



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

MECANISMOS DE ADAPTACIÓN DEL ALETEO DE UN ORNITÓPTERO ROBOTIZADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

BORIS ALBERTO GARRIDO ARÉVALO

**PROFESOR GUÍA:
JUAN CRISTOBAL ZAGAL MONTEALEGRE**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARTÍN ADAMS
BRUNO GROSSI CÓRDOVA**

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: BORIS GARRIDO ARÉVALO
FECHA: MARZO DEL 2015
PROF. GUÍA: JUAN CRISTOBAL ZAGAL

“Mecanismos de adaptación del aleteo de un ornitóptero robotizado”

Uno de los sueños más antiguos del hombre ha sido el de poder volar, es por esto que el reino animal ha sido una fuente inagotable de inspiración a la hora de crear vehículos aéreos, esto debido a que las aves son una máquina de volar diseñada por la naturaleza y perfeccionada durante millones de años, y hasta el día de hoy el ser humano no ha sido capaz de conseguir la versatilidad para realizar maniobras complejas, la estabilidad de vuelo y el poco consumo energético con que emprenden vuelo las aves, basta con ver que las alas y cola de las aves poseen un cambio de morfología mucho mayores a las alas y timones de la mayoría de los aviones existentes.

El objetivo de esta memoria es diseñar y construir un ornitóptero inspirado en las características morfológicas del halcón peregrino, y poder evaluar los beneficios de cambiar la morfología de sus alas mientras bate sus alas, en otras palabras, por implementar Shape Morphing. Para conseguir este objetivo se cuenta con la fuente de financiamiento FONDECYT (Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico), además de los equipos (entre ellos impresoras 3D) y software de fabricación disponibles en Laboratorio de Síntesis de Máquinas Inteligentes de la Universidad de Chile.

La metodología de esta memoria consiste primero en la recopilación de información con respecto a la morfología del halcón peregrino y también sobre la aerodinámica, materiales y construcción de ornitópteros similares. Con esto se procede a diseñar los componentes mecánicos y construirlos con la impresora 3D, y de diseñar la electrónica que permite el movimiento de batir las alas y permitir el cambio de la forma de sus alas.

Una vez construido se implementa algoritmo genético para poder encontrar la forma de bateo que produzca mayor empuje el cual es medido a través del desplazamiento del robot, ya que el ornitóptero se apoya en una estructura que permite su movimiento hacia adelante y atrás.

Finalmente se caracteriza el aleteo del ornitóptero que ha generado un mayor empuje utilizando el sensor OptiTrack (sistema de captura de movimiento), observando que esta forma de implementar Shape Morphing es semejante a la forma en que el halcón peregrino bate sus alas en vuelo.

Dedicatoria

El ser vivo nunca deja de jugar, solo cambia de juguete...

Sin lugar a dudas el camino de mi vida se ha destacado por estar siempre bien acompañado desde su comienzo y les aseguro que seguirá así hasta su final, es por esto que aprovecho esta oportunidad para demostrar una vez más a esos seres queridos mi gratitud y amor a ellos, ya que sin su ayuda lo que estarías leyendo ahora sería un trabajo más realizado solo porque debía hacerse, sin la calidad y el calor que implican un esfuerzo producto del “hacer lo que te apasiona, lo que te gusta”. En otras palabras, quiero dedicar este trabajo a ellos por permitirme entregar este aporte al mundo con una sonrisa en el alma, y dejar evidencia de que el camino que ha tomado mi vida ha sido decidido por las razones correctas.

Me encantaría partir dedicando este trabajo a Miguel Pavez Fuentealba y Heinz Gerdin Hunter por apoyarme y avivar las ganas del “aprender haciendo”. A Liliana Zurita I. por creer siempre en que volará, a Matías Inaipil L. por ponerme los pies en la tierra, a Cristóbal Vargas G. por estar siempre en las buenas y en las malas y a Gustavo Leiva F. por siempre intentar apoyar (también les agradezco el ser amigos de verdad en la universidad y sobre todo fuera de ella). Ya con una participación más directa en el proyecto a Gustavo, Pablo Silva G., Carlos Navarrete C. y Manuel Iglesias C. por ser parte del grupo que diseño y construyo del prototipo que permitió el nacimiento del robot de esta memoria, principalmente a Manuel por compartir las buenas y malas ideas que se nos ocurrían en nuestros proyectos y fuera de ellos, por ser el gran amigo que probablemente entiende mejor que nadie lo que significó “sufrir” mi camino universitario, y también por ser un gran apoyo para el presente proyecto. En todas las historias de vida existen los llamados “héroes anónimos” (si crees que no te invito a analizar tus historias nuevamente utilizando otros puntos de vista), es por ello que este trabajo también se lo dedico y con mucha alegría a Don Miguel encargado de la cortadora laser en el departamento de física, al guardia del primer piso del departamento de eléctrica y a la señora del aseo que antes estaba en el quinto de la torre central, y ahora en el departamento de mecánica en el edificio nuevo.

Finalmente dedico no tan solo esta memoria sino también mi vida a la fauna y flora, en especial a la Nicky y al Chipy por permitirme ver el mundo con esperanza, simpleza y alegría (es decir, la mitad media llena). También a mi papa ya que tiene la “culpa” de que elegiré ser Ing. eléctrico. Y obviamente también a mi mama (en especial dedicado a mi mama), por enseñarme a ser feliz, por hacerme sentir que todos los meses me gano el Kino o el Loto, por el amor incondicional que demuestra todos los días a sus 3 hijos, por el empujón que me ha permitido llegar a donde estoy y seguir avanzando, por enseñarme a apreciar lo que verdaderamente importa en la vida (y permitió escribir esta dedicatoria), y una infinidad de cosas más las cuales agradeceré por siempre.

No olvidare nunca a mis tías, abuelitas, primas y primos, a quienes también va dedicado esto y mucho más.

Como ves en una sola hoja no caben los sentimientos por los que este proyecto me ha hecho viajar, pero lo que en realidad me importa es que rescates solo una cosa de mi experiencia (una de las infinitas cosas que me enseñó mi mama): se puede ser feliz sin lastimar al de al lado, es más, tu felicidad puede ser alimentada por la felicidad de los demás (incluye a los animales, ojo).

Agradecimientos

El presente trabajo fue financiado parcialmente por FONDECYT.

Especiales agradecimientos al profesor Hector Augusto A. por su apoyo a lo largo de mi vida universitaria, al profesor Juan C. Zagal por la enorme oportunidad entregada la cual se traduce en este trabajo de memoria, al profesor Martín Adams por tener que vencer la brecha comunicacional del lenguaje, al profesor Bruno Grossi por su guía y al coordinador de laboratorios Miguel Patiño por su ayuda y enseñanzas claves para este proyecto.

También se extienden mis agradecimientos a Juan Esteban Salazar y al Dr. Michel Sallaberry por su ayuda desinteresada motivada por su pasión.

Tabla de contenido

RESUMEN	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
Tabla de contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de ecuaciones	v
Índice de figuras	vi
Capítulo 1.- Introducción	1
Capítulo 2.- Contextualización	2
2.1. El vuelo de las aves.....	2
2.1.1. Sustentación y Empuje.....	2
2.1.2. Alas	5
2.1.3. El Halcón Peregrino.....	8
2.2. Shape Morphing.....	11
2.3. Ornitóptero.....	15
2.3.1. Electrónica	15
2.3.2. Bio-Inspiración	17
2.4. Algoritmo genético (AG).....	20
2.5. OptiTrack.....	22
Capítulo 3.- Metodología	23
Capítulo 4.- Diseño y construcción	24
4.1. Parámetros de Diseño	24
4.2. Diseño solución.....	25
4.2.1. Torso	25
4.2.2. Alas	29
4.2.3. Electrónica del ornitóptero.....	32
4.3. Construcción del ornitóptero	37
Capítulo 5.- Mediciones	48
5.1. Montaje experimental	48
5.2. Implementación del AG.....	50
5.3. Implementación del OptiTrack	54
Capítulo 6.- Análisis de resultados	56
6.1. Resultados.....	56

6.1.1.	AG optimizando el desplazamiento	56
6.1.2.	Registros del OptiTrack	60
6.2.	Análisis	66
Capítulo 7.-	Conclusiones y Recomendaciones	70
Bibliografía		72
Anexos		74
	Anexo A: Aleteo de un Halcón peregrino.	74

Índice de tablas

Tabla 1:	Características biológicas del halcón peregrino.	9
Tabla 2:	Investigaciones relacionadas con <i>planform alternation</i>	13
Tabla 3:	Investigaciones relacionadas con <i>out-of-plane transformation</i> del ala.	13
Tabla 4:	Investigaciones relacionadas con <i>airfoil profile adjustment</i> del ala.	14
Tabla 5:	Parámetros principales del diseño del ornitóptero.	24
Tabla 6:	Parámetros de los perfiles alares.	29
Tabla 7:	Parámetros del motor brushless del ornitóptero.	32
Tabla 8:	Parámetros del ESC del ornitóptero.	32
Tabla 9:	Parámetros de servos en las muñecas del ornitóptero.	32
Tabla 10:	Parámetros de servos en los hombros del ornitóptero.	33
Tabla 11:	Parámetros del Arduino Due.	33
Tabla 12:	Parámetros batería LiPo del Ornitóptero.	33
Tabla 13:	Individuos elegidos por el AG he implementados por el ornitóptero.	56,57,58
Tabla 14:	Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 36 (010011101).	66
Tabla 15:	Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 79 (110000100).	66
Tabla 16:	Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 65 (101001010).	67
Tabla 17:	Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 26 (010000101).	67
Tabla 18:	Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 22 (010000000).	67
Tabla 19:	Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 23 (010000001), mejor fitness.	67
Tabla 20:	Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 59 (100011101), peor fitness.	67

Índice de ecuaciones

Ecuación 1	3
Ecuación 2	3
Ecuación 3	3
Ecuación 4	6
Ecuación 5	7

Índice de figuras

Figura 1: Velocidad y presión ejercida en un perfil alar.	2
Figura 2: Ángulo de ataque.	3
Figura 3: Movimientos de las alas de un ave durante un ciclo de aleteo [12].	4
Figura 4: Fuerzas de sustentación, arrastre y empuje en función del ángulo de ataque y extensión del ala [14].	4
Figura 5: Parametrización del perfil alar.	5
Figura 6: Aves con distintas RA. (A) Albatros, (B) Halcón, (C) Faisán y (D) Paseriformes.	7
Figura 7: Espesor máximo (t) y cuerda (c) de una sección del ala.	7
Figura 8: Halcón Peregrino.	8
Figura 9: Modificación de la forma de las alas de un halcón peregrino en picada [11].	9
Figura 10: Músculos utilizados durante el vuelo de un halcón peregrino.	10
Figura 11: Musculatura y esqueletos utilizados al volar.	10
Figura 12: Formas de las alas desde una vista superior. (A) Planeando, (B) Aleteando y (C) Buceando o en picada.	11
Figura 13: Una clasificación de Shape morphing del ala: <i>planform alternation</i> , <i>out-of-plane transformation</i> , y <i>airfoil profile adjustment</i>	12
Figura 14: <i>Planform alternation</i> puede lograrse mediante el cambio de envergadura (arriba a la izquierda), el cambio de longitud de la cuerda (arriba a la derecha), y el cambio del ángulo de barrido (abajo).	12
Figura 15: <i>Out-of-plane morphing</i> indica la torsión del ala (parte superior izquierda), <i>Chord-wise bending</i> del ala indica las deformaciones de la línea de curvatura media (arriba a la derecha), y <i>Span-wise bending</i> del ala indica una flexión lateral (abajo).	14
Figura 16: Perfil aerodinámico puede ser variada sin un cambio importante en la línea media de la comba.	14
Figura 17: A la izquierda vista aérea y a la derecha vista lateral del MAV.	17
Figura 18: A la izquierda está el Ornitóptero Mariposa, y a la derecha esta uno de las alas construidas.	18
Figura 19: Morfología del mini-UAV, los paneles de las alas y sus grados de libertad.	19
Figura 20: Small Bird.	19
Figura 21: Ornitóptero Smart Bird.	19
Figura 22: Procedimiento del algoritmo genético.	20
Figura 23: Individuo genético binario.	21
Figura 24: V120:Trio.	22
Figura 25: Ejemplo de implementación del OptiTrack en una persona.	22
Figura 26: Diseño ornitóptero propuesto.	25
Figura 27: Esqueleto del fuselaje. Izquierda superior vista diagonal 3 piezas, derecha superior vista diagonal 6 piezas, he inferior vista lateral.	26
Figura 28: Fuselaje con componentes eléctricos principales.	26
Figura 29: A la izquierda el sistema de engranajes con motor brushless, a la derecha el engranaje unido al hombro del ornitóptero.	27
Figura 30: Sistema completo de bateo de alas.	27
Figura 31: Posición de alas arriba, posición de planeo y posición de alas abajo respectivamente.	28
Figura 32: Perfil 1, 2 y 3 de izquierda a derecha.	29
Figura 33: Estructura pantógrafo que une y manipula la posición de los perfiles.	30

Figura 34: Comparación entre esqueleto del ala de un ave y la estructura pantógrafo del ornitóptero.	30
Figura 35: Estructura completa del ala.....	30
Figura 36: Acción de contracción y expansión del ala respectivamente.	31
Figura 37: Acción de modificación del ángulo de ataque.	31
Figura 38: C2028 Micro brushless Outrunner 1400kv.	32
Figura 39: TURNIGY Basic 18A v3.1 Speed Controller.....	32
Figura 40: Emax digital servo es 9356.	32
Figura 41: HS-815BB Mega Sail Control Servo.	33
Figura 42: Placa Arduino Due.	33
Figura 43: ZIPPY Compact 850mAh 2S 25C Lipo Pack.	33
Figura 44: Batería Hitec NiMh.....	34
Figura 45: Sensor de efecto Hall.	34
Figura 46: Imanes en el engranaje del motor brushless y en el engranaje que se comunica con el hombro respectivamente.....	34
Figura 47: Posición de imanes.....	35
Figura 48: Esquemático del ornitóptero.	36
Figura 49: A la izquierda se ven los rodamientos en articulaciones, a la derecha la unión entre ellos.....	37
Figura 50: A la izquierda superior se muestra el Perfil 1, a la izquierda inferior el Perfil 3. A la derecha se muestra las 2 piezas que juntas forman el Perfil 2.....	38
Figura 51: A la izquierda se muestra la estructura pantógrafo, el hombro y los perfiles separados. A la derecha el ala completamente armada.	38
Figura 52: Engranajes unidos al fuselaje y a los hombros.	39
Figura 53: Sistema de rotulas.	39
Figura 54: Sistema de elásticos.	40
Figura 55: Estructura del ornitóptero completa.	41,42
Figura 56: Molde de plumavit del torso del ornitóptero.....	43
Figura 57: Molde de plumavit del ala derecha del ornitóptero.....	43
Figura 58: Molde con masilla mágica	44
Figura 59: Molde del torso de fibra de carbono en el molde.....	44
Figura 60: Molde del Perfil 1 de fibra de carbono en el molde.....	44
Figura 61: Moldes de fibra de carbono definitivos para el ornitóptero.	45
Figura 62: Ornitóptero robotizado bio-inspirado.	46,47
Figura 63: Construcción del montaje experimental.....	48
Figura 64: Estructura móvil diseñada, construida e implementada en el ornitóptero.	49
Figura 65: Contrapeso colgando en la estructura móvil.....	49
Figura 66: Discretización del ciclo de aleteo en función de las detecciones del sensor de efecto Hall en el engranaje del ornitóptero.	51
Figura 67: Diagrama de movimientos del ornitóptero en función de los individuos del AG.....	52
Figura 68: Ubicación de los puntos reflectantes en el ornitóptero y clasificación de puntos de interés.	54
Figura 69: OptiTrack sobre el ornitóptero.....	54
Figura 70: Puntos reflectantes detectados por el OptiTrack, con las alas abiertas y cerradas.....	55
Figura 71: Desempeño del AG.	59
Figura 72: Movimientos del individuo N° 23 registrados por el OptiTrack y mostrados en SolidWorks.	60,61,62
Figura 73: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 36.	63

Figura 74: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 79.	63
Figura 75: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 65.	64
Figura 76: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 26.	64
Figura 77: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 22.	65
Figura 78: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 23.	65
Figura 79: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 59, peor fitness.	66
Figura 80: A la izquierda una secuencia de aleteo registrada con el OptiTrack del ornitóptero, y a la derecha una secuencia de aleteo real de un halcón peregrino.	74,75,76

Capítulo 1.- Introducción

En la actualidad es común ver procedimientos que antes eran hechos por el hombre ahora están siendo ejecutados por máquinas, ya que gracias a estas se ahorra tiempo y materiales obteniendo una mayor eficiencia garantizando una misma calidad en cada ejecución. Gracias a estas ventajas no es de extrañar que sea de interés utilizar impresoras 3D para construir robots que permitan ayudar en las investigaciones automatizando o ejecutando determinadas acciones, tal como es el caso de este trabajo que consiste en indagar en los misterios que yacen en los procedimientos ejecutados por el reino animal, los cuales han sido evolucionados durante millones de años convirtiéndose en una inspiración para el hombre.

Motivado por lo anterior, los objetivos planteados para este trabajo son los siguientes:

- Diseñar y construir un ornitóptero que se inspire en características morfológicas del halcón peregrino.
- Diseñar y construir un sistema motriz que transmita de manera eficiente la energía a las alas.
- Implementar algún sistema automático que permita optimizar el empuje en el ornitóptero construido.
- Caracterizar el comportamiento aéreo-elástico del ornitóptero mediante sensores de captura de movimiento.

Se espera que al implementar deformaciones del ala en forma activa en el ornitóptero se observen pistas que indiquen las ventajas de su uso tales como un mayor empuje, para conseguir esto se utiliza las impresoras 3D para construir el ornitóptero y un soporte móvil que permite desplazar al robot en función del empuje generado por el movimiento de sus alas; luego se implementa algoritmo genético para encontrar la secuencia de bateo que maximice el empuje del robot; para finalmente medir el desplazamiento del robot y con el sensor OptiTrack caracterizar sus movimientos.

Capítulo 2.- Contextualización

2.1. El vuelo de las aves

El primer desafío que se debe afrontar a la hora de diseñar el ornitóptero robotizado de esta memoria consiste en entender como las aves vuelan y porqué. Básicamente pueden emprender vuelo gracias a las fuerzas de sustentación y de empuje producidas por el bateo de sus alas y la peculiar forma de sus perfiles alares.

2.1.1. Sustentación y Empuje

Un perfil aerodinámico, es un cuerpo que tiene un diseño determinado con el fin de aprovechar al máximo las fuerzas que se originan por la variación de velocidad y presión cuando este perfil se sitúa en una corriente de aire.

El ala de las aves posee un perfil aerodinámico que fuerza al flujo de aire que discurre por arriba de esta viajar más rápido en comparación al que discurre por debajo generando una fuerza hacia arriba, esto se debe al efecto Venturi y al teorema de Bernoulli. El efecto Venturi dice que las partículas de un fluido viajan más rápido en espacios estrechos y el teorema de Bernoulli dice que la presión decrece en la medida que la velocidad del fluido se incrementa. Por lo tanto, al generar la parte de arriba del perfil alar un espacio más estrecho que el generado de abajo, la velocidad de arriba es mayor que la de abajo implicando una menor presión arriba y una mayor presión abajo (tal como muestra la Figura 1) generando una fuerza hacia arriba.

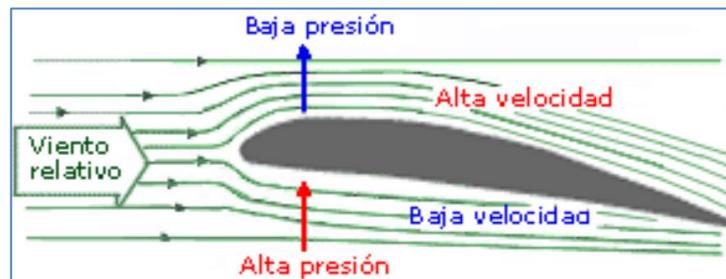


Figura 1: Velocidad y presión ejercida en un perfil alar.

Las aves mientras vuelan tienden a mantener ligeramente inclinadas sus alas con respecto a la dirección de desplazamiento para aprovechar al máximo el perfil aerodinámico de estas, esta inclinación denominada “ángulo de ataque” (representada en la Figura 2) es la que permite la generación de sustentación. Si se aumenta el ángulo de ataque se aumenta el estrechamiento en la parte de arriba del ala disminuyéndolo abajo, lo que implica una mayor velocidad arriba que abajo y por lo tanto aumenta la fuerza generada hacia arriba, por traducirse en una presión mayor abajo en comparación a la presión arriba del ala.

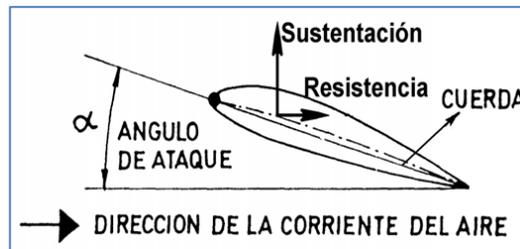


Figura 2: Ángulo de ataque.

Sin embargo las fuerzas que permiten el vuelo no solo depende del ángulo de ataque, la ecuación 1 [1, 3] muestra la fuerza de sustentación (L) en función de la densidad del fluido (ρ), la velocidad de vuelo (U), la superficie alar (A) y del coeficiente de sustentación C_l del ave.

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_l \quad (1)$$

Como muestra la Figura 2 además de la sustentación el ángulo de ataque también genera una resistencia aerodinámica (D) que afecta al ave, el cual está en función de casi los mismos parámetros exceptuando el coeficiente de arrastre (C_d), tal como muestra la ecuación 2.

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_d \quad (2)$$

Los coeficientes C_l y C_d dependen del Número de Reynolds (R_e), el Número de Mach y del ángulo de ataque. Las diferencias de comportamiento de objetos a diversas velocidades se suelen expresar con el Número de Reynolds, un número sin dimensiones que describe las relaciones entre viscosidad e inercia en un fluido, es decir, relaciona la densidad del aire; viscosidad dinámica del fluido μ ; velocidad del fluido v_s y longitud característica del sistema L en una expresión adimensional (puede representar el diámetro del tubo por el que pasa el fluido, o la altura a la que vuelan los perfiles alares), tal como se muestra en la ecuación 3.

$$R_e = \frac{\rho v_s L}{\mu} = \frac{v_s L}{\nu} \quad (3)$$

Para lograr el vuelo el ave bate sus alas desplazándolas verticalmente mientras que éste lo hace horizontalmente, e inclinando sus alas para conseguir distintos ángulos de ataque, con esto puede producir fuerzas de sustentación y de empuje suficientes provenientes de la suma de las fuerzas otorgadas por el movimiento de sus alas más la que se produce por el paso del aire a través de éstas, además, también cierra sus alas al subirlas para disminuir la fuerza de roce con el aire, y las abre al bajarlas para aumentar el empuje y sustentación conseguida, tal como muestra la Figura 3.

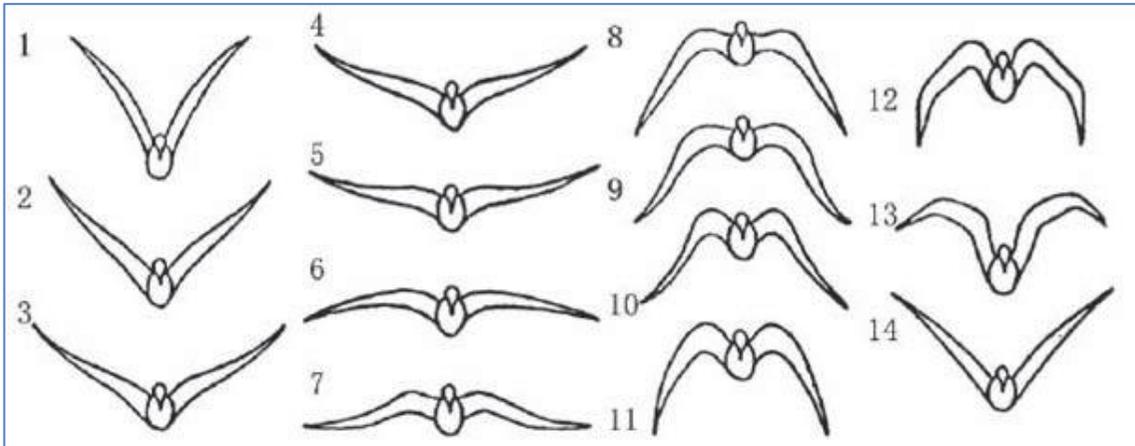


Figura 3: Movimientos de las alas de un ave durante un ciclo de aleteo [12].

Mientras se produce el aleteo hacia abajo, la torsión del ala produce que la sustentación generada por la parte exterior del ala se encuentre angulada hacia delante, generando de esta forma un empuje que desplaza el ave hacia delante, sin la pérdida de altitud.

Cuando el ala se desplaza hacia arriba, la parte exterior de ésta se tuerce alineándose de manera de reducir lo más posible la resistencia que genera con el aire, además las alas se flectan ligeramente de manera de reducir el área que produce arrastre [12].

De esta forma al controlar el ángulo de ataque durante el bateo de sus alas, puede controlar el avance cuando baja sus alas, las fuerzas de roce mientras las sube, y la sustentación que permite su elevación, tal como lo muestra la Figura 4.

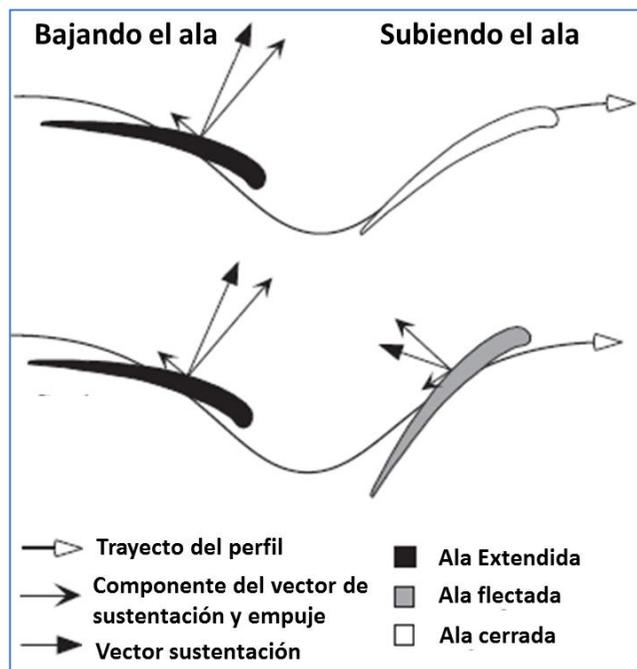


Figura 4: Fuerzas de sustentación, arrastre y empuje en función del ángulo de ataque y extensión del ala [14].

2.1.2. Alas

Las alas son las protagonistas cuando se habla del vuelo de las aves, y es evidente que existen muchas formas y tamaños dependiendo del tipo de ave o avión. Los conocimientos descritos tienen como objetivo poder construir un perfil alar (forma del ala) que cumpla los requerimientos aerodinámicos que permitan una sustentación y empujes suficientes para que el vehículo aéreo pueda emprender vuelo, en otras palabras, poder definir los parámetros de interés que determinan la forma de un perfil alar [12], los que se pueden observar en la Figura 5.

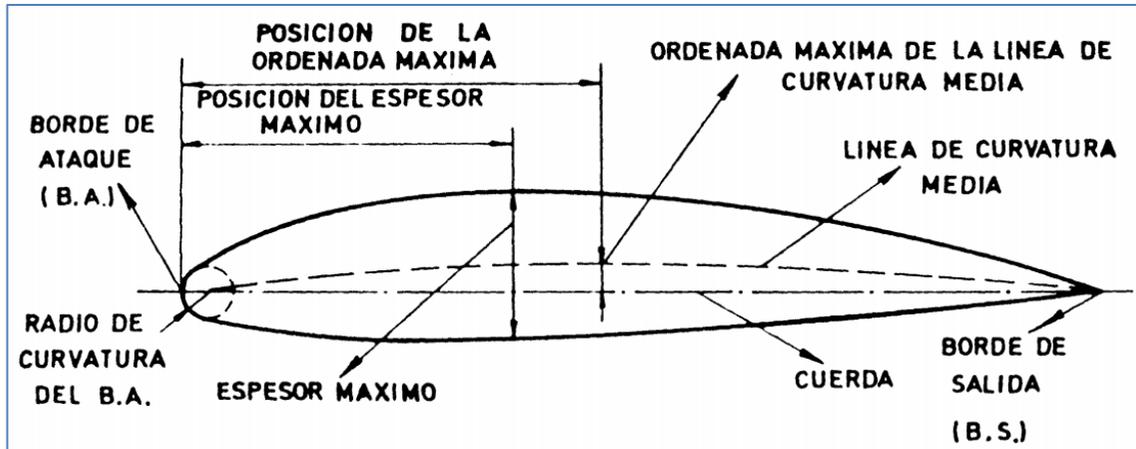


Figura 5: Parametrización del perfil alar.

A continuación se describen cada uno de los parámetros de interés:

- **Cuerda:** Es la línea recta que une el borde de ataque con el borde de fuga. Es una dimensión característica del perfil.
- **Extradós:** parte superior del perfil.
- **Intradós:** parte inferior del perfil.
- **Línea de curvatura media:** Línea equidistante entre el extradós y el intradós. Esta línea "fija" la curvatura del perfil. Si la línea de curvatura media "cae" sobre la cuerda (como en la Figura 5) se dice que la curvatura es positiva, si cae por debajo, negativa, y si va por debajo y por arriba, doble curvatura.
- **Ordenada máxima:** Es la máxima distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda del perfil. El valor suele darse en porcentaje de la cuerda.
- **Espesor máximo y posición:** Son dos características importantes, que se expresan en porcentaje de la cuerda. El valor varía desde un 3% en los perfiles delgados hasta un 18% en los más gruesos.
- **Radio de curvatura del borde de ataque:** Define la forma del borde de ataque y es el radio de un círculo tangente al extradós e intradós, y con su centro situado en la línea tangente en el origen de la línea de curvatura media.

Por lo que existen dos formas de diseñar un perfil alar, la primera consiste en especificar los parámetros mencionados anteriormente; o la segunda que suele ser la más usada, consiste en elegir un perfil alar de la base de datos NACA. Los perfiles NACA son perfiles aerodinámicos de alas de aviones desarrollados por el Comité Consultivo Nacional para la Aeronáutica (NACA). La forma de las superficies de los perfiles NACA se describe usando una serie de dígitos después de la palabra “NACA”, por lo general, estos dígitos son de 4 o 5 números, existiendo algunas modificaciones especiales. Si se trata de 4 dígitos, estos definen los siguientes parámetros:

- Primer dígito describe máximo camber (asimetría entre extradós e intradós) como porcentaje de la cuerda
- Segundo dígito describe la distancia de máxima curvatura del borde de ataque del perfil aerodinámico en decenas de porcentajes de la cuerda.
- Las dos últimas cifras describen espesor máximo de la superficie de sustentación como porcentaje de la cuerda.

Sin embargo, si se tratan de 5 dígitos estos definen los siguientes parámetros:

- La primera cifra, multiplicada por 0.15, da el coeficiente de sustentación por sección.
- La segunda y tercera cifra, dividida por 2, da la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque como porcentaje de la cuerda.
- Los dos últimos dan la máxima curvatura del perfil como porcentaje de la cuerda.

Con respecto al tamaño se suele utilizar el concepto “razón de aspecto” que es una medida adimensional de cuán larga y delgada es un ala de punta a punta, la cual está representada por la ecuación 5.

$$RA = \frac{b^2}{A} \quad (4)$$

Donde RA es la razón de aspecto, b es la envergadura del ala del ave y A es la superficie alar. La RA de las alas de las aves varía desde aproximadamente 1.5 a 18, siendo las de alta RA las alas de los halcones, golondrinas, chorlitos y otros especialistas de vuelo de alta velocidad, y casos muy elevados de RA como el del albatros por poseer alas planeadoras; la mayoría de los paseriformes, palomas, pájaros carpinteros, y aves de caza poseen una baja RA por ser alas diseñadas para un despegue y vuelo rápido pero no para mantener altas velocidades. Una relación de aspecto menor normalmente significa que el ave tiene un momento de inercia menor y por lo tanto es más fácil para que el ave volteé, por lo que el ave tiene mayor maniobrabilidad. En conclusión, el ala perfecta será aquella que puede cambiar la relación de aspecto en vuelo, con altas RA para bajas velocidades y con bajas RA para altas velocidades. En la Figura 6 se muestran 3 alas con distinta relación de aspecto

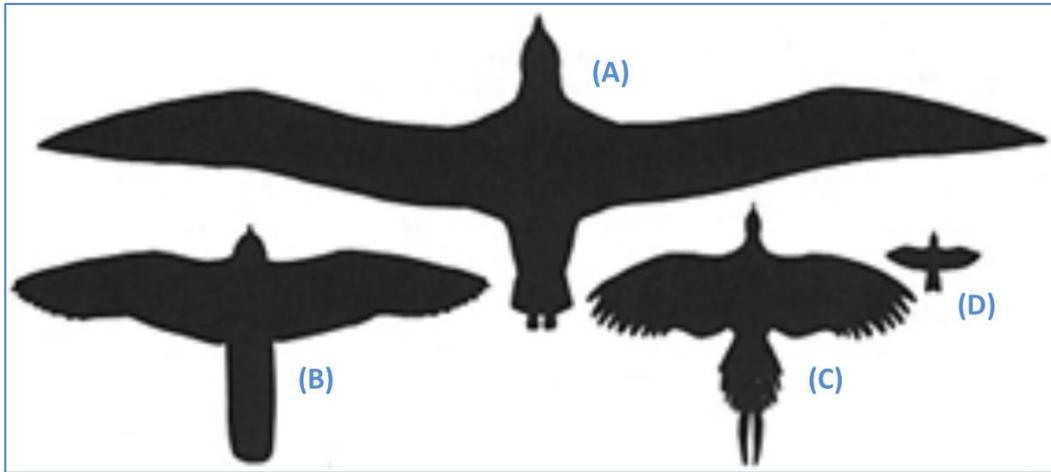


Figura 6: Aves con distintas RA. (A) Albatros, (B) Halcón, (C) Faisán y (D) Paseriformes.

Además de estas características, también existe el hecho de que las partes del ala que están más cerca del torso son más gruesas que las partes cercanas a la punta de esta. Una forma de parametrizar este fenómeno consiste en utilizar el espesor relativo, de este modo se suele hablar de perfiles gruesos, medios y delgados (ecuación 6) [5].

$$\tau = \frac{t}{c} \quad (5)$$

El espesor relativo (τ) representa una relación entre el espesor máximo del perfil alar (t) y la cuerda del perfil alar (c), tal como muestra la Figura 7. De este modo se habla de perfiles gruesos si $\tau > 0.14$, perfiles de espesos medio si $0.07 \leq \tau \leq 0.14$ y finalmente a perfiles delgados si $\tau < 0.07$.

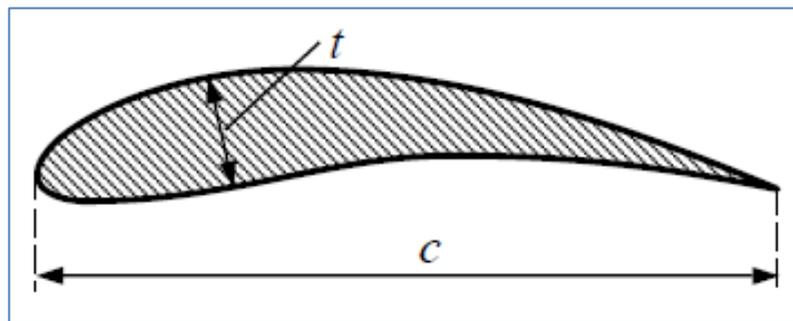


Figura 7: Espesor máximo (t) y cuerda (c) de una sección del ala.

2.1.3. El Halcón Peregrino

El halcón peregrino (Figura 8) es una especie de ave falconiforme de la familia Falconidae. Es un halcón grande, con la espalda de color gris azulado y la parte inferior blanquecina con manchas oscuras; la cabeza es negra y cuenta con una amplia y característica bigotera también de color negro.



Figura 8: Halcón Peregrino.

Esta ave es de especial interés puesto que posee el record de ser el animal más rápido del planeta, puede volar a una velocidad crucero de 100 [km/h], pero cuando caza efectuando un ataque en picada puede alcanzar más de 300 [km/h], esto ya que posee amplias y hendidas alas con un pronunciado combamiento, que suponen una respuesta adecuada para poder maniobrar rápidamente, en la Figura 9 se puede apreciar como el halcón peregrino maniobra cambiando la forma de sus alas para hacerse más aerodinámico y obtener mayor velocidad a medida que desciende.

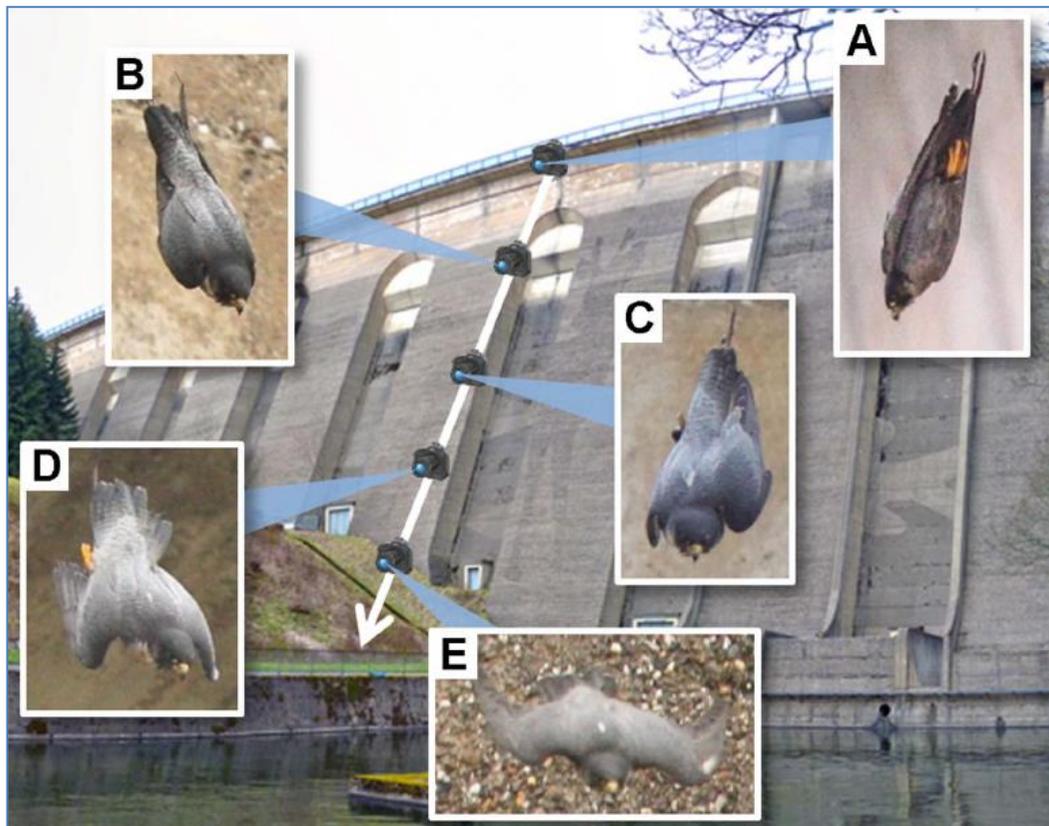


Figura 9: Modificación de la forma de las alas de un halcón peregrino en picada [11].

Como en otras aves de presa, la hembra es de mucho mayor tamaño que el macho. A continuación se muestran en la Tabla 1 algunas de las principales características biológicas de interés [21].

Tabla 1: Características biológicas del halcón peregrino.

Parámetro	Unidad	Magnitud
Longitud	<i>cm</i>	[34 – 58]
Envergadura	<i>cm</i>	[74 – 120]
Cola	<i>cm</i>	[13 – 22]
Cuerda del ala mayor	<i>cm</i>	[26 – 40]
Relación de aspecto		~ 7.7
Peso	<i>g</i>	[800 - 1500]
Angulo de bateo (vuelo normal)	°	[64 - 136]
Frecuencia de bateo (vuelo normal)	<i>Hz</i>	4.32
Área del ala	<i>m</i> ²	~0.149

Para poder lograr las maniobras de vuelo que caracterizan al halcón peregrino, este posee unos potentes músculos en el pecho y alas tal como se muestra en la Figura 10.



Figura 10: Músculos utilizados durante el vuelo de un halcón peregrino.

El músculo supracoracoideo trabaja usando un sistema parecido al de poleas para levantar las alas mientras que los pectorales proveen el poderoso golpe hacia abajo, tal como muestra la Figura 11.

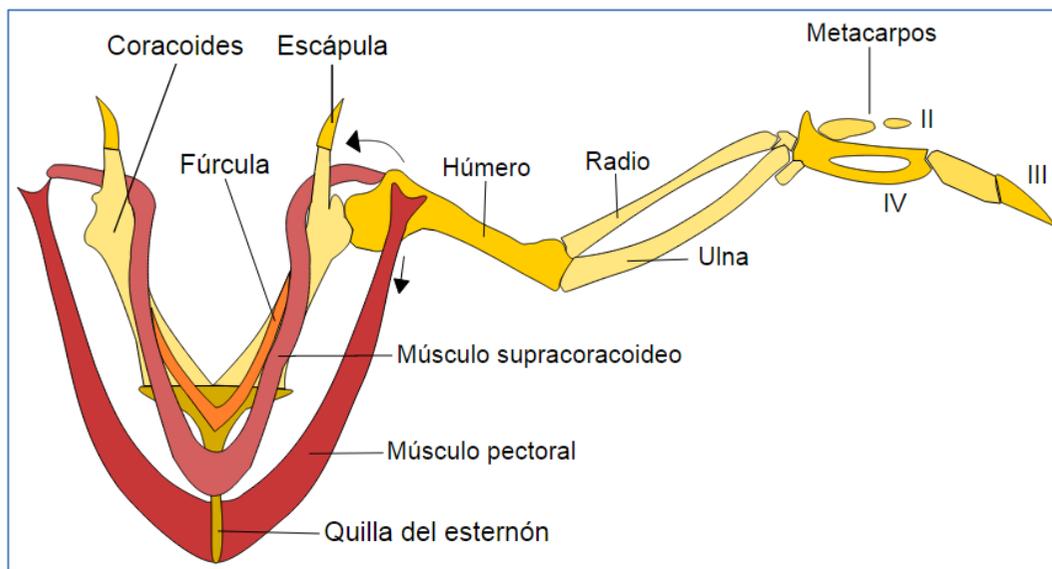


Figura 11: Musculatura y esqueletos utilizados al volar.

2.2. Shape Morphing

Los diferentes tipos de aves tienen diferentes formas de alas, por lo que los anchos de las cuerdas de sus alas son diferentes, incluso para la misma ave en diferentes situaciones de vuelo, la forma de sus alas puede ser cambiada mediante la extensión o la superposición de las plumas, como se muestra en la Figura 12 [14].

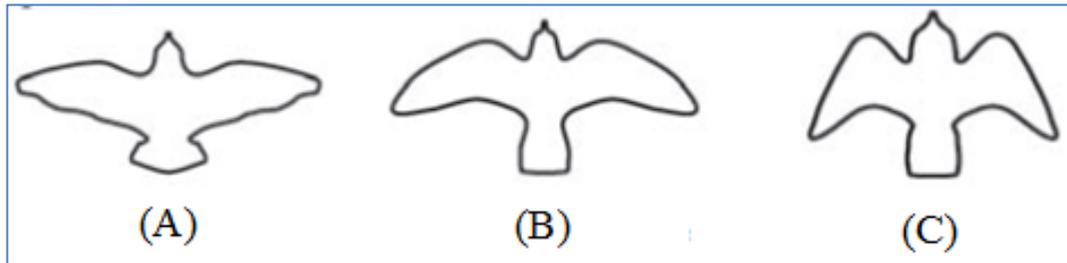


Figura 12: Formas de las alas desde una vista superior. (A) Planeando, (B) Aleteando y (C) Buceando o en picada.

En el campo de la aeronáutica, “Shape morphing” se ha utilizado para identificar a los vehículos aéreos que se someten a ciertos cambios geométricos para mejorar o adaptar sus perfiles de ala y cola, inspirado en el caso de las aves. No hay ni una definición exacta ni un acuerdo entre los investigadores sobre el tipo o el alcance de los cambios geométricos necesarios para calificar una aeronave por el título Shape morphing. Sin embargo, hay un acuerdo general en que las superficies de control con bisagras convencionales o dispositivos de alta elevación, tales como aletas o listones no pueden ser considerados como morphing [16].

Shape morphing se pueden clasificar en tres tipos principales: *planform alternation*, *out-of-plane transformation*, y *airfoil profile adjustment* (Figura 13). En la categoría de *planform alternation*, se discuten las técnicas de manipulación de la envergadura; como el cambio del tamaño de la amplitud y longitud de la cuerda; y enfoques para alterar el barrido del ala. En la categoría de *out-of-plane transformation*, se incluyen cambios en la cuerda, cambios de inclinación y del largo de la envergadura, el enfoque más notable en esta categoría es la torsión del ala. La categoría de *airfoil profile adjustment* resume los diseños que cambian el perfil de la piel (por ejemplo, el espesor) que no cambian significativamente la curvatura del ala.

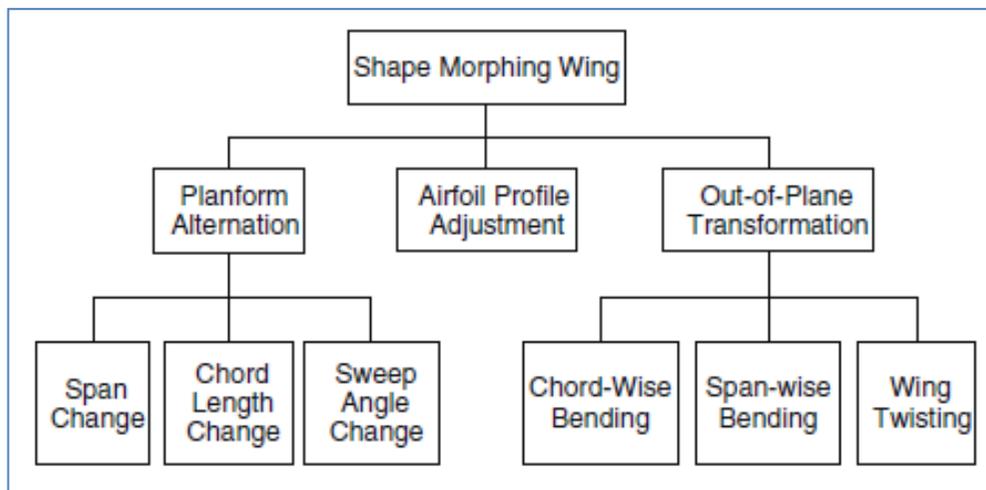


Figura 13: Una clasificación de Shape morphing del ala: *planform alternation*, *out-of-plane transformation*, y *airfoil profile adjustment*.

Planform alternation del ala está relacionada con el cambio de tamaño de la amplitud y longitud de la cuerda, y con el cambio del ángulo de barrido, como se muestra en la Figura 14.

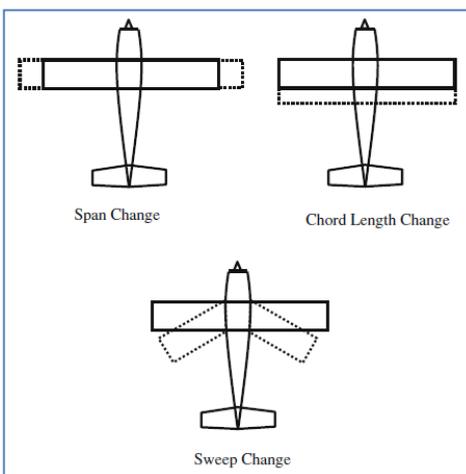


Figura 14: *Planform alternation* puede lograrse mediante el cambio de envergadura (arriba a la izquierda), el cambio de longitud de la cuerda (arriba a la derecha), y el cambio del ángulo de barrido (abajo).

Combinaciones de las anteriores también son posibles. Algunas investigaciones relacionadas se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Investigaciones relacionadas con *planform alternation*.

Author	Morphed geometry	Actuator	Skin	Prototype?	Wind tunnel test?	Flight test?
Neal et al.	Span, sweep, twist	Pneumatic	Rigid segmented	Y	Y	N
Blondeau et al.	Span	Pneumatic	Rigid segmented	Y	Y	N
Supekar	Span	UI*	Rigid segmented	Y	N	N
Joo et al.	Span, sweep, chord	Linear	UI	Y	N	N
Bharti et al.	Span, sweep	DC motor	UI	Y	N	N
da Costa Aleixo	Span, chord	Servo	Stretchable	Y	Y	N
Perkins et al.	Chord	SMP	Stretchable	Y	N	N
Reed et al.	Chord	UI	Stretchable	Y	N	N
Mattioni et al.	Sweep	UI	UI	Y	N	N
Yu et al.	Planform shear	SMP	UI	Y	N	N
Flanagan et al.	Sweep and area	Electric	Stretchable	Y	Y	Y

* Unidentified.

Out-of plane transformation es el enfoque más investigado de Shape morphing, tal como muestra la Tabla 3.

Tabla 3: Investigaciones relacionadas con *out-of-plane transformation* del ala.

Author	Morphed geometry	Actuator	Skin	Prototype?	Wind tunnel test?	Flight test?
Monner et al.	Camber	Linear actuator	Flexible	Y	N	N
Lim et al.	Camber	PZT	Flexible	Y	N	N
Poonsong	Camber	Pneumatic	Stretchable	Y	Y	N
Diaconu et al.	Camber		Flexible	N	N	N
Saggere and Kota	Camber	UI	Flexible	Y	N	N
Campanile and Sachau	Camber	UI	Flexible	Y	N	N
Wang et al.	Camber	PZT	Flexible	Y	N	N
Heinze and Karpet	Camber	PZT	Rigid	Y	Y	N
Vos et al.	Camber	PZT	Stretchable	Y	Y	Y
Wang et al.	Camber	SMA	Flexible	Y	N	N
Sofla et al.	Camber	SMA	Flexible	Y	N	N
Berton	Camber	SMA	UI	Y	N	N
Yang et al.	Camber	SMA	Flexible	Y	Y	N
Liu et al.	Camber	SMA	UI	Y	N	N

El ángulo de caída del perfil aerodinámico se puede cambiar de manera uniforme de una manera similar a la rotación de los alerones. Por otra parte, los cambios graduales de la comba de perfil aerodinámico a lo largo del trayecto pueden crear torsión controlable del ala. Se persigue el cambio de inclinación necesario, ya sea por la reconfiguración de la estructura subyacente (por ejemplo, nervios) o el cambio de forma del forro del ala. En la Figura 15 se muestra como se clasifican los métodos de cambio de inclinación de perfil aerodinámico: (a) utilizar los mecanismos internos, (b) de accionamiento piezoeléctrico, y (c) de accionamiento de aleación de memoria de forma.

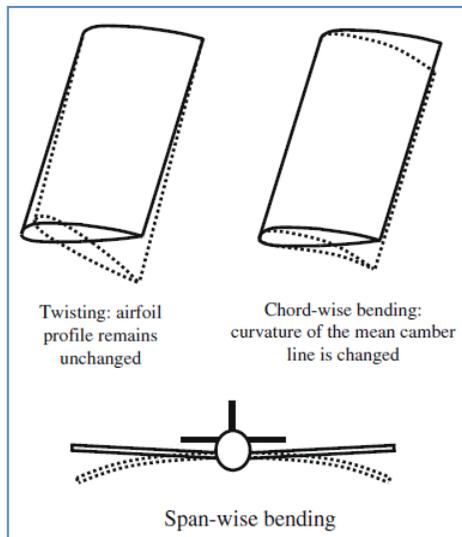


Figura 15: *Out-of-plane morphing* indica la torsión del ala (parte superior izquierda), *Chord-wise bending* del ala indica las deformaciones de la línea de curvatura media (arriba a la derecha), y *Span-wise bending* del ala indica una flexión lateral (abajo).

Varios investigadores han explorado las formas de alterar las propiedades aerodinámicas del ala por la remodelación del perfil alar, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Investigaciones relacionadas con *airfoil profile adjustment* del ala.

Author	Morphed geometry	Actuator?	Skin	Prototype?	Wind tunnel test?	Flight test?
Austin et al.	Airfoil	Conventional	Flexible	Y	N	N
Joo and Sanders	Airfoil	Conventional	Flexible	Y	N	N
Strelec et al.	Airfoil	SMA	Flexible	Y	N	N
Georges et al.	Airfoil	SMA	Flexible	N	N	N
Dong et al.	Airfoil	SMA	Flexible	Y	N	N
Pinkerton et al.	Airfoil	PZT	Flexible	Y	Y	N

Para ello, el ángulo de caída superior y/o inferior de la superficie de sustentación se cambia sin mayores cambios de la línea de curvatura media, tal como muestra la Figura 16.

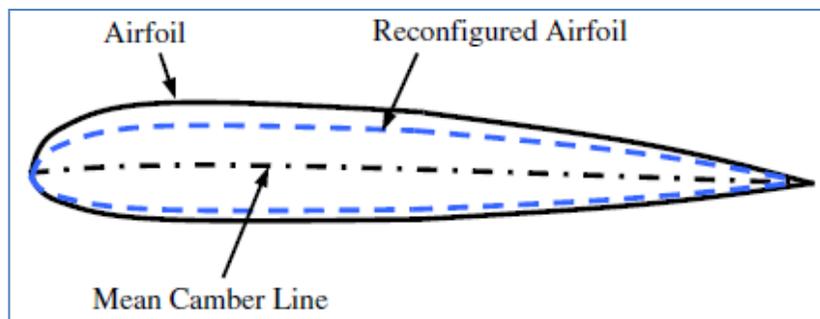


Figura 16: Perfil aerodinámico puede ser variada sin un cambio importante en la línea media de la comba.

2.3. Ornitóptero

Un ornitóptero es una aeronave más pesada que el aire capaz de generar la sustentación y empuje por el movimiento batiente de sus alas de forma análoga a como lo hacen las aves. Para poder comprender cuál ha sido el camino a seguir con respecto a la construcción y diseño de los ornitópteros durante los últimos años, y como permitirán implementar Shape Morphing, a continuación se da a conocer los procedimientos y materiales más usados.

Estos se pueden clasificar en las siguientes 3 configuraciones de alas:

- Los monoplanos: Consisten en un par de alas que oscilan en fase, como el caso del Small Bird [9] (Figura 20).
- Los biplanos: Consisten en dos pares de alas que se mueven en desfase. Estas alas puede estar una sobre otra o en configuración tándem (un par atrás del otro).
- Alas plegables: Sus alas se doblan de manera de simular el vuelo de pájaros. Las alas se extienden cuando el movimiento es hacia abajo y se pliegan hacia el cuerpo cuando suben, de ésta manera reducen el área lo que minimiza el efecto del levantamiento negativo. Un ejemplo de éste tipo de alas es el Festo Smart Bird [10] (Figura 21).

Para construir las alas se suelen utilizar marcos rígidos cubiertos por una película plástica, reforzados a través de barras o tubos de fibra de carbono, aleaciones de titanio, polímeros como el PET y PLA o material plástico como el ABS, ya que presentan una buena rigidez y poco peso. Esto ya que se debe conseguir alas que tengan flexibles para producir empuje, y al mismo tiempo que tengan rigidez para poder generar sustentación.

2.3.1. Electrónica

A continuación se hace una revisión general del resto de los componentes eléctricos necesarios para el funcionamiento de un ornitóptero.

2.3.1.1. Motor

Los ornitópteros suelen utilizar motores eléctricos para generar el movimiento. Se prefieren por sobre los actuadores lineales ya que son capaces de alcanzar altas frecuencias con bajas fuerzas. La tendencia ha sido utilizar motores sin escobillas ya que son capaces de lograr mayores eficiencias y densidades de potencia que los convencionales.

2.3.1.1.1. Motor sin escobillas o Brushless

Basados en los fundamentos de la corriente alterna donde un sólo campo magnético provoca el giro, hoy en día existen reguladores de velocidad (ESC) que simulan dicha corriente alterna pudiendo controlar un brushless con una batería de voltaje continuo. Son considerados muy valiosos para el aeromodelismo pues presentan grandes ventajas, alguna de ellas son el poseer piezas sin rozamientos; por tanto sin chispas perturbadoras; con un volumen y peso menor con mayor aprovechamiento de la energía. Eso sí, las baterías tienen que ser capaces de dar mucha intensidad pues el consumo puede ir desde los 3 o 4 [A] hasta 90 o más dando una potencia entre 40 y 1500 [W] o incluso más. Por ser un motor de inducción trifásico posee tres cables para suministrar la potencia que consume.

2.3.1.1.1.1. ESC (Electronic Speed Controller)

Imprescindibles para los motores brushless ya que aporta la corriente trifásica necesaria para su correcto funcionamiento. Esto ya que transforman el voltaje continuo obtenido de una batería, a un voltaje alterno trifásico para el motor brushless, de este modo obtienen potencias mucho mayores en comparación a los motores de corriente continua que se conectan directamente a las baterías. Básicamente consiste en tres cables para conectarlo al motor brushless, otros dos para conectar a la batería de corriente continua, y otros tres (negro, rojo y amarillo) donde en la mayoría de los casos se pueden usar para suministrar 5 [V] a servo motores y recibir una señal para indicar la velocidad del motor brushless.

2.3.1.2. Fuente de poder

La fuente de energía que utilizan la mayoría de los ornitópteros son baterías del tipo litio polímero. Esto debido a que presentan una alta densidad de energía (170 [Wh/Kg]) y de poder ([4000 W/Kg]). Además para los actuadores se suelen usar baterías de NiMh, siendo las más usadas las de tamaños AA, AAA, 2/3 A y SubC, cuyas capacidades varían desde 700 [mAh] (AAA) hasta los 4000 [mAh] (SubC).

2.3.1.3. Actuadores

La función de los actuadores es activar algún proceso con el fin de lograr el control de un proceso. Existen diversos tipos de actuadores, mecánicos, hidráulicos, etc. Los más comunes en el diseño de los ornitópteros son los motores servos y los actuadores magnéticos, debido al bajo peso y que son capaces de entregar un control suave y proporcional a la señal.

2.3.1.3.1. Servo Motor

El servo motor (o servo) es un potente dispositivo que dispone en su interior de un pequeño motor de corriente continua con un reductor de velocidad y multiplicador de fuerza, también dispone de un circuito que controla el sistema. De este modo se controla la ubicación del motor en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición.

Para controlar un servo se debe aplicar un pulso de duración y frecuencia específicas. Todos los servos disponen de tres cables, dos para alimentación Vcc y Gnd (4.8 a 6 [V]) y un tercero para aplicar la señal, que hace que el circuito de control interno ponga el servo en la posición indicada.

2.3.2. Bio-Inspiración

A continuación se muestran algunos ejemplos de ornitópteros construidos y de implementación de Shape Morphing, en los cuales se puede apreciar como la naturaleza ha aconsejado y/o guiado varios de los diseños, permitiendo la unión de estos dos conceptos.

El primero modelo que se presenta relacionado con el concepto de Shape Morphing es el MAV (Micro Vehículo Aéreo) que se muestra en la Figura 17, se basa en una familia de MAV de alas flexibles, el cual fue diseñado en la Universidad de Florida [6]. El fuselaje está construido enteramente de fibra de carbono, siendo una estructura monocasco de dos piezas diseñado para albergar componentes de vuelo, actuadores e instrumentación. Este MAV utiliza membranas como las superficies de las alas. Estas membranas son extremadamente ligeras y las alas son lo suficientemente grandes como para generar la suficiente sustentación sin peso excesivo. Además, su flexibilidad permite cambiar el ángulo de ataque a lo largo del ala para reducir la sensibilidad inherente a las perturbaciones. Sin embargo, este MAV es difícil de volar, tal dificultad se espera dado que los aviones son muy ágiles y maniobrables, pero este se debe volar de forma remota.

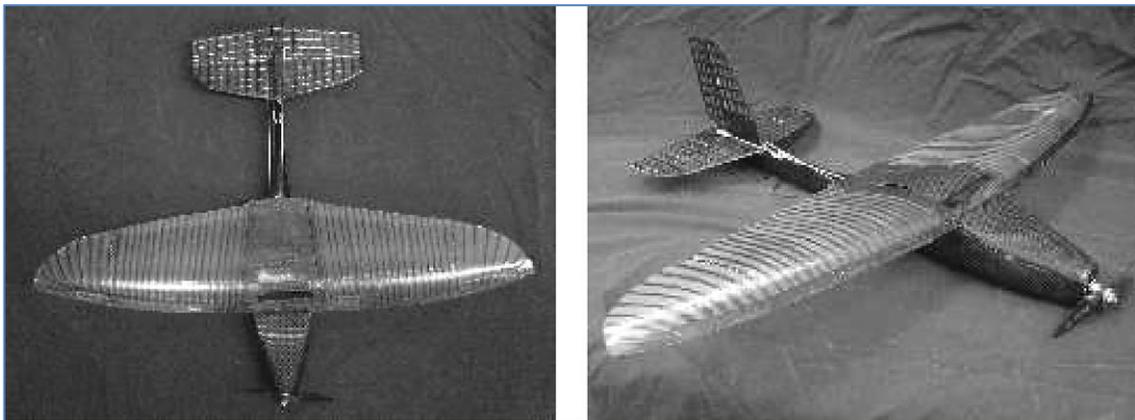


Figura 17: A la izquierda vista aérea y a la derecha vista lateral del MAV.

Un segundo modelo a presentar es el Ornitóptero Mariposa (Butterfly Ornithopter) mostrado en la Figura 18, resultado de una bio-inpiración creado por Hiroto Tanaka, Kiyoshi Matsumoto y Isao Shimoyama [7], para investigar sobre la función morfológica de las alas de mariposa reales, para ello se fabricaron tres tipos de alas de mariposa artificiales las cuales se componen de una membrana delgada de polímero y las venas de poliuretano micro moldeado. La forma plana y venación de un tipo eran las mismas que las de una mariposa cola de golondrina, y las de los otros dos eran diferentes. El efecto de las características de vuelo durante el vuelo libre hacia adelante producto de la distribución de la rigidez sobre las alas por las venas se investigó usando un ornitóptero y los tres tipos diferentes de ala. Los coeficientes aerodinámicos generales fueron los más altos para las alas con venas similares a las de una mariposa cola de golondrina, lo que indica que las venas permiten el vuelo de avance lento.

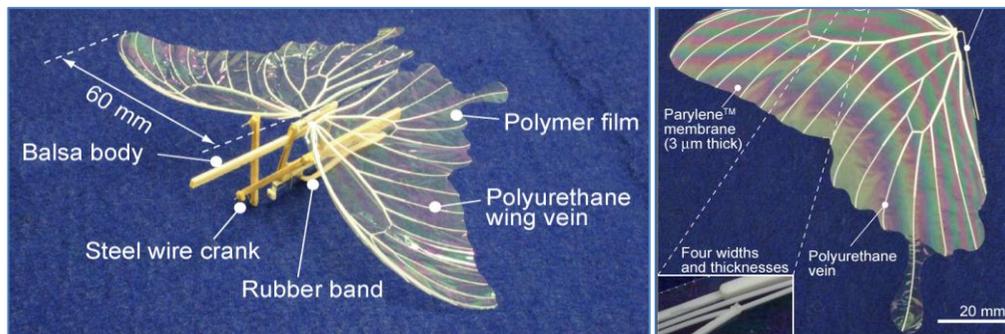


Figura 18: A la izquierda está el Ornitóptero Mariposa, y a la derecha esta uno de las alas construidas.

Otro modelo de interés por explorar los beneficios de implementar Shape Morphing es el mini-UAV (Figura 19) [8], el cual corresponde a un MAV (Micro Vehículo Aéreo) que si bien no se ha construido, tiene el mérito de ser una simulación de un mini-UAV de 1kg de peso, con 12 grados de libertad dotado de alas articuladas en el hombro y muñeca, con el fin de utilizar la evolución artificial para optimizar sus características morfo-cinemáticas. Las pruebas de vuelo se llevaron a cabo en condiciones aerodinámicas constante. Los resultados mostraron que el vuelo a velocidad media (10 a 12 [m/s]) se puede obtener con energía mecánica razonable (20 [W/Kg]) el cual es comparable con el gasto energético real de las aves (sus parámetros corresponden a una superficie alar de 0.2 [m²], una alta relación de aspecto y con un aleteo aproximado de 3 [Hz], idénticos a los de una gaviota), mientras que los vuelos a mayor velocidad (16 a 20 [m/s]) implican un aumento de potencia (30 a 50 [W/Kg]), y los vuelos a velocidad baja implicaron una cantidad de potencia irreal.

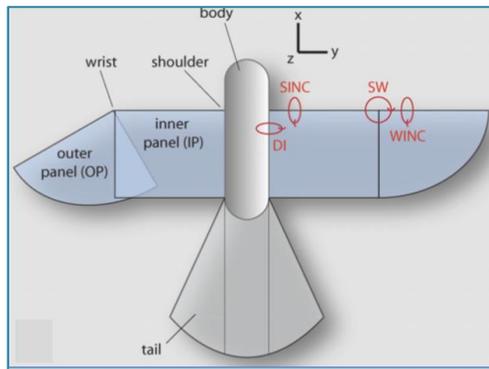


Figura 19: Morfología del mini-UAV, los paneles de las alas y sus grados de libertad.

En la Universidad de Maryland se desarrolló el Small Bird [9]. Este modelo consiste en un monoplano que controla su altitud variando la frecuencia de aleteo y la dirección por medio de la cola montada en la parte posterior del MAV (Figura 20).

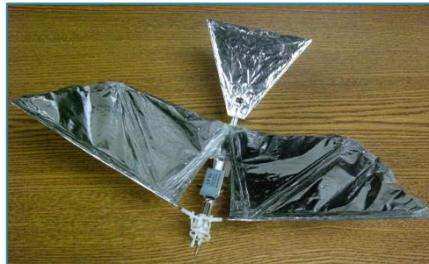


Figura 20: Small Bird.

Finalmente, el Smart Bird (Figura 21) creado por la empresa Festo [10], es uno de los Ornitópteros que mejor replica el vuelo de las aves, siendo uno de los más grandes y ultra ligeros, pudiendo despegar, aterrizar y volar de forma independiente.



Figura 21: Ornitóptero Smart Bird.

2.4. Algoritmo genético (AG)

Los algoritmos genéticos son técnicas de optimización y búsqueda de soluciones basados en el proceso de selección natural y de la genética natural, es decir, tal como sucede en el reino animal, estos métodos mantiene un conjunto de entidades que representan posibles soluciones del problema, las cuales se mezclan, y compiten entre sí, de tal manera que las más aptas son capaces de prevalecer a lo largo del tiempo, evolucionando hacia mejores soluciones cada vez. Estos procedimientos son utilizados principalmente en problemas con espacios de búsqueda extensos y no lineales, en donde otros métodos no son capaces de encontrar soluciones en un tiempo razonable.

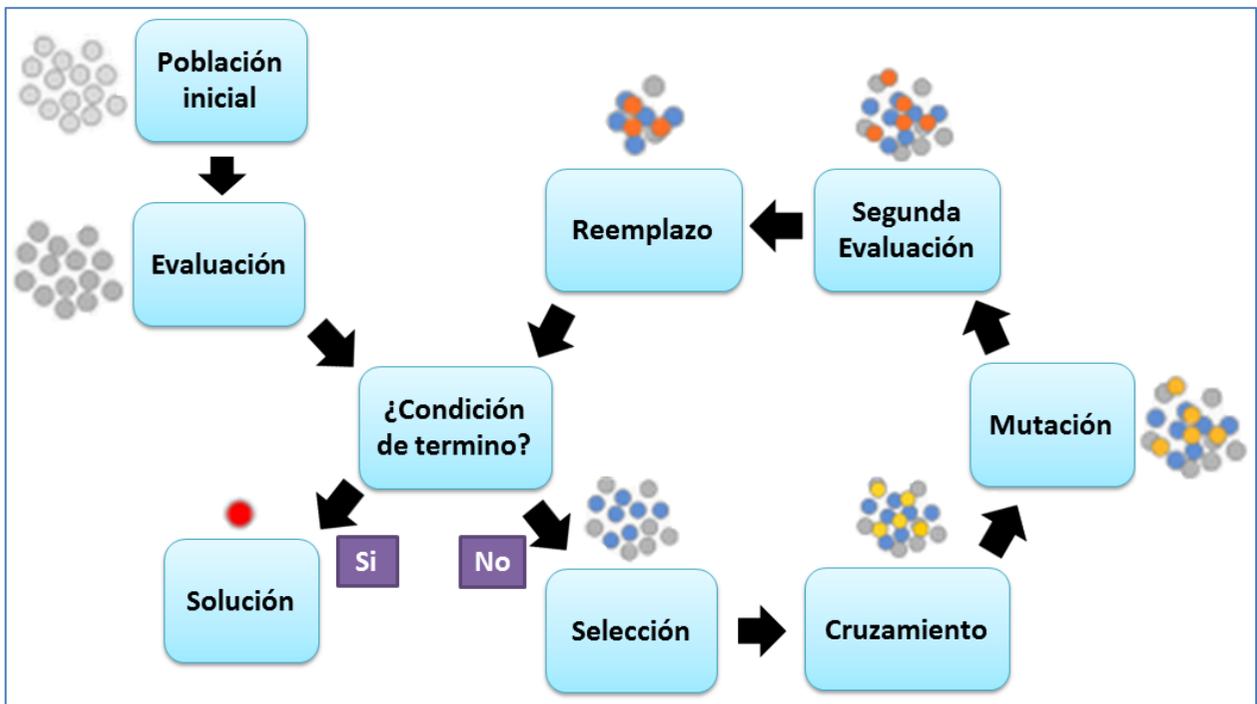


Figura 22: Procedimiento del algoritmo genético.

Este algoritmo puede presentar diversas variaciones, dependiendo de cómo se aplican los operadores genéticos (cruzamiento, mutación), de cómo se realiza la selección y de cómo se decide el reemplazo de los individuos para formar la nueva población. En general, el pseudocódigo consiste en los siguientes pasos mostrados en la Figura 22. A continuación se describen el procedimiento del algoritmo.

Primero se debe seleccionar una población inicial la cual consiste en el conjunto de entidades que representan soluciones al problema denominadas individuos o cromosomas. Como se trata del AG la representación de los cromosomas se hace utilizando un número binario constituido por una serie de dígitos llamados alelos, los cuales conforman los genes que representan las características de los individuos, en la Figura 23 se muestra un ejemplo de un individuo binario que codifica 3 parámetros.

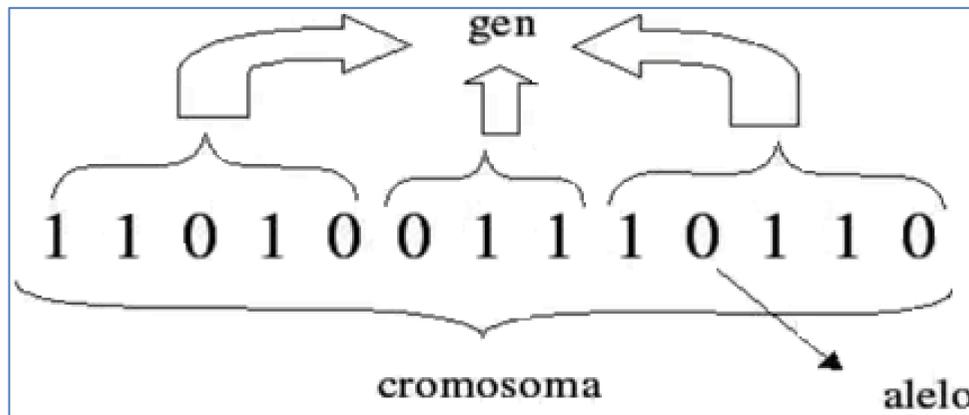


Figura 23: Individuo genético binario.

Se procede a elegir los individuos que serán cruzados en la siguiente generación. Los cromosomas con mejor aptitud tienen mayor probabilidad de ser seleccionados, para esto se utiliza una función de fitness que evalúa a cada individuo de la población.

Con los mejores se procede a implementar los operadores genéticos, el primero de ellos es el cruzamiento el cual representa la reproducción sexual, se opera sobre dos cromosomas a la vez para generar dos descendientes donde se combinan las características de ambos cromosomas padres.

Posterior a esto se genera una mutación la cual consiste en la modificación al azar de los alelos del individuo, esto tiene el fin de poder alcanzar zonas del espacio de búsqueda que no están cubiertas por los individuos de la población actual.

Ya con los hijos obtenidos de la población aplicando los operadores genéticos, se seleccionan los mejores individuos entre padres e hijos para conformar la población de la generación siguiente en el proceso de recombinación.

El AG se deberá detener cuando se alcance la solución óptima, pero ésta generalmente se desconoce, por lo que se deben utilizar otros criterios de detención. Normalmente se usan dos criterios: correr el AG un número máximo de iteraciones (generaciones) o detenerlo cuando no haya cambios en la población.

2.5. OptiTrack

El sistema de cámaras OptiTrack (Figura 24) cumple con la función de capturar el movimiento utilizando diferentes marcadores puesto en punto de interés sobre el objeto de estudio [17]. Las cámaras V100:Trio ofrecen captura de imagen integrada, capaz de capturar objetos en movimiento rápido.



Figura 24: V120:Trio.

Tal como muestra la Figura 25 básicamente el OptiTrack detecta los puntos reflectantes puestos en el objetivo guardando las coordenadas de estos en el espacio 3D.



Figura 25: Ejemplo de implementación del OptiTrack en una persona.

Capítulo 3.- Metodología

A continuación se describe la metodología a utilizar para el desarrollo de la memoria.

- 1) Revisar bibliografía: Buscar información para la redacción del estado del arte y contextualización del proyecto.
- 2) Construcción del Ornitóptero Robotizado Bio-Inspirado: Puede dividirse en los siguientes pasos:
 - i) Estudio de las principales características biológicas del Halcón Peregrino que permiten la maniobrabilidad y estabilidad en vuelo que lo caracteriza.
 - ii) Diseño estructural de un Ornitóptero basado en los estudios anteriores permitiendo la implementación de Shape Morphing.
 - iii) Estudio de los componentes eléctricos necesarios para poder replicar las maniobras de interés.
 - iv) Reunión de los materiales y maquinaria necesarios para la construcción.
- 3) Realización de pruebas utilizando el OptiTrack, caracterizando los movimientos que realiza el ornitóptero, los cuales son impuestos por un algoritmo evolutivo cuyo objetivo es conseguir un aleteo que produzca mayor empuje.

Capítulo 4.- Diseño y construcción

En el presente capítulo se detallan el procedimiento del diseño y construcción del ornitóptero de esta memoria.

4.1. Parámetros de Diseño

El desafío principal consiste en obtener un punto de equilibrio entre un robot que este bio-inspirado lo mejor posible en el halcón peregrino y que a la vez sea factible su construcción y utilización en pruebas. Esto significa que los parámetros para el diseño del mecanismo motriz, torso, alas y cola del ornitóptero son los mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros principales del diseño del ornitóptero.

Parámetro	Unidad	Magnitud
Longitud	cm	55
Envergadura ave	cm	145
Cola	cm	20
Cuerda del ala mayor	cm	30
Envergadura alas	Cm	59
Relación de aspecto		9.18
Angulo de bateo	°	[31 , -18]

Con estos datos se obtiene un ornitóptero un tanto más grande que un halcón peregrino hembra promedio, esto se debe a que el torso se ha construido más gordo por la necesidad de más espacio para el mecanismo de bateo de las alas.

4.2. Diseño solución

Utilizando el software Solidworks se diseñó un mecanismo que cumpliera con los parámetros de diseño mostrados en la Tabla 5. La siguiente imagen muestra la solución propuesta.

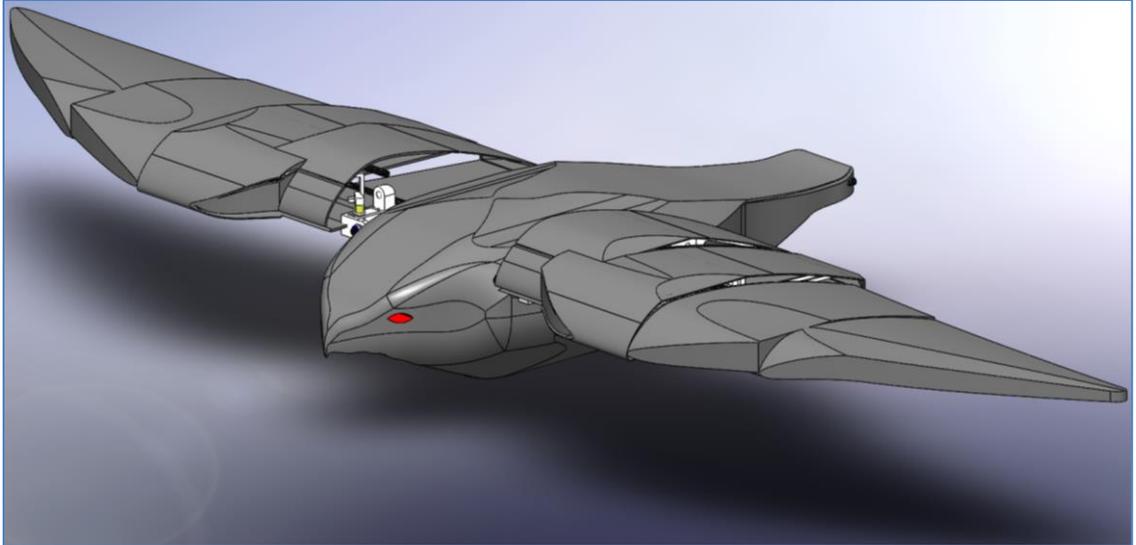


Figura 26: Diseño ornitóptero propuesto.

Básicamente el ornitóptero puede separar en 3 mecanismos fundamentales, el torso, las alas y la cola. La cola no se explicara puesto que si bien ha sido construido, no implica participación al tema de esta memoria.

4.2.1. Torso

El diseño del torso cumple los siguientes objetivos:

- Fuselaje capaz de resistir las fuerzas generadas donde se almacenan principalmente la batería, motor brushless, regulador de velocidad (ESC) y Arduino Due.
- Proporcionar un sistema motriz que trasmita de manera eficiente la energía del motor brushless a las alas.

El primer objetivo se consigue creando la estructura mostrada en la Figura 27, el cual consiste en un conjunto de 6 piezas y 2 barras de fibra de carbono. Con esto se consigue ubicar los componentes principales de forma segura dentro del ornitóptero, tal como se muestra en la Figura 28.

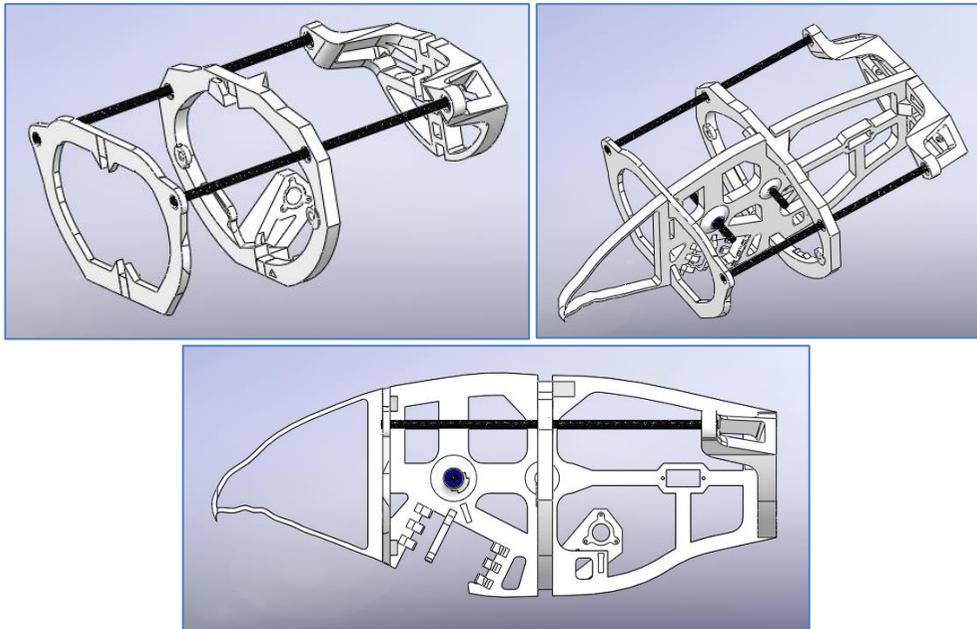


Figura 27: Esqueleto del fuselaje. Izquierda superior vista diagonal 3 piezas, derecha superior vista diagonal 6 piezas, he inferior vista lateral.

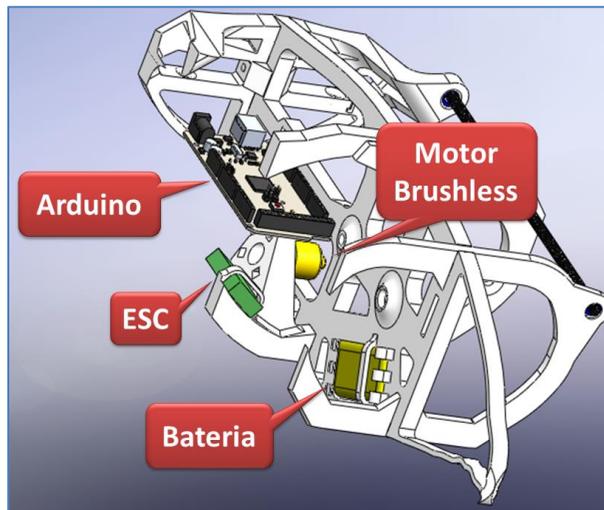


Figura 28: Fuselaje con componentes eléctricos principales.

Para el segundo objetivo se diseñó un mecanismo en el cual el motor brushless es el encargado de otorgar la potencia para batir las alas, esta potencia se transmite utilizando 4 engranajes que reducen las revoluciones del motor a una razón 1/15 tal como muestra a la izquierda de la Figura 29, los engranajes tienen como eje barras de fibra de carbono fijadas en el fuselaje.

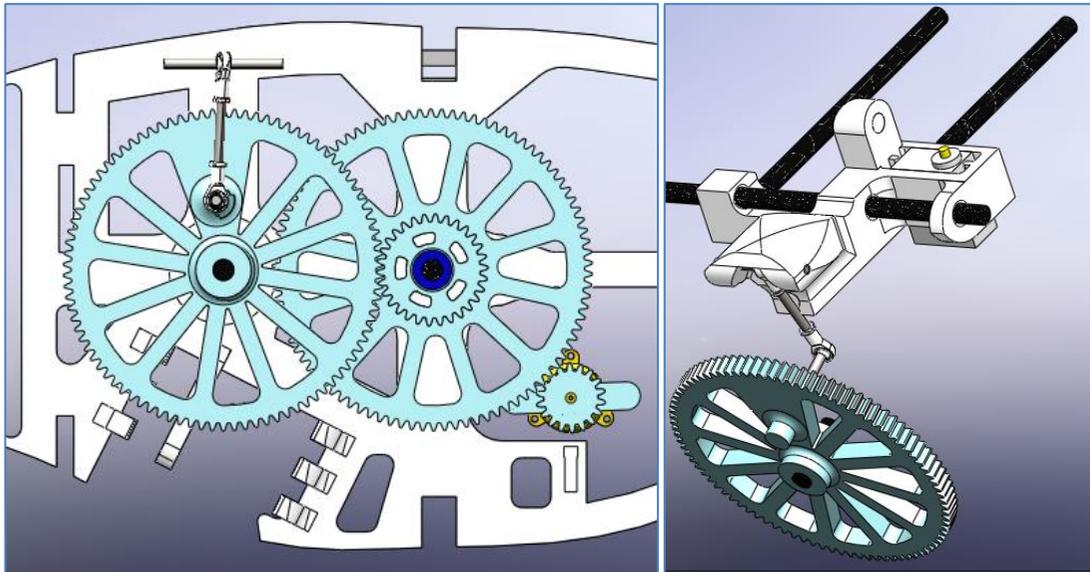


Figura 29: A la izquierda el sistema de engranajes con motor brushless, a la derecha el engranaje unido al hombro del ornitóptero.

Una vez reducida la velocidad de giro, el engranaje es unido al hombro del ave utilizando una barra con rotulas en sus extremos (derecha de Figura 29) de manera que el movimiento rotatorio se transforme en uno lineal permitiendo el bateo del robot, es sistema completo que permite el bateo de las alas (motor brushless, engranajes y hombros) se ve en la Figura 30.

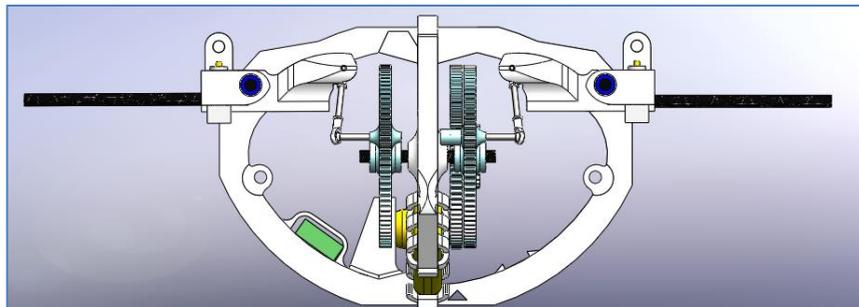


Figura 30: Sistema completo de bateo de alas.

Con este sistema se obtiene el ciclo completo del movimiento hacia arriba y debajo de las alas, tal como se aprecia en la Figura 31.

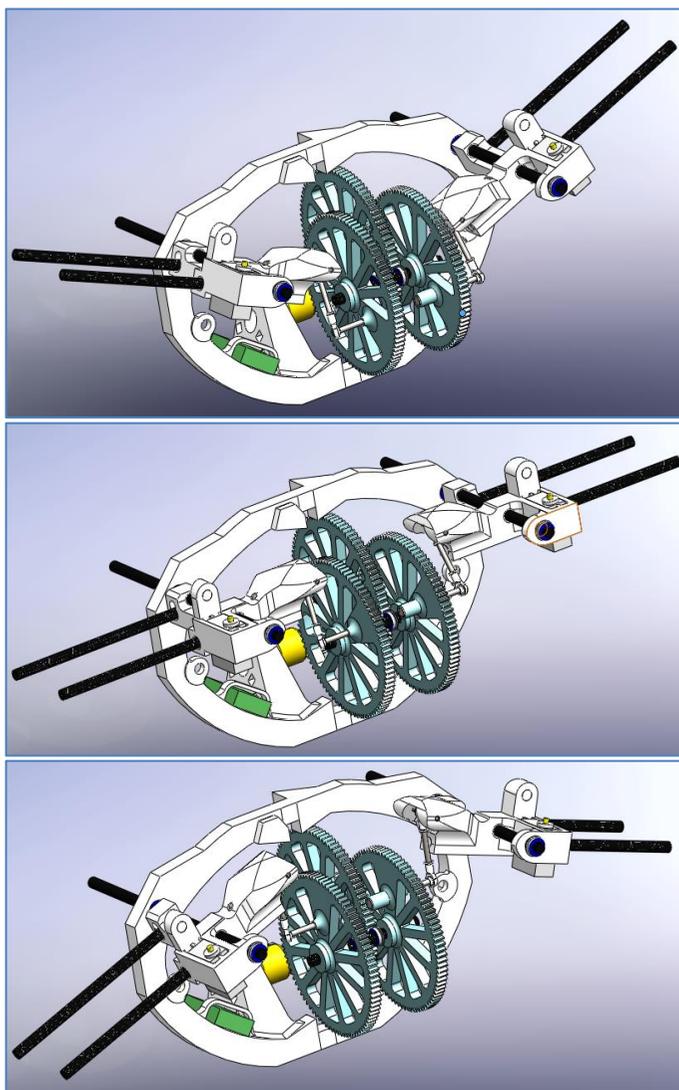


Figura 31: Posición de alas arriba, posición de planeo y posición de alas abajo respectivamente.

4.2.2. Alas

El diseño de las alas cumple los siguientes objetivos:

- Poder generar empuje y sustentación como lo hacen las aves.
- Implementar Shape morphing modificando la forma del área de contacto de las alas con el aire.

Para el diseño de los perfiles alares se ha usado el software Xfoil, con el fin de optimizar la sustentación producida y minimizar el arrastre durante el vuelo, se utilizan los perfiles NACA indicados con sus características principales en la Tabla 6 y mostrados en la Figura 32.

Tabla 6: Parámetros de los perfiles alares.

	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3
Perfil NACA	NACA 8218	NACA 8214	NACA 8210
Ángulo de ataque [°]	5.35	0.25	[-6.45 , 7.52]
Coefficiente de sustentación (C_L)	1.09	0.7	[0.005 , 1.374]
Coefficiente de arrastre (C_d)	0.04	0.04	[0.1 , 0.046]
Espesor relativo (τ)	0.181	0.139	0.09

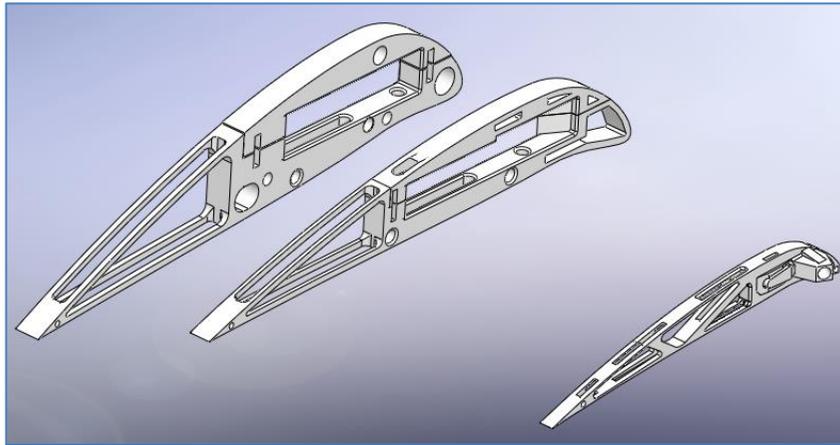


Figura 32: Perfil 1, 2 y 3 de izquierda a derecha.

Siendo el Perfil 1 el más cercano al torso y por lo tanto el más grueso, el Perfil 2 ubicado en el medio del ala con un espesor relativo medio, y finalmente el Perfil 3 con un espesor más pequeño siendo el más alejado al torso. Los dos primeros mantienen su ángulo de ataque fijo en todo momento, mientras que el Perfil 3 tiene la capacidad de modificarlo en un rango entre $[-40^\circ, 40^\circ]$ siendo el encargado de cambiar el ángulo de ataque de la mitad del ala. Para unir y mover los tres perfiles a lo largo del ala, se utiliza una estructura con forma de pantógrafo (Figura 33), esta permite expandir el ala y flexionarla al mismo tiempo imitando el movimiento natural de las aves, tal como muestra la Figura 34.

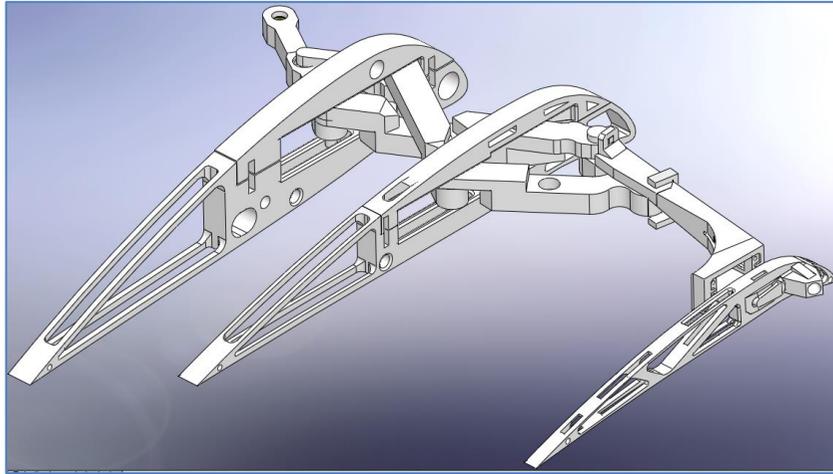


Figura 33: Estructura pantógrafo que une y manipula la posición de los perfiles.

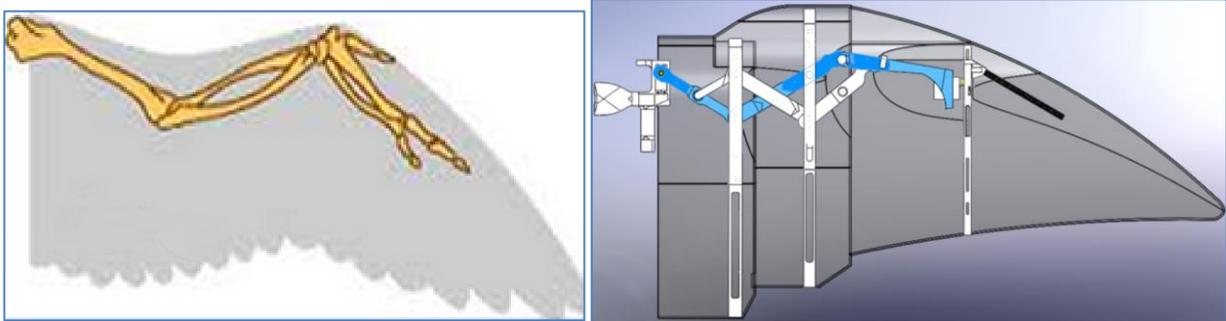


Figura 34: Comparación entre esqueleto del ala de un ave y la estructura pantógrafo del ornitóptero.

Además de la estructura pantógrafo se utilizan barras de fibra de carbono las cuales otorgan rigidez y resistencia al ala evitando que se rompan, sirviendo de guías para el desplazamiento del Perfil 1 y 2, y otorgando una extensión al Perfil 3 hacia la punta del ala. Finalmente la estructura es unida al hombro del ornitóptero tal como se muestra en la Figura 35.

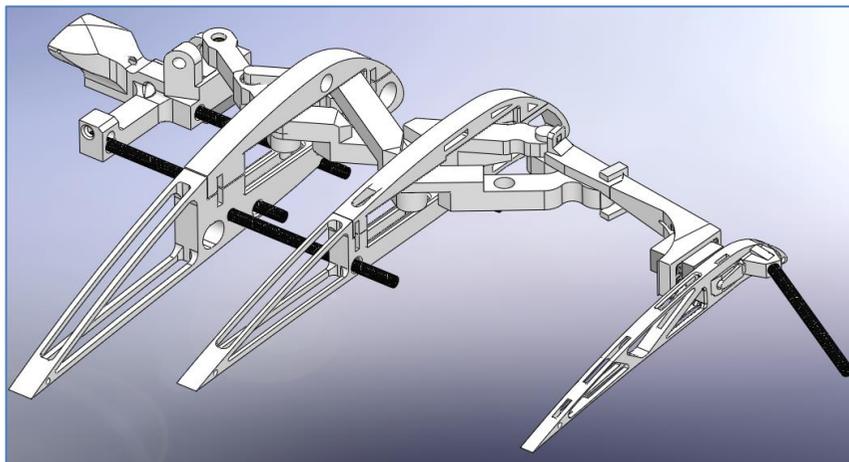


Figura 35: Estructura completa del ala

Cada ala posee 2 servos motores, el primero ubicado en el hombro y unido al pivote estacionario de la estructura pantógrafo del ala, tiene como función el expandir y contraer el ala tal como se muestra en la Figura 36, la flecha amarilla indica la acción del servo y las flechas verdes el movimiento que realizan los perfiles alares; el segundo servo está ubicado en la muñeca, y como se aclaró anteriormente este modifica el ángulo de ataque tal como se muestra en la Figura 37.

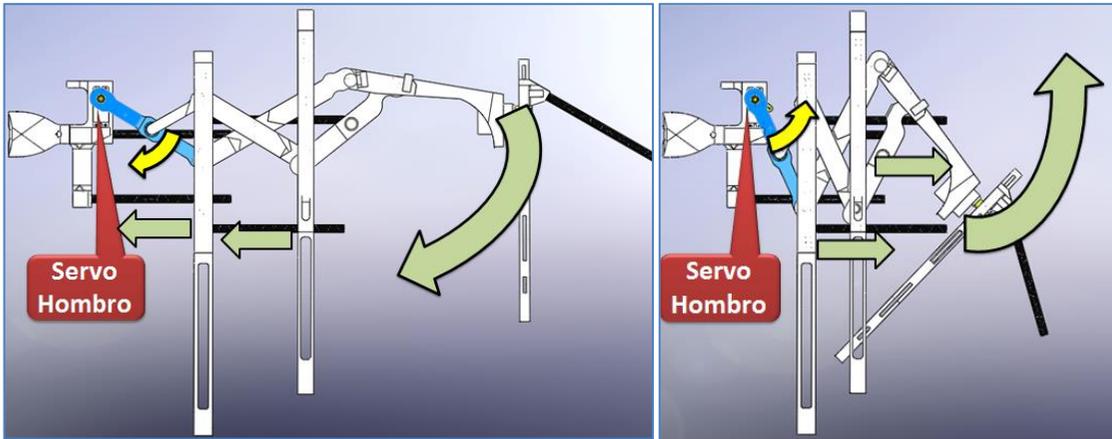


Figura 36: Acción de contracción y expansión del ala respectivamente.

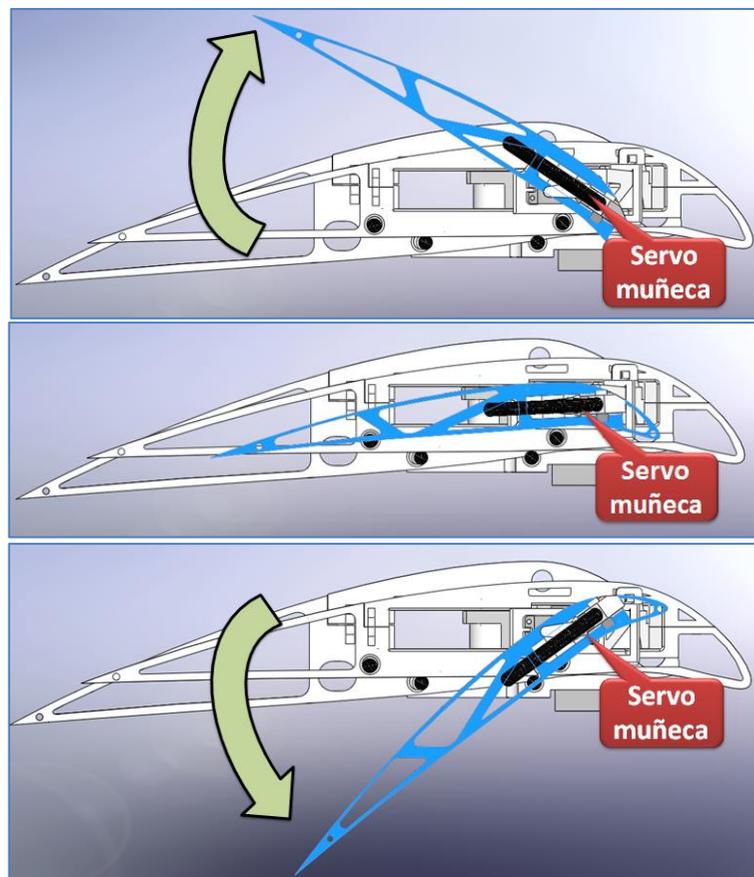


Figura 37: Acción de modificación del ángulo de ataque.

4.2.3. Electrónica del ornitóptero

Para poder mover y controlar el ornitóptero, es fundamental diseñar la electrónica adecuada, a continuación se detallan los componentes eléctricos utilizados y su configuración.

Tabla 7: Parámetros del motor brushless del ornitóptero.



Figura 38: C2028 Micro brushless Outrunner 1400kv.

Peso	22 [g]
Diámetro	10.2 [mm]
Largo	28 [mm]
Eje	5 [mm]
Potencia	90 [W]
Kv	1400 [rpm/V]
Máxima corriente	12 [A]
Voltaje	Batería LiPo 2-4 celdas

Tabla 8: Parámetros del ESC del ornitóptero.



Figura 39: TURNIGY Basic 18A v3.1 Speed Controller.

Peso	19 [g]
Tamaño	45*14*11 [mm]
Velocidad	0.05 Sec/60°
Máxima corriente	18 [A]
Voltaje	NiMh 5-12 LiPo 2-4 celdas

Tabla 9: Parámetros de servos en las muñecas del ornitóptero.



Figura 40: Emax digital servo es 9356.

Peso	20 [g]
Tamaño	22.9*12*27.3 [mm]
Torque	3.7 [Kg/cm]
Velocidad	0.05 Sec/60°
Voltaje	7.4 [V]

Tabla 10: Parámetros de servos en los hombros del ornitóptero.



Figura 41: HS-815BB Mega Sail Control Servo.

Peso	159 [g]
Tamaño	65.8*30*57.4 [mm]
Torque	19.8 [Kg/cm]
Velocidad	0.19 Sec/60°
Voltaje	4.8 [V]

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basado en hardware y software fácil de usar. Está dirigido a cualquier persona que hace proyectos interactivos. Para controlar este ornitóptero se ha decidido usar el Arduino Due por sus siguientes características.

Tabla 11: Parámetros del Arduino Due.

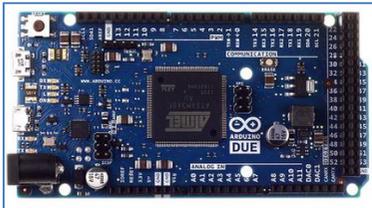


Figura 42: Placa Arduino Due.

Voltaje de operación	3.3 [V]
Voltaje de entrada	7-12 [V]
Digital I/O Pins	54 (12 de ellos con salida PWM)
Entradas Analógicas	12
Flash Memory	512 KB
SRAM	96 KB
Velocidad del reloj	84 MHz
Tamaño	101.52*53.3 [mm]
Peso	36 [g]

Además se usan 2 baterías, una de LiPo para energizar al motor brushless, servos de las muñecas y el Arduino, y otra de MiMh para energizar los servos de los hombros.

Tabla 12: Parámetros batería LiPo del Ornitóptero.



Figura 43: ZIPPY Compact 850mAh 2S 25C Lipo Pack.

Peso	44 [g]
Tamaño	56*14*30 [mm]
Capacidad	850 [mAh]
Voltaje	2 celdas 7.4 [V]
Descarga	25 C



Peso	40 [g]
Tamaño	56*14*30 [mm]
Capacidad	1300 [mAh]
Voltaje	4.8 [V]

Figura 44: Batería Hitec NiMh.

Finalmente, para que el Arduino pueda controlar el movimiento de los actuadores mientras el ornitóptero está aleteando, se utilizan 2 sensores de efecto Hall (Figura 45), este sensor detecta la presencia de un campo magnético como el que tienen los imanes.



Figura 45: Sensor de efecto Hall.

Utilizando 3 imanes puestos en los engranajes del ornitóptero (Figura 46) y 2 sensores de efecto Hall (Figura 47), el movimiento de bateo se puede medir en 30 puntos, es decir, 15 detecciones de imanes cuando sube las alas y otras 15 detecciones de imanes al bajarlas. Por último, el tercer imán puesto en el engranaje de la derecha en la Figura 46, mide en qué posición empezar a contar.

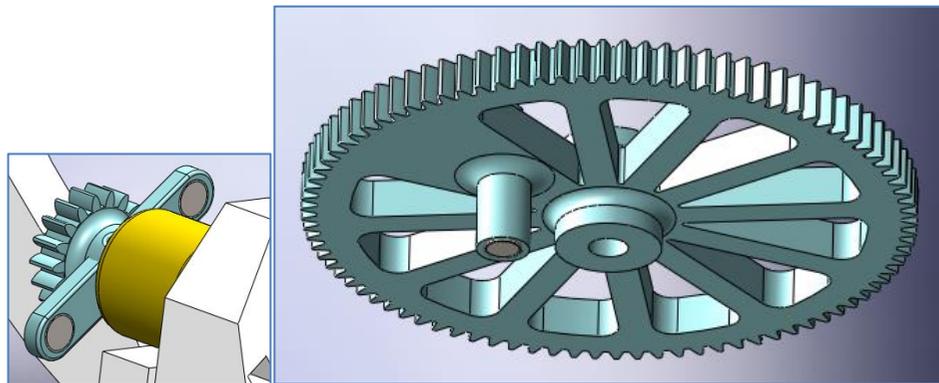


Figura 46: Imanes en el engranaje del motor brushless y en el engranaje que se comunica con el hombro respectivamente.

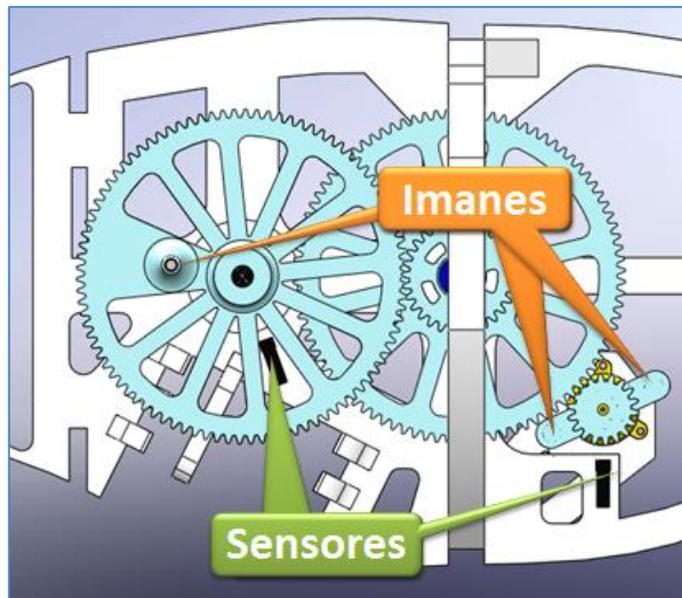


Figura 47: Posición de imanes.

En conclusión, el esquemático propuesto para controlar al ornitóptero es el que se muestra en la Figura 48. Siendo el “SH Partida” el sensor de efecto Hall que se muestra a la izquierda de la Figura 47, el “SH Posición” el que se muestra a la derecha. Para el caso de los servos del ala derecha se nombran como “MD” y “HD” siendo muñeca derecha y hombro derecho respectivamente, y para el ala izquierda “MI” y “HI” siendo muñeca izquierda y hombro izquierdo respectivamente.

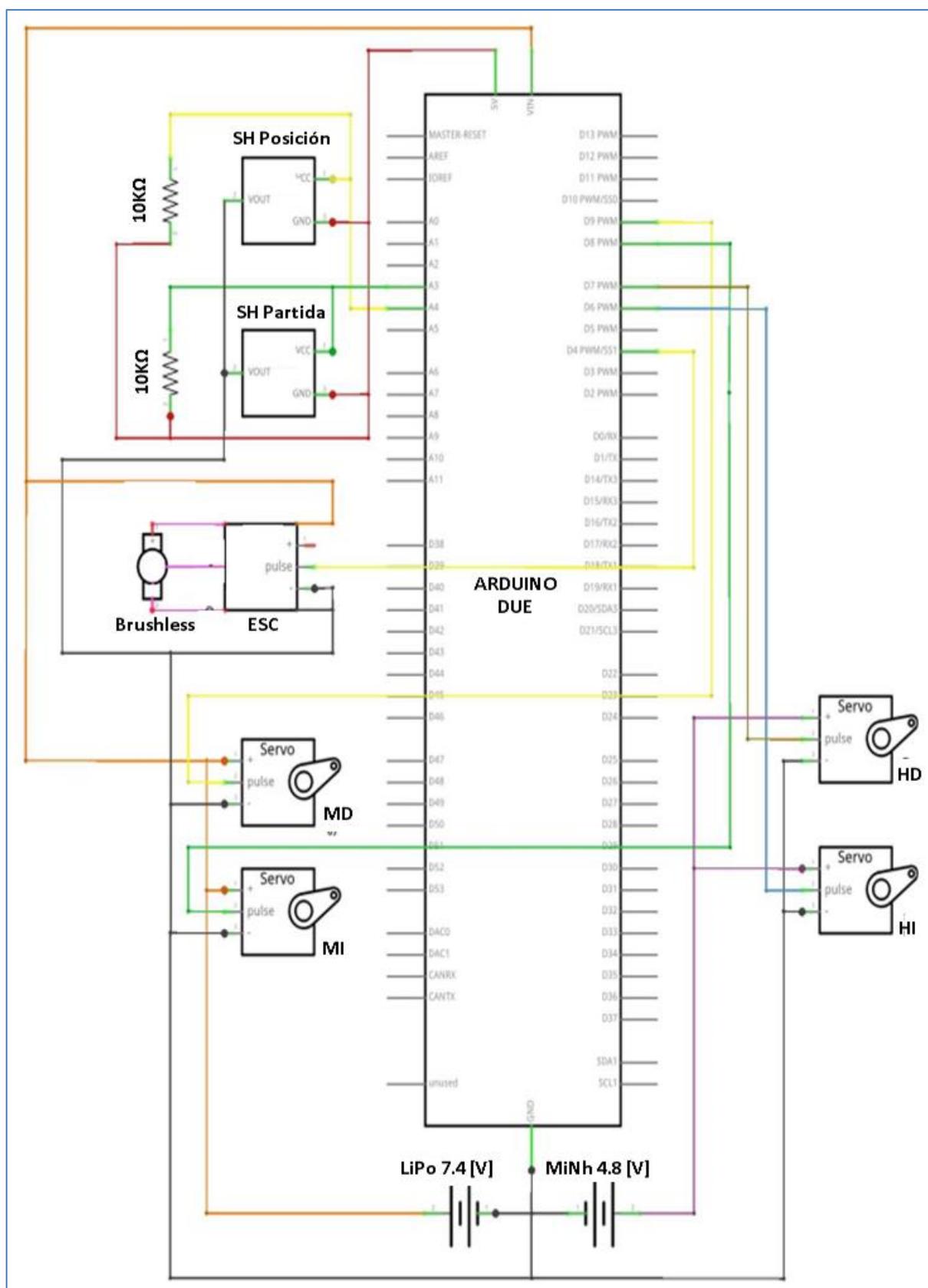


Figura 48: Esquemático del ornitóptero.

4.3. Construcción del ornitóptero

Para la confección de las piezas diseñadas se utilizaron 2 impresoras 3D, la primera corresponde a la “Makerbot replicator 2X” [18] la cual consiste en la utilización de materiales plásticos tales como ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) o PLA (ácido poliláctico), los cuales se funden imprimiendo las piezas capas por capas; gracias a esta técnica se puede seleccionar los patrones y porcentajes de densidad de las piezas, con lo que se puede conseguir construir piezas huecas, pudiendo imitar la estructura ósea de las aves. La segunda impresora utilizada es la “Objet24” [19] la cual utiliza como material de impresión fotopolímeros opacos rígidos, los cuales permiten imprimir piezas con una gran precisión.

La estructura del ornitóptero fue construida en la Markerbot usando el plástico PLA, ya que permite obtener piezas de bajo peso y alta dureza, las múltiples articulaciones que posee el robot se consiguen utilizando rodamientos entre las piezas impresas (Figura 49).

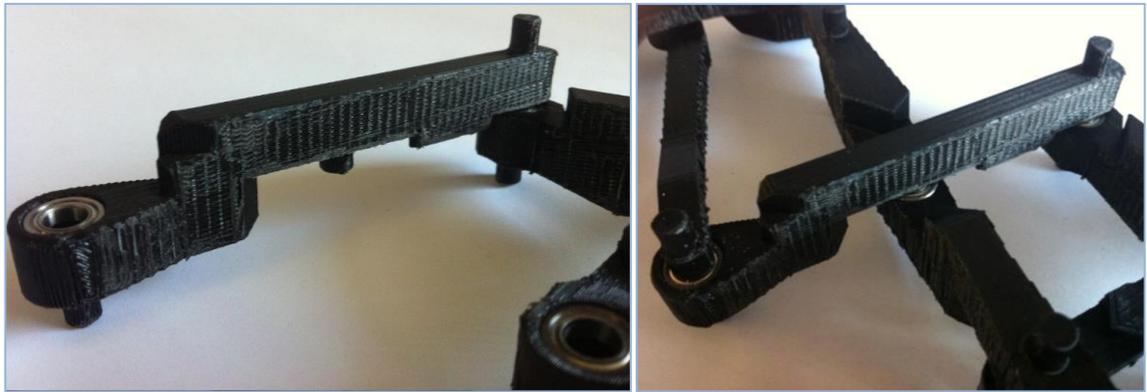


Figura 49: A la izquierda se ven los rodamientos en articulaciones, a la derecha la unión entre ellos.

Para evitar que estas piezas se separen producto de las fuerzas soportadas por los aleteos, los perfiles alares fueron diseñados de tal modo de poder “abrazar” las articulaciones, como se puede apreciar en la Figura 50, los Perfiles 1 y 2 están diseñados para ser armados por dos piezas que se unen, y en el espacio rectangular que cumplen el rol de guías para que las articulaciones se muevan sin problemas.



Figura 50: A la izquierda superior se muestra el Perfil 1, a la izquierda inferior el Perfil 3. A la derecha se muestra las 2 piezas que juntas forman el Perfil 2.

Como se puede apreciar en la Figura 51, el diseño de las piezas se ha guiado bajo el concepto de poder acoplar las piezas sin necesidad de pegamento en grandes cantidades. Para el caso del ala, esta se conforma usando 3 subconjuntos, la estructura pantógrafo; el hombro y los perfiles alares.

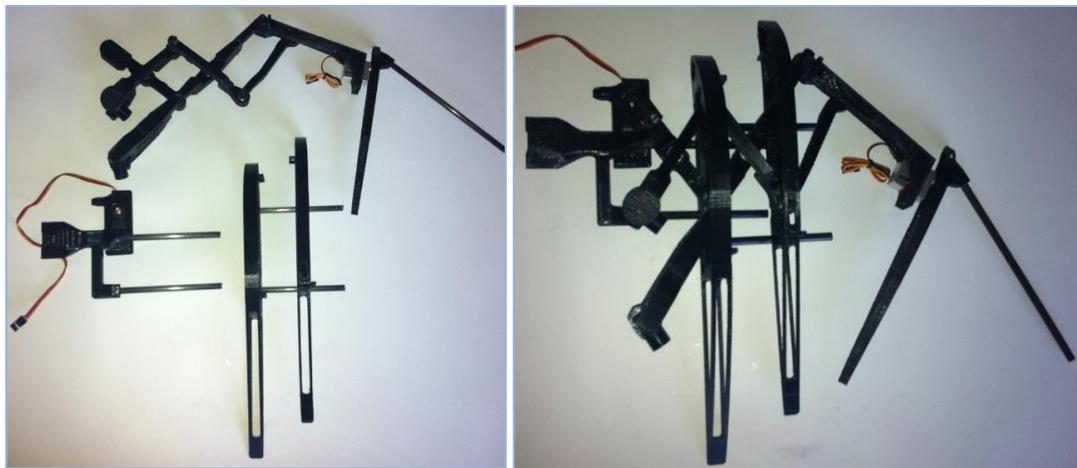


Figura 51: A la izquierda se muestra la estructura pantógrafo, el hombro y los perfiles separados. A la derecha el ala completamente armada.

Los engranajes encargados de la transmisión de la energía desde el motor brushless al bateo de las alas fueron construidos usando la Objet24, y se usaron barras de fibra de carbono fijadas en el fuselaje como ejes, uniéndolos con rodamientos, tal como se puede apreciar en la Figura 52.

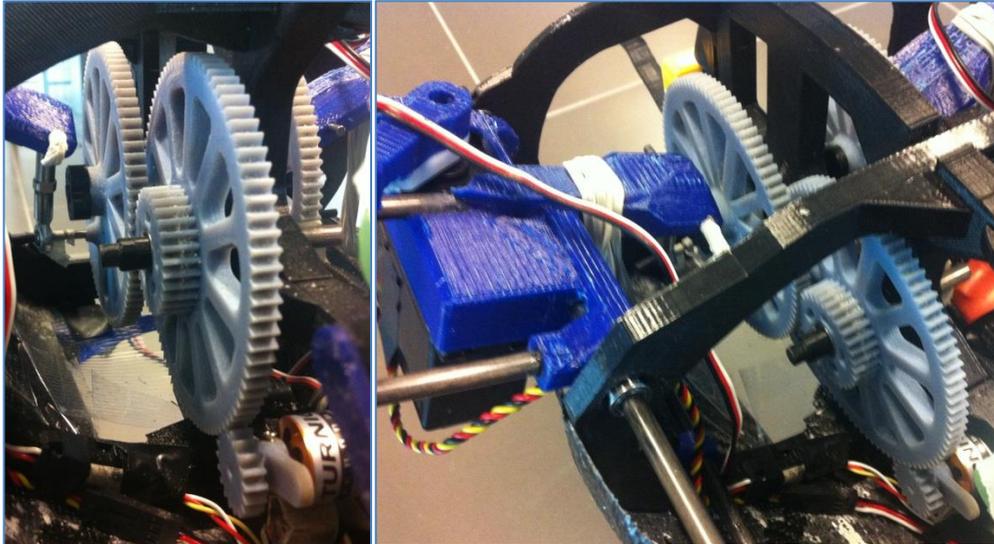


Figura 52: Engranajes unidos al fuselaje y a los hombros.

Para unir los engranajes y los hombros del robot, se utilizan 4 barras de acero inoxidable de 3 [mm] de diámetro (2 en los engranajes y 2 en los hombros), los cuales sujetan unas rotulas que están unidas entre sí por medio de un hilo sin (Figura 53).



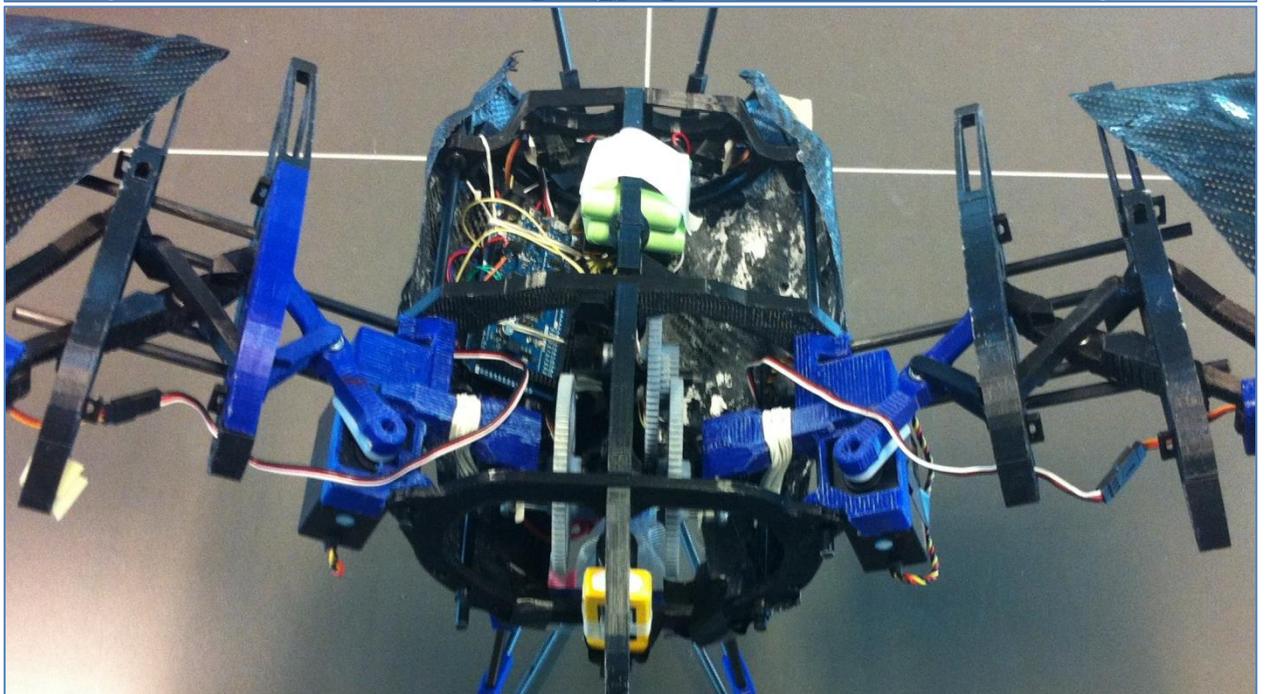
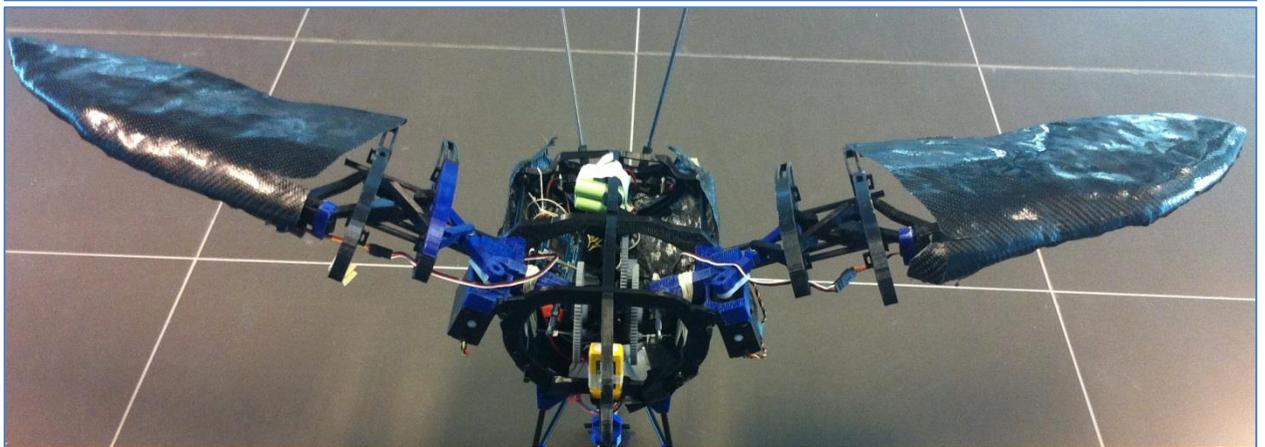
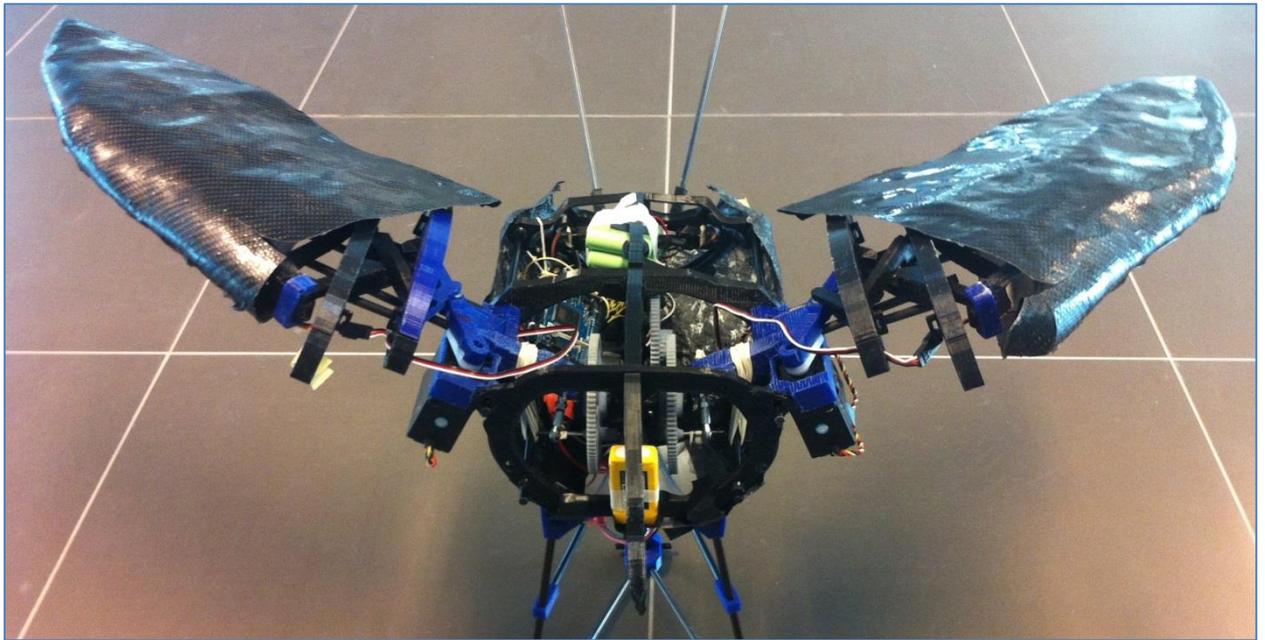
Figura 53: Sistema de rotulas.

Sin embargo se presentó un problema que no se había considerado en el diseño, el cual consiste en que el peso de las alas impone un aleteo brusco y torpe. Para solucionarlo y obtener un aleteo suave y controlado, se han utilizado elásticos puestos en los hombros los cuales se sujetan a barras de fibra de carbono como muestra la Figura 54 (también se aprecia en la foto de la derecha de la Figura 53), de este modo los elásticos generan una fuerza que se contrarresta con la del peso de las alas, eliminando la carga extra que tiene que soportar el motor brushless y por lo tanto solo se debe encargar del movimiento de bateo y no de frenar el peso de las ala. Solución fuertemente inspirada en los músculos que utilizan las aves para generar el bateo de sus alas, ya que cumple la misma función que el músculo supracoracoideo de las aves (Figura 11).



Figura 54: Sistema de elásticos.

Uniando el fuselaje, alas y cola se obtiene la estructura del ornitóptero en su totalidad, tal como se puede apreciar en la Figura 55.



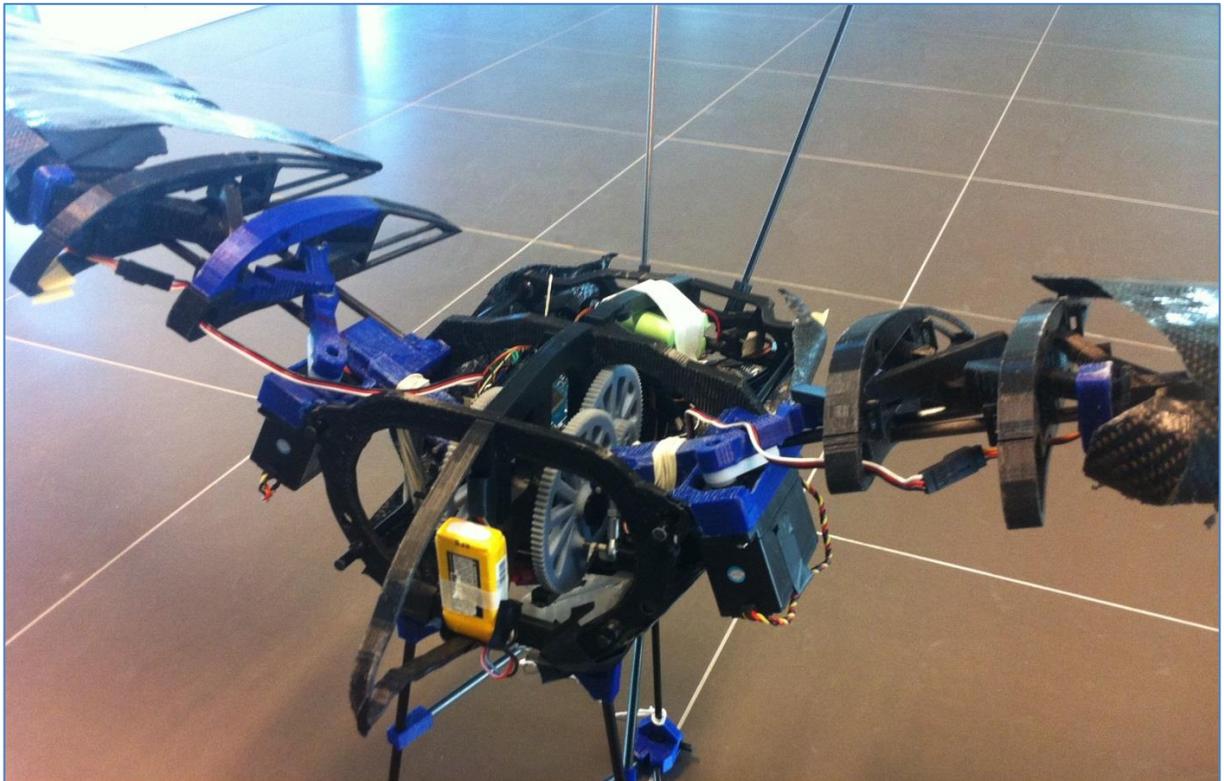


Figura 55: Estructura del ornitóptero completa.

Finalmente una vez terminada la estructura, se dispuso a construir la piel del ornitóptero, se decidió utilizar tela de fibra de carbono la cual es moldeada y endurecida utilizando resina epóxica, ya que de esta forma se obtiene un material suficientemente flexible para generar sustentación, y la suficiente rigidez para generar empuje. Para esto es necesaria la elaboración de un molde, el cual fue confeccionado usando plumavit como primera instancia (Figura 56 y Figura 57), y después aplicando masilla mágica sobre este para conseguir un acabado más liso (Figura 58).



Figura 56: Molde de plumavit del torso del ornitóptero.



Figura 57: Molde de plumavit del ala derecha del ornitóptero.



Figura 58: Molde con masilla mágica

Se puede apreciar que para hacer los moldes de plumavit se han utilizado como guías las piezas impresas basadas en el modelo inspirado en el halcón peregrino, se hizo de esta forma para respetar lo mejor posible los parámetros de diseño impuestos en la Tabla 5.

Finalmente de estos moldes se obtienen las piezas en fibra de carbono, algunos ejemplos se muestran en la Figura 59 y Figura 60.



Figura 59: Molde del torso de fibra de carbono en el molde.



Figura 60: Molde del Perfil 1 de fibra de carbono en el molde.

Finalmente se obtiene los moldes de fibra de carbono definitivos mostrados en la Figura 61.



Figura 61: Moldes de fibra de carbono definitivos para el ornitóptero.

Uniando los moldes construidos y la estructura del ornitóptero, se obtiene el robot en su totalidad (Figura 62).



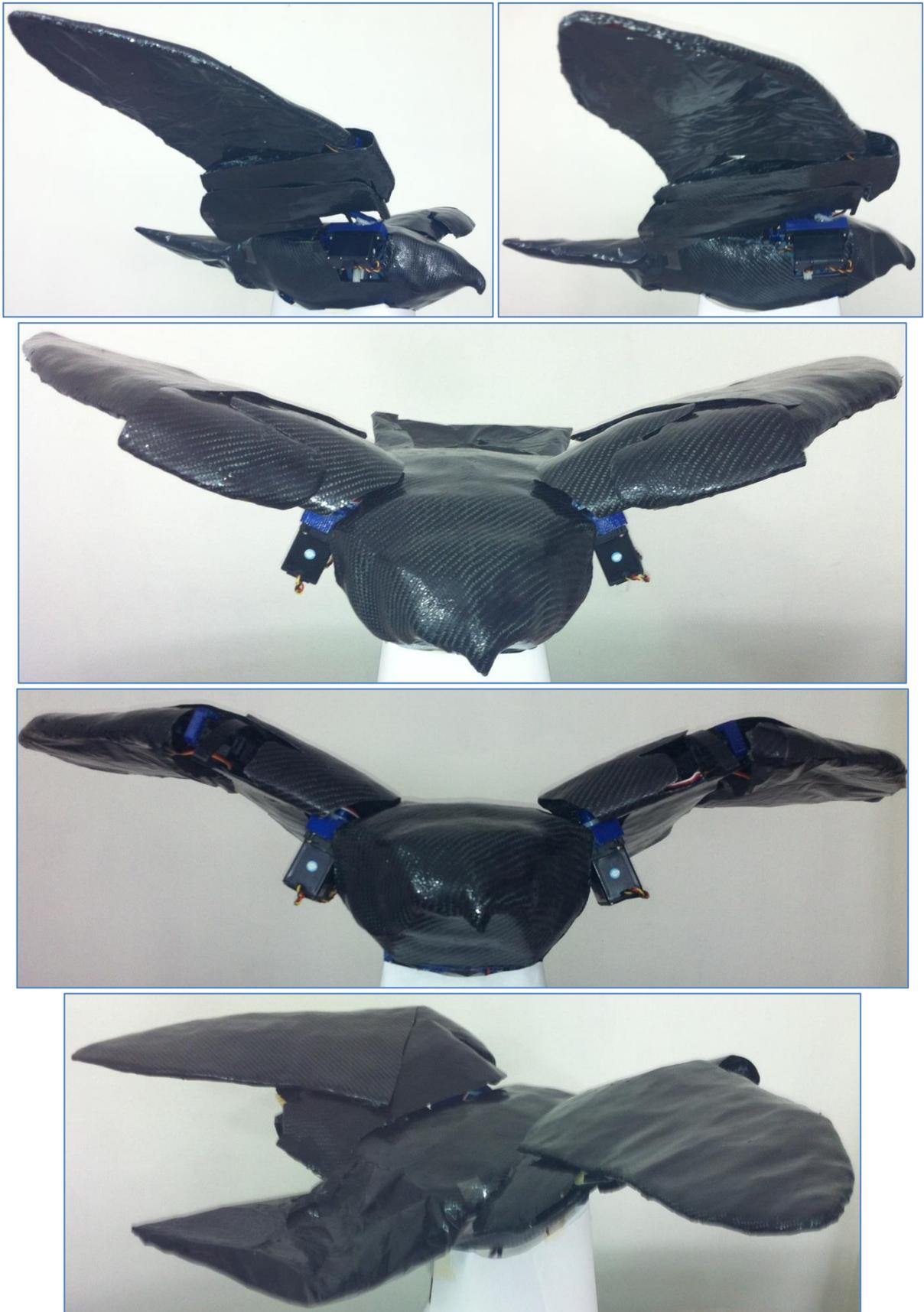


Figura 62: Ornitóptero robotizado bio-inspirado.

Capítulo 5.- Mediciones

Básicamente se busca descubrir en que situaciones el ornitóptero genera mayores fuerzas de empuje, para ello se harán pruebas que determinen movimientos que optimicen la fuerza generada y la velocidad del robot.

5.1. Montaje experimental

Con el fin de poder conseguir mediciones que permitan determinar cuál es la forma óptima de bateo para el ornitóptero en la situación mencionada, se implementa el montaje experimental mostrado en la Figura 63.



Figura 63: Construcción del montaje experimental.

Con este montaje se puede medir el desplazamiento del ornitóptero en función de la forma en que bate sus alas, con lo que se consigue una forma indirecta de comparar y decir cual movimiento produce mayor empuje. Esto ya que las fuerzas son proporcionales a los desplazamientos, es decir existe una relación lineal por existir un roce mínimo entre el robot y la superficie.

Básicamente el montaje consta de una estructura móvil construida con piezas 3D impresas en la MarketBot, barras de fibra de carbono y rodamientos que permiten utilizar 3 ruedas disminuyendo el roce con estas (Figura 64); y una rampla de medición. La estructura móvil cumple dos objetivos, el primero consiste en permitir al ornitóptero que aletee sin chocar con el suelo, ubicando al robot a una altura de 30 [cm] sobre la superficie en la que se apoya; y el segundo objetivo es permitir que el robot se desplacé hacia adelante y atrás. La rampla también cumple dos tareas, la primera es proporcionar una superficie sin inclinaciones con respecto a la trayectoria de desplazamiento del robot; y su segundo propósito es permitir una medición de desplazamiento de la estructura y por lo tanto del robot.

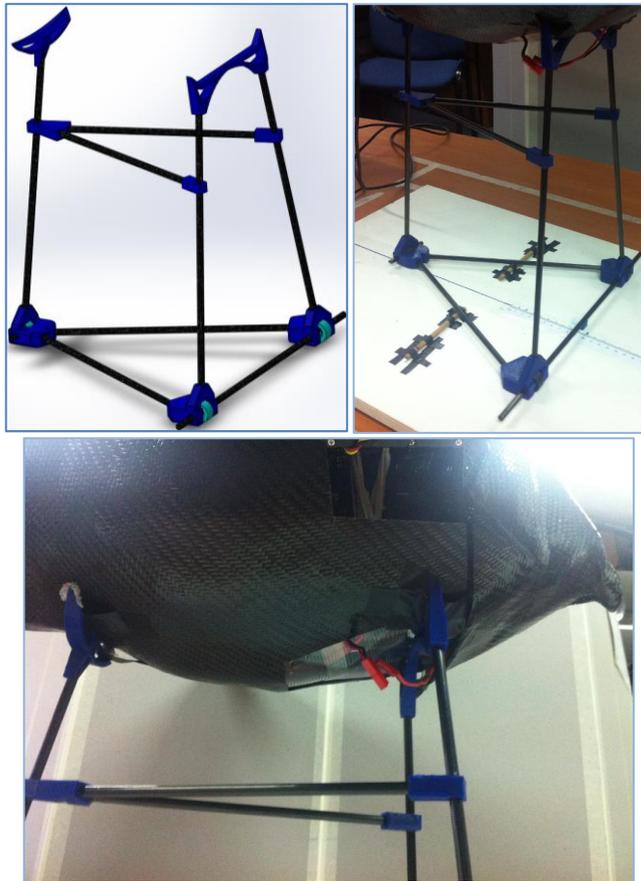


Figura 64: Estructura móvil diseñada, construida e implementada en el ornitóptero.

En la estructura móvil se amarra cerca de la rueda trasera un contrapeso de 100 [g] el cual cuelga en una extensión de la estructura tal como se muestra en la Figura 65 (también se ve a la izquierda de la Figura 63), si bien se ha minimizado el roce entre el ornitóptero y el suelo, este es imposible de eliminar completamente. Con el fin de evitar que el robot se desplace a causa de los movimientos realizados y no por el empuje ejercido por su batir de alas, se utiliza este contrapeso que genera una fuerza en sentido contrario al desplazamiento hacia adelante.

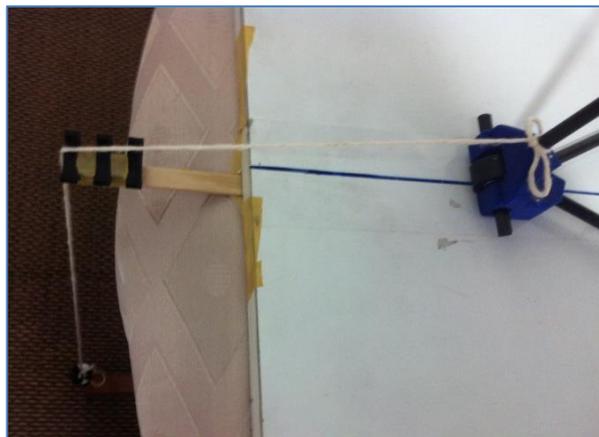


Figura 65: Contrapeso colgando en la estructura móvil.

5.2. Implementación del AG

Debido a que el ornitóptero usa cinco actuadores para poder mover sus alas y generar el movimiento de bateo, la cantidad de combinaciones de movimientos que puede ejecutar son prácticamente infinitas, es por ello que se utiliza un algoritmo genético para obtener un aleteo óptimo el cual es ejecutado utilizando el software MATLAB. A continuación se indican algunas acotaciones a los experimentos y cómo se implementa el algoritmo genético en ellos.

- Puesto que se desea obtener un desplazamiento máximo en una trayectoria recta, el ornitóptero realiza un aleteo simétrico en todo momento, es decir, el movimiento del ala izquierda será el reflejo del movimiento del ala derecha y viceversa.
- La acción de expandir y contraer las alas será ejecutada durante medio ciclo del aleteo cada una, esto ya que permite imitar el movimiento natural de las aves y al mismo tiempo garantizar la seguridad estructural del robot.
- Aumentar y disminuir del ángulo de ataque de las alas se ejecutara durante medio ciclo cada uno por los mismos motivos que la acotación anterior.

Considerando lo anterior y el hecho de que el robot posee sensores de efecto Hall que permiten discretizar el movimiento completo de bateo de sus alas en 30 posiciones, los individuos genéticos binarios para el AG consistirán en cromosomas con 9 alelos y 4 genes. Esto impone la proposición de una población de 512 individuos, siendo cada uno representante de cuatro características principales del aleteo, las cuales son:

- A) Acción de expandir y contraer las alas durante el aleteo, o no hacerlo.
- B) Si se implementa la acción de la característica A, determinar cuándo hacerla durante el aleteo. En caso contrario determinar con que ángulo de apertura de las alas generar los aleteos.
- C) En qué momento aumentar y disminuir el ángulo de ataque durante el aleteo.
- D) Con que amplitud se modificara el ángulo de ataque de las alas durante el aleteo.

Las tres primeras características (A, B y C) dependen fuertemente de las lecturas del sensor Hall, en la Figura 66 se puede apreciar que posición del engranaje corresponde a cada detección del sensor, y por lo tanto saber la posición de las alas ya que estas dependen de la rotación de los engranajes (tal como se muestra en la Figura 29). Básicamente el ciclo completo de aleteo empieza en la detección de posición del engranaje en 1, cuando las alas están abajo del torso; luego las alas comienzan a subir por el giro del engranaje siguiendo las manecillas del reloj con el pico del ave apuntando a la izquierda; esto hasta llegar a la posición 16 que significa que las alas están arriba; para finalmente bajar las alas volviendo a la posición 1.

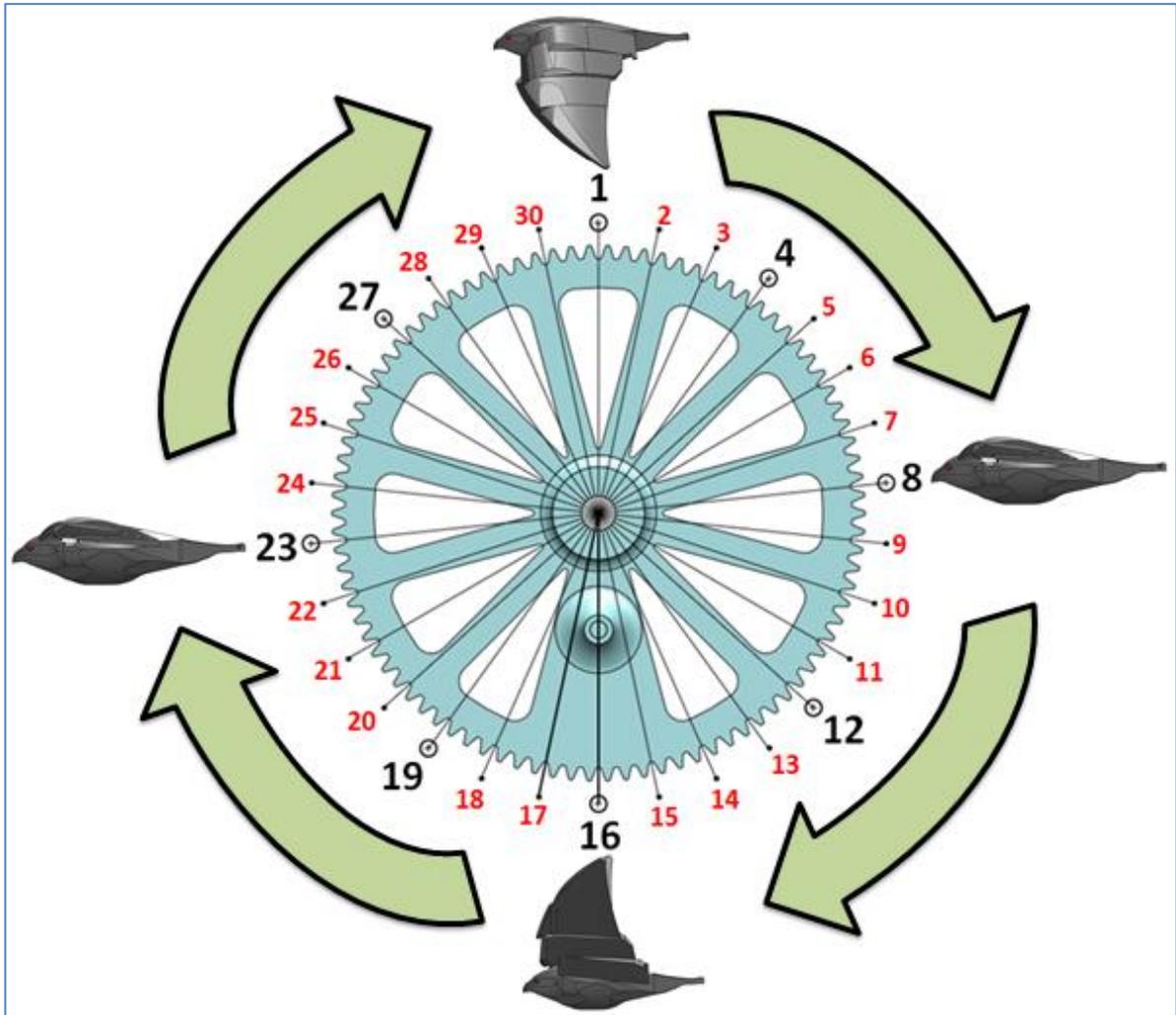


Figura 66: Discretización del ciclo de aleteo en función de las detecciones del sensor de efecto Hall en el engranaje del ornitóptero.

Con respecto a la característica D (amplitud con la que varía el ángulo de ataque), se permiten 8 rangos durante un aleteo, estos son los siguientes: $[8^\circ, -6^\circ]$, $[15^\circ, -13^\circ]$, $[30^\circ, -26^\circ]$, $[38^\circ, -32^\circ]$, $[15^\circ, 0^\circ]$, $[38^\circ, 0^\circ]$, $[0^\circ, -13^\circ]$ y $[0^\circ, -32^\circ]$. Estos ya que para el Perfil 3 se ha estimado que para los ángulos de ataque entre $[-6.45^\circ, 7.52^\circ]$ se consigue un mayor coeficiente de sustentación (C_l) versus un menor coeficiente de roce (C_d) (tal como muestra la Tabla 6).

Ya con el entendimiento del funcionamiento en detalle del sensor Hall y los rangos permitidos para el ángulo de ataque, se pueden comprender como el AG controla las 4 características principales de un aleteo. A continuación se muestra en la Figura 67 un diagrama todas las posibles combinaciones de acciones que el AG impone al ornitóptero, siendo Hall la posición del engranaje detectado por el sensor de efecto Hall y AT el ángulo de ataque de las alas.

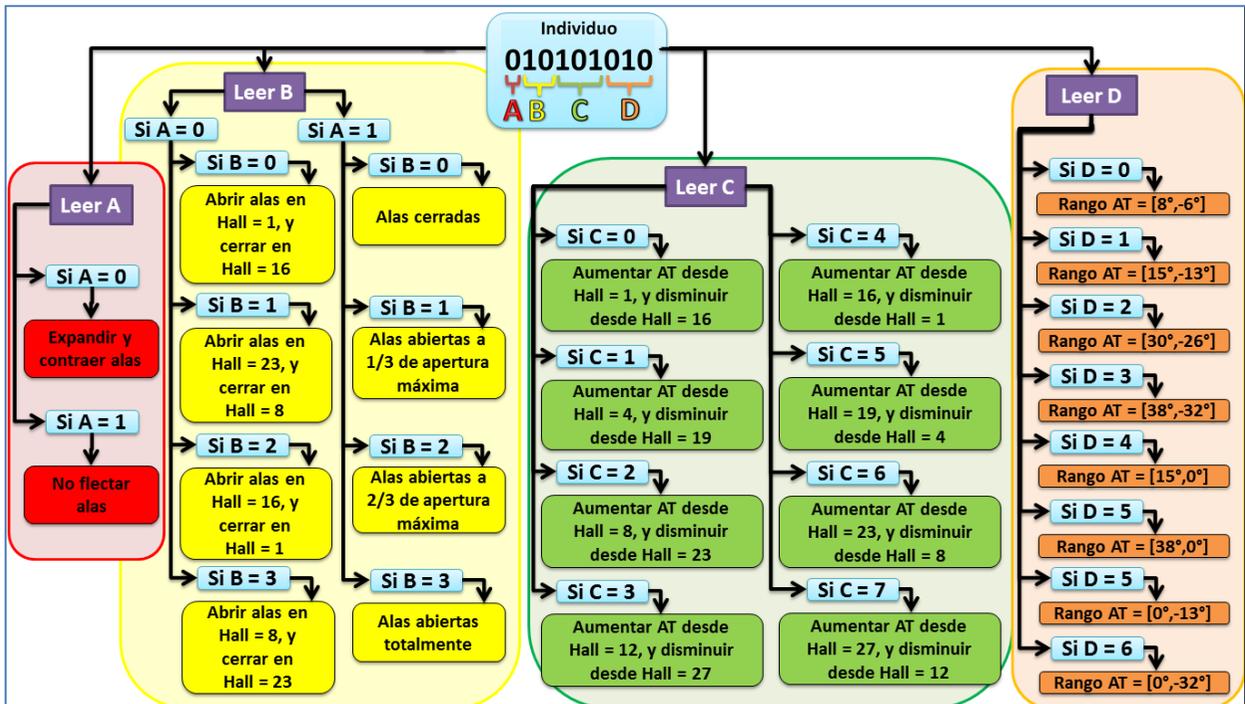


Figura 67: Diagrama de movimientos del ornitóptero en función de los individuos del AG.

A continuación se presenta un ejemplo con la finalidad de mostrar como los individuos imponen las acciones que deben ejecutar los actuadores del ornitóptero:

- Sea el individuo binario 000100100. La característica A se rescata del primer alelo, en este caso 0 significa que las alas se abren y se cierran. La característica B se rescata de los siguientes dos alelos, en este caso 00 significa que las alas se abren cuando la posición del engranaje detectada es la 1 (es decir cuando las alas están abajo, tal como indica la Figura 66), y se abren cuando se detecta la posición 16. La característica C se rescata de los siguientes tres alelos, en este caso 100 significa que el ángulo de ataque empieza a crecer inclinando el borde de ataque hacia abajo (es decir, la punta delantera del perfil alar, tal como muestra la Figura 5) desde la posición 16 hasta la 30, disminuyendo el ángulo de ataque (subiendo el borde de ataque) desde la posición 1 hasta la 15. Finalmente la característica D se rescata de los últimos tres alelos, en este caso 100 significa que el rango en el cual se cambia el ángulo de ataque es entre [15°, 0°].

De este modo el AG genera 8 individuos al azar, y sigue los pasos mostrados en la Figura 22 con las siguientes características:

- Como función fitness utiliza el desplazamiento del ornitóptero medido para cada individuo.
- Se utiliza una tasa de Cruzamiento de 0.9, y una tasa de mutación de 0.1.
- La selección entre individuos se produce por una serie de torneos de tamaño 2 entre los 8 individuos de la generación.
- El cruzamiento se genera entre 2 individuos dividiéndolos en 2 partes a cada uno y luego mezclándolas, el tamaño de las partes obtenidas por la división de los individuos es seleccionada al azar.
- En la etapa de reemplazo todos los hijos pasan a ser los padres de la siguiente generación.
- El AG se detiene si se llega a un individuo único como óptimo.

5.3. Implementación del OptiTrack

Con el fin de caracterizar los movimientos generados por el ornitóptero impuestos por el AG, se utiliza el sensor de movimientos OptiTrack. Para conseguir este objetivo, se utilizan puntos reflectantes puestos sobre el robot en partes claves de este tal como muestra la Figura 68, en la cual se destacan 3 grupos de puntos de interés los cuales son: Los 2 puntos que representan las posiciones de las puntas de las alas, los 4 puntos que representan los ángulos de ataque de las alas, y los 2 puntos que representan las posiciones de los hombros.

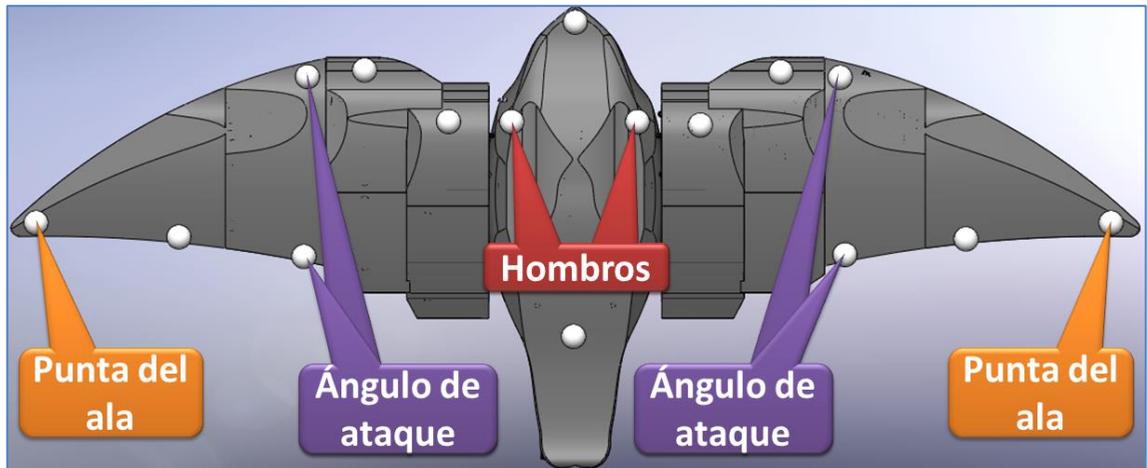


Figura 68: Ubicación de los puntos reflectantes en el ornitóptero y clasificación de puntos de interés.

De este modo el OptiTrack detecta las ubicaciones de los puntos reflectantes por estar ubicado sobre el ornitóptero tal como muestra la Figura 69, y poder obtener las coordenadas XYZ de los 16 puntos reflectantes tal como lo muestra la Figura 70.

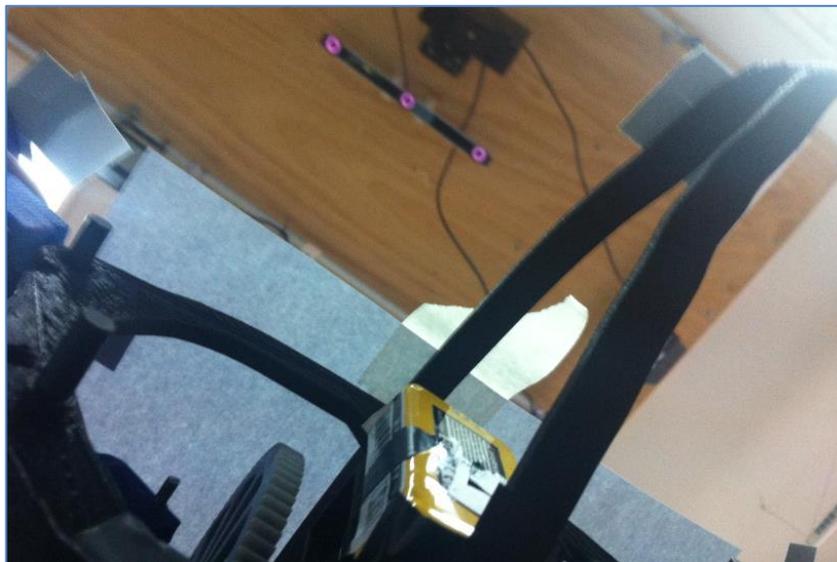


Figura 69: OptiTrack sobre el ornitóptero.

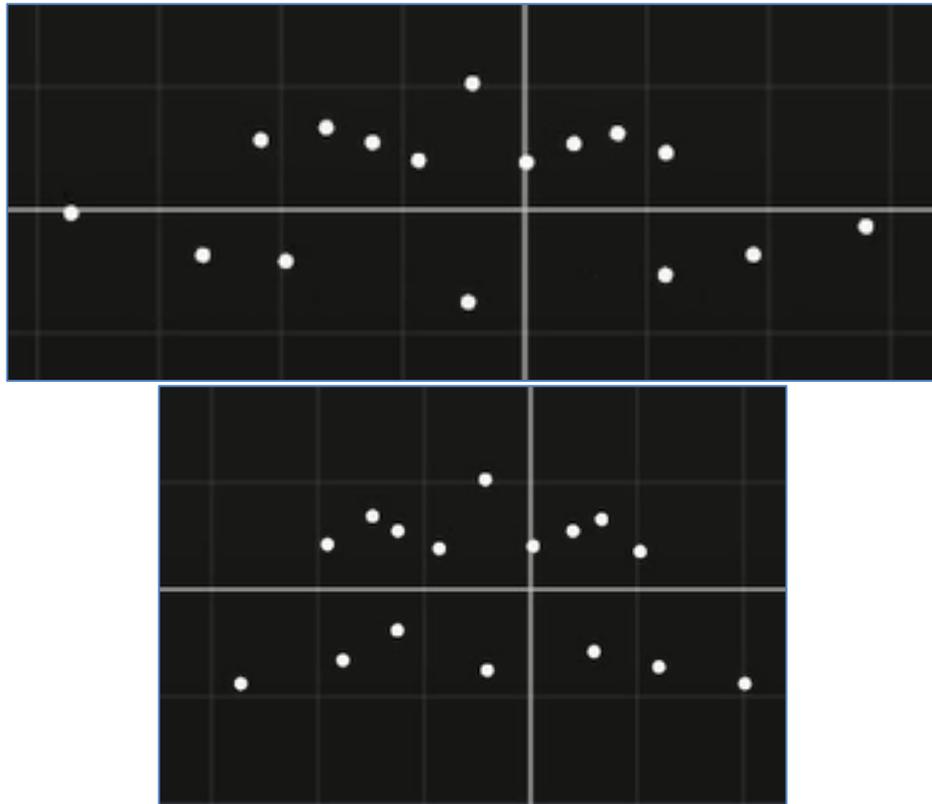


Figura 70: Puntos reflectantes detectados por el OptiTrack, con las alas abiertas y cerradas.

Se puede observar que el pico del ave es el punto ubicado en el medio de la parte superior, el comienzo de la cola es el punto medio en la parte baja, los puntos que se encuentran a la derecha de la línea blanca vertical corresponden al ala derecha, y el resto de puntos al ala izquierda (es decir, la posición del en la Figura 70 es la misma de la Figura 68). Las líneas blancas son referencias del sistema de coordenadas del OptiTrack, las cuales ayudan apreciar cómo cambia la posición de estos puntos al expandir y contraer al máximo las alas estando en paralelo con suelo.

Capítulo 6.- Análisis de resultados

6.1. Resultados

6.1.1. AG optimizando el desplazamiento

Con el fin de encontrar el o los movimientos que generen mayor empuje, se mide el desplazamiento conseguido por el robot en el montaje experimental repitiendo el individuo un total de cinco veces, es decir, se deja aleteando al ornitóptero cinco veces con una frecuencia aproximada de 1.5 [Hz] antes de medir el desplazamiento generado por estos. A continuación se muestran en la Tabla 13 los individuos impuestos por el AG, donde la primera columna los ordena y la segunda identifica al individuo dentro del universo de los 512 candidatos a solución óptima.

Tabla 13: Individuos elegidos por el AG he implementados por el ornitóptero.

Individuo			Características								FITNESS
N°	Lista	Binario	Binario				Decimal				Desplazamiento [mm]
			A	B	C	D	A	B	C	D	
1	1	000000000	0	00	000	000	0	0	0	0	42
2	2	000000001	0	00	000	001	0	0	0	1	47
3	15	000001110	0	00	001	110	0	0	1	6	29
4	21	000010100	0	00	010	100	0	0	2	4	98
5	23	000010110	0	00	010	110	0	0	2	6	85
6	27	000011010	0	00	011	010	0	0	3	2	32
7	29	000011100	0	00	011	100	0	0	3	4	93
8	30	000011101	0	00	011	101	0	0	3	5	80
9	39	000100110	0	00	100	110	0	0	4	6	36
10	70	001000101	0	01	000	101	0	1	0	5	50
11	71	001000110	0	01	000	110	0	1	0	6	21
12	73	001001000	0	01	001	000	0	1	1	0	60
13	74	001001001	0	01	001	001	0	1	1	1	61
14	75	001001010	0	01	001	010	0	1	1	2	45
15	77	001001100	0	01	001	100	0	1	1	4	46
16	78	001001101	0	01	001	101	0	1	1	5	40
17	79	001001110	0	01	001	110	0	1	1	6	44
18	89	001011000	0	01	011	000	0	1	3	0	43
19	95	001011110	0	01	011	110	0	1	3	6	10

Individuo			Características								FITNESS
N°	Lista	Binario	Binario				Decimal				Desplazamiento [mm]
			A	B	C	D	A	B	C	D	
20	111	001101110	0	01	101	110	0	1	5	6	37
21	127	001111110	0	01	111	110	0	1	7	6	40
22	129	010000000	0	10	000	000	0	2	0	0	125
23	130	010000001	0	10	000	001	0	2	0	1	140
24	132	010000011	0	10	000	011	0	2	0	3	83
25	133	010000100	0	10	000	100	0	2	0	4	70
26	134	010000101	0	10	000	101	0	2	0	5	99
27	135	010000110	0	10	000	110	0	2	0	6	54
28	136	010000111	0	10	000	111	0	2	0	7	64
29	137	010001000	0	10	001	000	0	2	1	0	119
30	142	010001101	0	10	001	101	0	2	1	5	80
31	145	010010000	0	10	010	000	0	2	2	0	115
32	146	010010001	0	10	010	001	0	2	2	1	118
33	149	010010100	0	10	010	100	0	2	2	4	111
34	150	010010101	0	10	010	101	0	2	2	5	93
35	155	010011010	0	10	011	010	0	2	3	2	87
36	158	010011101	0	10	011	101	0	2	3	5	81
37	159	010011110	0	10	011	110	0	2	3	6	20
38	161	010100000	0	10	100	000	0	2	4	0	18
39	162	010100001	0	10	100	001	0	2	4	1	26
40	165	010100100	0	10	100	100	0	2	4	4	77
41	166	010100101	0	10	100	101	0	2	4	5	99
42	174	010101101	0	10	101	101	0	2	5	5	74
43	178	010110001	0	10	110	001	0	2	6	1	90
44	180	010110011	0	10	110	011	0	2	6	3	106
45	189	010111100	0	10	111	100	0	2	7	4	85
46	190	010111101	0	10	111	101	0	2	7	5	95
47	202	011001001	0	11	001	001	0	3	1	1	30
48	205	011001100	0	11	001	100	0	3	1	4	8
49	206	011001101	0	11	001	101	0	3	1	5	20
50	207	011001110	0	11	001	110	0	3	1	6	22
51	217	011011000	0	11	011	000	0	3	3	0	22
52	222	011011101	0	11	011	101	0	3	3	5	20
53	238	011101101	0	11	101	101	0	3	5	5	19
54	259	100000010	1	00	000	010	1	0	0	2	28
55	263	100000110	1	00	000	110	1	0	0	6	24
56	264	100000111	1	00	000	111	1	0	0	7	37
57	270	100001101	1	00	001	101	1	0	1	5	7
58	271	100001110	1	00	001	110	1	0	1	6	22
59	286	100011101	1	00	011	101	1	0	3	5	6
60	295	100100110	1	00	100	110	1	0	4	6	35

Individuo			Características								FITNESS
N°	Lista	Binario	Binario				Decimal				Desplazamiento [mm]
			A	B	C	D	A	B	C	D	
61	313	100111000	1	00	111	000	1	0	7	0	12
62	323	101000010	1	01	000	010	1	1	0	2	34
63	324	101000011	1	01	000	011	1	1	0	3	11
64	327	101000110	1	01	000	110	1	1	0	6	26
65	331	101001010	1	01	001	010	1	1	1	2	59
66	332	101001011	1	01	001	011	1	1	1	3	10
67	334	101001101	1	01	001	101	1	1	1	5	29
68	335	101001110	1	01	001	110	1	1	1	6	24
69	336	101001111	1	01	001	111	1	1	1	7	15
70	345	101011000	1	01	011	000	1	1	3	0	11
71	347	101011010	1	01	011	010	1	1	3	2	26
72	350	101011101	1	01	011	101	1	1	3	5	13
73	354	101100001	1	01	100	001	1	1	4	1	18
74	356	101100011	1	01	100	011	1	1	4	3	15
75	358	101100101	1	01	100	101	1	1	4	5	35
76	360	101100111	1	01	100	111	1	1	4	7	30
77	366	101101101	1	01	101	101	1	1	5	5	17
78	385	110000000	1	10	000	000	1	2	0	0	35
79	389	110000100	1	10	000	100	1	2	0	4	46
80	391	110000110	1	10	000	110	1	2	0	6	22
81	402	110010001	1	10	010	001	1	2	2	1	40
82	419	110100010	1	10	100	010	1	2	4	2	32
83	421	110100100	1	10	100	100	1	2	4	4	51
84	423	110100110	1	10	100	110	1	2	4	6	27
85	424	110100111	1	10	100	111	1	2	4	7	20
86	433	110110000	1	10	110	000	1	2	6	0	24
87	463	111001110	1	11	001	110	1	3	1	6	11
88	470	111010101	1	11	010	101	1	3	2	5	15
89	490	111101001	1	11	101	001	1	3	5	1	28

Siendo el mejor individuo el N° 23 con un desplazamiento máximo de 140 [mm], un total de 26 generaciones y 89 individuos evaluados. En este caso el AG se detuvo por todos los padres tuvieron al mismo hijo. El desempeño del AG se puede apreciar en el siguiente gráfico (Figura 71).

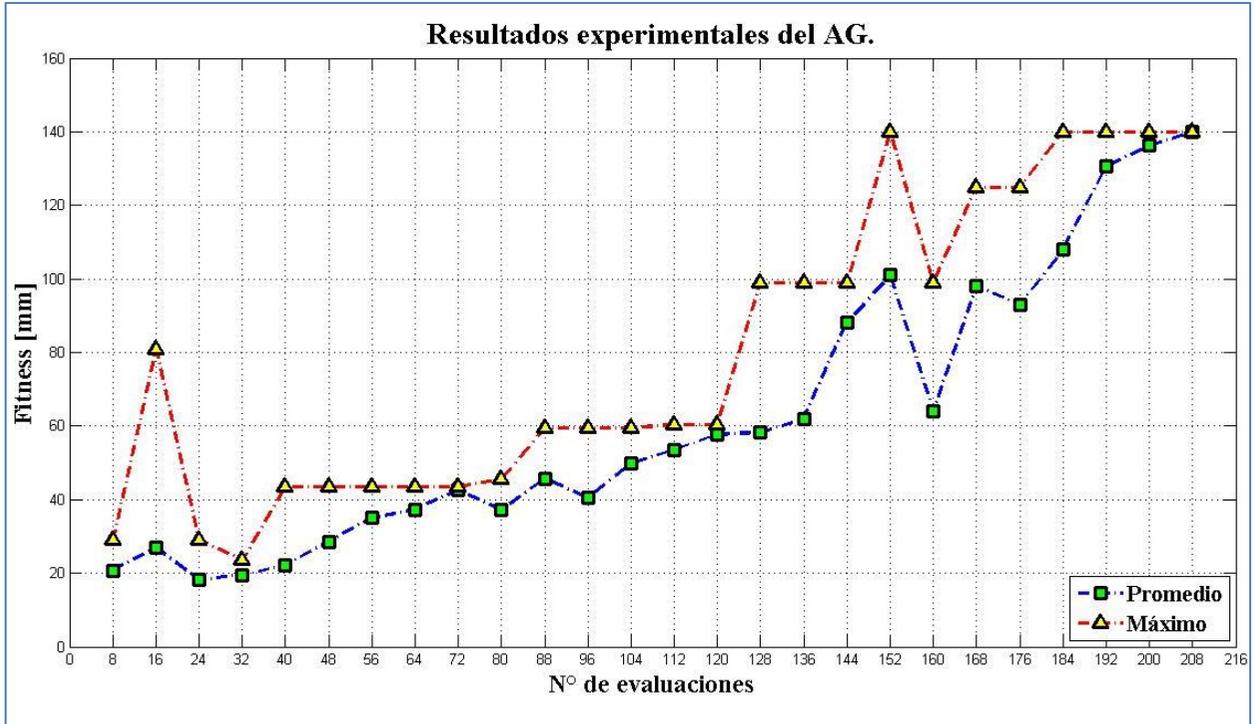
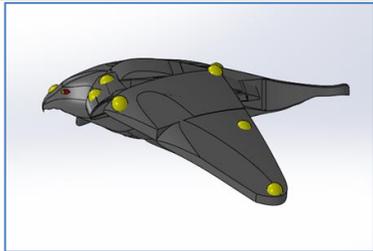
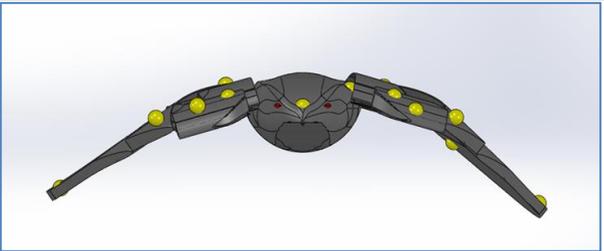
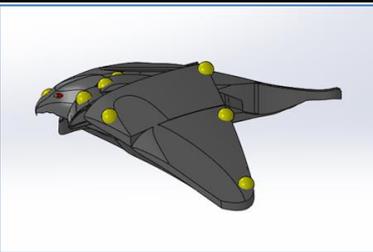
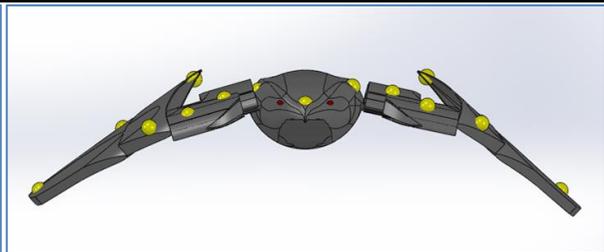
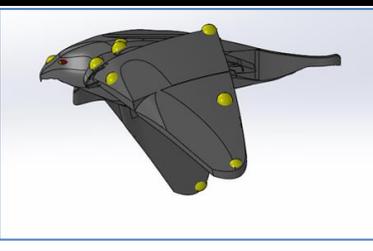
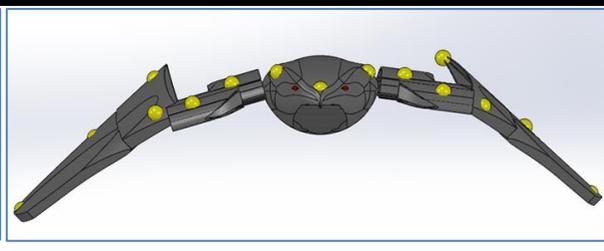
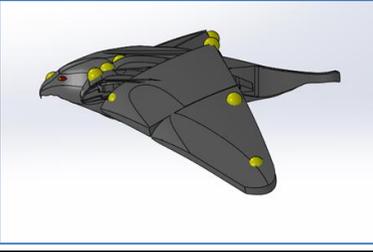
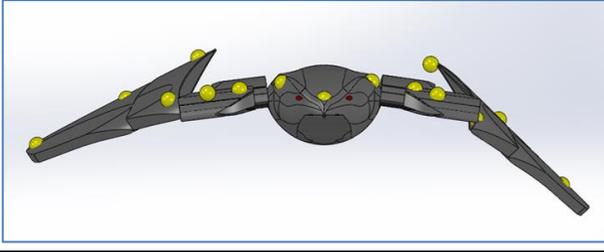
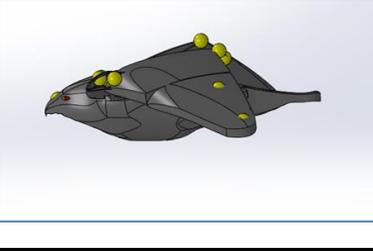
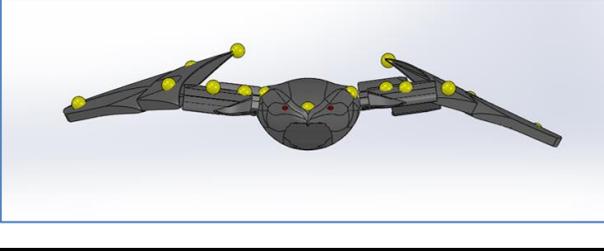
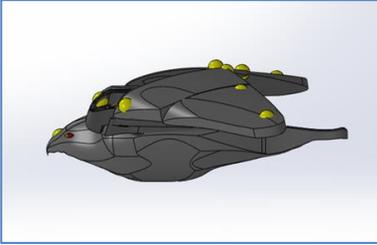
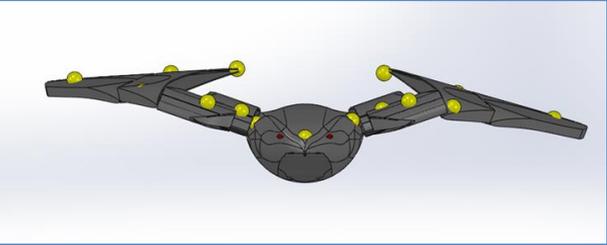
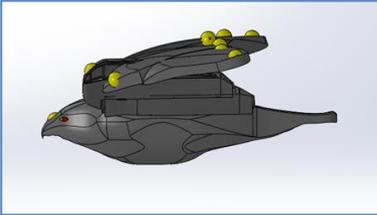
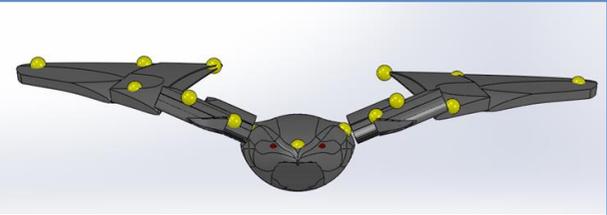
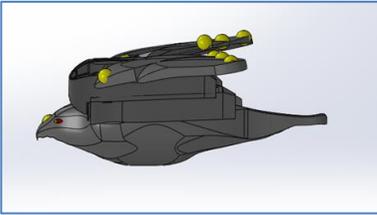
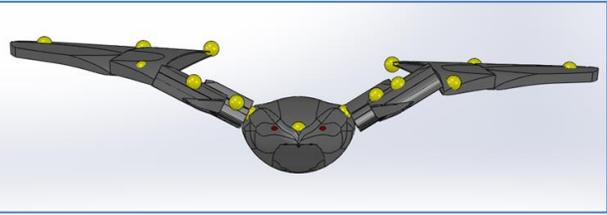
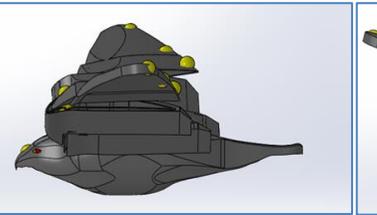
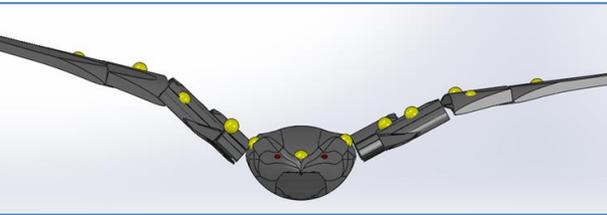
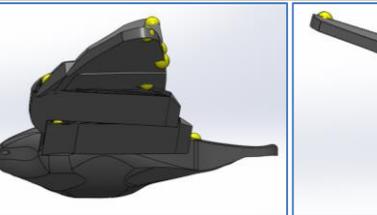
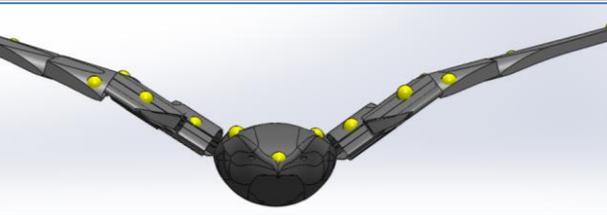
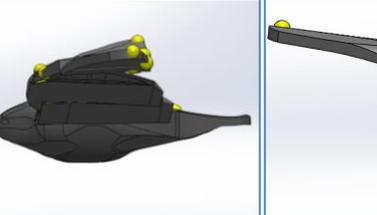
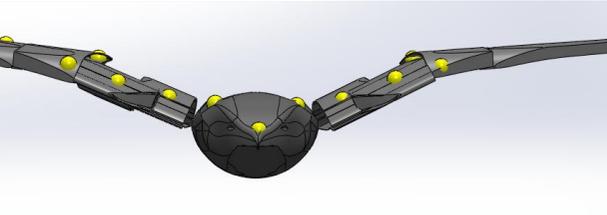


Figura 71: Desempeño del AG.

6.1.2. Registros del OptiTrack

A continuación se muestra la secuencia de movimientos registradas por el OptiTrack del mejor individuo en los experimentos descritos anteriormente. En la Figura 72 se muestra como el ornitóptero reproduce un aleteo, esta secuencia se obtuvo registrando con el OptiTrack los puntos reflectantes puestos en el robot mientras este ejecutaba las acciones del individuo N° 23 (Tabla 19), y con la información de las coordenadas XYZ de los 16 puntos dibujarlos en el espacio tridimensional en SolidWorks (puntos amarillos), utilizándolos como referencia para representar al ornitóptero. Con una duración de 0.72 [seg] se muestra una vista lateral y frontal de 14 posiciones.

N° 1		
0.00 [Seg]		
N° 2		
0.05 [Seg]		
N° 3		
0.10 [Seg]		
N° 4		
0.15 [Seg]		
N° 5		
0.20 [Seg]		

N° 6		
0.25 [Seg]		
N° 7		
0.30 [Seg]		
N° 8		
0.35 [Seg]		
N° 9		
0.40 [Seg]		
N° 10		
0.46 [Seg]		
N° 11		
0.53 [Seg]		

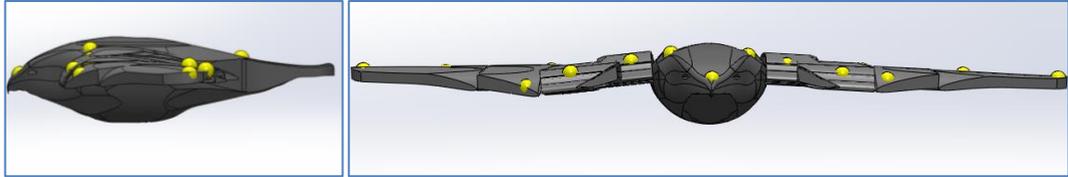
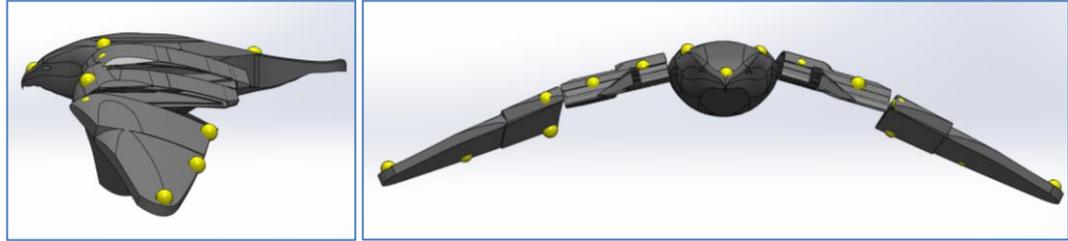
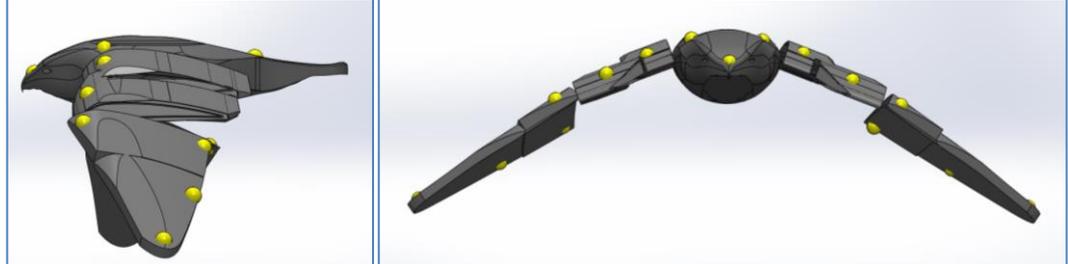
N° 12		
0.59 [Seg]		
N° 13		
0.66 [Seg]		
N° 14		
0.72 [Seg]		

Figura 72: Movimientos del individuo N° 23 registrados por el OptiTrack y mostrados en SolidWorks.

Como se puede apreciar en la Figura 71, hay seis individuos que destacan por tener el máximo fitness a medida que evoluciona el AG los cuales son el N° 36, N° 79, N° 65, N° 26, N° 22 y N° 23. A continuación se muestra la evolución del promedio de las alturas de los dos puntos que representan la punta de las alas y del promedio de los ángulos de ataque de estos seis individuos en función del tiempo, utilizando como altura de referencia (es decir, altura medida igual a 0 [mm]) la posición promedio en el eje Z de los hombros (en la Figura 68 se muestran estos tres conjuntos de puntos de interés en el ornitóptero).

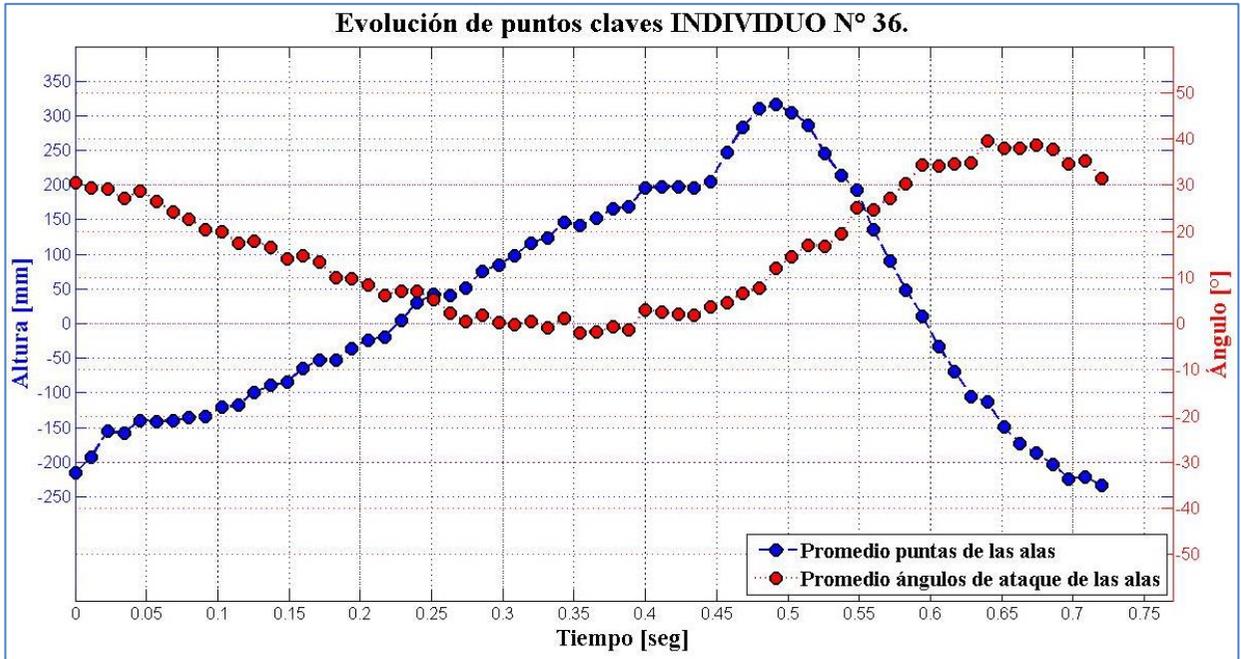


Figura 73: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 36.

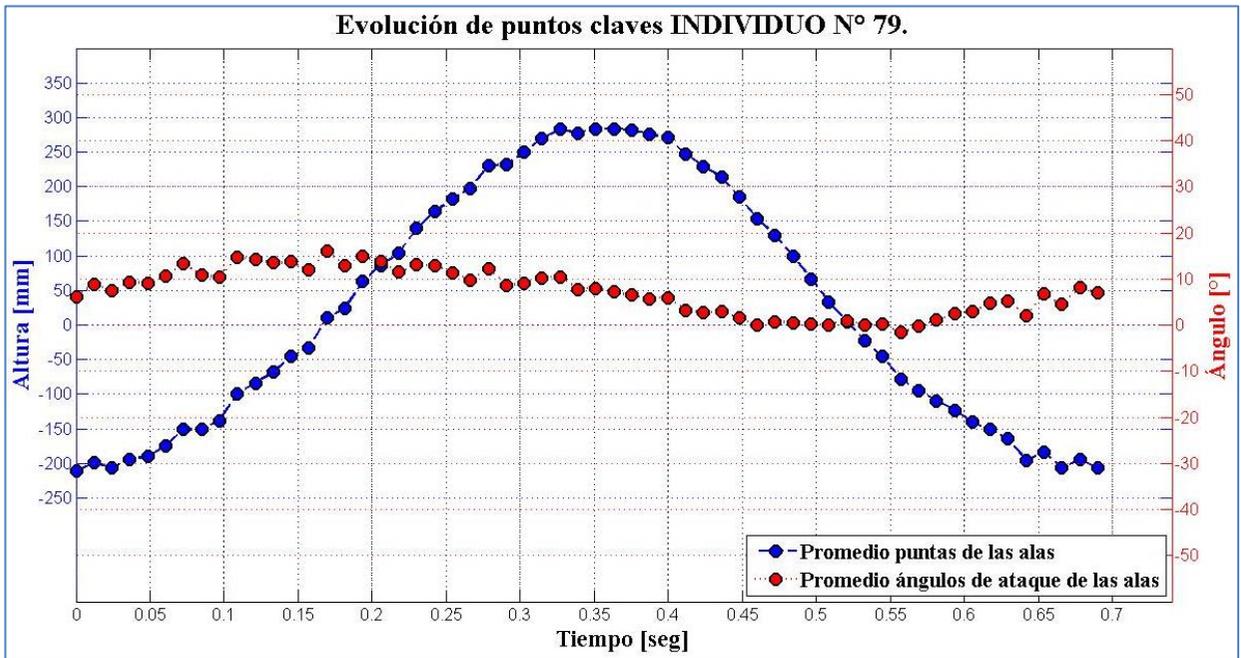


Figura 74: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 79.

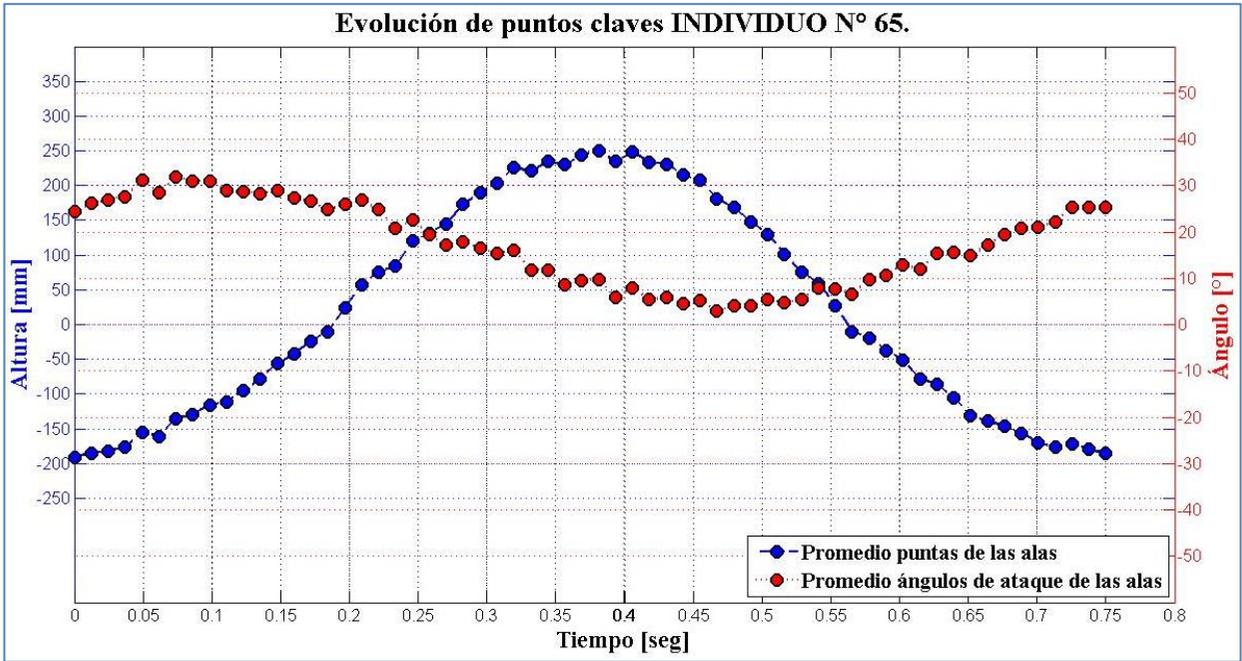


Figura 75: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 65.

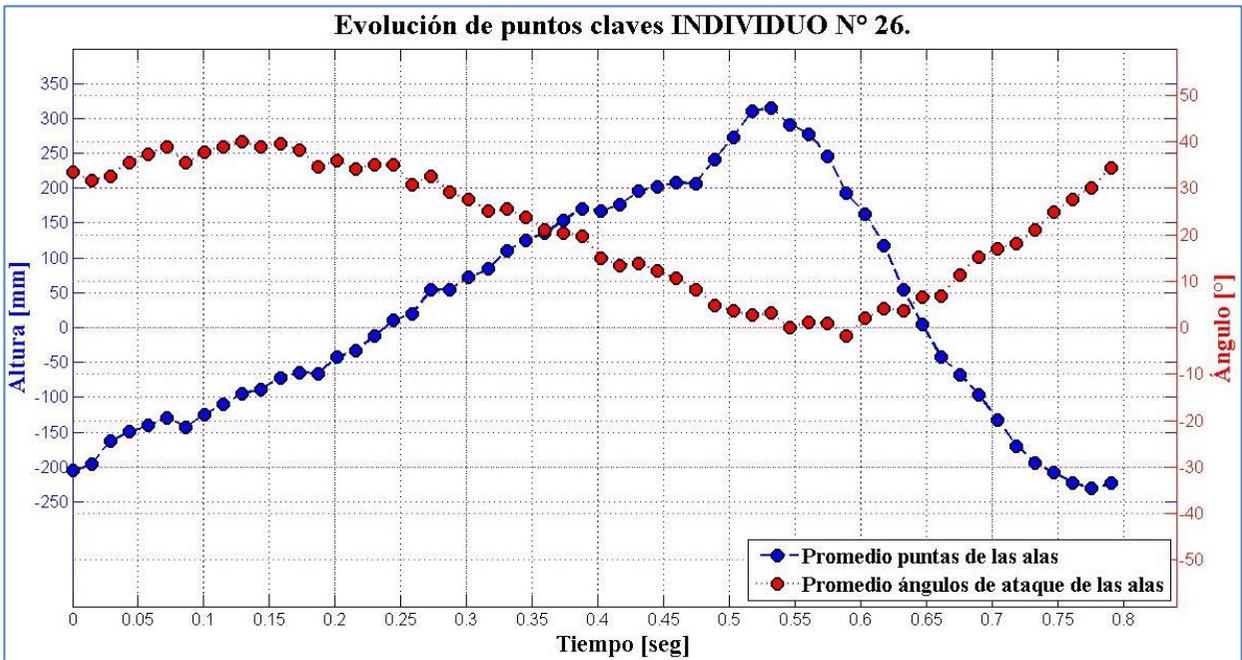


Figura 76: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 26.

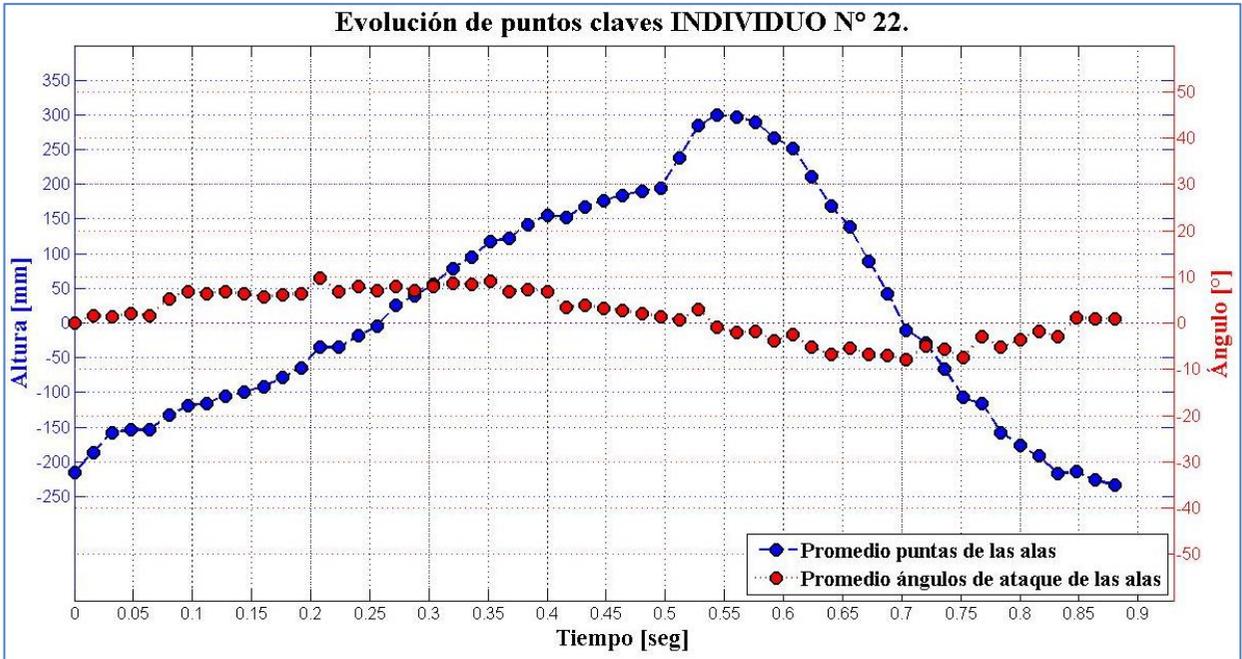


Figura 77: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 22.

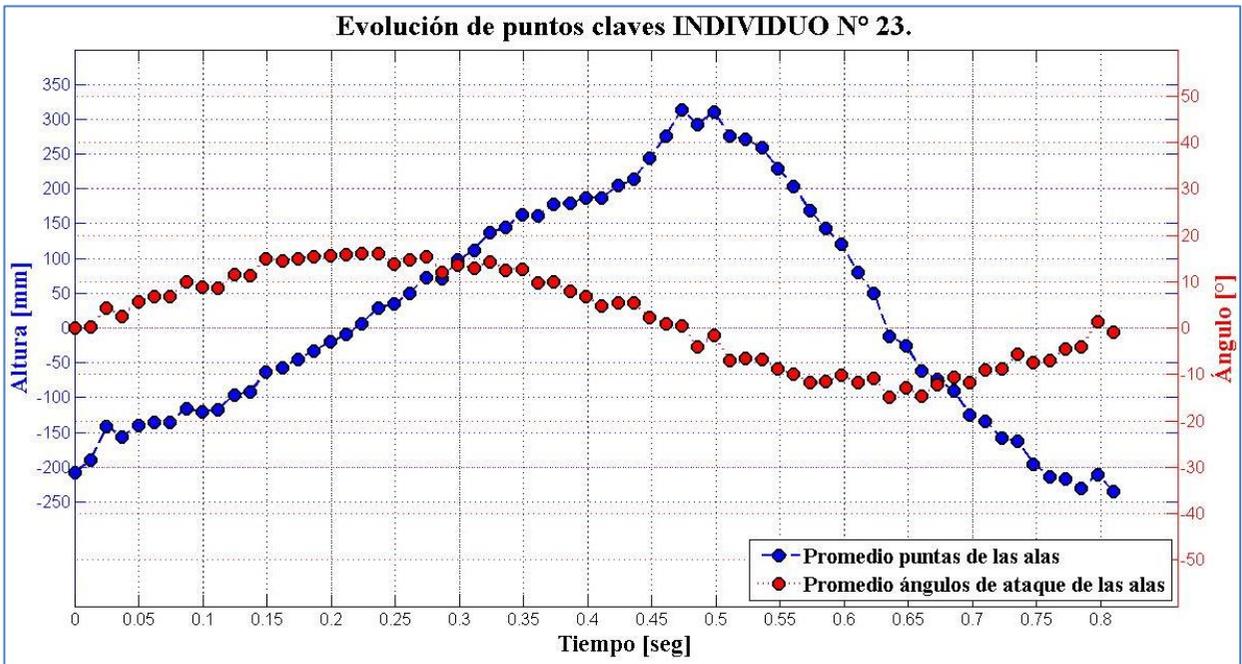


Figura 78: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 23.

A continuación se muestran las mismas mediciones para el individuo N° 59, el cual corresponde al individuo con peor fitness de la Tabla 13.

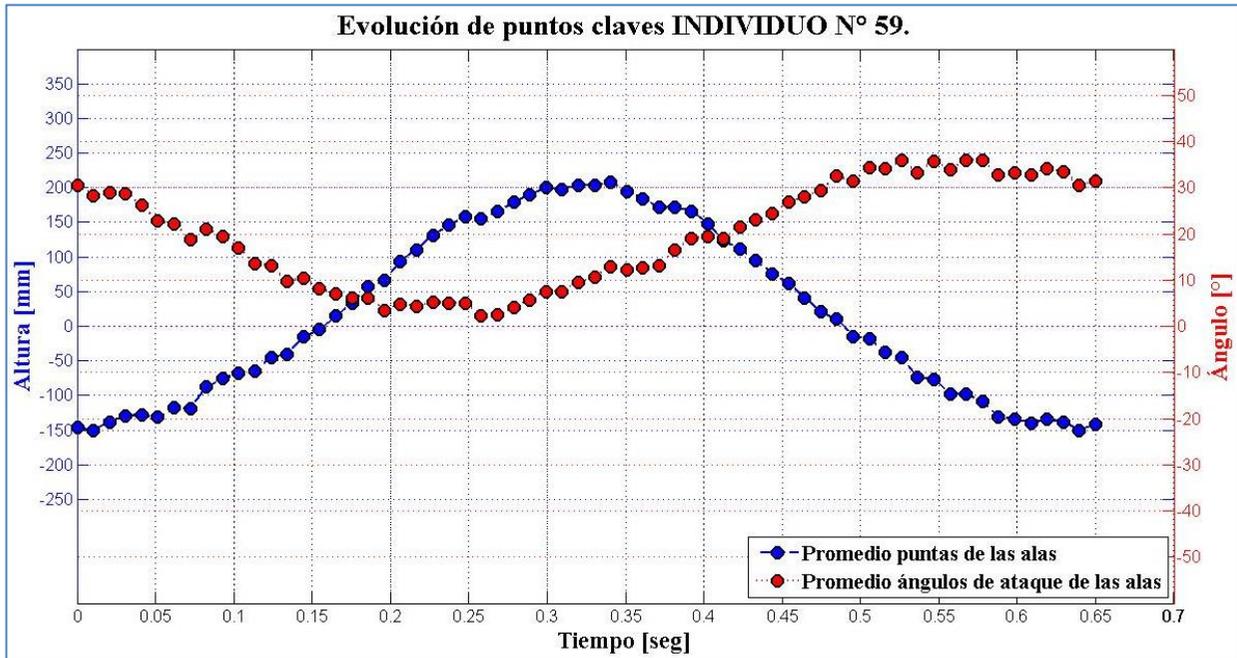


Figura 79: Comportamiento de puntos claves para el individuo N° 59, peor fitness.

6.2. Análisis

A continuación se muestran los movimientos que han sido impuestos realizar al ornitóptero en las pruebas por los seis mejores individuos encontrados por el AG:

Tabla 14: Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 36 (010011101).

Característica	Binario	Acción
A	0	Abrir y cerrar las alas
B	10	Abrir cuando las alas estén arriba y cerrar cuando estén abajo
C	011	Aumentar ángulo de ataque desde Hall = 12 y disminuir desde Hall = 27
D	101	Rango del ángulo de ataque de [38°, 0°]

Tabla 15: Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 79 (110000100).

Característica	Binario	Acción
A	1	No flectar las alas
B	10	Alas abiertas a 2/3 de su apertura máxima
C	000	Aumentar ángulo de ataque al momento de subir las alas y disminuirlo al momento de bajarlas
D	100	Rango del ángulo de ataque de [15°, 0°]

Tabla 16: Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 65 (101001010).

Característica	Binario	Acción
A	1	No flectar las alas
B	01	Ala extendida al máximo
C	001	Aumentar ángulo de ataque desde Hall = 4 y disminuir desde Hall = 19
D	010	Rango del ángulo de ataque de [30°, -26°]

Tabla 17: Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 26 (010000101).

Característica	Binario	Acción
A	0	Abrir y cerrar las alas
B	10	Abrir cuando las alas estén arriba y cerrar cuando estén abajo
C	000	Aumentar ángulo de ataque al momento de subir las alas y disminuirlo al momento de bajarlas
D	101	Rango del ángulo de ataque de [38°, 0°]

Tabla 18: Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 22 (010000000).

Característica	Binario	Acción
A	0	Abrir y cerrar las alas
B	10	Abrir cuando las alas estén arriba y cerrar cuando estén abajo
C	000	Aumentar ángulo de ataque al momento de subir las alas y disminuirlo al momento de bajarlas
D	000	Rango del ángulo de ataque de [38°, 0°]

Tabla 19: Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 23 (010000001), mejor fitness.

Característica	Binario	Acción
A	0	Abrir y cerrar las alas
B	10	Abrir cuando las alas estén arriba y cerrar cuando estén abajo
C	000	Aumentar ángulo de ataque al momento de subir las alas y disminuirlo al momento de bajarlas
D	001	Rango del ángulo de ataque de [15°, -13°]

Tabla 20: Acciones en el ornitóptero impuestas por el individuo N° 59 (100011101), peor fitness.

Característica	Binario	Acción
A	1	No flectar las alas
B	00	Ala extendida al mínimo
C	011	Aumentar ángulo de ataque desde Hall = 12 y disminuir desde Hall = 27
D	101	Rango del ángulo de ataque de [38°, 0°]

Se comprobó que los movimientos ejecutados por el robot en situaciones específicas no son los esperados, gracias a los resultados obtenidos por el OptiTrack y dibujados en SolidWorks (Figura 72) se puede apreciar que la frecuencia de aleteo del ornitóptero es de aproximadamente 1.5 [Hz], lo cual es baja en comparación a la frecuencia de aleteo del Halcón peregrino de 4.32 [Hz] (Tabla 1); también se puede observar que cuando el ornitóptero abre y cierra las alas cuando estas están arriba o abajo lo suele hacer con dificultad (el movimiento no es muy rápido), esto ya los servo motores de los hombros tienen que vencer el peso de las alas sumado a la inercias de estas por el movimiento de bateo. Sin embargo, estos problemas no obstaculizan el objetivo de este trabajo puesto que se busca un aleteo óptimo bajo condiciones controladas manteniéndolas inalteradas para cada prueba. Y de estos mismos resultados se puede apreciar una ventaja inesperada al comparar la Figura 3 y Figura 72 la cual consiste en que el ornitóptero posee alas flexibles semejantes a las aves, permitiendo poder replicar el aleteo aun con los problemas mencionados.

Como era esperable, el empuje generado por los movimientos es mayor en aquellos que imitan de mejor manera el aleteo normal de las aves. De todos los individuos de la población, para el caso del individuo N° 23 (Tabla 19) acreedor del mayor desplazamiento obtenido, el movimiento impuesto al ornitóptero corresponde a uno de los movimientos con mayor similitud al vuelo de las aves que el AG puede describir. Seguido del individuo N° 22 (Tabla 18) cuya única diferencia con el individuo N° 23 es la característica D (rango de variación del ángulo de ataque). Se puede apreciar al comparar las Figura 77 y Figura 78 que ambos individuos son prácticamente iguales, y si bien la teoría dice que debió haber existido mayor desplazamiento en el individuo N° 22 por poseer ángulos de ataque que optimizan la sustentación, el mejor ha sido el N° 23, esto puede explicarse a que al no poseer el ornitóptero velocidad de vuelo se prioriza el empuje del aire Vs la sustentación.

Con respecto a los individuos N° 36, N° 79, N° 65 y N° 26 que poseen un mayor desplazamiento a lo largo del desempeño del AG se puede apreciar que si bien no son del todo semejantes a un vuelo natural, si representan en un pequeño porcentaje algunos movimientos que se pueden observar en el reino animal en situaciones específicas, o movimientos opuestos a estos pero simétricos (es decir, movimientos al revés). Para el caso del individuo N° 79 (Tabla 15) el movimiento representado es muy semejante al de un ave al despegar, sin embargo, este movimiento el robot no lo puede aprovechar al máximo debido a que no posee patas, las cuales son usadas como empujón inicial o para obtener velocidad por las aves, además de la Figura 74 se puede apreciar que si bien este individuo posee un bateo de alas amplio su ángulo de ataque no varía mucho; el individuo N° 65 (Tabla 16) si bien representa un movimiento natural no obtiene gran desplazamiento, esto debido a que el movimiento no es enérgico, es decir, las alas no se expanden mucho aunque el rango del ángulo de ataque es amplio. Además tal como se puede apreciar de la Figura 74 y Figura 75 ambos individuos poseen un aleteo en el cual el subir las alas toma casi el mismo tiempo que bajarla, lo cual no concuerda con un aleteo normal el cual consiste en bajar las alas más rápido que subirlas.

Para el individuo N° 26 (Tabla 17) e individuo N° 36 (Tabla 14) el movimiento es semejante al bateo normal de alas con la salvedad de que el primero presenta un rango para el ángulo de ataque no típico, y el segundo si bien si lo presenta modifica el ángulo de ataque casi al revés de como lo haría un aleteo normal. Lo anterior se puede confirmar viendo la Figura 73 y Figura 76, y se puede apreciar que si bien ambos bajan las alas más rápido de lo que las suben, los dos factores mencionados impiden que su desplazamiento sea aún mayor.

Y para los demás individuos los movimientos representados corresponden a articulaciones antinaturales, que el robot no puede ejecutar fluidamente o que simplemente atípicas, generando casi empuje nulo. Un ejemplo de lo anterior es el individuo N° 59 (Tabla 20) el cual corresponde al individuo que posee el peor fitness, las acciones que impone al ornitóptero si bien pueden ser ejecutadas fluidamente son atípicas para el vuelo, ya que las alas están cerradas en todo momento, y tal como se puede apreciar en la Figura 79 la variación del ángulo de ataque no está relacionada con el subir y bajar las alas, además de poseer un tiempo de subida y bajada de alas casi iguales.

Se comprobó que en todos los casos donde se obtiene mayor desplazamiento y por lo tanto mayor empuje generado por el bateo de las alas, la implementación de Shape Morphing es fundamental. Se puede observar en la Figura 72 que de hecho el individuo con mejor fitness requiere el cambio de la forma de las alas para poder ser ejecutado, y confirma la idea de que las aves poseen un batir de alas optimizado puesto que es similar (en el Anexo A, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar una comparación).

Capítulo 7.- Conclusiones y Recomendaciones

A continuación se presentan las conclusiones generadas para este trabajo de título:

- El poder replicar el movimiento de las aves permitirá conseguir un vuelo más estable, con un mayor ahorro de energía y mayor maniobrabilidad, tal como lo demuestra el halcón peregrino obteniendo máxima velocidad al cambiar la forma de sus alas en pleno vuelo.
- Se ha construido un ornitóptero robotizado bio-inpirado con las características morfológicas del halcón peregrino, cuya característica principal es el tener la capacidad de cambiar la forma de sus alas mientras aletea (implementar Shape Morphing).
- Los perfiles NACA permiten un diseño aerodinámico rápido y bueno.
- Se ha diseñado y construido una estructura pantógrafo que cambia la forma de las alas, además se ha utilizado elásticos que cumplen la misma función que el músculo supracoracoideo de las aves. Sistemas muy pocas veces implementado en esta área.
- Las impresoras 3D permiten una construcción rápida y eficiente de estructuras variadas garantizando siempre una misma calidad, permitiendo el rediseño o reparaciones en periodos cortos de tiempo, sin embargo, los materiales con los que fabrican las piezas solo permiten la construcción de prototipos en la mayoría de los casos.
- Se ha construido una estructura móvil que otorga condiciones de roce entre el robot y la superficie mínimas, mientras sostiene un contrapeso generando una pequeña fuerza en el sentido contrario al desplazamiento del ornitóptero, lo que garantiza que el ornitóptero avance a causa del empuje generado.
- La evolución de la electrónica ha permitido la utilización de más energía y menos peso para los ornitópteros, un ejemplo de ello es el poder utilizar motores de inducción trifásicos energizados por baterías de voltaje continuo (motores brushless con ESC). Sin embargo todavía falta camino por recorrer, para el caso de los servos motores la relación energía-peso todavía no permite un ornitóptero liviano, por lo que implementar Shape Morphing y que al mismo tiempo sea liviano todavía es un desafío difícil de cumplir.
- El AG permitió apreciar que los movimientos del ornitóptero semejantes a los de un aleteo normal generan mayor empuje.
- Se han caracterizado los movimientos del robot utilizando el sensor OptiTrack (sistema de captura de movimiento), lo que permite apreciar la semejanza entre como el robot implementa Shape Morphing y como el halcón peregrino bate sus alas en un vuelo normal.
- OptiTrack es una herramienta de medición y observación muy poderosa, ya que permitió poder apreciar características del robot que de otro modo no hubiera sido posible.

A continuación se presentan algunas recomendaciones para trabajos futuros:

- Diseñar el AG para estudiar más casos utilizando menos acotaciones al problema a optimizar, ya sea indagando en otras maniobras tales como que el ornitóptero quiera girar a la derecha o izquierda; abrir y cerrar las alas durante ciclos distintos a un periodo del 50% del bateo completo (para esto se requiere la utilización de otro ESC).
- Diseñar el AG para optimizar la energía consumida.
- Hacer mediciones de empuje y sustentación en un túnel de viento.
- Parametrizar los movimientos de un halcón peregrino con el OptiTrack o alguna otra técnica.
- Construcción del ornitóptero con materiales más livianos para hacer pruebas de vuelo.
- Modificar el diseño y construcción para poder variar el ángulo de ataque a lo largo de toda el ala (desde el hombro hasta la punta del ala).
- Modificar el sistema de amortiguamiento con elásticos para que pueda adaptarse al cambio de torque debido al cambio de morfología de las alas.

Bibliografía

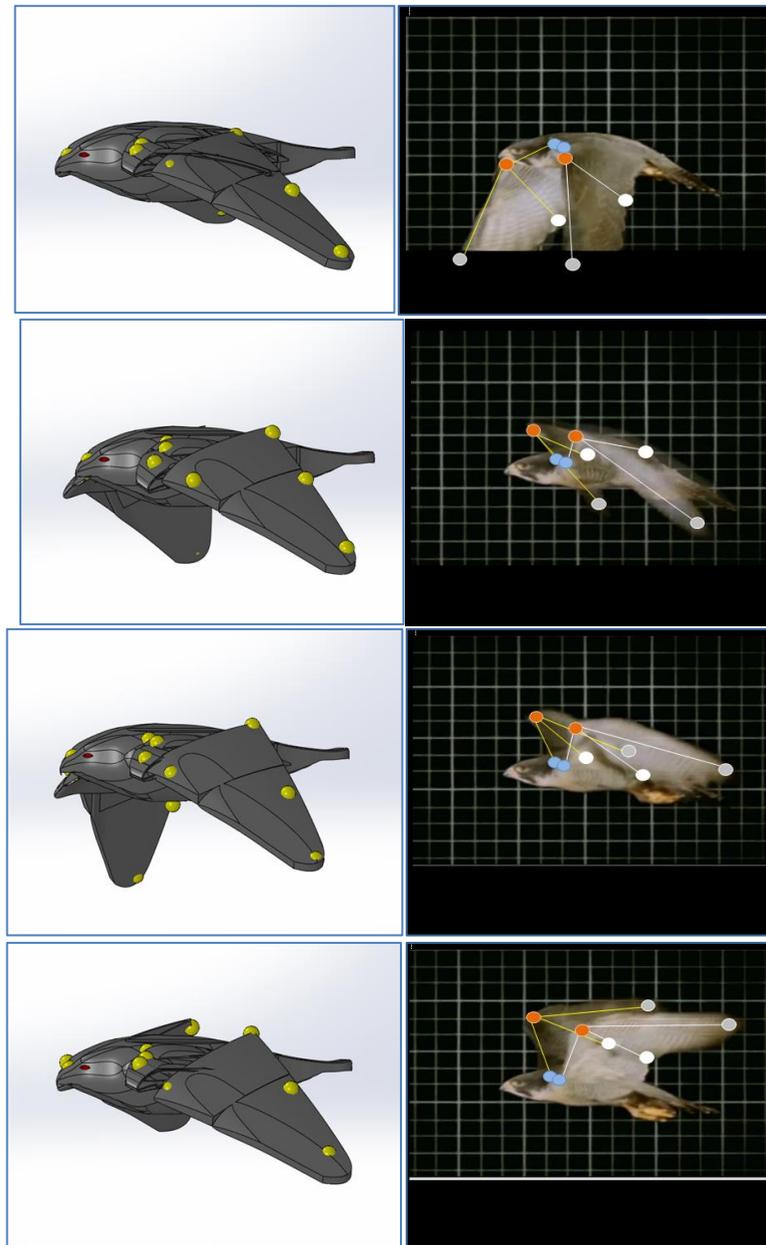
- 1.- CHRISTIAN, P. y VANCE, A. 1970. Aerodynamics of gliding flight in a falcon and other birds. *The Journal Experimental Biology* (52):345-367.
- 2.- HO, S. NASSEF, H. PORNSINSIRIRAK, N. TAI y HO, C. 2003. Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing glyers. *Progress in Aerospace Sciences* (39):635-681.
- 3.- S. Wei, L. Yongsheng, T. Jian, V. Dragos, L. Hao, “Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers”, 1ra Edición, Cambridge University Press (2008).
- 4.- S. Ho, H. Nassef, N. Pornsinsirirak, Y. Tai, C. M. Ho, “Unsteady Aerodynamics and Flow Control for Flapping Wing Flyers”, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol 39, pp. 635-681. (2003).
- 5.- IDR/UPM. E.T.S.I Aeronáuticos. MESEGUER, J. ÁLVAREZ, J. y PÉREZ, A. 2004. FORMAS DE RETRASAR LA ENTRADA EN PÉRDIDA EN LAS ALAS DE LAS AVES. SEO-Sierra de Guadarrama. El Escorial, Madrid. IDR/UPM. E.T.S.I Aeronáuticos. 15 p.
- 6.- *Journal of Aircraft*. 2005. University of Florida, Gainesville, Florida 32611. Flight Characteristics of Shaping the Membrane Wing of a Micro Air Vehicle. 42(1).
- 7.- 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2008. Nice, France. Acropolis Convention Center. 6 p.
- 8.- E de Margerie, J B Mouret, S Doncieux and J-A Meyer. 2007. Artificial evolution of the morphology and kinematics in a flapping-wing mini-UAV. *BIOINSPIRATION & BIOMIMETICS*. 2:65–82
- 9.- J.W. Gerdes, “Design, Analysis, and Testing of a Flapping Wing Miniature Air Vehicle”, Tesis de grado Maestro en Ciencia, Universidad de Maryland.(2010)
- 10.- http://www.festo.com/cms/en_corp/11369.htm
- 11.- PONITZ, B. SCHMITZ, A. FISCHER, D. BLECKMANN, H. y BRUCKER, C. 2014. Diving-Flight Aerodynamics of a Peregrine Falcon (*Falco peregrinus*). *PLOS one*. 1-13
- 12.- FLORES G., D. R. 2006. Diseño de perfiles aerodinámicos. Ingeniero en aeronáutica. México D. F. Instituto politécnico nacional escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica. 10 p.
- 13.- R. Zeng. Aerodynamic Characteristics of Flapping-wing MAV Simulating Bird Flight. PhD thesis, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, College of Aerospace Engineering, 2004.

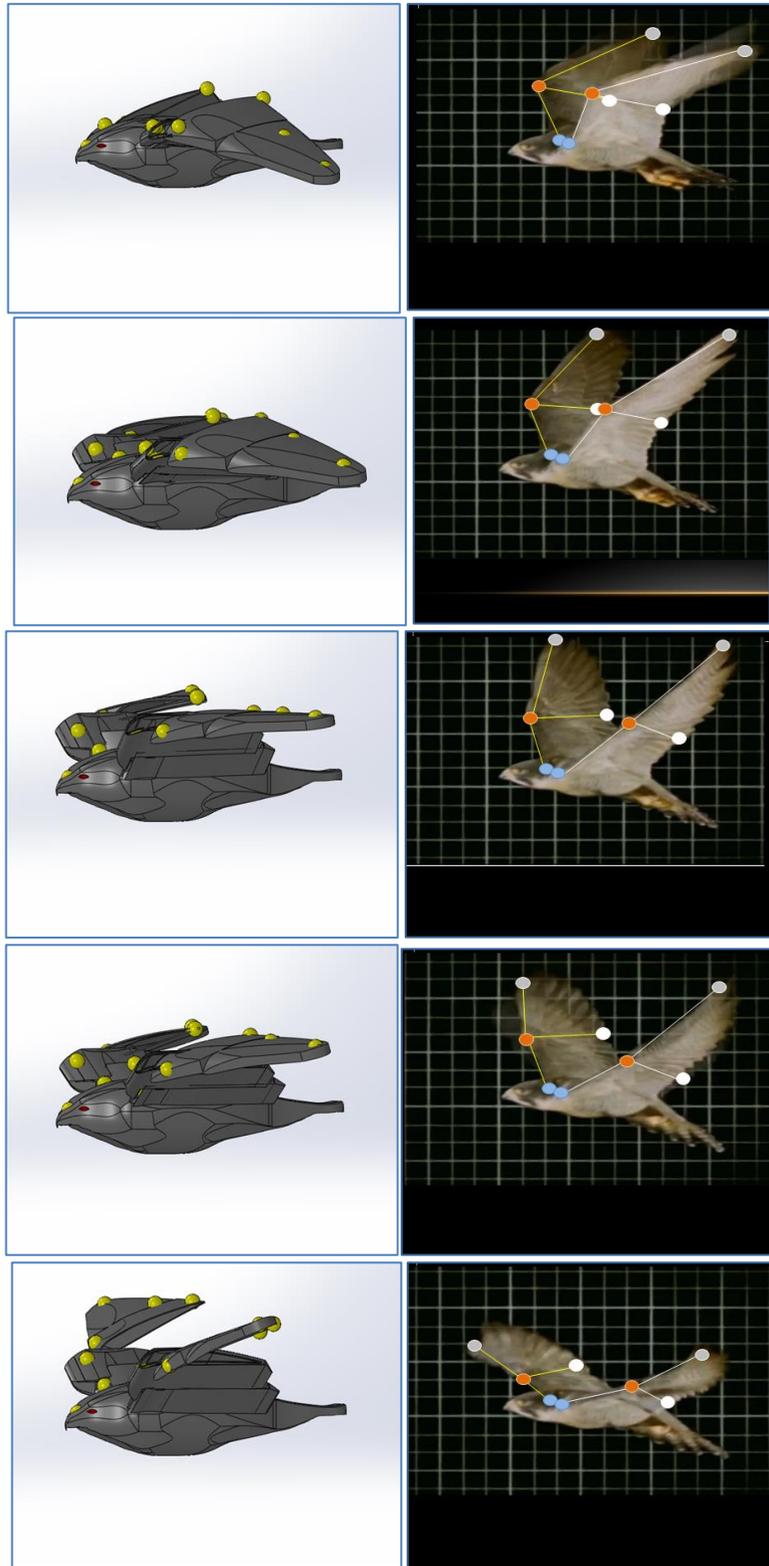
- 14.- HEDRICK T., TOBALSKE B. y BIEWENER. A. 2002. Estimates of circulation and gait change based on a three-dimensional kinematic analysis of flight in cockatiels (*Nymphicus hollandicus*) and ringed turtle-doves (*Streptopelia risoria*). *The Journal of Experimental Biology*. (205):1389-1409
- 15.- D. E. Alexander. *Nature's flyers: birds, insects, and the biomechanics of flight*. Johns Hopkins University Press, 2002.
- 16.- SOFLA A.Y.N. MEGUID S.A., TAN K.T. y YEO W.K. 2010. Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges. *Materials and Design*. 31:1284-1292.
- 17.- <http://www.optitrack.com/products/v120-trio/indepth.html>
- 18.- <http://store.makerbot.com/replicator2x>
- 19.- <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/design-series/objet24>
- 20.- <http://store.discoveryeducation.com/product/show/53421>
- 21.- H. Djojodihardjoaa, A. S. Syazwan Ramlib, S. Wiriadidjajac. 2012. Kinematic and Aerodynamic Modelling of Flapping Wing Ornithopter. *Procedia Engineering*. 50:848–863

Anexos

Anexo A: Aleteo de un Halcón peregrino.

A continuación se muestran 2 secuencias de bateo, la primera corresponde a los movimientos registrados por el OptiTrack mientras el ornitóptero ejecuta las acciones impuestas por el individuo 01000000 (el mejor propuesto por el AG); y la segunda corresponde a una secuencia de bateo real de un halcón peregrino durante un vuelo normal, obtenida del documental “The ultimate guide: Birds of Prey DVD” emitido por Discovery Channel [20].





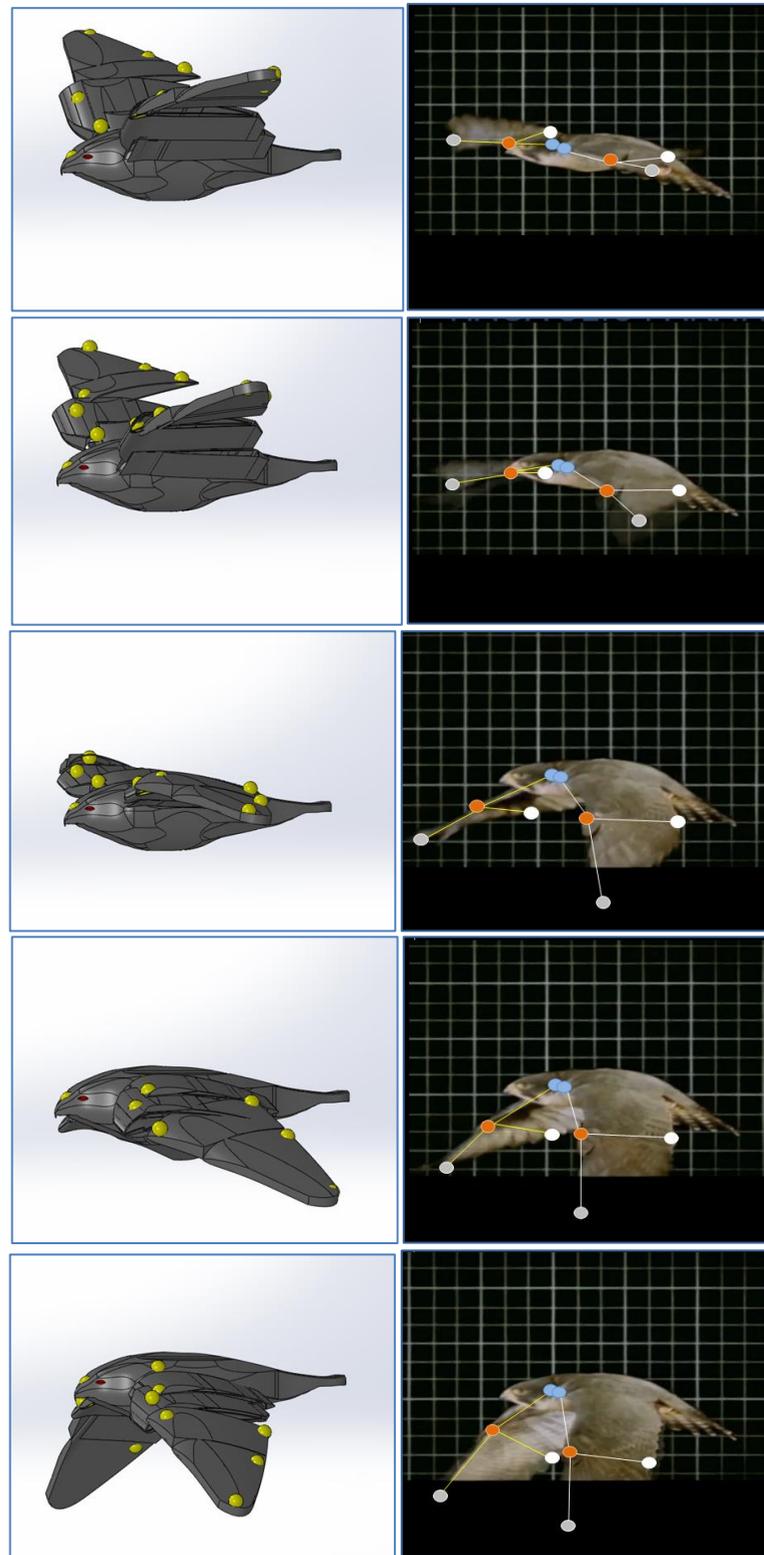


Figura 80: A la izquierda una secuencia de aleteo registrada con el OptiTrack del orniptero, y a la derecha una secuencia de aleteo real de un halcón peregrino.