

# Jornadas de Automática

## Reescalado de un robot aéreo de ala batiente para vuelos en espacios limitados

S. Coca, P. Crassous, E. Sanchez-Laulhe, R. Tapia\*, J.R. Martínez-de Dios, A. Ollero

*GRVC Robotics Lab, Universidad de Sevilla, Sevilla 41092, Spain*

**To cite this article:** Coca, S., et al. Rescaling of a Flapping-wing Aerial Vehicle for Flights in Confined Spaces. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10914>

### Resumen

Este artículo presenta el proceso de reescalado de un robot aéreo de ala batiente. El objetivo es diseñar una plataforma que permita volar de forma autónoma en espacios interiores y exteriores limitados. Se ha redimensionado un modelo previo de gran escala, haciendo más ligeras las distintas partes del robot. El diseño aerodinámico incluyó un nuevo perfil alar (S1221) que mejora la eficiencia aerodinámica. Además, se han realizado modificaciones significativas en el diseño mecánico y electrónico para reducir el peso, utilizando materiales más ligeros y componentes de menor tamaño. Los resultados preliminares indican que el prototipo cumple con los objetivos de peso y carga alar, lo que ofrece una buena maniobrabilidad.

*Palabras clave:* Robots voladores, Diseño mecánico de vehículos aéreos, Sistemas robóticos autónomos

### Rescaling of a Flapping-wing Aerial Vehicle for Flights in Confined Spaces

#### Abstract

This paper presents the rescaling of a flapping-wing aerial robot. Our objective is to design a platform that enables autonomous flights in indoor and outdoor confined areas. A previous model has been rescaled using more lightweight parts. The aerodynamic design includes a new airfoil (S1221) that improves the efficiency. In addition, significant modification have been performed in the mechanical and electronic designs to reduce the weight by using more lightweight materials and smaller components. The preliminary results suggest our prototype fulfill the weight and wing-loading constraints, providing a high manoeuvrability.

*Keywords:* Flying robots, Mechanical design of autonomous vehicles, Autonomous robotic systems

## 1. Introducción

Actualmente, existe un creciente interés en el diseño de robots aéreos de ala batiente. Estas plataformas ofrecen varias ventajas comparadas con los multirotores tradicionales, principalmente en términos de seguridad para las personas y consumo energético. La comunidad investigadora ha desarrollado en los últimos años robots de ala batiente que emulan el comportamiento de los pájaros (por ejemplo, Zufferey et al. (2021)), así como robots de menor envergadura con inspiración en el vuelo de los insectos (por ejemplo, De Croon (2020)).



Figura 1: Robot aéreo de ala batiente presentado en este artículo.

\*Autor para correspondencia: [raultapia@us.es](mailto:raultapia@us.es)  
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

El objetivo de este artículo es el reescalado del robot de ala batiente descrito en Gayango et al. (2023), pasando de una envergadura de 1,5 m a 0,8 m. Este reescalado obliga a reducir su peso, manteniendo una carga alar similar. Los criterios de reescalado incluyen redimensionamiento de las distintas partes del prototipo para obtener el peso deseado. Mediante esta disminución de tamaño, se diseña una plataforma maniobrable capaz de volar de forma autónoma en zonas interiores y exteriores con obstáculos. Nuestra motivación nace de la necesidad de una aeronave de pequeño tamaño para poder volar en espacios limitados en los que una plataforma de mayor envergadura no podría. Un robot aéreo de ala batiente de media o pequeña escala presenta mayor maniobrabilidad. Dado que el peso de nuestra plataforma se ha reducido, hemos disminuido también su consumo energético. Además, nuestro robot es mucho más seguro para las personas comparado con otros vehículos aéreos tales como multirrotores.

El resto de este documento se organiza de la siguiente forma. La sección 2 resume algunos trabajos de estado del arte afines a nuestro estudio. La plataforma robótica se describe con detalle en la sección 3. Finalmente, la sección 4 cierra el documento con unas conclusiones y presenta el trabajo futuro.

## 2. Estado del Arte

El desarrollo de robots aéreos de ala batiente se centró en los primeros años en la imitación de los insectos y pequeños pájaros como los colibríes (Keennon et al. (2012); Jafferis et al. (2019); Phan et al. (2019); Karásek et al. (2018)). Estos primeros diseños, caracterizados por la ausencia de una superficie aerodinámica secundaria (en inglés, *tailless*, sin cola), permitían muy poca o ninguna carga útil. En cambio, eran muy maniobrables, permitiendo también permanecer en estado de *hovering*, es decir, volando en una posición fija como un multirrotores.

Posteriormente, comenzaron a diseñarse robots aéreos de ala batiente con dos superficies aerodinámicas: ala y cola. Algunos primeros diseños, de pequeño tamaño y sin carga útil, eran capaces también de realizar *hovering* (De Croon et al. (2009)). Sin embargo, al igual que sucede con las grandes aves, para tener más capacidad de carga útil se debe aumentar el tamaño y conseguir la sustentación necesaria mediante vuelo de avance.

En esta escala, el prototipo *Dove* (Yang et al. (2018)) permite una carga útil de 100 g, en la que se incluye la electrónica de control y una cámara. Otros, como el *RoboRaven* (Gerdes et al. (2014); Perez-Rosado et al. (2016)), pueden añadir paneles solares en las alas, incrementando el tiempo de vuelo. El *RoBird Bald Eagle* (Folkertsma et al. (2017)) permite una carga útil de 1 kg hasta un peso máximo en vuelo de 3,1 kg.

*E-Flap* (Zufferey et al. (2021)), la plataforma desarrollada en la ERC Advanced Grant GRIFFIN (788247), presenta una carga útil de aproximadamente 500 g sobre el mismo peso estructural. Este prototipo ha sido además modificado para obtener una mayor robustez en vuelos de largo alcance (Gayango et al. (2023)).

Estos diseños de mayor tamaño ya disponen de la capacidad de vuelo autónomo en exteriores, a diferencia de los prototipos de menor tamaño cuya autonomía es limitada y que no

tienen capacidad para volar en exteriores con el mínimo viento. Sin embargo, el tamaño también puede ser una restricción a la hora de volar en espacios con obstáculos. Es en ese nicho es donde es necesario desarrollar prototipos de una envergadura media para poder cumplir requisitos de vuelo autónomo en zonas exteriores con obstáculos.

## 3. Descripción de la Plataforma



Figura 2: Diseño CAD de nuestro robot de ala batiente.

Para el diseño de nuestro robot se ha optado por un redimensionamiento del prototipo descrito en Gayango et al. (2023). Se ha analizado la envergadura deseada para un caso de vuelo en espacio limitado. La envergadura seleccionada es 80 cm, lo que involucra una reducción del  $\sim 45\%$ . Al reducir también la cuerda, la superficie alar pasa a ser de  $0,12\text{ m}^2$ , conservando en gran medida la forma en planta, ya que se ha tenido que modificar para simplificarla y así ayudar en la fabricación.

Para un correcto reescalado, se opta por mantener la carga alar, estableciendo de esta forma un límite de peso para el prototipo. La carga alar es un parámetro definido como el ratio entre peso y superficie alar. En el caso del prototipo descrito en Gayango et al. (2023), la carga alar era de  $2,42\text{ kg/m}^2$ , lo que nos aporta una restricción de peso tras el escalado de  $0,291\text{ kg}$ . Para alcanzar el objetivo, se detallan a continuación los rediseños de los distintos componentes aerodinámicos, mecánicos y electrónicos.

### 3.1. Diseño aerodinámico

La plataforma consta de dos superficies aerodinámicas: el ala y una cola horizontal. La única actuación sobre el ala es el aleteo, caracterizado por la frecuencia y con una amplitud fijada en  $46^\circ$ , al igual que su homólogo de mayor tamaño.

La cola actúa como un único estabilizador horizontal. Esta compuesta de cartón pluma reforzado con fibra de carbono. En ella, se incluyen dos superficies de control a ambos lados, en configuración de elevones (de la unión de las palabras inglesas *elevator*, timón de profundidad, y *aileron*, alerón). Las superficies se han reducido de acuerdo con el escalado de la superficie alar, manteniendo la relación entre ellas de forma que el control y la estabilidad no se vean afectadas. Para ello, es clave mantener la posición relativa del centro de gravedad.

Uno de los cambios sobre la plataforma anterior es la eliminación del estabilizador vertical. Dada la menor envergadura de este nuevo prototipo, la inestabilidad lateral se reduce bastante, de forma que es posible prescindir de esta superficie aerodinámica, consiguiendo una reducción de peso sin empeorar el vuelo.

Para el diseño de las alas se realizó un estudio aerodinámico para optimizar el perfil alar. Previamente se utilizó el perfil S1210 para el prototipo de mayor tamaño. Se usa la serie de perfiles Selig al ser los más parecidos a los de las aves reales, como en el caso del modelo en el que se basa esta nueva plataforma o como en Jameel et al. (2015). En este reescalado, se comparó su rendimiento con tres perfiles alternativos: S1020, S1221 y S1223. Para ello, se hizo uso de la herramienta XFLR5, un programa de código abierto que combina las capacidades de análisis de perfiles aerodinámico de XFOIL con un *solver* 3D, para bajos números de Reynolds, que permite simular el rendimiento de una configuración de aeronave en cualquier fase del proceso de diseño. Se consideró para ello una velocidad de vuelo de 4,11 m/s y una altura de 20 m, obteniendo las características aerodinámicas en estas condiciones. Los datos se analizaron posteriormente para optimizar el rendimiento en función de diversos parámetros, poniendo especial énfasis en la eficiencia aerodinámica. Los resultados indicaron que uno de los perfiles alternativos ofrecía un mejor rendimiento, específicamente el S1221. En función de estos resultados, se decidió incorporar este nuevo perfil en nuestro prototipo para incrementar la eficiencia aerodinámica.

Para la fabricación, se da forma al perfil mediante corte de corcho con hilo caliente. Posteriormente se refuerza el ala con barras de fibra de carbono que sirven como elemento estructural, fijándose al cuerpo en dos puntos de unión. Mediante la barra situada cerca del borde de ataque se transmite el movimiento de aleteo, mientras que en el borde de salida, la otra barra sirve de anclaje. Además, se añade una superficie de tela de cometa, lo que mejora la eficiencia aerodinámica reduciendo la fricción. El montaje se ha simplificado con respecto a la plataforma anterior, reduciendo el número de varillas, las cuales además son de un menor diámetro. Asimismo, se opta por un borde de ataque recto en lugar del diseño con codo del modelo previo.

### 3.2. Diseño mecánico

El cuerpo de la plataforma se utiliza para unir las superficies aerodinámicas (ala y cola) y los actuadores que permiten su movimiento. La importancia del cuerpo en la aerodinámica es reducida, ya que solo añadirá una resistencia de fricción, la cual se debe reducir al máximo para conseguir un vuelo eficiente. Es en esta parte donde se han hecho las mayores modificaciones respecto a la plataforma original.

En cuanto a la transmisión del movimiento del motor a las alas, se opta por una reducción similar a la que se tenía en la plataforma anterior, mediante dos ejes, pasando de una reducción de 42 : 1 a aproximadamente 35 : 1. Además, la disminución de envergadura conlleva la reducción de esfuerzos sobre la transmisión. Por ello, se eliminan los engranajes metálicos y se añaden unos de plástico (más ligeros). Desde el último eje, se transmite el movimiento a las alas mediante un mecanismo de biela-manivela. De nuevo, se opta por piezas de plástico de PLA fabricadas mediante impresión 3D. A su vez, las piezas de unión de las alas al eje de giro también pasan de metal a plástico, reduciéndose significativamente el peso. Las bielas se mantienen de metal, pues el giro constante en las uniones desgastaría el plástico, pero se reduce igualmente su tamaño y peso.

Los elementos estructurales se mantienen en fibra de carbono, con dos placas paralelas sobre las que se disponen el motor y los engranajes, así como la controladora de vuelo y la electrónica correspondientes. Sin embargo, se reduce el grosor, el tamaño y la distancia de las placas.

La unión con la cola se sigue haciendo mediante una barra de carbono, pasando de una barra de 12 mm de grosor a una de 4 mm. La unión de esta barra con la estructura de placas de carbono y con la cola se hace mediante piezas de PLA. Por último, la transmisión de los servomotores a las superficies de control de la cola se realiza mediante varillas metálicas. Cabe destacar que la fabricación de la transmisión fue compleja, ya que es difícil encontrar varillas de transmisión tan finas en el mercado. Se decidió fabricarlas partiendo de varillas rectas de 1 mm de grosor. De igual manera, las piezas que unen las varillas con los elevones se diseñaron e imprimieron *ad hoc*.

Nuestro prototipo se modeló mediante el software de diseño CATIA. En la Figura 2, se puede observar el diseño CAD renderizado.

### 3.3. Diseño electrónico

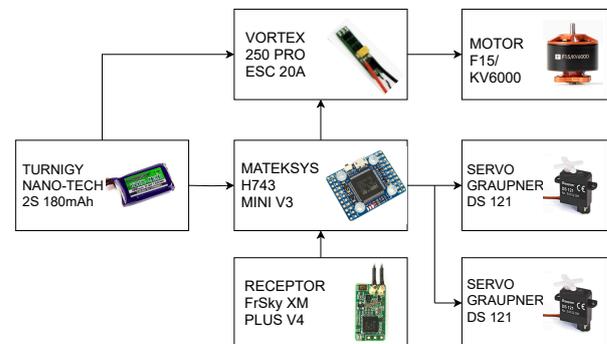


Figura 3: Esquema de conexión de nuestra plataforma de ala batiente.

La limitación de peso en el nuevo modelo obliga a reducir el peso de todos los sistemas embarcados. El componente más limitante es la batería, ya que una reducción de su peso conlleva una menor autonomía de vuelo. Se ha optado por usar una batería 2S de 180 mAh, cuya capacidad permite su descarga en 1,5 min cuando el consumo es máximo. La reducción de la tensión de funcionamiento permite eliminar el módulo de alimentación, conectando el motor y la controladora de vuelo directamente a la batería sin necesidad de un regulador de tensión. En cuanto a los servomotores, se ha optado por el modelo 121 de la gama DS (microservos) de Graupner, que proporcionan un torque de 0,170 kg · cm a 4,2 V y un peso de 1,9 g. El receptor cuenta con 16 canales y hace uso del protocolo SBUS. El motor elegido es el T-MOTOR F15 de 6000 kV, con un peso de 8 g. Como controladora de vuelo se utiliza la H743-MINI V3 de Mateksys. Se ha seleccionado una versión del *firmware* Ardupilot utilizada para aeronaves de ala fija (versión estable, ArduPlane v4.4.0). Ha sido necesario ajustar ciertos parámetros respecto al modelo anterior para considerar la nueva geometría y las diferencias en los componentes electrónicos. El esquema de conexiones se muestra en la Figura 3.

### 3.4. Sistema de posicionamiento

Las restricciones impuestas por la carga útil y la autonomía de la plataforma imposibilitan el uso de sistemas de

percepción y posicionamiento complejos tales como LiDARs (*Light Detection and Ranging*), cámaras de alta resolución o soluciones basadas en GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Para plataformas de pequeña escala como la descrita, el uso de sensores para localización basada en rango es una solución adecuada. El diseño e implementación del sistema de localización está fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, por completitud, se resume a continuación. Se utilizan un conjunto de siete sensores de banda ultra-ancha (en inglés, *ultra-wideband* o *UWB*) de 5 g cada uno. Un sensor (*tag*) se embarca en la plataforma, mientras que los seis restantes (*anchors*) se colocan en posiciones conocidas. Se utilizan dispositivos basados en el módulo IEEE 802.15.4a DWM1000 UWB, véase Figura 4. El protocolo de comunicación se ha implementado en los microcontroladores Seeeduno XIAO de los sensores.

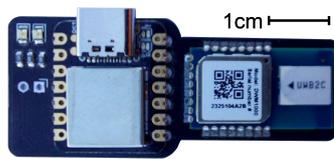


Figura 4: Sensor de banda ultra-ancha para localización. Incluye un módulo IEEE 802.15.4a DWM1000 UWB y un microcontrolador Seeeduno XIAO. Masa total: 5 g.

#### 4. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo se ha presentado el procedimiento para el reescalado de un robot aéreo de ala batiente. Al disminuir la escala, ha sido posible reducir el peso mediante la sustitución de distintos elementos estructurales y de transmisión, ya que los esfuerzos de aleteo se reducen de forma cuadrática. De esta forma, se cumplen los objetivos de peso definidos por la carga alar. En base al diseño, se ha realizado el montaje del prototipo mostrado en la Figura 1. El peso final es de 154 g, permitiendo una carga útil adicional superior a 100 g que podría ser utilizada para añadir una pequeña cámara o algún sensor adicional para interactuar con el entorno. Ya que el diseño ha sido correctamente reescalado, la funcionalidad en vuelo está asegurada para la carga considerada, puesto que la carga alar es un parámetro completamente transferible a distintas escalas. Estos resultados son consecuentes con prototipos de tamaño similar (Yang et al. (2018)). Sin embargo, se ha conseguido reducir el peso estructural a la vez que se ha diseñado para volar a velocidades más bajas, mejorando la maniobrabilidad.

Actualmente no se han efectuado pruebas de vuelo debido a que aún se están haciendo comprobaciones de funcionamiento relativas al software de vuelo, así como pruebas de todos los componentes motores. Conviene añadir, que el software de ArduPilot está desarrollado para ala fija, como ya se mencionó anteriormente. Para alcanzar la máxima maniobrabilidad del prototipo sería necesario un trabajo adicional en la modificación de este software. Este diseño se podría seguir optimizando. Una alternativa adicional sería el rediseño de la cola utilizando la misma tela empleada en las alas, lo que podría resultar en una reducción considerable de peso, además de llevar el centro de gravedad hacia delante aumentando la estabilidad en vuelo. Sin embargo, este enfoque necesitaría un nuevo mecanismo para el movimiento asimétrico

de las alas, permitiendo a la plataforma girar, ya que con la cola de tela se prescindirían de elevones. En cuanto a sistemas electrónicos, sería conveniente mejorar la autonomía del modelo, así como implementar un modelo de control específico que se adecue a esta plataforma. Además, sería necesario también implementar un estimador de estado que combinara las medidas de la unidad de medición inercial (IMU, *Inertial Measurement Unit*) con las obtenidas mediante el sistema de posicionamiento.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto GRIFFIN ERC Advanced Grant 2017 (788247) y del proyecto SARA (*Sistema aéreo no tripulado seguro para la inspección de líneas eléctricas fuera de la línea de vista*) del Ministerio de Ciencia del Gobierno de España. Raul Tapia agradece el apoyo del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación del Ministerio de Universidades del Gobierno de España (FPU19/04692). Ernesto Sanchez-Laulhe reconoce igualmente su contrato predoctoral por la Universidad de Málaga. Los autores agradecen la ayuda prestada por Iván Gutiérrez, Francisco Javier Luna y Mario Hernández.

#### Referencias

- De Croon, G., 2020. Flapping wing drones show off their skills. *Science Robotics* 5 (44), eabd0233.
- De Croon, G., De Clercq, K., Ruijsink, R., Remes, B., De Wagter, C., 2009. Design, aerodynamics, and vision-based control of the delfly. *International Journal of Micro Air Vehicles* 1 (2), 71–97.
- Folkertsma, G. A., Straatman, W., Nijenhuis, N., Venner, C. H., Stramigioli, S., 2017. Robird: a robotic bird of prey. *IEEE robotics & automation magazine* 24 (3), 22–29.
- Gayango, D., Salmoral, R., Romero, H., Carmona, J. M., Suarez, A., Ollero, A., 2023. Benchmark evaluation of hybrid fixed-flapping wing aerial robot with autopilot architecture for autonomous outdoor flight operations. *IEEE Robotics and Automation Letters*.
- Gerdes, J., Holness, A., Perez-Rosado, A., Roberts, L., Greisinger, A., Barnett, E., Kempny, J., Lingam, D., Yeh, C.-H., Bruck, H. A., et al., 2014. Robo raven: a flapping-wing air vehicle with highly compliant and independently controlled wings. *Soft Robotics* 1 (4), 275–288.
- Jafferis, N. T., Helbling, E. F., Karpelson, M., Wood, R. J., 2019. Untethered flight of an insect-sized flapping-wing microscale aerial vehicle. *Nature* 570 (7762), 491–495.
- Jameel, A., Khalid, S., Khan, M., Kamal, K., Aqeel, A., Mathavan, S., Awais, T., Zafar, T., 2015. A bio inspired uav model based on corvus splendens. In: 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM). IEEE, pp. 797–802.
- Karásek, M., Muijres, F. T., De Wagter, C., Remes, B. D., De Croon, G. C., 2018. A tailless aerial robotic flapper reveals that flies use torque coupling in rapid banked turns. *Science* 361 (6407), 1089–1094.
- Keennon, M., Klingebiel, K., Won, H., 2012. Development of the nano hummingbird: A tailless flapping wing micro air vehicle. In: 50th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition. p. 588.
- Perez-Rosado, A., Bruck, H. A., Gupta, S. K., 2016. Integrating solar cells into flapping wing air vehicles for enhanced flight endurance. *Journal of Mechanisms and Robotics* 8 (5).
- Phan, H. V., Aurecianus, S., Kang, T., Park, H. C., 2019. Kubeetle-s: An insect-like, tailless, hover-capable robot that can fly with a low-torque control mechanism. *International Journal of Micro Air Vehicles* 11, 1756829319861371.
- Yang, W., Wang, L., Song, B., 2018. Dove: A biomimetic flapping-wing micro air vehicle. *International Journal of Micro Air Vehicles* 10 (1), 70–84.
- Zufferey, R., Tormo-Barbero, J., Guzmán, M. M., Maldonado, F. J., Sanchez-Laulhe, E., Grau, P., Pérez, M., Acosta, J. Á., Ollero, A., 2021. Design of the high-payload flapping wing robot e-flap. *IEEE Robotics and Automation Letters* 6 (2), 3097–3104.