

Análisis de la capacidad de flujo y vuelo de un dron bioinspirado

DIRECTOR: ING. JORGE LUIS AROCA TRUJILLO

Jordy Abelardo Perdomo Suarez

Santiago Trujillo Gutiérrez

CORPORACION UNIVERSITARIA DEL HUILA – CORHUILA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

NEIVA

2024

Tabla de Contenidos

1	Descripción del Trabajo	3
2	Justificación	4
3	Marco Teórico	5
3.1	Principios Aerodinámicos y Desafíos en Drones a Pequeña Escala.....	5
3.2	Innovaciones Biométricas en el Diseño de Alas	5
3.3	Morfología de Alas y Colas Biomórficas	5
3.4	Configuración de Alas en Tándem y Optimización de Fuerza.....	5
3.5	Sensores Distribuidos y Monitoreo Avanzado	5
3.6	Pieles Sensoriales Inteligentes y Percepción Multifuncional	6
3.7	Técnicas de Diseño de Experimentos (DoE) y Optimización	6
4	Objetivos	7
4.1	Objetivo General	7
4.2	Objetivos Específicos.....	7
5	Metodología	8
5.1	Análisis de la Eficiencia Aerodinámica de Alas Biomiméticas	8
5.2	Estudio de la Maniobrabilidad y Estabilidad de Configuraciones de Alas y Colas Biomórficas	8
5.3	Evaluación del Impacto de Sensores Distribuidos en el Control de Vuelo.....	9
6	Presupuesto	10
7	Bibliografía	11
8	Plan de trabajo a desarrollar	12
8.1	Preparación y Planificación.....	12
8.2	Simulación Computacional y Diseño de Prototipos	12
8.3	Pruebas Experimentales y Evaluación	13
8.4	Optimización y Validación Final.....	13
9	Cronograma.....	15

1 Descripción del Trabajo

El presente anteproyecto detalla exhaustivamente los mecanismos y principios aerodinámicos subyacentes que permiten a los drones alados bioinspirados alcanzar un rendimiento de vuelo superior. Los diseños aerodinámicos de drones, basados en la biomimética, se han especializado en optimizar diferentes perfiles de vuelo mediante la aplicación de configuraciones morfológicas y dinámicas avanzadas. La investigación se centró en la ingeniería de alas con capacidades de sustentación mejoradas, especialmente bajo condiciones de flujo turbulento, sin comprometer la eficiencia aerodinámica inherente. Mediante el uso de sofisticadas pruebas en túneles de viento y agua, se demostró que las alas innovadoras desarrolladas poseen una resistencia significativamente menor a las perturbaciones inducidas por la turbulencia. Estas alas exhiben un comportamiento aerodinámico superior al mantener la estabilidad del flujo y minimizar las fluctuaciones indeseadas que típicamente afectan a las alas convencionales operando en regímenes de bajo número de Reynolds. Esta mejora en la estabilidad y el control se traduce directamente en una mayor duración del vuelo, lo que representa un avance significativo en la tecnología de drones a pequeña escala. Además, el estudio exploró la implementación de diseños biomorfológicos, inspirados en el dron Metabird, para optimizar aún más el rendimiento de vuelo. Al integrar configuraciones de alas y colas biomiméticas, se lograron mejoras sustanciales en agilidad, maniobrabilidad, estabilidad, velocidad y eficiencia energética. La combinación estratégica de múltiples parámetros de diseño de alas y colas permitió la generación de momentos de cabeceo potentes y ajustes angulares precisos, facilitando maniobras complejas como la percha de alta desaceleración. Estos hallazgos indican un considerable potencial para la evolución futura de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) y su aplicación en escenarios operacionales exigentes.

En conclusión, la investigación presentada en este artículo ofrece una visión comprensiva del potencial de la biomimética para revolucionar el diseño de drones alados. Las innovaciones introducidas no solo prometen mejorar la eficiencia y capacidad de vuelo de estos dispositivos, sino que también abren nuevas avenidas para su aplicación en una variedad de campos, desde misiones de reconocimiento y monitoreo ambiental hasta operaciones de rescate en entornos complejos y dinámicos.

2 Justificación

La optimización del rendimiento de los drones a pequeña escala representa un desafío crítico debido a la alta sensibilidad a la turbulencia atmosférica en condiciones de bajos números de Reynolds, lo cual compromete tanto la estabilidad como el control del vehículo y limita su eficiencia aerodinámica y la duración del vuelo. Para superar estas limitaciones, se han implementado innovaciones basadas en principios biomiméticos que imitan a los pequeños voladores de la naturaleza, mejorando la robustez y eficiencia de las alas de estos drones frente a perturbaciones turbulentas [1].

Las alas diseñadas con separación forzada del flujo en el borde de ataque han demostrado tener una menor sensibilidad a la turbulencia, resultando en mejoras significativas en la estabilidad y control del vehículo, así como en un tiempo de vuelo hasta cuatro veces mayor en comparación con drones convencionales de bajo número de Reynolds [1]. Estas innovaciones no solo optimizan el rendimiento de vuelo, sino que también abren nuevas oportunidades para investigaciones futuras en el diseño y fabricación de alas de alta eficiencia aerodinámica [2].

El diseño biomórfico de alas y cola inspirado en aves, como el Azor del Norte, ha mostrado mejoras sustanciales en agilidad, maniobrabilidad, estabilidad, velocidad y eficiencia energética, tanto en vuelo agresivo como en crucero. La capacidad de producir potentes momentos de cabeceo mediante la variación del ángulo de ataque, barrido y área de las alas y la cola facilita maniobras complejas como la percha de alta desaceleración, lo que es crucial para aplicaciones en entornos operacionales exigentes [2].

Adicionalmente, las configuraciones de alas en tándem han demostrado optimizar la producción de fuerza a través de ángulos de ataque específicos, mejorando el empuje y la sustentación, aunque requieren una gestión cuidadosa del peso y la estabilidad [3]. El uso de sensores distribuidos en las alas permite la medición precisa de fuerzas y flujos, proporcionando datos valiosos que superan las limitaciones de los sensores inerciales tradicionales y mejoran el control de vuelo [5].

El desarrollo de pieles sensoriales bioinspiradas que integran capacidades de percepción multifuncional ha mostrado ser efectivo para la adaptación a entornos de flujo complejos, permitiendo la detección precisa de impactos y la predicción de pérdida de sustentación y separación. Estas innovaciones representan un gran potencial para el monitoreo avanzado en vehículos aéreos y submarinos [8].

Finalmente, la aplicación de técnicas de diseño de experimentos (DoE) para optimizar dispositivos de control de flujo inspirados en aves ha resultado en modelos empíricos eficientes en tiempo y costo, permitiendo un control preciso durante condiciones de vuelo complejas [6]. Estos estudios subrayan la importancia de un enfoque multidisciplinario que combine biomimética, aerodinámica avanzada y tecnologías de sensores para el desarrollo de drones de alta eficiencia y robustez.

3 Marco Teórico

3.1 Principios Aerodinámicos y Desafíos en Drones a Pequeña Escala

El vuelo de drones a pequeña escala presenta desafíos únicos debido a las condiciones de bajo número de Reynolds, donde la sensibilidad a la turbulencia atmosférica afecta significativamente la estabilidad y el control del vehículo. Estos desafíos se traducen en una eficiencia aerodinámica reducida y, por ende, en una limitación en la duración del vuelo. La turbulencia puede causar fluctuaciones indeseadas en el flujo de aire alrededor de las alas, lo que compromete la capacidad de los drones para mantener un vuelo estable y eficiente [1].

3.2 Innovaciones Biométricas en el Diseño de Alas

Para superar estos desafíos, se han desarrollado alas bioinspiradas que imitan las características de vuelo de pequeños voladores naturales. Un ejemplo destacado es el ala de flujo separado forzado en el borde de ataque, diseñada para proporcionar una sustentación robusta frente a ráfagas y turbulencias sin sacrificar la eficiencia aerodinámica. Este diseño ha demostrado una menor sensibilidad a la turbulencia en pruebas en túneles de viento y agua, mejorando la estabilidad del flujo y reduciendo las fluctuaciones indeseadas [1].

3.3 Morfología de Alas y Colas Biomorficas

El diseño biomórfico de alas y colas, inspirado en aves como el Azor del Norte, ha permitido mejorar la agilidad, maniobrabilidad, estabilidad, velocidad y eficiencia energética de los drones. Estos diseños permiten una variación controlada del ángulo de ataque, el barrido y el área de las alas y la cola, facilitando maniobras complejas como la percha de alta desaceleración. La capacidad de generar potentes momentos de cabeceo y ajustes angulares precisos es crucial para aplicaciones en entornos operacionales exigentes, donde se requiere una alta adaptabilidad y precisión en el vuelo [2].

3.4 Configuración de Alas en Tándem y Optimización de Fuerza

La investigación en configuraciones de alas en tándem ha mostrado que ciertos ángulos de ataque optimizan la producción de fuerza, mejorando el empuje y la sustentación del dron. Sin embargo, estos diseños también requieren una gestión cuidadosa del peso y la estabilidad para mantener un rendimiento óptimo. Las pruebas de empuje y sustentación han sido fundamentales para la optimización del diseño y para identificar las limitaciones e inconvenientes asociados con diferentes configuraciones de alas [3].

3.5 Sensores Distribuidos y Monitoreo Avanzado

El uso de sensores distribuidos en las alas de drones permite una medición precisa de las fuerzas y el flujo de aire durante el vuelo. Estos sensores proporcionan datos valiosos más allá del control de vuelo basado en sensores inerciales tradicionales, permitiendo la detección de pérdida de sustentación, alivio de ráfagas y medición de fuerzas aerodinámicas. La

integración de esta tecnología mejora significativamente el control y la estabilidad del dron, abriendo nuevas posibilidades para el desarrollo de aeronaves más flexibles y con un mayor número de grados de libertad [5].

3.6 Pielas Sensoriales Inteligentes y Percepción Multifuncional

El desarrollo de pieles sensoriales bioinspiradas, que integran capacidades de percepción multifuncional, ha demostrado ser efectivo para la adaptación a entornos de flujo complejos y ambiguos. Estas pieles, que imitan las capacidades sensoriales de criaturas voladoras, incluyen mecano sensores, transmisión de datos, monitoreo de impactos e inteligencia artificial. Las pruebas en túneles de viento han validado las funcionalidades de estas pieles, mostrando su potencial para el monitoreo avanzado y la predicción de fenómenos aerodinámicos críticos, como la pérdida de sustentación y la separación del flujo [8].

3.7 Técnicas de Diseño de Experimentos (DoE) y Optimización

La aplicación de técnicas de diseño de experimentos (DoE) ha demostrado ser una herramienta eficiente en tiempo y costo para optimizar dispositivos de control de flujo inspirados en características biológicas. Estos modelos empíricos permiten relacionar cambios en la sustentación y la resistencia aerodinámica con parámetros específicos de diseño, facilitando el desarrollo de drones más eficientes y con mejor rendimiento durante condiciones de vuelo complejas [6].

4 Objetivos

4.1 Objetivo General

Analizar un dron a pequeña escala con capacidades avanzadas de vuelo mediante el uso de innovaciones biomiméticas en el diseño de alas y colas, sensores distribuidos, y pieles sensoriales inteligentes, para mejorar la eficiencia aerodinámica, estabilidad, maniobrabilidad y duración del vuelo en condiciones de bajos números de Reynolds.

4.2 Objetivos Específicos

- I. Análisis de la Eficiencia Aerodinámica de Alas Biomiméticas:
 - Evaluar el rendimiento de alas bioinspiradas con separación forzada del flujo en el borde de ataque, enfocándose en la mejora de la sustentación y la reducción de la sensibilidad a la turbulencia. Realizar pruebas en túneles de viento y agua para validar su eficiencia aerodinámica y estabilidad [1].
- II. Estudio de la Maniobrabilidad y Estabilidad de Configuraciones de Alas y Colas Biomorficas:
 - Analizar el impacto de configuraciones de alas y colas inspiradas en el Azor del Norte en la maniobrabilidad y estabilidad del dron. Realizar pruebas experimentales para evaluar la capacidad de estas configuraciones en generar potentes momentos de cabeceo y facilitar maniobras complejas [2].
- III. Evaluación del Impacto de Sensores Distribuidos en el Control de Vuelo:
 - Investigar la efectividad de sensores distribuidos en las alas del dron para medir fuerzas y flujos de aire durante el vuelo. Analizar cómo la información obtenida de estos sensores puede mejorar el control y la estabilidad del dron en tiempo real [5].

5 Metodología

5.1 Análisis de la Eficiencia Aerodinámica de Alas Biomiméticas

Para evaluar la eficiencia aerodinámica de las alas biomiméticas con separación forzada del flujo en el borde de ataque, se llevarán a cabo las siguientes etapas:

1) Diseño y Simulación Computacional:

Se utilizarán herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) para modelar el comportamiento aerodinámico de las alas bajo diferentes condiciones de flujo. Las simulaciones permitirán identificar los parámetros críticos que afectan la sustentación y la sensibilidad a la turbulencia.

2) Pruebas en Túneles de Viento y Agua:

Se construirán prototipos de las alas diseñadas y se someterán a pruebas exhaustivas en túneles de viento y agua. Estas pruebas medirán la eficiencia aerodinámica, la estabilidad del flujo y la resistencia a las perturbaciones turbulentas.

3) Pruebas en Túneles de Viento y Agua:

Los datos obtenidos de las simulaciones y pruebas experimentales serán analizados utilizando técnicas estadísticas avanzadas para evaluar la eficiencia aerodinámica y la estabilidad de las alas. Se compararán los resultados con modelos convencionales para validar las mejoras propuestas.

5.2 Estudio de la Maniobrabilidad y Estabilidad de Configuraciones de Alas y Colas Biomorficas

El análisis de la maniobrabilidad y estabilidad de configuraciones biomorficas de alas y colas se realizará siguiendo estos pasos:

1. Pruebas Experimentales:

Los prototipos serán evaluados en un entorno controlado para medir su desempeño en términos de maniobrabilidad y estabilidad. Se realizarán maniobras complejas como la percha de alta desaceleración para evaluar la capacidad de las configuraciones en generar potentes momentos de cabeceo.

2. Evaluación de Resultados:

Los datos obtenidos de las pruebas experimentales serán analizados para identificar las configuraciones óptimas que proporcionan mejoras significativas en maniobrabilidad y

estabilidad. Se utilizarán métodos de análisis de datos para correlacionar las variables de diseño con el desempeño observado.

5.3 Evaluación del Impacto de Sensores Distribuidos en el Control de Vuelo

Para investigar la efectividad de los sensores distribuidos en el control de vuelo, se seguirán estos pasos:

1. Pruebas de Vuelo:

Se realizarán pruebas de vuelo en condiciones controladas y en entornos reales para capturar datos sobre el comportamiento del dron. Los sensores proporcionarán información en tiempo real sobre las fuerzas aerodinámicas y las condiciones de flujo.

2. Análisis y Control de Datos:

Los datos recolectados serán procesados y analizados para evaluar cómo la información obtenida de los sensores distribuidos puede mejorar el control y la estabilidad del dron. Se desarrollarán algoritmos de control basados en estos datos para optimizar el desempeño del vehículo en tiempo real.

3. Validación y Comparación:

Los resultados del análisis serán comparados con el desempeño de drones equipados con sistemas de control tradicionales. Esto permitirá validar la efectividad de los sensores distribuidos en mejorar la estabilidad y maniobrabilidad del dron.

6 Presupuesto

I. Recursos Humanos:

Investigador principal (1): \$2.000.000 por 3 meses

Investigador asociado (1): \$1.500.000 por 3 meses

Total, recursos humanos: \$3.500.000

II. Equipos y Materiales:

Dron Bioinspirado: \$3.000.000

Sistema de adquisición de datos y sensores: \$2.000.000

Equipos de cómputo y software: \$3.000.000

Materiales diversos (electrónica, instrumentación, etc.): \$1.000.000

Total, equipos y materiales: \$9.000.000

III. Gastos de Difusión y Publicación:

Publicación en revistas científicas: \$3.000.000

Participación en congresos y eventos: \$4.000.000

Total gastos de difusión y publicación: \$7.000.000

Presupuesto Total del Proyecto: \$26.500.000

7 Bibliografía

- [1] Di Luca, M., Mintchev, S., Su, Y., Shaw, E., & Breuer, K. (2020). A bioinspired Separated Flow wing provides turbulence resilience and aerodynamic efficiency for miniature drones. *Science Robotics*, 5(38), eaay8533.
- [2] Ajanic, E., Feroskhan, M., Mintchev, S., Noca, F., & Floreano, D. (2020). Bio-inspired synergistic wing and tail morphing extends flight capabilities of drones. *arXiv preprint arXiv:2002.02421*.
- [3] Lane, P., Throneberry, G., Fernandez, I., Hassanalian, M., Vasconcellos, R., & Abdelkefi, A. (2020). Towards bio-inspiration, development, and manufacturing of a flapping-wing micro air vehicle. *Drones*, 4(3), 39.
- [4] Strydom, R., Denuelle, A., & Srinivasan, M. V. (2016). Bio-inspired principles applied to the guidance, navigation and control of UAS. *Aerospace*, 3(3), 21.
- [5] Araujo-Estrada, S. A., Salama, F., Greatwood, C. M., Wood, K. T., Richardson, T. S., & Windsor, S. P. (2017). Bio-inspired distributed strain and airflow sensing for small unmanned air vehicle flight control. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference* (p. 1487).
- [6] Zekry, D. A., Duan, C., Ito, M. R., & Wissa, A. A. (2021). Design of experiments for two-and three-dimensional bio-inspired flow control devices. In *AIAA Scitech 2021 Forum* (p. 0467).
- [7] Bardera, R., Crespo, J., Rodríguez-Sevillano, Á., Muñoz-Campillejo, J., Barderas, E. B., & Cobo-González, Á. (2022). Design of a flight control system for a bioinspired drone. In *AIAA AVIATION 2022 Forum* (p. 3389).
- [8] Xiong, W., Zhu, C., Guo, D., Hou, C., Yang, Z., Xu, Z., ... & Huang, Y. (2021). Bio-inspired, intelligent flexible sensing skin for multifunctional flying perception. *Nano Energy*, 90, 106550.

8 Plan de trabajo a desarrollar

8.1 Preparación y Planificación

Objetivos:

- Realizar una revisión bibliográfica exhaustiva.
- Definir las especificaciones técnicas del proyecto.
- Desarrollar un plan detallado para las etapas de simulación, experimentación y análisis.

Actividades:

1. Revisión Bibliográfica:

- Compilación de literatura relevante sobre aerodinámica de drones, biomimética y tecnologías de sensores.
- Identificación de estudios previos que aborden desafíos similares en el diseño y análisis de drones [1-6].

2. Definición de Especificaciones Técnicas:

- Establecer los parámetros clave de diseño y funcionamiento para el dron biomimética.
- Determinar los requisitos específicos para las pruebas de túnel de viento, simulaciones y vuelos experimentales.

3. Planificación del Proyecto:

- Crear un cronograma detallado que incluya todas las fases del proyecto.
- Asignar recursos y definir roles y responsabilidades para cada miembro del equipo.

8.2 Simulación Computacional y Diseño de Prototipos

Objetivo:

- Realizar simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar diseños de alas y colas.

Actividades:

1. Simulación Computacional:

- Utilizar software de CFD para modelar el comportamiento aerodinámico de diferentes configuraciones de alas y colas.
- Analizar la eficiencia aerodinámica, la sustentación y la resistencia de los diseños propuestos [1, 2].

2. Pruebas Iniciales:

- Realizar pruebas preliminares en túneles de viento y agua para validar las simulaciones.

- Ajustar los diseños basados en los resultados de las pruebas iniciales.

8.3 Pruebas Experimentales y Evaluación

Objetivos:

- Ejecutar pruebas exhaustivas en túneles de viento y agua.
- Realizar pruebas de vuelo controladas para evaluar la maniobrabilidad y estabilidad del dron.

Actividades:

1. Pruebas en Túneles de Viento y Agua:

- Configurar y llevar a cabo pruebas aerodinámicas detalladas.
- Medir la eficiencia aerodinámica, la estabilidad del flujo y la resistencia a la turbulencia [1].

2. Pruebas de Vuelo Controladas:

- Realizar vuelos controlados en un entorno seguro para recolectar datos sobre la maniobrabilidad y estabilidad.
- Utilizar sensores distribuidos para monitorear las condiciones de vuelo en tiempo real [5].

3. Recolección y Análisis de Datos:

- Recolectar datos detallados durante las pruebas experimentales.
- Utilizar técnicas estadísticas avanzadas para analizar los datos y validar los resultados.

8.4 Optimización y Validación Final

Objetivos:

- Optimizar los diseños basados en los resultados de las pruebas experimentales.
- Validar las mejoras mediante pruebas adicionales y análisis detallados.

Actividades:

1. Optimización de Diseños:

- Ajustar los parámetros de diseño basados en el análisis de los datos recolectados.
- Realizar simulaciones adicionales para confirmar las mejoras propuestas [2, 5].

2. Pruebas de Validación:

- Llevar a cabo pruebas adicionales en túneles de viento y vuelos experimentales para validar las optimizaciones.

- Comparar el rendimiento de los diseños optimizados con los modelos convencionales [1, 5].

3. Documentación y Presentación de Resultados:

- Documentar todos los hallazgos y resultados del proyecto.
- Preparar informes detallados y presentaciones para compartir los resultados con la comunidad científica y otros interesados.

9 Cronograma

