



Trabajo Fin de Grado

Desarrollo de un ala mecánica con morfología de ave

*Development of a mechanical wing with bird-like
morphology*

Autora

Alisson Zapatier Troya

Director/es

Dr. Ing. Luis Manuel Cerecedo

Dr. Ing. David Ranz Angulo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2024/2025

Resumen.

Desde tiempos remotos el ser humano ha mostrado su curiosidad en el vuelo y en cómo la naturaleza ha conseguido en las aves dicha acción. Una parte de esa curiosidad se ha debido al intento por controlar el medio que lo rodea, y el vuelo presenta la ventaja de que, desde el aire, la perspectiva de observación y vigilancia se amplía. Además, el desplazamiento aéreo evita los conflictos que se presentan en los desplazamientos terrestres debidos a las distintas morfologías que pueda haber en un determinado terreno.

Actualmente, los drones, como un gran avance tecnológico, están siendo de gran ayuda, tanto al ser humano como al ecosistema, para cumplir las ambiciones de control y observaciones aéreas. Sus usos continúan en plena expansión y, de hecho, ya son utilizados para gran cantidad de actividades: vigilancia aérea, cartografía, supervisión de la agricultura, entrega de paquetería, seguridad ciudadana y, en los países en vías de desarrollo y en las zonas que se urbanizan a toda velocidad, los drones se están convirtiendo en una herramienta esencial para garantizar los derechos territoriales; también para actualizar los mapas en línea en tiempo real y comprender los patrones de los asentamientos no planificados.^[1] Sin embargo, existen ciertas aplicaciones en donde el camuflaje con su entorno, y por el ruido y su apariencia mecánica, impiden la discreción requerida para el control, por ejemplo, de especies en riesgo de extinción.

De esta manera, el presente proyecto plantea el desarrollo de un prototipo mecánico de una ave con morfología de ave, como una primera aproximación para un proyecto con un potencial tan amplio como la ambición y visión de quienes lo impulsen. Se procederá a diseñar un modelo mecánico, simple, a escala real, para intentar reproducir lo más similar posible este sistema biológico tan complejo. Se iniciará con el análisis aerodinámico que permita un diseño posterior en 3D en el que se tendrá en cuenta la geometría adecuada que permita un movimiento eficiente y viable.

Para lograr este objetivo se ha considerado la anatomía de una paloma, puesto que su morfología pasa por desapercibida (presencia cotidiana en las zonas pobladas, y no representa peligro para otras especies). De esta forma, se espera diseñar un mecanismo que sirva de base para crear el prototipo completo, y adecuado, que reproduzca fehacientemente el vuelo de este animal, y consiga camuflarse con el entorno.

Abstract.

Since ancient times, humans have shown curiosity about flying and how nature has achieved this ability in birds. Part of this curiosity stems from the attempt to control the surrounding environment, with flight offering the advantage of expanding the perspective for observation and surveillance from the air. Furthermore, (air travel) avoids the conflicts inherent in overland movements due to different terrain morphologies.

Currently, drones represent a significant technological progress and are proving their valuable help in both humans and ecosystems to fulfill ambitions for aerial control and observation. Their uses continue in expansion in a wide range of activities including aerial surveillance, cartography, agriculture monitoring, package delivery, public protection, and in rapidly urbanizing areas of developing countries where they are essential tools for securing territorial rights and updating real-time online maps, while understanding patterns of unplanned settlements[1].However, challenges exist in applications where their camouflage, noise, and mechanical appearance hinder the discretion required for tasks such as monitoring endangered species.

In this way, the present project proposes the development of a mechanical prototype of a bird-shaped wing as a first approach to a project with potential as vast as the ambition and vision of those who drive it. A simple, life-sized mechanical model will be designed to closely replicate this highly complex biological system. The process will begin with an aerodynamic analysis to enable a subsequent 3D design, considering appropriate geometry to achieve efficient and feasible motion.

To achieve this goal, the anatomy of a pigeon has been considered due to its inconspicuous morphology (common presence in populated areas without posing a threat to other species). The aim is to design a mechanism that serves as the foundation for creating an accurate prototype capable of faithfully reproducing the flight of this animal and blending effectively with its environment.

Índice

Resumen	2
Abstract.....	3
Índice	4
1.Introducción	6
1.1 ¿Qué son los drones?.....	7
1.2. Diferentes usos de los drones para vigilancia aérea y exploración de zonas de difícil acceso.....	7
1.3. Ventajas del uso de un dron con la morfología de paloma para vigilancia.....	8
1.4. Alcance del Proyecto	9
1.5. Objetivos del TFG para la obtención del Grado en Ingeniería Mecánica	10
1.6. Alcance de la Memoria.....	10
2. Paloma (<i>Columbia livia</i>).	11
2.1 El cuerpo de las aves.....	11
2.1.1. Anatomía ósea de las alas.	13
2.1.2. Plumas	14
2.1.3. Diferentes formas de las alas	16
2.1.3.1 Alas cortas y elípticas	16
2.2 Conceptos aerodinámicos básicos y analogía con el ala de un ave.	18
2.2.1. Fuerzas aerodinámicas.....	19
2.2.1.1 Sustentación (Lift)	19
2.2.1.2 Arrastre (Drag).	20
2.2.1.3. El ángulo de ataque.	22
2.2.2. Relación entre la Sustentación y el Arrastre	23
2.2.3. Empuje	24
3. Diseño conceptual del ala mecánica. Mecanismos y camuflaje.	25
3.1. Propuestas conceptuales y justificación del mecanismo elegido.	25
3.2. Análisis biomecánico estructural.....	26
3.3. Descripción del movimiento	26
3.4. Movimientos básicos	28
3.5. Definición dimensional	29
3.6. Transmisión de movimiento	29
3.6.1 Transmisión de movimiento vertical a un movimiento horizontal	29
3.6.2 Transmisión de movimiento lineal a un movimiento angular	30
3.7. Sincronización de movimientos básicos	31
3.8. Ángulo de ataque.	32
3.9. Mecanismo modelo 3D.	32
3.9.1 Primer mecanismo. Mecanismos básicos.	32
- Control de Ángulo del Ala.....	34
- Estabilidad y Resistencia	34
3.9.2 Segundo mecanismo. Mecanismo propuesto.	34
3.9.2.1 Mecanismo Biela -Manivela.	34
3.9.2.2 Mecanismo leva	35
3.9.2.3 Mecanismo de barras.....	36

3.9.2.4 Articulaciones y fijaciones.....	37
3.10. Análisis Aerodinámico y Mecánico de Alas en el diseño 3D.	37
3.10.1. Cálculos Aerodinámicos de la paloma: Sustentación.....	37
3.10.2. Relación entre el Arrastre y la Sustentación.....	39
4. Construcción. Materiales empleados e IMPRESIÓN 3D. Pruebas.	39
4.1. Pruebas aerodinámicas: Túnel de viento.	40
4.2 Análisis por elementos finitos.	42
5. Conclusiones y trabajos futuros.	44
7. Referencias.....	45

1. Introducción.

Desde tiempos remotos, el vuelo ha fascinado a la humanidad como un logro supremo de la naturaleza, especialmente en cómo las aves han dominado esta habilidad con gracia y eficiencia. Este interés ancestral no solo ha sido impulsado por la curiosidad científica, sino también por la búsqueda de aplicaciones prácticas que permitan al ser humano expandir sus capacidades de observación y movilidad. En este contexto, los avances tecnológicos recientes han llevado a la creación de los drones, dispositivos que, basados en el conocimiento aerodinámico, han revolucionado campos tan diversos como la vigilancia, la agricultura, y la logística.

Sin embargo, a pesar de estos avances, la replicación exacta de los movimientos y características del vuelo de las aves sigue siendo un desafío considerable. La complejidad biomecánica y aerodinámica involucrada en el vuelo aviar presenta numerosos obstáculos técnicos que deben ser superados para lograr una imitación efectiva y funcional en un contexto mecánico. Este proyecto se centra en abordar estos desafíos mediante el desarrollo de un prototipo de ala mecánica inspirado en la morfología y el movimiento de las aves, específicamente de la paloma, conocida por su adaptabilidad y presencia común en entornos urbanos.

El presente trabajo se estructura en varias fases claves. En primer lugar, se llevarán a cabo análisis biomecánicos detallados para comprender los principios del vuelo de las aves, incluyendo la generación de empuje y la sustentación aerodinámica. Este enfoque permitirá identificar y adaptar los mecanismos básicos necesarios para imitar, con la mayor precisión posible, los movimientos naturales de un ala aviar.

Posteriormente, se realizará una simulación del ala, utilizando herramientas avanzadas de modelado 3D. Estas simulaciones no solo validarán la viabilidad del diseño propuesto, sino que también ayudarán a anticipar y resolver posibles problemas y limitaciones que puedan surgir al implementar el modelo biomimético en un prototipo funcional. La utilización de software especializado permitirá explorar diferentes configuraciones y ajustes geométricos, asegurando así un diseño final que combine eficiencia de vuelo con capacidad de camuflaje en entornos reales.

Este enfoque, entre la biología del ave y la ingeniería mecánica no solo busca alcanzar un objetivo único, sino también sentar las bases para futuras aplicaciones innovadoras en campos como la robótica y la tecnología de drones, fomentando también el interés por la

naturaleza y el medio ambiente.

1.1 ¿Qué son los drones?.

De acuerdo con la RAE, un dron es *un vehículo aéreo no tripulado*. Aunque inicialmente los drones nacieron con fines de ocio, actualmente su uso se ha extendido al control aéreo de incendios, a la ayuda para la detección de personas extraviadas, al apoyo descriptivo de la orografía, a la entrega de paquetería, e incluso al seguimiento de ciertas especies de animales para determinar sus costumbres y conocer mejor su hábitat.

Todas estas aplicaciones se explican por la gran ventaja que tiene el vuelo ante el seguimiento vía terrestre, es decir, el vuelo presenta mayor libertad al evitar zonas con topografías muy accidentadas.

Los drones siguen los principios de la aerodinámica al imitar el vuelo de los helicópteros (a través de hélices que proporcionan un empuje vertical); por supuesto que la historia de todos estos principios, así como de todos los sistemas de vuelos, comienzan con el anhelo del hombre por conquistar los aires. Tres estudios destacan por la importancia que tienen en el desarrollo de este trabajo:

La biomecánica de un ave difiere grandemente respecto al de una simple hélice. Leonardo Da Vinci (s.XV) fue pionero en describir el movimiento de las alas de las aves. Sus observaciones, aunque erróneas e impracticables, concluyen con la construcción de su máquina voladora: *el ornitóptero* [2].

Varios siglos después, en 1906, los hermanos Wright patentan el primer planeador propulsado gracias a sus ensayos en un túnel de viento. Con esta patente se inicia el desarrollo de la aerodinámica de los aviones, y cambia la idea de Leonardo da Vinci en que las aves batén las alas de arriba hacia abajo y de delante hacia atrás, siempre en constante movimiento.

Finalmente, cabría mencionar que la mejora continua de los drones se está realizando en el ámbito militar, tanto para vigilancia como para protección, y en el ámbito social como instrumento de recreación, salvamento, y exploración de zonas de difícil acceso [1].

1.2. Diferentes usos de los drones para vigilancia aérea y exploración de zonas de difícil acceso.

Aunque, como se ha mencionado anteriormente, el uso de los drones nace con fines recreativos y de ocio, actualmente la inspección y el control son los usos más extendidos de los drones. Por ejemplo, son usados frecuentemente por las unidades de seguridad ciudadana

(policías, tránsito, bomberos, rescate, protección de fronteras) al dotarlos de cámaras de videovigilancia, para el monitoreo y control [3], especialmente en zonas de difícil acceso, o para observar a infractores, personas y animales en dificultades. También se conocen sus usos para el seguimiento y control del ganado, puesto que resulta más eficiente en cuanto al área de control que puede abarcar y en un tiempo razonable (más corto) [4]. Un procedimiento similar se sigue en la inspección de líneas de tensión al poder comandar al dron de forma remota.

Con la pandemia de COVID-19, hubo un aumento radical en el uso de drones para la entrega autónoma de comestibles y suministros médicos esenciales, y también para cumplir la distancia social recomendada (sana distancia).

Con miras a sus usos de vigilancia y control de especies en vía de extinción, se esperaría que fuese de gran ayuda el dotar a los científicos y a los expertos con un dron camuflado adecuadamente tal que pudiera integrarse con el medio, disponiendo así de una herramienta de seguimiento no intrusivo.

1.3. Ventajas del uso de un dron con la morfología de paloma para vigilancia.

Las ventajas del uso de un dron con apariencia de un ave podríamos enumerarlas de esta manera:

- Visualmente, un ave no representa una amenaza (su apariencia es distinta a la de un ave rapaz). Además,
- Su mayor tamaño, respecto a seres vivos con menor tamaño y voladores, por ejemplo insectos, permitiría albergar los dispositivos y equipos requeridos (el propio mecanismo de movimiento, cámaras y grabadoras de sonidos, etc.).
- Debido a que las palomas son aves muy comunes, la mayoría de las personas no cambiaría de actitud, ni detendría sus actividades si observaran la presencia de alguna de ellas. Imagínese que se observara que una paloma estuviera volando cerca; es muy probable que su presencia pasara por desapercibida (descartando a aquellos individuos con *ornitofobias* declaradas).

Aunado a lo anterior, la utilización de drones también permite la adquisición de datos en tiempo real, lo que refuerza el gran apoyo a las investigaciones en campo, con bancos de datos más completos y extensos.

Así, el mayor reto del uso de drones para aplicaciones específicas es el camuflaje, tanto visual como auditivo. La configuración más común (con 4 hélices como sistema propulsor) los limitan, puesto que llegan a crear una molestia visual y auditiva. En la Figura 1 se muestra una fotografía donde se muestra un dron común volando entre dos aves; la diferencia es apreciable.[5]

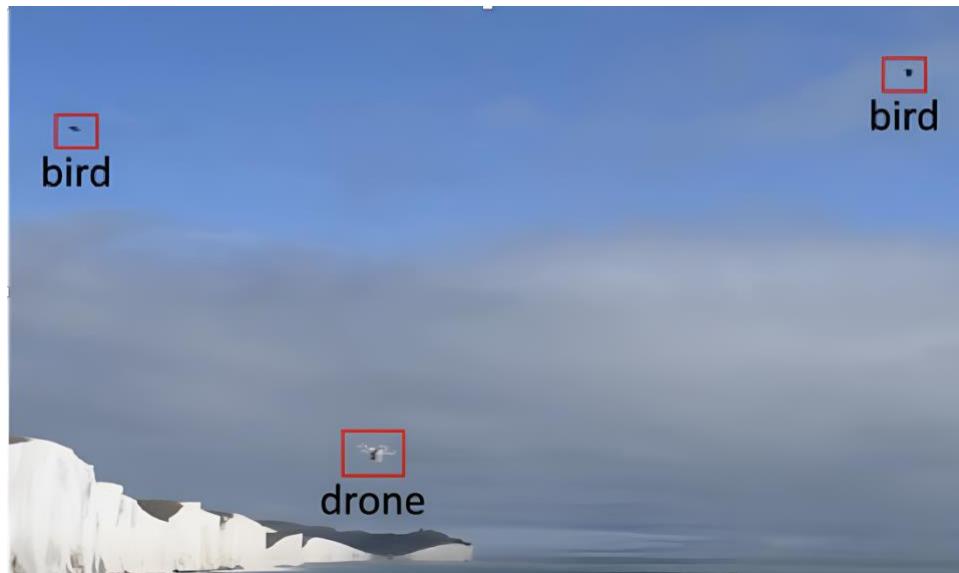


Figura 1. Imagen de un dron volando entre aves. Diferencia visual acusada. [5]

Con base en esto, podemos afirmar que la utilización de drones camuflados como medio para el monitoreo, control y seguimiento, en misiones específicas, es importante.

1.4. Alcance del Proyecto.

Este Trabajo de Fin de Grado trata sobre la primera aproximación al estudio de la morfología y la funcionalidad del ala de un ave de una paloma (*Columba Livia*) a través del estudio, diseño y desarrollo final de un prototipo de ala (diseñado en SolidWorks) que será impreso en 3D y probado. Este proyecto sienta las bases para la mejora e investigación en el campo de la tecnología de drones unido a la ingeniería mecánica.

1.5. Objetivos del TFG para la obtención del Grado en Ingeniería Mecánica.

El objetivo principal es el de desarrollar un prototipo de ala mecánica cuyo movimiento sea capaz de imitar al de una paloma. Para lo cual se propone un mecanismo a partir de la similitud biológica del ala del ave para su respectivo camuflaje con el medio.

Para cumplir el objetivo planteado, el presente proyecto se desarrolla siguiendo la estructura:

- Se abordarán los análisis biomecánicos que permiten comprender el empuje inicial y la sustentación del ave.
- Se realizará la similitud aerodinámica que conllevará al diseño de los mecanismos que imiten adecuadamente los movimientos
- La complejidad y los problemas que se presentan al extraer el modelo (ave) al prototipo (mecanismo) se resolverán a través de software 3D (SolidWorks), una herramienta adecuada para completar el estudio y cumplir con las mínimas exigencias mecánicas involucradas en el fenómeno.

Las principales áreas de aplicación en este proyecto abarcan las asignaturas de la carrera: Mecánica de Fluidos, en la parte de la aerodinámica, Mecanismos y Máquinas, relacionada con el movimiento del mecanismo del prototipo, Dibujo y Dibujo Industrial a través de la expresión gráfica del diseño de los mecanismos que la conforman. La parte física y matemática estarán contempladas en los cálculos de elementos finitos sobre la estructura para ver su funcionalidad y resistencia.

1.6. Alcance de la Memoria.

La presente memoria consta de 5 capítulos (excluyendo referencias).

Inicialmente, Capítulo II, se realiza una revisión bibliográfica sobre la biomecánica del vuelo de las aves. Esta revisión ha sido completada con el visionado exhaustivo de diferentes videos que han permitido relacionar la fisiología del ave con la funcionalidad de su vuelo.

Con base en esta revisión, en el Capítulo III se especifican las condiciones que deberá cumplir el mecanismo que, a consideración personal, imita, de forma sencilla pero adecuada, el movimiento natural del ala del ave.

Las distintas fases de la simulación del diseño por ordenador, que se presentan en el Capítulo III, desglosan detenidamente los pasos seguidos para cumplir todos los parámetros considerados. Además, gracias a esta simulación, se pudo comparar las observaciones del vuelo del ave real con las animaciones del mecanismo artificial propuesto, que se presentan en el Capítulo IV.

En el Capítulo IV se realiza la similitud entre el modelo y el prototipo propuesto, además de permitir cualquier cambio que se considere adecuado. Al final de este Capítulo, se presenta y se analiza el prototipo que, a criterio personal, funciona adecuadamente para los propósitos perseguidos a lo largo del presente proyecto.

Finalmente, en el Capítulo V se muestran las bases propuestas para continuar en el diseño completo de un dron con forma de paloma que pueda camuflarse completamente con su entorno.

2. Paloma (*Columbia Livia*).

A lo largo de este capítulo se expondrán las bases que han permitido desarrollar el mecanismo que se propone para imitar el movimiento del ala de una paloma (*Columbia Livia*). Se explican su morfología, estructura, los principios físicos y aerodinámicos para el desarrollo de este proyecto.

Cabe señalar que el diseño final se ha completado con el visionado exhaustivo de diferentes vídeos [8],[26].

2.1 El cuerpo de las aves.

De acuerdo con Escartí [4], durante centenares de millones de años, las aves han evolucionado, modificando el cuerpo hasta conseguir su forma actual. Así, por ejemplo, no tienen dientes ni mandíbula sino un pico muy ligero que les aporta aerodinámica durante su vuelo.

También su esqueleto ha sufrido evolución, ha prescindido de ciertos huesos que sí tienen la mayoría de los vertebrados, mientras que otros se han fusionado para simplificar la estructura ósea que, además, es más ligera gracias a que los huesos están huecos. Pero, en contra de lo que cabe suponer, los huesos de sus “brazos”, los que actúan como alas, son más

fuertes y pesados que los de otros animales, al igual que su esternón, reforzado con una quilla, y donde se anclan los músculos que las mueven (Figura 2 y Figura 3).



Figura 2. Anatomía del ave (Paloma). Morfología de músculos y vuelo [10].

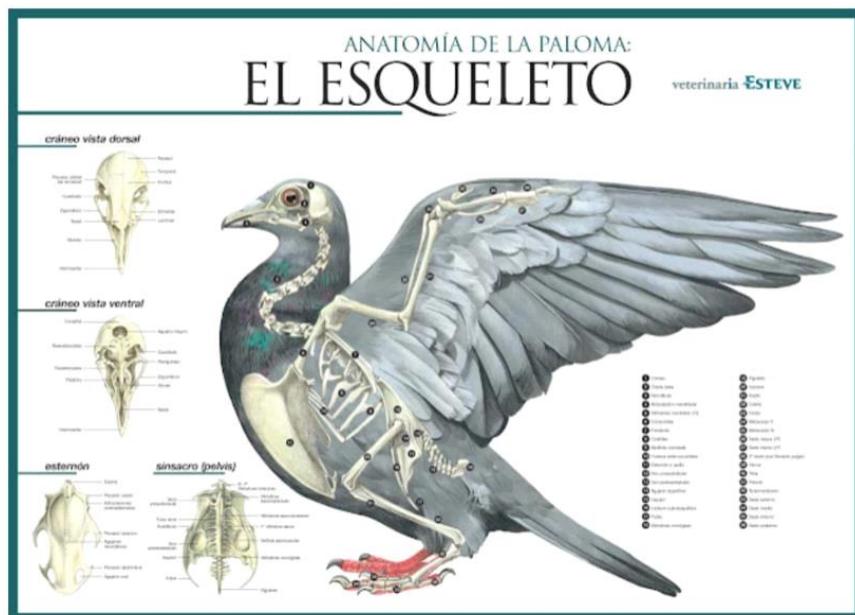


Figura 3. Anatomía del ave (Paloma). Estructura ósea [10].

Durante el vuelo, en algunas de sus facetas (por ejemplo, durante el empuje), se exige mucha potencia, por lo que las aves también han adaptado su sistema respiratorio, circulatorio y los músculos para satisfacer este requerimiento energético.[4]

2.1.1. Anatomía ósea de las alas.

Las alas del ave son la evolución de sus brazos. El *húmero* se une a los huesos del cuerpo en la articulación del hombro cuya cavidad forma la *escápula* y el *coracoides* (Figura 4). El *coracoides* se sujeta al *esternón*, y es el hueso que soporta la mayor parte de la fuerza que transmiten las alas al cuerpo, sobre todo durante el movimiento descendente del ala. Por su parte, la *quilla* proporciona una superficie para la inserción de los pectorales. Las clavículas están fusionadas y se unen a los *coracoides* en su parte dorsal. Hay vértebras en la espalda que también se han fusionado y las costillas están unidas al esternón, con lo que la caja torácica es fuerte y compacta.

Los músculos pectorales que se insertan en el esternón y la quilla pueden alcanzar del orden del 20% del peso del ave y tiran del húmero en el movimiento descendente del ala [4].

Los músculos supracoracoideos son los que accionan el movimiento ascendente del ala y también se insertan en el esternón; pasan por un canal que hace de polea.

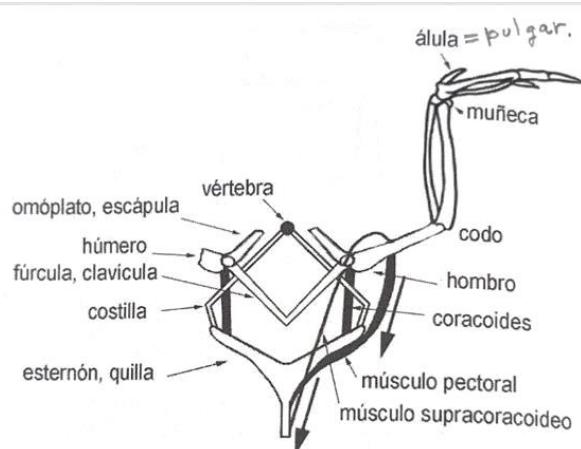


Figura 4. Inserción de las alas en el esqueleto de las aves y músculos supracoracoideos y pectorales [4].

Entre el codo y la mano hay dos huesos, el cúbito (o *ulna*) y el radio, equivalente al antebrazo. En la mano, el carpo y el metacarpo están unidos. Los dedos (dedo medio y dedo externo, dos) son cortos, con la excepción de uno mucho más alargado. El pulgar (*álula*) suele estar cubierto por un penacho de pequeñas plumas y es muy corto. El hueco entre el cúbito y el radio aloja la musculatura que actúa sobre la mano y condiciona, por tanto, la capacidad de vuelo del ave [4].

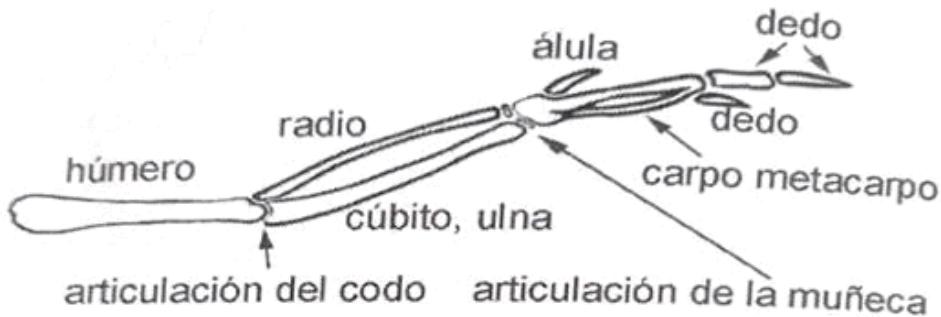


Figura 5. Los diez huesos de la ala de un ave [4].

2.1.2. Plumas.

Las plumas de un ave son algo más que una cubierta colorida para su cuerpo. Cada pluma tiene forma aerodinámica y está colocada con precisión para ayudar a volar, ajustando el flujo de aire alrededor de las alas y del cuerpo del ave. (Las aves pueden ajustar algunas plumas clave para ayudar a dirigir el aire alrededor de su propio cuerpo).

En general, las plumas se pueden clasificar en 5 tipos [4]:

- **Primarias:** Generalmente son 10 plumas en cada ala. Son más largas y están situadas en el extremo del ala.
- **Secundarias:** Están más cerca del cuerpo y junto con las primarias completan el ala del ave.
- **Timoneras:** Casi siempre son 12 y, como su nombre indica, hacen de timón.
- **Coberteras:** Cubren el cuerpo del ave, aislándola y protegiéndola de la humedad
- **Flemón o pulmón:** Sirve de aislante protector contra el frío y el calor

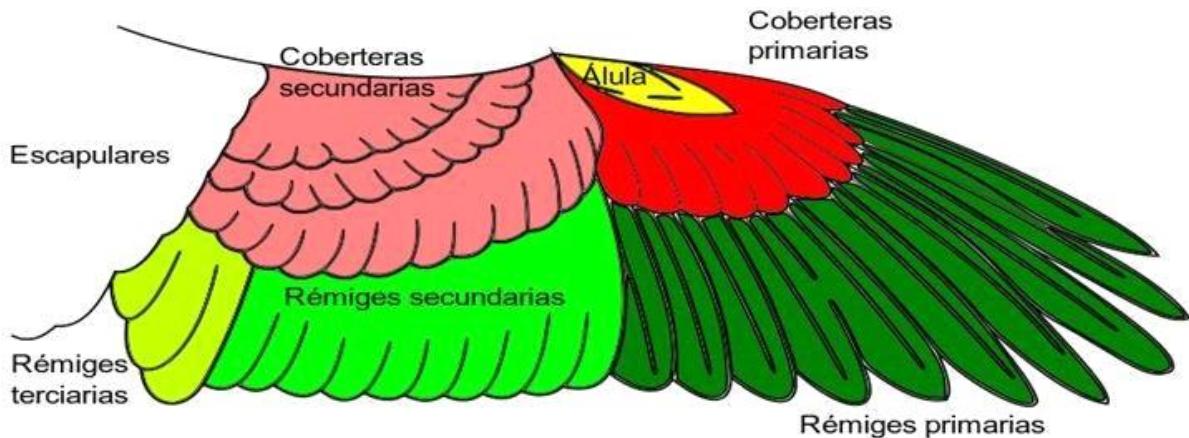


Figura 6. Croquis de las plumas del ala de un ave [11].

La estructura de una pluma es bastante compleja: se inserta en la piel en la parte inferior de su eje llamado raquis, que está hueco. El raquis divide a la pluma en dos mitades asimétricas llamadas vexilos, formados por barbas perpendiculares de las que emergen, también perpendicularmente, las bárbulas y los ganchillos que se sujetan a otras bárbulas.

No todas las plumas son iguales, las remeras y timoneras son las de las alas y de la cola, respectivamente, que se utilizan activamente en el vuelo, y el resto son simplemente plumas de cobertura. Hay dos tipos de plumas remeras (ver Figura 6): las primarias que se insertan en las manos, en las puntas de las alas, por tanto, y cuyo número suele variar de 9 a 12, y las secundarias que se insertan en el antebrazo, y cuyo número varía de 6 a 32. Las aves suelen cambiar el plumaje de cobertura dos veces al año, y las plumas remeras y timoneras una vez al año.

En nuestro caso, en la figura 7a. podemos apreciar cómo se disponen estas plumas en la Columbia Livia y la estructura interna de sus plumas (figura 7b.).

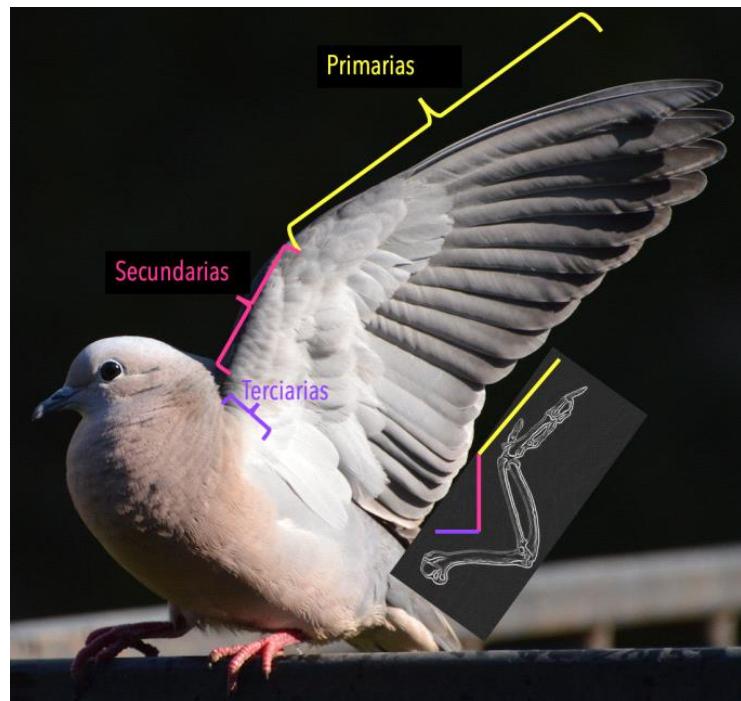


Figura 7a. Topografía de una pluma [12].

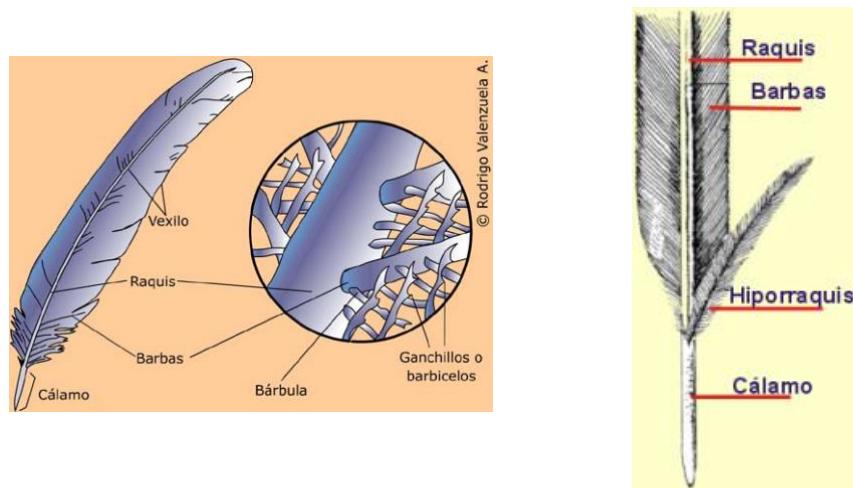


Figura 7b. Topografía de una pluma [13].

2.1.3. Diferentes formas de las alas.

2.1.3.1 Alas cortas y elípticas

Las alas se clasifican en cuatro categorías [14]: planeadoras pasivas, planeadoras activas, elípticas y de gran velocidad (Figura 8).

En el caso de la paloma, la morfología del ala es del tipo elíptica, lo que les permite minimizar el arrastre inducido (que se genera como una desventaja al crearse la sustentación). Al pasar el viento por la parte superior del ala, éste es desviado hacia el cuerpo, mientras que en la parte inferior es desviado hacia fuera. Ambas corrientes producen vórtices en la punta del ala (Figura 9) y ocasionan una fuerza opuesta al empuje (generalmente durante la etapa de despegue), de manera que se requiere mayor fuerza bajo estas condiciones . Cuando la paloma vuela a bajas velocidades, la resistencia inducida aumenta. De esta manera se requiere más aleteo para mantener la sustentación, mientras que a altas velocidades disminuye, por lo que la paloma no requiere tanta fuerza y puede mantenerse en vuelo más tiempo[4] .



Figura 8. Tipos de alas. [14].



Figura 9. Visualización de vórtices generados por la diferencia en la dirección de las corrientes a través de las alas. [15].

Aunque un ala con perfil elíptico conlleva a alas más anchas [4], permite vuelos de alta velocidad en períodos cortos de tiempo, lo que facilita un control preciso en las maniobras y despegues rápidos en espacios reducidos. En general, las aves con alas elípticas tienen las rémiges primarias separadas y una ácula grande; es la configuración típica de un ave que utiliza el vuelo para escapar de sus atacantes.

2.2 Conceptos aerodinámicos básicos y analogía con el ala de un ave.

Dados los objetivos del presente Trabajo de Fin de Grado, se torna importante mencionar los conceptos básicos de la aerodinámica para analizar el vuelo de las aves.

El deseo del ser humano por volar ha sido una larga carrera de quebrantos, que inicia con las simples observaciones de las aves, y continúa con el estudio de su morfología y estructura. Mitos como el que se refiere a Dédalo e Ícaro que crearon unas alas con cera para escapar, datan de muchos años de antigüedad [16]. En el Renacimiento, los “estudios de vuelo” de Leonardo da Vinci [17], y posteriormente los estudios de Sir Isaac Newton (s.XVII) sobre la resistencia producida por el aire [18], muestran los incansables esfuerzos por entender la física del vuelo. Pero sería Daniel Bernoulli, en el año 1738, quien sentaría las bases de la aerodinámica al poderse aplicar su “Principio” con el que es posible explicar la sustentación.[19]

La aerodinámica, una rama fundamental de la física, se dedica al estudio del movimiento del aire y su interacción con los cuerpos en movimiento a través de él [20]. Este campo ha evolucionado desde sus primeros fundamentos hasta los principios establecidos por George Cayley en 1799, quien definió las cuatro fuerzas aerodinámicas básicas que intervienen en el vuelo: empuje, peso, sustentación y arrastre. Los trabajos pioneros de Cayley sentaron las bases teóricas para la aviación, proporcionando los cálculos esenciales que impulsaron el desarrollo de la aerodinámica moderna y los primeros vuelos [4].

En 1885, Horatio Phillips demostró con sus experimentos en túneles de viento que los perfiles con formas curvas (Figura 10), cóncavas en su parte inferior y convexas en la superior, generan más sustentación [4]. Estos trabajos sientan las bases para el diseño de los actuales aviones modernos, ya que ayudaron a dirigir su esfuerzo en mejorar los transportes para los primeros vuelos.

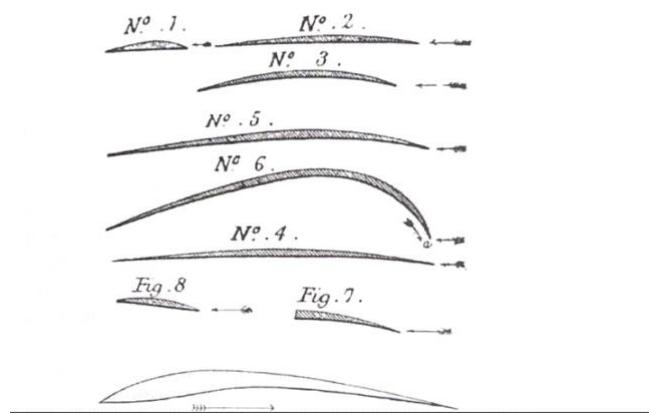


Figura 10. Perfiles de las alas según Horatio Phillips de 1884 [4].

2.2.1. Fuerzas aerodinámicas.

2.2.1.1 Sustentación (Lift).

Esta fuerza aerodinámica es la que debe generarse con una magnitud adecuada para elevar al objeto volador (ave o aeronave) y mantenerlo suspendido durante su desplazamiento.

En los cursos básicos de aerodinámica se retoman los resultados de Phillips [4], y se enfatiza en que un perfil aerodinámico, sustentador, no debe ser simétrico respecto al plano que corta por la cuerda. Esta asimetría es la que genera la presencia de la fuerza de sustentación (fuerza perpendicular a la corriente fluida). Esto se explica al aplicar la Ecuación de Bernoulli (Ec.1), a lo largo de una línea de corriente, y en donde se establece una necesaria diferencia geométrica entre el extradós (superficie superior de un perfil sustentador) y el intradós (superficie inferior) para generar la diferencia de presión que produce sustentación:

$$\frac{p}{\rho g} + z + \frac{v^2}{2g} = cte \quad (\text{Ec.1})$$

Donde p es la presión termodinámica, z la cota, v es la velocidad relativa entre el perfil y el aire, g es la constante gravitatoria, y ρ es la densidad del fluido de trabajo (aire).

De la ecuación 1 se extrae que, al aumentar la velocidad del flujo por el extradós, la presión estática disminuye para que pueda darse este aumento de energía cinética (o presión dinámica).

Cabe mencionar que la resultante de las fuerzas de presión produce, además, una segunda componente en la misma dirección del flujo, llamada *arrastre* o fuerza de *resistencia al avance* (figura 12).

Coeficiente de sustentación:

Por definición, el coeficiente de sustentación es C_L , es:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L v^2 S \quad (\text{Ec.2})$$

Donde F_L es la fuerza de sustentación (Lift), S es el área proyectada en planta del perfil, v es la velocidad relativa entre el perfil y el aire, y ρ es la densidad del fluido de trabajo (aire).

Imagínese un trayecto no excesivamente largo, en donde el peso del volador varía poco. Considérese también que se mantiene la velocidad de crucero. Para tener una fuerza de sustentación adecuada es preciso o incrementar la superficie del ala, S , o el coeficiente de sustentación, C_L , para mantener el equilibrio entre las fuerzas de sustentación y peso.

La relación entre el tamaño del ala y la sustentación es bastante sencilla. La sustentación, F_L , de un ala es directamente proporcional a la superficie, S , del ala. Por tanto, un ala el doble de grande puede soportar el doble de peso. Por otro lado, la fuerza generada por el aire que fluye alrededor de las alas es proporcional a la velocidad del aire por el flujo de masa de aire (Ec.2). Lo que esto significa en la práctica es que, si un pájaro vuela el doble de rápido, genera 4 veces más sustentación[4].

2.2.1.2 Arrastre (Drag).

El arrastre o resistencia aerodinámica es la fuerza se opone al movimiento y, por lo tanto, la fuente de demanda de energía en vuelo.

Para explicar la fuerza de arrastre es necesario retomar la teoría de capa límite, considerando que la velocidad del flujo cambia drásticamente desde las líneas de corriente que envuelven el perfil hasta la velocidad en la superficie del propio perfil. Este cambio refleja una zona muy estrecha (Figura 11), en la que se generan altos gradientes de velocidad, por lo que se producen esfuerzos cortantes muy grandes. De acuerdo con la ley de viscosidad de Newton [21]:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{Ec.3})$$

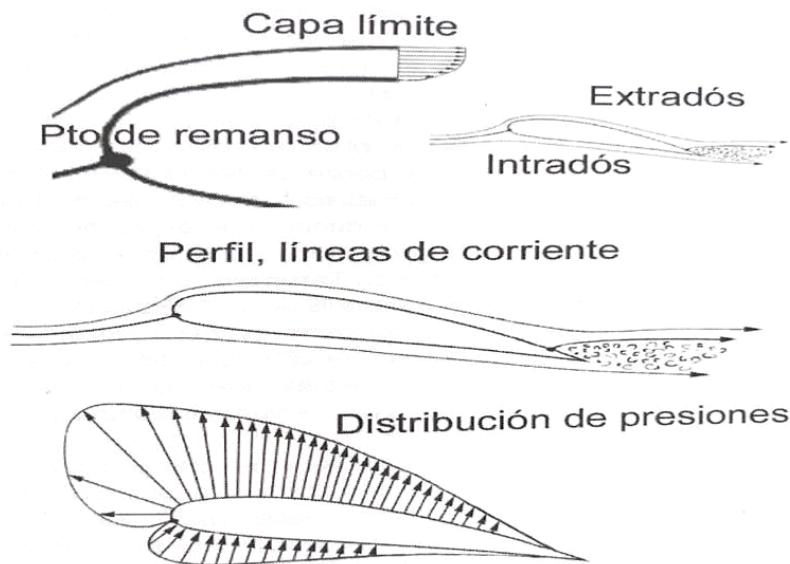


Figura 11. Capa límite, gradiente, extradós e intradós, perfil alar y distribución de presiones [4].

De esta forma, la necesidad de generar fuerza de sustentación durante el vuelo y desplazamiento de las aves conlleva a la presencia de otra componente por arrastre viscoso, y ambas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la velocidad relativa con la que el ave se desplaza (Ec.2 y Ec.4). Las necesidades biológicas obligan a que la fuerza por arrastre sea mínima, para optimizar el consumo de energía [4].

Cabe aclarar que, en ciertas condiciones (velocidad de vuelo, v , superficie del ala, S , ángulo de ataque, α ,..), los esfuerzos cortantes conllevan a la presencia de gradientes adversos de presión, y como consecuencia final al desprendimiento del flujo, como se observa en la Figura 11. Así, la fuerza de arrastre aumenta significativamente.

Coeficiente de arrastre:

De una forma similar al coeficiente de sustentación, el coeficiente de arrastre se defina a través de la fuerza de arrastre

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D v^2 S \quad (\text{Ec.4})$$

donde, en este caso, F_D es la fuerza de arrastre y C_D el coeficiente de arrastre. Las demás variables son las mismas que las expuestas en la Ec.2.

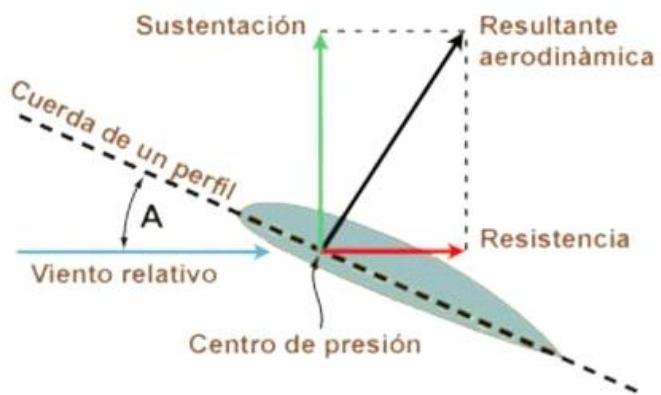


Figura 12. Diagrama vectorial de la Resultante aerodinámica [22].

2.2.1.3. El ángulo de ataque.

Otro parámetro importante es el ángulo de ataque. De éste depende fuertemente la magnitud de la componente en contradirección al avance del ave. Al aumentar el ángulo de ataque (p.e., durante el despegue o por cualquier cambio en la dirección del viento respecto a la cuerda del ala), la dirección y magnitud de la fuerza aerodinámica total cambian (Figura 13). Por ejemplo, en un ala de avión comercial, conforme la aeronave despega y se aproxima a un ángulo de ataque de (ángulo entre la cuerda y el movimiento al avance), la capa límite se desprende acusadamente, alterando la magnitud de la fuerza por presión y sus respectivas componentes [4]:

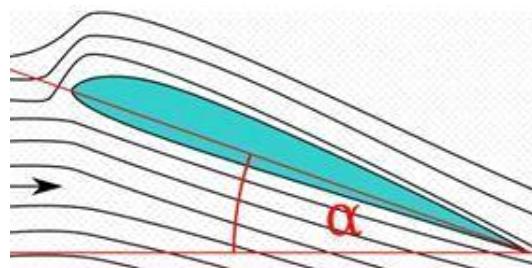


Figura 13. El ángulo de ataque. [23].

A partir de un valor de ángulo de ataque de 20 grados, en la parte posterior del extradós se empiezan a formar torbellinos y el flujo deja de ser laminar para convertirse en turbulento, generando “entrada en pérdida del ala”.(Figura 14)



Figura 14. Observación del desprendimiento de vórtices a grandes ángulos de ataque [24].

2.2.2. Relación entre la Sustentación y el Arrastre.

Otro parámetro importante es la relación (F_L/F_D). Éste da una idea de la eficiencia del perfil al comparar ambas fuerzas aerodinámicas. Por ejemplo, en el caso de algunos pájaros, F_L/F_D puede llegar a un valor de 10 [4], lo que implica que si el animal pesa 2 kg, durante su vuelo tendrá que vencer una fuerza de resistencia de 0,2 kg. Entre mayor sea esta relación mejor será el rendimiento energético del ave durante su vuelo. En la Figura 15 se muestran las relaciones entre estos coeficientes como función del ángulo de ataque para un perfil aerodinámico genérico.

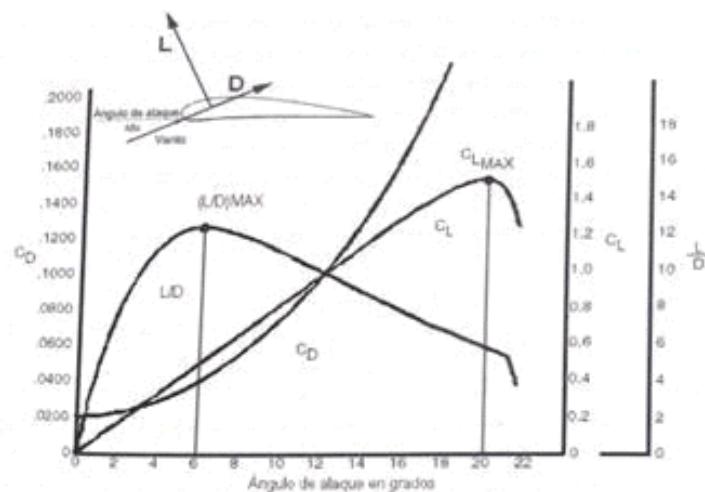


Figura 15. Gráfico de Coeficiente de Sustentación (C_L), Resistencia (C_D), y Relación entre sustentación y resistencia (F_L/F_D) en función del ángulo de ataque [4].

2.2.3. Empuje.

Esta fuerza adicional en las aves puede verse como el inicio del vuelo, con la que el ave logra despegar y alcanzar su velocidad de crucero [25]. Esta fuerza sería análoga a la que lograría un avión con la propulsión de sus motores, pero considerando que el ave no precisa de una pista de despegue (a excepción de los albatros y aves similares que presentan alas de planeo. Ver Figura 16).

Con el empuje, el ave debe vencer su propio peso y la fuerza de arrastre (Figura 16.a). Para ciertas aves, el plano de trazo de las alas se aproxima hasta unos 60 grados respecto a la vertical [25].

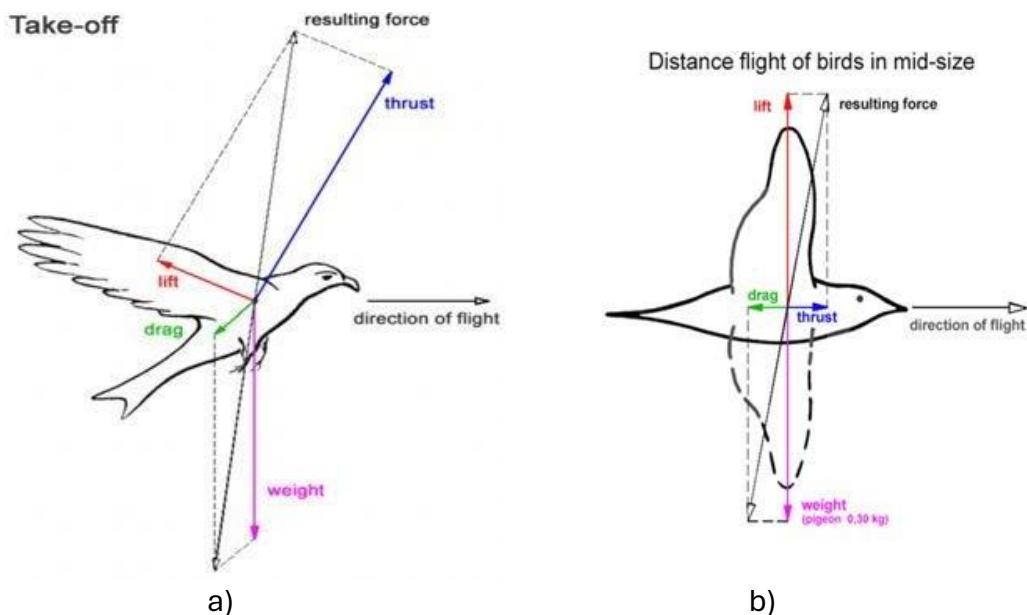


Figura 16. Diagrama de fuerzas ejercidas por el ave. a) fuerzas durante el despegue, requerimiento de una fuerza de empuje. b) fuerzas durante el vuelo, equilibrio del empuje con el arrastre [25].

Una vez que el ave ha alcanzado la altura deseada, el empuje necesario sólo debe compensar al arrastre aerodinámico; de esta forma logra mantener el vuelo con el menor gasto de energía posible (Figura 16.b).

Cuando vuela puramente con empuje, la fuerza de peso del ave se equilibrará principalmente por la fuerza de empuje dirigida hacia arriba.

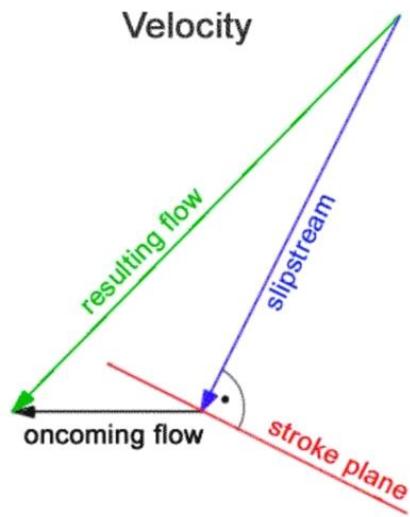


Figura 17. Diagrama de fuerzas ejercidas realizadas por el ave [25].

Debido a su forma aerodinámica, el pájaro logra un levantamiento suficiente. Su empuje se puede dirigir directamente hacia adelante y puede disminuir sustancialmente junto con los movimientos de torsión del ala.

3. Diseño conceptual del ala mecánica. Mecanismos y camuflaje.

3.1. Propuestas conceptuales y justificación del mecanismo elegido.

A continuación, se describe el diseño de dos modelos de un ala mecánica, inspirada en la estructura anatómica y la funcionalidad del ala de una paloma. El objetivo del mecanismo es replicar la biomecánica para desarrollar un ala mecánica que simule sus movimientos de vuelo: aleteo, extensión y flexión de las articulaciones, así como el ajuste de las plumas.

La progresión de los modelos se fundamenta en mejoras estructurales y funcionales con base en principios de ingeniería, buscando una mayor precisión en la simulación de los movimientos naturales de las alas en un entorno mecánico.

Destacan tres movimientos, principalmente, que hacen posible simular los de un ave: 1) movimiento vertical (aleteo), 2) contracción y expansión del ala, y 3) apertura y cierre de las plumas primarias.

Para conseguir estos movimientos realizaremos un análisis biomecánico estructural.

3.2. Análisis biomecánico estructural.

Como hemos observado en la figura 5 tenemos el ala de una paloma consta de 10 huesos los cuales transformaremos en mecanismos a través del estudio del movimiento para conseguir el estiramiento y encogimiento del ala y su batida.

En el *Apartado 2.1.1 Anatomía ósea de las alas* hemos comprendido que el coracoides es el hueso que soporta la mayor parte de la fuerza, sobre todo el movimiento descendente del ala para esto necesitaremos un mecanismo resistente y con gran área que soporte esta fuerza.

Otra parte importante, es el hueco entre el cúbito y el radio ya que ahí se aloja una musculatura que actúa sobre la mano condicionando a que el vuelo sea solo batir las alas o planear [4].

Para conseguir estos requerimientos, podrían usarse mecanismos como guías, barras, levas, entre otros, que nos ayudarán a conseguir una primera aproximación y un mecanismo simple que cumpla los requerimientos de movimiento.

3.3. Descripción del movimiento.

En este apartado, analizaremos el ciclo completo del movimiento del ala de una paloma.

Para iniciar el ascenso, el ave despliega sus alas a la vez que inicia la elevación de ellas a una posición vertical (Figura 18).



Figura 18: Alas de un ave con su identificación estructural: Elevación (izquierda) Elevación y extensión (derecha).[26]

Finalmente, el ala llega a un punto límite de elevación y extensión (Figura 19)



Figura 19: Momento del ala completamente elevada y extendida con la identificación estructural que la compone.[26]

A partir de la elevación y despliegue máximos, el ave desciende el ala sin plegarla hasta llegar a un punto límite inferior. (Figura 20)



Figura 20: Identificación estructural que compone el ala. Momento del descenso sin pliegue (izq.). Momento del ala en su límite inferior (der).[26]

Al reiniciar el movimiento ascendente del ala, el ave contrae el ala para minimizar la cantidad de aire por encima de esta. Una vez llega al punto máximo superior (nivel por encima de la cabeza), se vuelve a extender completamente el ala y se repite el ciclo. (Figura 21)



Figura 21: Identificación estructural que compone el ala: Pliegue para retomar elevación (izq.). Momento del ala sobre pasando el nivel de la cabeza (der).[26]

3.4. Movimientos básicos.

Con base a la secuencia anterior de pliegue y despliegue del ala, se define el sistema estructural en un conjunto de tres partes: 1) húmero (línea azul), 2) ulna y radio(línea rosa) , 3) metacarpo (línea verde y naranja), con sus respectivos juegos de plumas cada uno, proponiendo los siguientes movimientos básicos para definir los mecanismos a aplicar (Figura 22).

Elevación y descenso del ala: La elevación y el descenso están dados por un movimiento rotacional de 80° como lo describe la Figura 22.

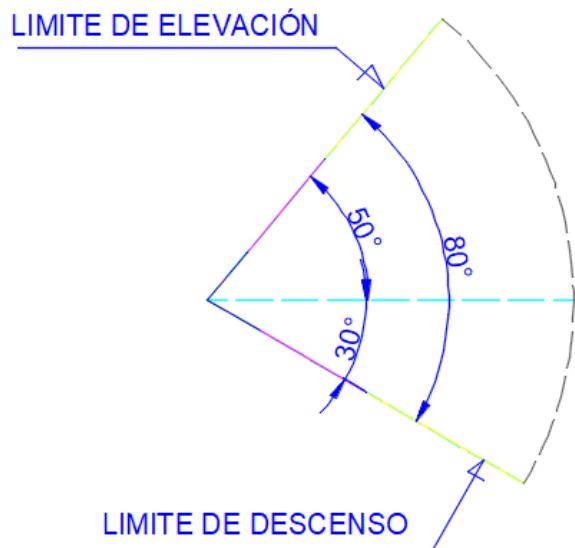


Figura 22: Gráfica del movimiento de elevación realizado en AutoCAD. Obtenido mediante observación [26].

Extensión y pliegue del ala: Para la extensión y pliegue del ala se proponen las siguientes posiciones.



Figura 23: Posición del ala en extensión realizada en AutoCAD. Obtenido mediante observación[26]

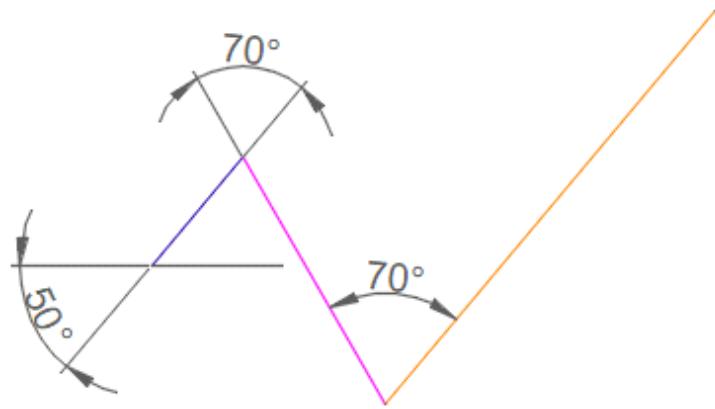


Figura 24: Posición del ala plegada realizada en AutoCAD. Obtenido mediante observación[26]

3.5. Definición dimensional.

El húmero mide de 7-9 cm el radio de 5-6 cm y el carpo metacarpo más dedo medio y externo completan con una distancia de 9-12 cm [10].

Todos los componentes serán redimensionados al doble aproximadamente de su tamaño, ya que en la impresión 3D se generarían problemas de resolución y posibles roturas en el montaje (*Capítulo 4*).

Las dimensiones serán:

- El húmero: 120,5mm.
- El cúbito: 150 mm y radio: 115,5 mm. En el diseño son diferentes para ajustarse al modelo 3D pero en la realidad se representan como una línea de la misma dimensión como veremos en las siguientes explicaciones.
- El carpo metacarpo: 195 mm

3.6. Transmisión de movimiento

La secuencia dinámica del vuelo de un ave se desarrolla con respecto a los movimientos básicos tratados anteriormente proponiendo las siguientes transmisiones de movimiento.

3.6.1 Transmisión de movimiento vertical a un movimiento horizontal

A través de un movimiento vertical , se lleva a cabo un desplazamiento controlado por un accionamiento manual. Este mecanismo facilitará la transición de un movimiento

vertical, hacia un movimiento horizontal lo que permite cambiar la dirección de desplazamiento. Esto se observa en la figura 25.

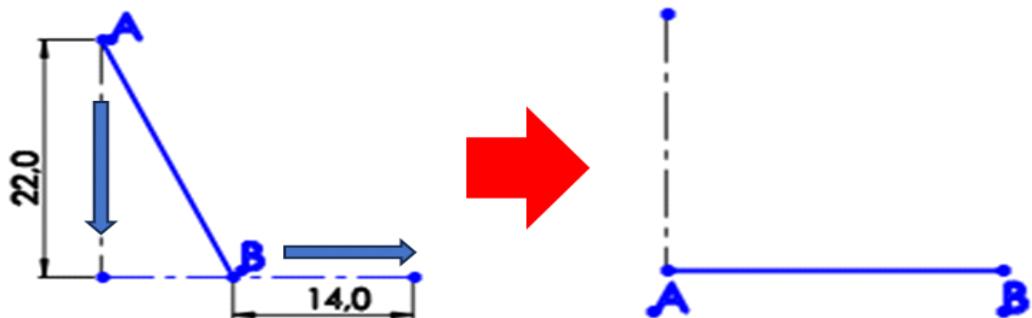


Figura 25: Gráfica realizada en SolidWorks de la demostración de la transmisión de un movimiento vertical a un movimiento horizontal. Unidades(mm). Se usan valores aproximados al tamaño del ave para reflejar el movimiento.

Según lo muestra la Figura 25, cuando distancia A-B se mantiene constante, el punto (A) se desplaza verticalmente 22 mm hacia abajo generando un desplazamiento horizontal 14 mm del punto (B).

3.6.2 Transmisión de movimiento lineal a un movimiento angular.

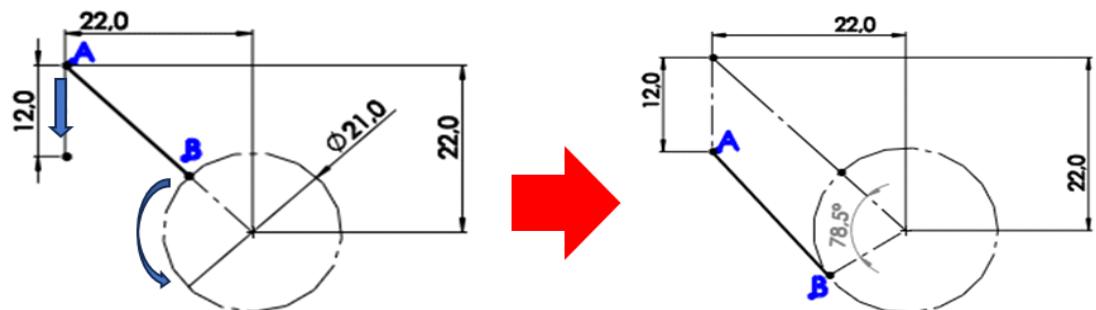


Figura 26: Gráfica realizada en SolidWorks de la demostración de la transmisión de un movimiento lineal a un movimiento angular con unidades en (mm). Se usan valores aproximados al tamaño del ave para reflejar el movimiento.

La transmisión del movimiento lineal a angular , como se muestra en la figura 26, es un

principio que puede ser aplicado al análisis del movimiento del ala del ave. En este caso la articulación del ala en la base, punto A, se desplaza verticalmente para generar un movimiento angular en una región distal del ala, punto B.

Según lo muestra la Figura 26, cuando distancia A-B se mantiene constante, el punto (A) se desplaza verticalmente 12mm, hacia abajo generando un desplazamiento angular de 78.5° del punto (B).

Es similar a cómo una articulación (como un hombro) puede convertir un movimiento lineal (músculo que se contrae) en un giro del ala. Es la base de cómo las alas cambian su posición y ángulo durante el vuelo [4].

3.7. Sincronización de movimientos básicos.

Se establecen posiciones secuenciales en el rango de giro del ascenso y descenso definidos por medidas angulares como lo muestra la Figura 27.

Una secuencia experimental quedaría de la siguiente manera si proponemos como eje de rotación el cuerpo:

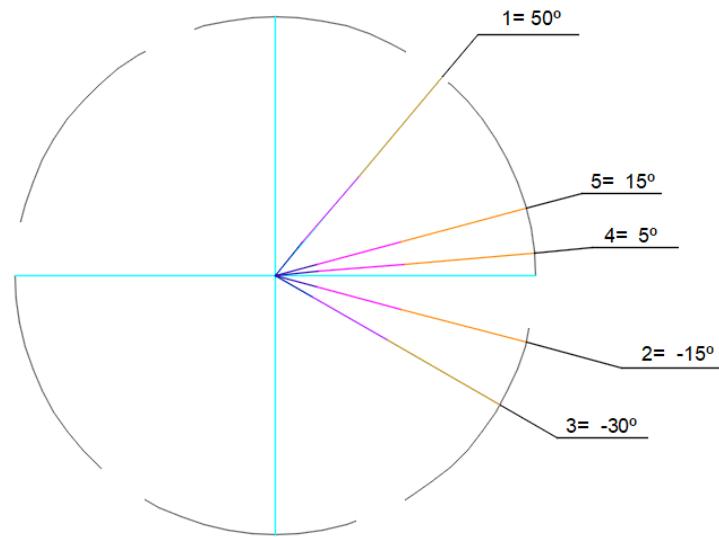


Figura 27: Gráfica realizada en AutoCAD de las posiciones secuenciales en el rango de ascenso y descenso del ala del ave. Datos obtenidos de la observación del ala del ave [26].

Según la Figura 27 se establece una secuencia de ascenso y descenso en donde desde

la posición 1 del ala (50°) pasa a la posición 2 (-15°) y así progresivamente de la posición 1 a la posición 5 y retoma el ciclo.

Estos parámetros están definidos para obtener la descripción del movimiento del ala del ave proponiendo los siguientes requerimientos de sincronización entre el movimiento de ascenso-descenso y el movimiento de extensión-pliegue (figuras en Capítulo 3.3):

Posición 1: Ala elevada y extendida.

Posición 2: Ala en descenso y extendida en esta posición inicia el pliegue del ala.

Posición 3: Ala completamente en descenso y en secuencia de pliegue.

Posición 4 y 5: Ala en elevación completamente plegada inicia secuencia de extensión.

3.8. Ángulo de ataque.

El ángulo de ataque es un movimiento de rotación con dirección frontal con el objetivo cuyo objetivo es el de controlar la relación $\frac{F_L}{F_D}$ (Apartado 2.2.1.3).

En el mecanismo, inicialmente se estudiará el ángulo generado de forma natural por el propio movimiento del sistema. Sin embargo, para simplificar el análisis, se considerará al final un ángulo de ataque fijo de 10 grados [26] respecto de la horizontal.

3.9. Mecanismo modelo 3D.

Una vez realizado el estudio de movimiento de un ave y plasmar su geometría utilizando el programa de modelado SolidWorks se pondrá en práctica los movimientos del ala de un ave para lo cual se proponen los siguientes mecanismos.

Los mecanismos seleccionados cumplen la función de transformar un movimiento rotativo en un movimiento lineal de esta forma poder aplicar las transmisiones de movimiento propuestas anteriormente.

3.9.1 Primer mecanismo. Mecanismos básicos.

Como punto de partida, en la primera versión, se utilizó una excéntrica que permite generar el movimiento vertical de subida y bajada del ala. Este componente mecánico transforma un movimiento rotativo en un movimiento lineal alternativo. Cuando el mecanismo se activa, la excéntrica se acopla a un motor que, al girar, hace que el seguidor se desplace hacia

arriba y hacia abajo. Este desplazamiento se traduce en el movimiento ascendente y descendente del ala, imitando el aleteo de un ave (Figura 28).

Excéntrica. (Mecanismo biela-manivela).

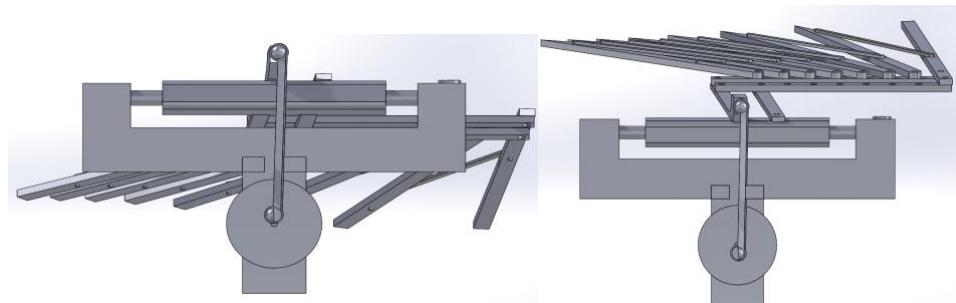


Figura 28. A) Excéntrica en el punto más alto: Hace que el ala se sitúe en la posición más baja posible. B) Excéntrica en el punto más bajo: Hace que el ala se sitúe en la posición más alta posible. Diseño propio generado con SolidWorks.

Rótula.



Figura 29. Rótula(simulando hombro de ave). Diseño propio generado con SolidWorks.

La rótula al final de la barra de acoplamiento, facilita principalmente dos tipos de movimiento: abducción y aducción.

La **abducción** es el movimiento del ala al alejarse del cuerpo del ave (despliegue). Este movimiento es esencial para aumentar el área de las alas, lo cual es crucial para generar el empuje inicial y la suficiente sustentación durante el vuelo.

La **aducción**, en cambio, es el movimiento del ala hacia el cuerpo del ave (pliegue). Este movimiento es necesario para evitar un empuje negativo durante el vuelo y/o para plegar el ala cuando el ave no está en movimiento.

Mecanismo de apertura y cierre de las alas

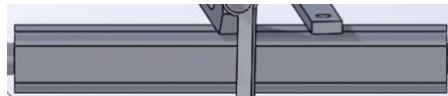


Figura 30. Barra que genera estabilidad y resistencia. Diseño propio generado con SolidWorks.

Lo dividiremos en dos partes importantes para el diseño:

- Control de Ángulo del Ala

La barra indicada en el diseño cumple la función de ajustar el ángulo del ala, permitiendo rotación hacia arriba y hacia abajo alrededor de un eje específico.

- Estabilidad y Resistencia

Para asegurar que la barra mantenga su posición y no sufra desviaciones laterales ni deformaciones durante el movimiento, es esencial que esté firmemente fijada en ambos extremos. Esto se logra a través de componentes de soporte, que minimizan el juego lateral y absorben las fuerzas de carga aplicadas al ala.

En conjunto, estos tres elementos biomecánicos permiten a las aves realizar una variedad de acciones en vuelo. Se buscará mejorar el diseño actual al integrar principios biomecánicos que permitan un control más preciso y dinámico del mecanismo, imitando la capacidad de las aves para ascender, planear y realizar maniobras complejas en el aire. Al ajustar la sincronización de las partes móviles, el sistema se acercará a la fluidez y versatilidad del vuelo natural, logrando una mayor adaptabilidad a distintas condiciones de vuelo.

3.9.2 Segundo mecanismo. Mecanismo propuesto.

A continuación, se describe el mecanismo finalmente propuesto, ya que, a criterio personal, cumple los requisitos mencionados desde el punto 3.2 al 3.8.

3.9.2.1 Mecanismo Biela -Manivela.

Por medio de la transmisión de potencia de una manivela conectada a una barra guiada en un eje, se transforma un movimiento circular en uno lineal,

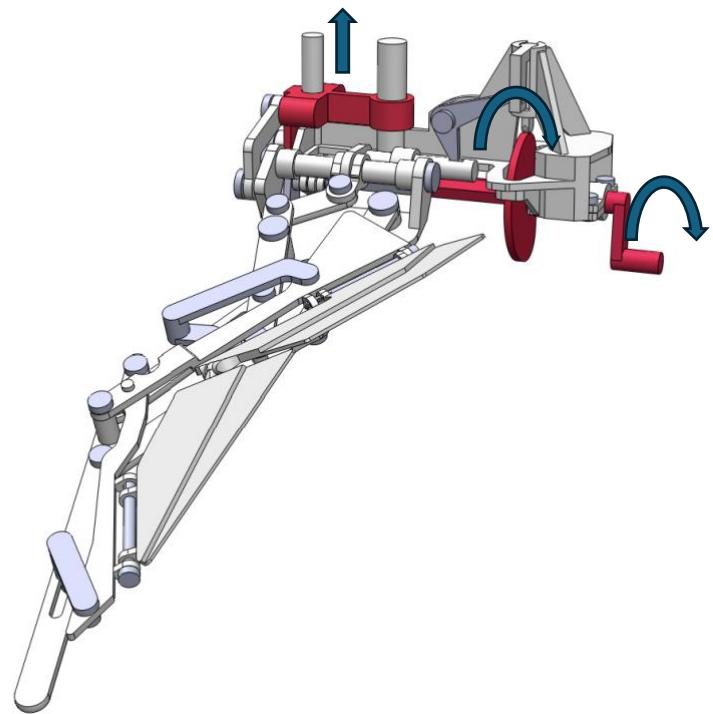


Figura 31. Mecanismo manivela diseñado en SolidWorks.

3.9.2.2 Mecanismo leva.

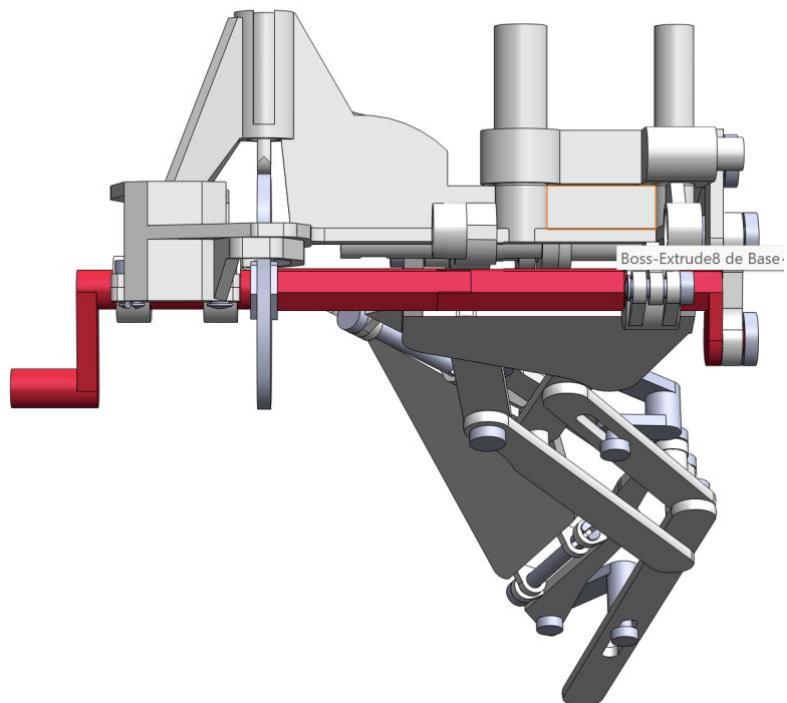


Figura 33. Mecanismo leva, vista lateral, diseñado en SolidWorks.

Mediante la rotación transmitida por el mecanismo manivela una leva transforma el desplazamiento rotacional en uno lineal. Además, este elemento acciona a su vez un sistema de barras para hacer posible el movimiento básico de extensión-pliegue.

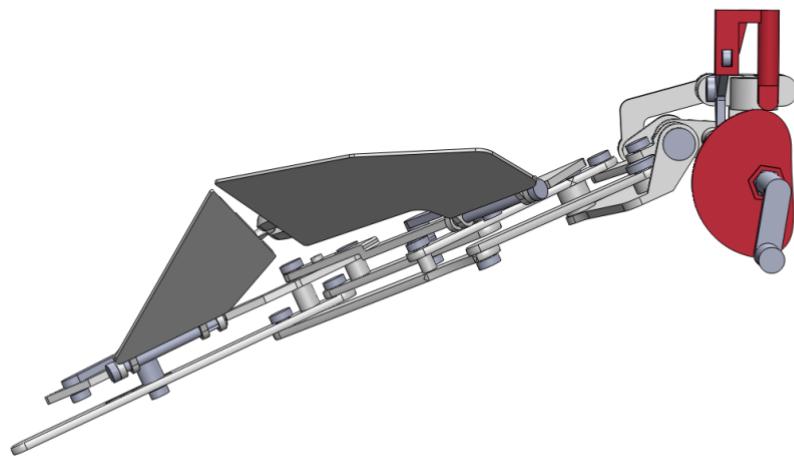


Figura 34. Mecanismo leva, vista posterior, realizado en SolidWorks.

3.9.2.3 Mecanismo de barras.

Acoplado al sistema biela-manivela, se transforma el movimiento vertical de la corredera en un movimiento horizontal. La acción de este mecanismo interviene en el movimiento de extensión pliegue.

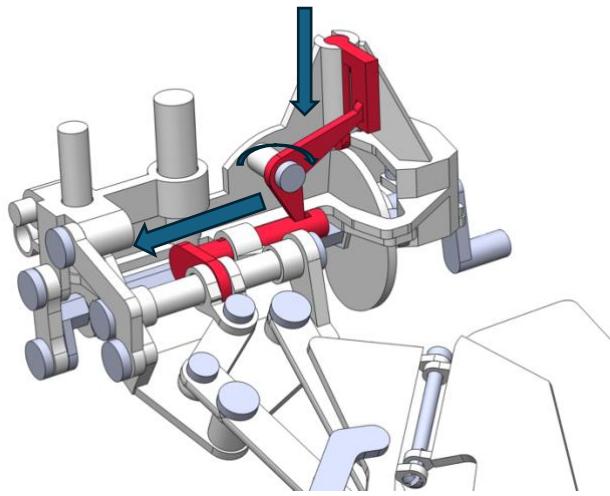


Figura 35: Gráfica dinámica mecanismo de barras realizado en SolidWorks.

3.9.2.4 Articulaciones y fijaciones.

Fijación por tetones: Aplica para fijación de las barras, articulaciones de rótula. Funciona mediante un pasador.

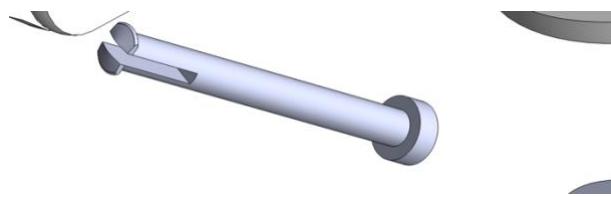


Figura 36: Funcionamiento de la fijación.

Para más detalles del mecanismo y sus dimensiones consultar planos en ANEXO A.

3.10. Análisis Aerodinámico y Mecánico de Alas en el diseño 3D.

3.10.1. Cálculos Aerodinámicos de la paloma: Sustentación.

En este trabajo, la sustentación constituye una fuerza fundamental para el funcionamiento de la mecánica del ala (Ec. 2). En el caso de una *Columba Livia* con las alas en posición horizontal y velocidad de crucero, la sustentación debe igualar su peso para permitir el vuelo sostenido. Por lo tanto, se calculará la fuerza de sustentación generada durante la velocidad de crucero, que es clave para mantener el equilibrio de fuerzas en vuelo nivelado.

Considerando que:

- C_L es el coeficiente de sustentación máximo estimado en 0,8 [28].
- $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$. La densidad del aire varía dependiendo de las condiciones atmosféricas, pero a nivel del mar y a una temperatura de 15 °C (condiciones estándar) [29] se considera este valor como adecuado.
- v es la velocidad de crucero de la paloma con un valor de 90 km/h que equivale a 25 m/s [30].
- Masa del ave: $m = 400 \text{ gramos}$ [30].
- S es el área del ala proyectada en planta con un valor de $0,0296 \text{ m}^2$ [31].
- Se toma la gravedad como $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Calculamos fuerza de sustentación:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L v^2 S = 0,5 * 1,225 * 0,8 * 25^2 * 0,0296 = 9,07 \text{ N}$$

$$\text{Peso} = m * g = 0,4 * 9,81 = 3,924 \text{ N}$$

Como se observa, la fuerza de sustentación es mayor que el peso de la paloma. Esto puede explicarse debido a la necesidad de un ascenso rápido (ángulo de 60° - Figura 16), lo que le permite una maniobra rápida de huida de sus depredadores.

Es decir, que la sustentación generada bajo las condiciones dadas es suficiente no solo para equilibrar su peso, sino que también podría permitirle ganar altura o realizar maniobras. Cabe señalar que en condiciones de vuelo en crucero, el ave es capaz de adaptar sus alas (área y ángulo de ataque) para ahorrar energía durante distancias largas.

Ahora, para aproximar el modelo a este resultado, debemos calcular la masa que podría sostener en función de su sustentación. El modelo tiene una superficie del ala proyectada de $0,015782 \text{ m}^2$ (valor extraído del diseño en SolidWorks), y por similitud con el prototipo:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L v^2 S = 0,5 * 1,225 * 0,8 * 25^2 * 0,015782 = 4,59 \text{ N}$$

$$\text{Peso} = F_L$$

$$m (\text{masa}) = \frac{F_L}{g} = 0,467 \text{ kg}$$

El ala en este TFG es capaz de levantar un peso del cuerpo de 467 gramos.

Al tomar en cuenta que el prototipo completo estará dotado de dos alas, entonces se podrá albergar un equipo de control y de videocámara no mayor a 930 (gr).

Esta fuerza está calculada por el caso de que el dron ya haya alcanzado la altura pertinente (posición vertical). Para el caso del despegue, se tomará la proyección de acuerdo a la Figuras 16 y 17, proponiendo la restricción de que entre menor sea ángulo de despegue mayor será la carga admisible que soportará.

3.10.2. Cálculos aerodinámicos: Relación entre el Arrastre y la Sustentación.

Se repite el caso con la fuerza de arrastre, para el caso real(prototipo).

En la bibliografía especializada se resume que una paloma presenta una relación C_L/C_D entre 2-8 [28]. Para nuestro modelo se recurre a ducho cálculo, considerando el valor anterior de $F_L = 4,59 N$, tendremos:

$$2 < \frac{F_L}{F_D} < 8$$

$$0,57 N < F_D < 2,3 N$$

Lo que implica que el prototipo deberá generar un arrastre mínimo para vencer esta fuerza de avance.

4. Construcción. Materiales empleados e IMPRESIÓN 3D. Pruebas.

El material empleado para la impresión 3D ha sido PLA cuyas propiedades mecánicas son[32]:

Propiedad	Valor
Módulo de Young	3.3 - 3.6 GPa
Coeficiente de Poisson	0.38 - 0.4
Límite elástico	55 - 72 MPa
Resistencia a tracción	47 - 70 MPa
Resistencia a compresión	66 - 86 MPa
Elongación	3 - 6 %
Dureza-Vickers	17 - 27 HV
Resistencia a fatiga para 10^7 ciclos	22.2 - 27.7 MPa
Tenacidad a fractura	3 - 5 MPa·m ^{0.5}

Con material PLA, tenemos que el peso del prototipo incluyendo el cuerpo y ala es de 320 gramos. Si comparamos con el resultado calculado en el *Apartado 3.10.1*(467 gramos) es un peso razonable para el diseño.

Pero, el material utilizado y la calidad de impresión no han sido óptimos, resultando en una superficie rugosa que incrementa la resistencia al movimiento. Las múltiples uniones

introducen fricciones acumulativas debido a la interacción entre los componentes, lo que impacta directamente en el desempeño estructural del ala, que termina soportando las consecuencias de estas pérdidas mecánicas.

A pesar de estas limitaciones, el diseño destaca por su robustez y un tamaño adecuado para su aplicación en una paloma. Este modelo representa una primera aproximación funcional para generar movimiento, aunque existe un margen significativo de mejora. Algunos componentes podrían fabricarse con materiales más ligeros o alternativos que reduzcan el peso y mejoren la eficiencia del sistema.

En términos de diseño mecánico, incorporar una rótula podría ser una solución eficiente para unificar dos movimientos, optimizando así el sistema. Sin embargo, dado que este es un modelo simple, las barras empleadas cumplen adecuadamente su función inicial. Para futuras iteraciones, sería recomendable optar por un material más ligero, que ofrezca un mejor balance entre peso y resistencia, favoreciendo el desempeño global del sistema.



Ilustración 1. Modelo impreso en 3D.

4.1. Pruebas aerodinámicas: Túnel de viento.

Para evaluar el diseño propuesto, el prototipo será sometido a pruebas experimentales en el túnel de viento para analizar su desempeño aerodinámico.

En la Ec.1 la presión dinámica se define como $P_D = \frac{1}{2} * \rho * v^2$ (P_D en Pa, v en $\frac{m}{s}$, ρ en kg/m^3), despejando la velocidad se obtiene :

$$v = \sqrt{\frac{2*P_D}{\rho}} \quad (\text{Ec.5}),$$

en nuestro caso, el valor de P_D se determinará experimentalmente a partir del tubo de Pitot analizando diferentes valores en mm y como indica la Ilustración 3, un 1 mm equivale a 2 Pa.

Al analizar en laboratorio el perfil del ala del ave se considera completamente plana como se observa en la Ilustración 2.

Las medidas realizadas y datos se recogen en la Tabla 1.

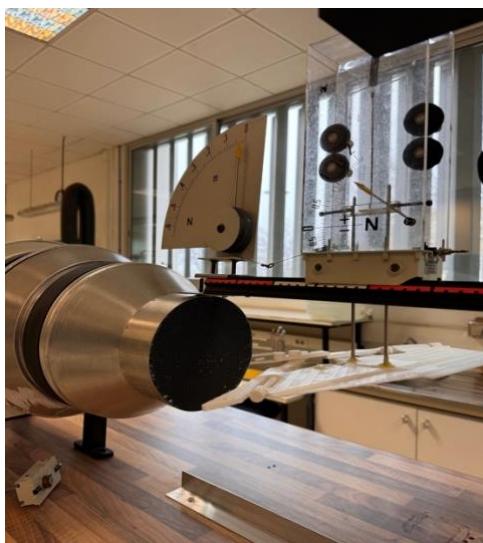


Ilustración 2. Prueba en túnel de viento para estudiar el comportamiento del perfil del ala del prototipo.



Ilustración 3. Sistema de medición de presión del Tubo de Pitot. Relación de 1 mm equivalente a 2 Pa.

Para el cálculo del C_D consideraremos la siguiente ecuación:

$$C_D = \frac{2P_D}{\rho v^2 A} \quad (\text{Ec.6})$$

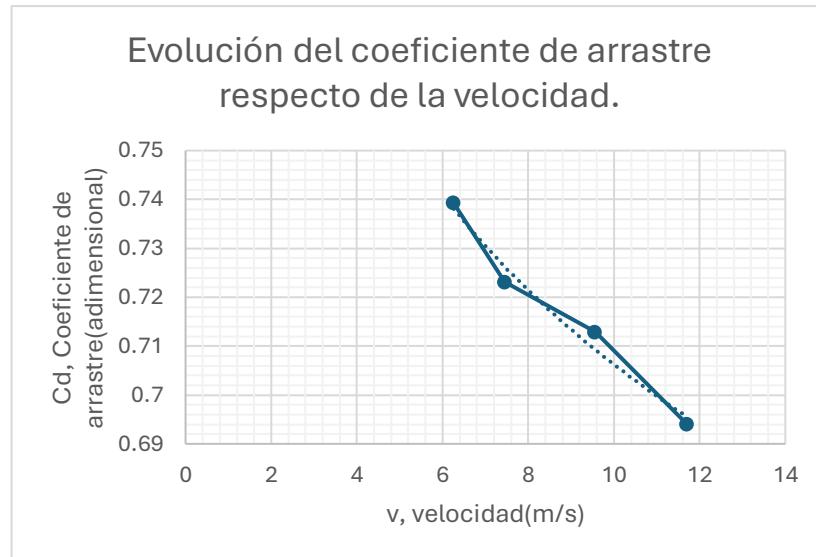
Tabla 1. Resultados experimentales para el prototipo del ala del ave en un túnel de viento. Datos experimentales.

mm	$F_D(N)$	$F_L(N)$	$v(\frac{m}{s})$ (Ec.5)	$C_D(\text{adim.})$ (Ec.6)
12	0,14	0,05	6,25	0,739
17	0,194	0,05	7,45	0,723
28	0,315	0,05	9,56	0,712
42	0,46	-0,1	11,71	0,693

El valor de F_L no es representativo del comportamiento del prototipo, porque había ineficiencias en los dispositivos de medición del laboratorio (el carro de medida tenía rozamiento y se quedaba atascado).

El análisis del coeficiente de arrastre (C_D) en función de la velocidad del prototipo muestra un comportamiento típico de un perfil plano en un túnel de viento. A medida que la velocidad (v) aumenta, C_D disminuye progresivamente. Este comportamiento lo observamos en la Gráfica 1. Esto se debe a que, a mayores velocidades, el flujo se adhiere mejor al perfil del ala, reduciendo la separación del flujo y el arrastre relativo [33].

Si continúa la tendencia hacia los 25 m/s a los que vuela la paloma podemos concluir que el prototipo tiene cierta aproximación, sin embargo, no se está teniendo en cuenta todo el cuerpo, ni las plumas, ni la cola(partes que son también fundamentales en la aerodinámica del ave).



Gráfica 1. Evolución del coeficiente de arrastre(C_D) respecto de la velocidad(v).

4.2 Análisis por elementos finitos.

Aplicando las fuerzas del apartado 3.10.1 y 3.10.2 en nuestro prototipo, analizaremos su comportamiento.

En el primer resultado se observa una distribución de tensiones Von Mises en la estructura del ala bajo las condiciones de carga y sujeción(uniones rígidas) establecidas(Illustración 4). El máximo nivel de tensiones alcanzado es de 13 MPa en la bisagra que une el ala externa. Estas tensiones son inferiores al límite elástico del material(55-72 MPa), por lo que no se espera una falla plástica en este caso.

El análisis de desplazamientos muestra que la estructura del ala presenta un desplazamiento máximo de 13.46 mm(Illustración 5), localizado en la región más alejada de los puntos de sujeción, lo que coincide con las zonas de mayor flexibilidad estructural.

Aunque el desplazamiento máximo podría considerarse elevado, es razonable suponer que el ala interna es el punto donde se concentra dicho desplazamiento, ya que no

constituye una articulación rígida. Su propia construcción permite que este punto sea el más adecuado para experimentar deformaciones.

Otro cálculo procedente sería el factor de seguridad, que se puede encontrar en el ANEXO B.

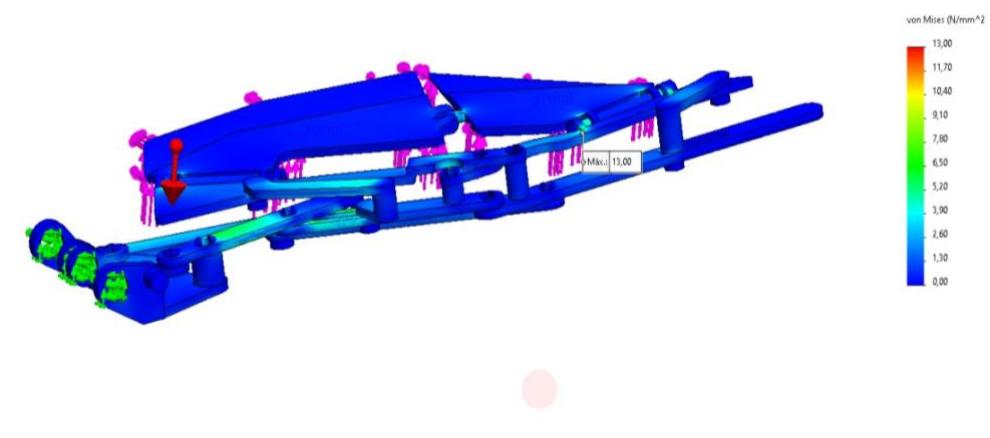


Ilustración 4. Tensión VON MISSES (Mpa). SolidWorks Simulation

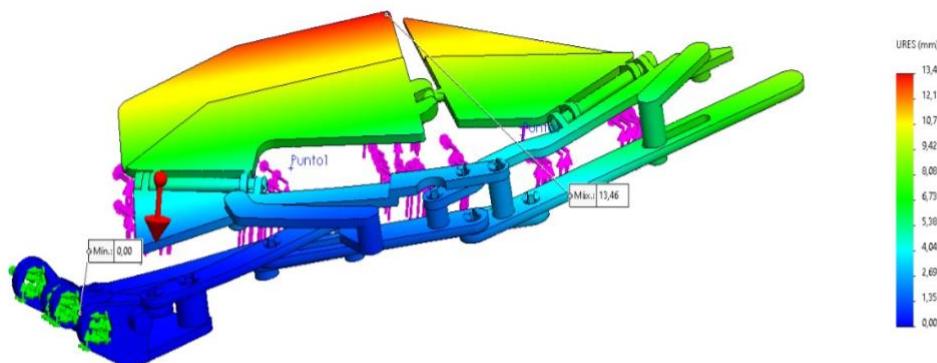


Ilustración 5. DESPLAZAMIENTO (mm). SolidWorks Simulation.

5. Conclusiones y trabajos futuros.

Como se ha destacado a lo largo de esta memoria, el presente trabajo representa una primera aproximación al estudio del movimiento del ala de la paloma, sentando las bases para futuros desarrollos más complejos.

En investigaciones futuras, sería posible extender este análisis al cuerpo completo del animal, incorporando mecanismos adicionales como motores de pequeño tamaño, baterías de larga duración, y procesadores o chips con algoritmos de machine learning implementados, que podrían permitir el uso de técnicas como RRT (Rapidly-exploring Random Trees) para optimizar rutas en el menor tiempo posible, todo ello constituiría finalmente el dron completo(no solo el ala) con morfología de paloma.

Este trabajo abre la puerta a múltiples líneas de investigación y desarrollo, las cuales ya están siendo exploradas por empresas tanto públicas (orientadas a la investigación y desarrollo científico) como privadas (como en la industria armamentística). Es importante tener en cuenta que este proyecto parte de un diseño inicial limitado por la disponibilidad de presupuesto y recursos, pero que constituye una base sólida para futuras mejoras y avances.

7. Referencias.

1. Claros Zelaya, R. A., Guevara Aguilar, A. E., & Pacas Cruz, N. R. (2016). *Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados* (Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador).
2. Von Holst. E, Herzog. K (1970) "Cómo vuelan los ornitópteros". Aviación y educación, 6. Volumen, diciembre. 1940, parte 3, páginas 24-26 Berlín-Charlottenburg.
3. Burgan, Michael (2009). Nikola Tesla: Inventor, Electrical Engineer. Mankato, Minnesota: Capstone.
4. Secretos de los pájaros. (s.f.). *Las ideas de Leonardo da Vinci sobre el vuelo*. Recuperado el 3 de julio de 2024, de <https://elsecretodelospajaros.net/las-ideas-de-leonardo-da-vinci-sobre-el-vuelo/>
5. Ferrer Achiaga, J., Yuste, D., & Casasús Pueyo, I. (2020). Los drones al servicio de la ganadería extensiva.
6. Coluccia, A., Fascista, A., Schumann, A., Sommer, L., Dimou, A., Zarpalas, D., ... & Rajashekhar, S. (2021). Drone vs. bird detection: Deep learning algorithms and results from a grand challenge. *Sensors*, 21(8), 2824.
7. Escartí, F (2016) "El libro del vuelo de las aves". Edit CreateSpace. PP 284.
8. Física y Química canal (2020) Como vuelan las aves. Sustentación de la cola. Aerodinámica. Avión canard. Vórtices de punta alas. Recuperado el 3 de julio de 2024, de <https://www.youtube.com/watch?v=KKZ7VIUrkv8>
9. MACRO WORLD. White dove flying - ULTRA SLOW MOTION. Recuperado el 4 de julio de 2024, de
10. Mis amigas las palomas. (2014) Blog "Sobre el plumaje y la muda" <http://www.misamigaslaspalomas.com/2011/08/13-sobre-el-plumaje-y-la-muda.html>
11. Gottrop, M. (2006). Drawing of idealised feathers in a bird's wing [Ilustración]. Wikimedia Commons.

12. Loros y Guacamayos. (s.f.). *Estructura de un ala de ave*. Recuperado de:
<https://lorosyguacamayos.com.ar/estructura-de-un-ala-de-ave/#anatomia basica del ala de un ave>
13. Real Federación Colombófila Española. (s.f.). *La muda*. Recuperado el 24 de noviembre de 2024, de <https://www.realfede.com/la-muda/>
14. Lyd. (2007, octubre 23). ALAS (I). Juan de la Cueva. Recuperado de <http://historicalsociety.blogspot.com/2010/03/alias-i.html>
15. Nature Video. (2020, febrero 12). *Birds gliding through bubbles reveal aerodynamic trick* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=2sh8_3-R90I
16. Mitos y Leyendas. (s.f.). *Dédalo e Ícaro | Historia de padre e hijo*. Recuperado de <https://www.mitostleyendas.net>
17. Ruiz, E. (Ed.). (2009). *Códice sobre el vuelo de los pájaros*. Patrimonio Ediciones.
18. Newton, I. (1687). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. London: Royal Society.
19. Bernoulli, D. (1738). *Hydrodynamica*. En *Principio de Bernoulli*. Recuperado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Hydrodynamica>
20. **Wikipedia**.(s.f.).*Aerodinámica*.Recuperadode
<https://es.wikipedia.org/wiki/Aerodin%C3%A1mica>
21. Wikipedia.(s.f.).*Ley de viscosidad de Newton*. Recuperado de
https://es.wikipedia.org/wiki/Fluido_newtoniano
22. Cjalzumit. (2023, 24 de julio). Caratteristiche dei profili alari. En Cjalzumit: Cjalait ce robis. Recuperado de <https://cjalzumit.wordpress.com/2023/07/24/caratteristiche-dei-profili-alarri/>
23. **Wikipedia**. (s.f.). *Ángulo de ataque*. Recuperado de
https://es.wikipedia.org/wiki/Ángulo_de_ataque
24. Autor desconocido. (1915). *Photograph of an airfoil in a wind tunnel, showing separated flow over the top surface* [Fotografía]. Wikimedia Commons. Recuperado de

http://www.dlr.de/100Jahre/DesktopDefault.aspx/tabcid-3300/5149_read-7460/gallery-1/gallery_read-Image.37.2921/

25. Holst, E. v., & Herzog, K. (s.f.). *Cómo vuelan los ornípteros: Cambio de marcha de las aves*. Recuperado de <http://www.ornithopter.de/english/gait.htm>
26. Around The World Media. (2016, septiembre 6). *White dove filmed with 2000fps ultra slow motion in Cluj* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=uw13Xkj0ZfI>
27. Birds of the World. (2020, 4 de marzo). Rock pigeon (*Columba livia*). Recuperado de <https://birdsoftheworld.org/bow/species/rocpig/cur/introduction?lang=es&printable>
28. Journal of Experimental Biology. (n.d.). *Table 3. Profile drag coefficient, maximum lift coefficient, maximum lift/drag ratio, slope of lift curve, and 1/πARe for bird wings and vulture primary feather*. Recuperado de https://journals.biologists.com/view-large/figure/17820980/JEXBIO_90_1_143TB3.tif
29. Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
30. Wikipedia. (n.d.). *Paloma mensajera*. Recuperado el 27 de noviembre de 2024, de https://es.wikipedia.org/wiki/Paloma_mensajera.
31. Usherwood, J. R., Hedrick, T. L., McGowan, C. P., & Biewener, A. A. (2005). Dynamic pressure maps for wings and tails of pigeons in slow, flapping flight, and their energetic implications. *Journal of experimental biology*, 208(2), 355-369.
32. Universitat Jaume I. (s.f.). *Propiedades del PLA*. Recuperado el 27 de noviembre de 2024, de <https://www.uji.es>
33. Anderson, J. D. (2010). *Fundamentals of aerodynamics* (5th ed.). McGraw-Hill Education.