



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL MECANICA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ROBOT VOLADOR BIO-INSPIRADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL MECANICO

SEBASTIAN IGNACIO ROBLES GEBAUER

PROFESOR GUIA:

JUAN CRISTOBAL ZAGAL MONTEALEGRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JAVIER RUIZ DEL SOLAR

WILLIAMS CALDERÓN

SANTIAGO DE CHILE

SEPTIEMBRE 2012

## Resumen Ejecutivo

Las nuevas tecnologías de fabricación digital, permiten producir elementos complejos de manera rápida y eficiente. Una aplicación de estas tecnologías es el desarrollo de vehículos voladores no tripulados. En particular, en el último tiempo interesan los micro vehículos aéreos que se asemejan a los pequeños insectos debido a las ventajas que estos presentan. Estos últimos, entre las características que exhiben es una mayor maniobrabilidad y estabilidad, además que se pueden pilotar en lugares de difícil acceso o peligrosos para una persona.

El objetivo de esta memoria es diseñar y construir un mecanismo inspirado en características biológicas de aves o insectos y estudiar perfiles de alas que presenten mejores propiedades aerodinámicas. Para lograr el objetivo se cuenta con diversas fuentes de financiamiento (Fondecyt, ANR-Conicyt, etc.), además de los equipos, software e impresoras de fabricación digital disponibles en el laboratorio de robótica del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Chile.

La metodología consiste en una etapa de recopilación de información y antecedentes relacionados con la aerodinámica, materiales y construcción de robots similares. Luego se diseñarán los distintos componentes mecánicos involucrados, poniendo principal énfasis en el diseño y construcción de las alas del vehículo.

Se estudiaron dos perfiles de alas para determinar cual presenta mejores propiedades aerodinámicas. Se midieron experimentalmente el empuje y sustentación que son capaces de generar y se modificaron parámetros en el diseño que influyen en la flexión y torsión de las alas para medir como estos afectan en su desempeño.

Se midió en un túnel de viento la sustentación que genera el paso del aire a través de las alas para distintas velocidades de circulación del viento.

Con el sistema mecánico definitivo, se realizaron pruebas de vuelo para estudiar la capacidad de vuelo del MAV. Se traslado el centro de masa y el ángulo de ataque de las alas para lograr condiciones de vuelo mas estables.

Finalmente se construyó un micro vehículo aéreo el cual logro volar por unos instantes, pero que no fue capaz de mantener un vuelo estable.

# Índice

Resumen Ejecutivo	i
Índice	ii
Capítulo 1.-Introducción	1
1.1    Motivación	1
1.2    Objetivos	1
1.2.1    Objetivos Generales	1
1.2.2    Objetivos Específicos	1
Capítulo 2.- Antecedentes	3
2.1 Aerodinámica	3
2.2 Vuelo de Insectos y Pájaros	3
2.3 Estado del Arte	5
2.3 Alas	10
2.3.1 Configuración	10
2.3.2 Materiales	11
2.4 Semejanza Geométrica	11
2.5 Semejanza Aerodinámica	11
2.6 Dirección	15
2.6 Diseño de la Cola	15
2.7 Mecanismos Motrices	16
2.8 Otros Componentes	19
2.8.1 Motor	19
2.8.2 Fuente de Poder	20
2.8.3 Fuselaje	20
2.8.4 Actuadores	20
Capítulo 3.-Metodología	21
Capítulo 4.- Recursos	22
4.1 Recursos No Financieros	22
4.2 Recursos Financieros	22
Capítulo 5.- Carta Gantt	22
Capítulo 6.- Diseño y Construcción	22

6.1 Parámetros de Diseño	23
6.2 Diseño Solución	23
6.3 Construcción del Mecanismo	26
6.3 Diseño de Alas	28
6.4 Componentes Eléctricos	29
6.5 Construcción Cola	31
6.6 Parámetros del MAV	32
Capítulo 7.- Mediciones de sustentación y empuje	35
7.1 Montaje Experimental	35
7.2 Resultados	37
7.3 Mediciones en túnel de viento	41
Capítulo 8.- Pruebas de vuelo	43
Capítulo 9.- Discusiones	44
Capítulo 10.- Conclusiones	46
Bibliografía	47
Anexos	48

# Capítulo 1.-Introducción

## 1.1 Motivación

Las tecnologías de fabricación digital, permiten producir elementos complejos de manera rápida y eficiente. Una aplicación interesante de estas tecnologías es el desarrollo de nuevos vehículos voladores inteligentes. En la literatura se ha podido observar un explosivo interés en el estudio de mecanismos que se asemejan a aves o a los pequeños insectos (Coleópteros, Gómfidos, etc.). Este tipo de vehículos permiten pilotar y explorar de manera remota lugares de difícil acceso, además del desarrollo de vuelos colectivos tipo enjambre.

Las ventajas que ofrecen este tipo de vehículos inspirados en insectos son su mayor versatilidad para realizar maniobras complejas, una mayor estabilidad de vuelo y un menor consumo energético. Todo lo anterior significa mayores tiempos de vuelos. Entre las maniobras que son capaces de realizar se encuentran la habilidad para suspenderse en el aire, vuelos a baja velocidad, además de despegues y aterrizajes en cortas distancias, que los ubica perfectamente entre los micro vehículos aéreos de alas fijas o de hélices. A esto se suma que es posible ejercer la misma fuerza de sustentación incluso con alas más pequeñas con solo aumentar la frecuencia de bateo de las alas, ventaja que no se puede obtener con los otros tipos de mecanismos.

Es por ello que en esta memoria se busca diseñar un micro vehículo aéreo que sea inspirado en características biológicas de aves o insectos.

## 1.2 Objetivos

A continuación se enuncian los objetivos que se espera conseguir con esta memoria.

### 1.2.1 Objetivos Generales

- Diseñar y construir un mecanismo motriz de alas batientes que se inspire en características biológicas de aves o insectos y estudiar configuraciones de alas que presenten mejores propiedades aerodinámicas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir alas capaces de resistir las fuerzas aerodinámicas involucradas y que puedan generar el impulso necesario para desplazar el robot y proporcionar condiciones de vuelo estables.

- Diseñar y construir un sistema motriz liviano que transmita de manera eficiente la energía a las alas
- Diseñar y construir un fuselaje liviano que sea capaz de resistir las cargas generadas por los componentes que soporta.

## Capítulo 2.- Antecedentes

### 2.1 Aerodinámica

Con el fin de lograr un buen diseño que minimice el peso y presente un buen desempeño de vuelo, es necesario comprender los efectos aerodinámicos que influyen en el vuelo de insectos o pájaros. Si bien la comprensión de estos fenómenos aún se encuentra en desarrollo, ya se han logrado teorías capaces de explicar el fenómeno. Básicamente además de la teoría convencional de la aerodinámica, se suman efectos debido a la interacción entre el ala y el fluido. Los efectos que permiten el vuelo de los insectos se enumeran a continuación [1].

- Efecto aplaudir y lanzar de WeisFogh
- Flujo retardado
- Circulación rotacional
- Captura de estela

El primer efecto sostiene que al separarse las alas, se forma una zona de baja presión lo cual empuja aire hacia la hendidura del borde de ataque del ala. Ésta afluencia de aire estimula la formación de vórtices los cuales aumentan la circulación y producen el levantamiento. Un efecto similar se obtiene al momento en que las alas comienzan a juntarse. El aire que se encontraba entre las alas, al salir genera la formación de vórtices en el borde de ataque.

El flujo retardado es un mecanismo de translación el cual incentiva la formación de vórtices en el borde de ataque del ala resultando en un aumento de circulación de aire alrededor del ala.

La circulación rotacional es un mecanismo no viscoso que representa la circulación necesaria para satisfacer la condición de Kutta en el borde posterior del ala, debido al movimiento ascendente y descendente que se genera producto de la rotación del ala.

Finalmente, la captura de estela es una respuesta por medio de la cual el ala recaptura el flujo dejado por la estela de su carrera anterior a que comenzara su regreso.

### 2.2 Vuelo de Insectos y Pájaros

Para lograr un mejor diseño del micro vehículo aéreo, es necesario comprender la manera en que los pájaros e insectos producen con sus alas las fuerzas de sustentación y empuje necesarias para producir el vuelo.

En el caso de los pájaros, estos poseen alas las cuales se encuentran ligeramente anguladas con respecto a la dirección de vuelo. Este ángulo de ataque les permite desviar el flujo de aire que pasa a través de las alas hacia abajo de manera de lograr producir sustentación. El ángulo que mejor se adecue para el vuelo va a depender de la forma del ala, sin embargo si el ángulo es demasiado bajo no se producirá suficiente sustentación y si es demasiado alto el arrastre aumentara considerablemente.

Para lograr el vuelo, el ala se desplaza de manera vertical mientras el ave se desplaza hacia delante. De esta manera la sustentación necesaria para producir el vuelo se logra por la suma de las fuerzas generadas por el movimiento de las alas más la que se produce por el paso del aire a través de éstas. Mientras se produce el movimiento de las alas, el ave debe cambiar el ángulo de ataque a través de toda la envergadura de ésta para asegurarse que sea el correcto. Puesto que la parte interior del ala, más cercana al cuerpo del ave, se desplaza menos que la parte exterior, el ala se tuerce de manera de mantener dicho ángulo.

Mientras se produce el aleteo hacia abajo, la torsión del ala produce que la sustentación generada por la parte exterior del ala se encuentra angulada hacia delante, generando de esta forma un empuje que desplaza al ave hacia delante, sin la pérdida de altitud. Por lo tanto durante este movimiento el aire no solo es desplazado hacia abajo sino que también hacia atrás.

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. Este último movimiento no es estrictamente necesario para producir vuelo. Por otra parte, la parte interior del ala al desplazarse menos sigue generando sustentación, claro que esta es menor que la producida durante el movimiento hacia abajo.

La figura 1 ilustra como los cambios en el ángulo de ataque del ala afectan en el arrastre como en la sustentación.

El caso de los insectos es similar, salvo que ellos poseen una fisonomía que les permite torsionar, por medio de músculos, distintas partes del ala. Esto les permite obtener mayores grados de torsión, llegando algunas especies a ángulos cercanos a los 180 grados.

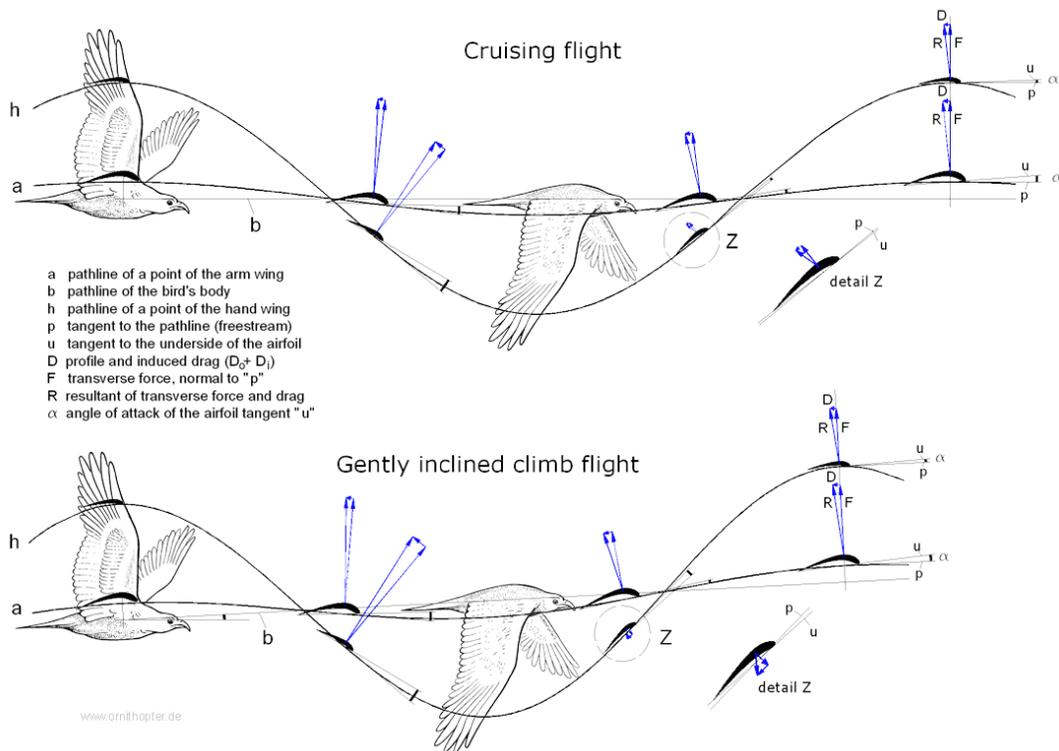


Figura 1.- Variación del ángulo de ataque, de sustentación y arrastre durante el aleteo. [14]

## 2.3 Estado del Arte

Durante los últimos años se han desarrollado un sin número de micro vehículos aéreos (MAV), por lo que para tener una perspectiva del estado actual del arte y conocer los avances tecnológicos ya realizados es necesario examinar los distintos modelos existentes. Para esto nos enfocaremos en los MAV que presentan características biológicas en su diseño (básicamente propulsión a través de alas batientes) y de los cuales se ha publicado en la literatura.

Un ejemplo interesante es el modelo realizado por la Universidad Técnica de Delft denominado Delfly [2]. Este ornitóptero simula a una libélula y por medio de dos pares de alas eleva su peso de 30 gramos. Posteriormente se desarrollaron variantes a éste modelo y se crearon el Delfly II y el Micro. Las variantes realizadas, como el cambio del motor y posición del mecanismo de manivelas, permitieron que el Delfly II lograra suspenderse sin desplazarse en el aire y volar hacia atrás, mientras que en el Delfly Micro, aprovechando los avances logrados con sus 2 antecesores, se logro una reducción de peso y tamaño de los componentes además de incluir un sistema de estabilización con un controlador basado en la visión.

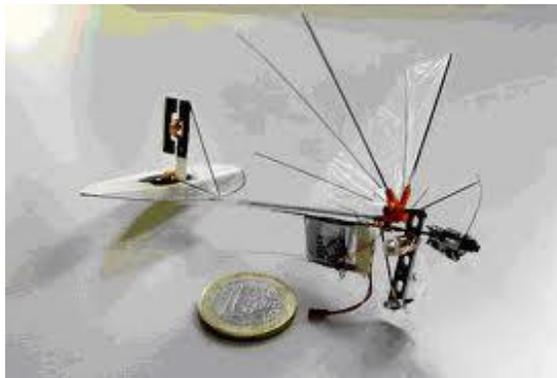


Figura 2.- Delfly Micro, posee sistema de estabilización con controlador basado en la visión

Otro modelo es el Microbat desarrollado por la Universidad de California [3]. Este ornitóptero fue el primero del tamaño de una mano en lograr el vuelo. Utilizando fibra de carbono como marcos del ala, recubiertas por capas de Mylar, se logro que en 1998 el primer prototipo volara por 9 segundos impulsado por la descarga de dos súper capacitadores de un faraday. Posteriormente se utilizaron baterías de nickel-cadmio para lograr mayor duración de vuelo.

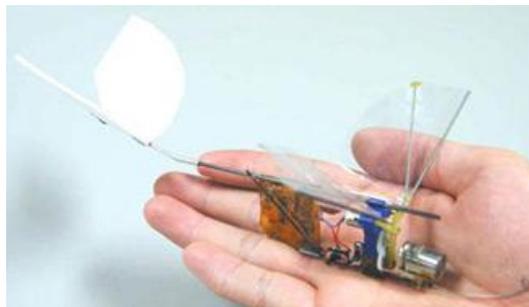


Figura 3.- Microbat, modelo que funciona con baterías

La Universidad de Maryland desarrollo el Small Bird [4]. Este modelo consiste en un monoplano que controla su altitud variando la frecuencia de de bateo de las alas y la dirección por medio de la cola montada en la parte posterior del MAV.



Figura 4.- Small Bird, con cola tipo timón para controlar la dirección

Inspirándose en insectos y el vuelo del colibrí, F. Van Breugelet *al.* [5] desarrollaron un modelo capaz de suspenderse en el aire. Con un fuselaje de madera de balsa y alas construidas con un marco de Tereftalato de Polietileno (PET) recubierto por láminas del mismo material, el MAV es capaz de mantener la estabilidad creando un balance de fuerzas que lo mantienen centrado y vertical.

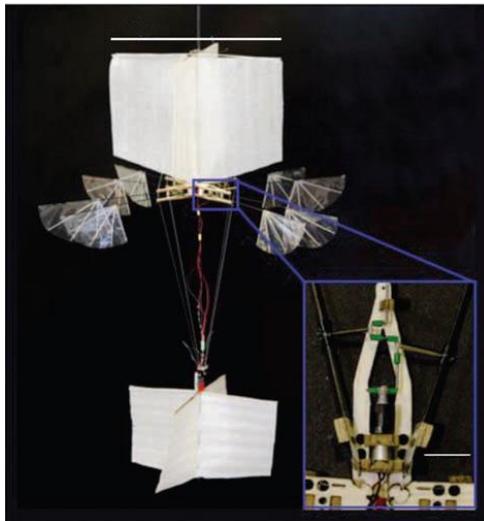
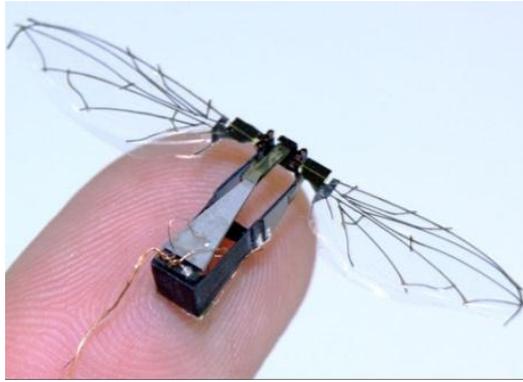


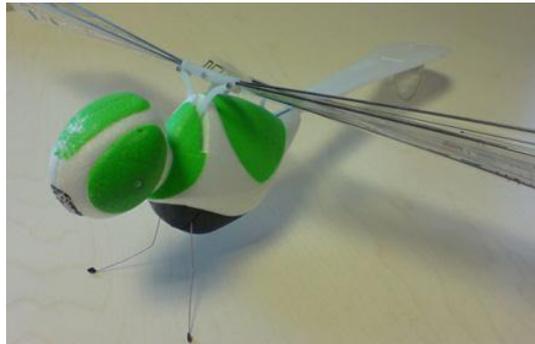
Figura 5.- Van Breugel MAV, capaz de mantener vuelo en suspensión

Otro ejemplo es el desarrollado por la Universidad de Harvard que imita el concepto de los insectos más pequeños [6]. La fuerza de levantamiento lo logra principalmente por los vórtices generados en el borde de ataque del ala y por la circulación rotacional. La desventaja que presenta es que utiliza dispositivos piezoeléctricos de alta tensión, por lo que no se le ha podido integrar una fuente de alimentación.



**Figura 6.- Insecto Robótico Harvard University, vuela pero sin levantar la fuente de poder**

Finalmente, el Wowwee's Flytech Dragonfly es un ejemplo de los MAV desarrollados por el mercado de juguetes y hobbies [7]. La particularidad de este MAV es que para controlar la dirección posee un pequeño motor en la cola el cual es capaz de proveer el empuje en ambas direcciones logrando de ésta forma la rotación, similar al rotor de cola de un helicóptero.



**Figura 7.-Wowwee's Flytech Dragonfly, MAV desarrollado como juguete**

La tabla a continuación ilustra la información física de los distintos ornitópteros revisados.

Tabla 1.- Propiedades físicas de MAV construidos

MAV	Peso	Envergadura	Largo	Velocidad	Tiempo de Vuelo	Grados de Libertad	Configuración de Alas	Mecanismo Motriz	Fuselaje	Esquema
Wright State University [4]	12,56	20,07	22,86	6,7	-*	2	Biplano	Frontal con doble manivela y doble barra de empuje	Sándwich de fibra de carbono y madera de balsa	
Delfly I [2]	30	50,01	50,8	12	600	3	Biplano	Frontal con doble barra de empuje	Sándwich de fibra de carbono y madera de balsa	
Delfly II [2]	16,07	27,99	27,94	15	900	3	Biplano	Perpendicular con doble barra de empuje	Sándwich de fibra de carbono y madera de balsa	
Delfly Micro [2]	3,07	10,01	10,16	5	180	3	Biplano	Perpendicular con doble barra de empuje	Sándwich de fibra de carbono y madera de balsa	
OSFC Elier [4]	1,47	5,99	7,01	-	-	2	Biplano	Perpendicular con doble barra de empuje	Plástico ABS	
Harvard Microrobotics Ely [16]	0,06	3	3,2	-	-	1	Monoplano	Actuador lineal	Plástico ABS	
UMD Small Bird [11]	16,3	34,29	20,32	4,4	300	2	Monoplano	Frontal con una una manivela y una barra de empuje	Plástico ABS	
UMD Big Bird [11]	47	57,15	26,67	3,04	900	2	Monoplano	Frontal con una manivela y con una barra de empuje	Plástico ABS	

<u>UMD Junbo Bird</u> [11]	71	63,5	28,5	2,96	900	2	Monoplano	Frontal con una manivela y con una barra de empuje	Plástico ABS	
<u>Microbat</u> [3]	12,5	23,01	15,24	-	42	2	Monoplano	Frontal con una manivela y doble barra de empuje	Plástico ABS	
<u>Flytech Dragonfly</u> [7]	28,35	31,24	41,91	8	360	2	Biplano	Frontal con una manivela y doble barra de empuje	Plástico ABS	
<u>I-Fly Vamp</u> [12]	13	26,67	21,59	-	600	2	Monoplano	Frontal con una manivela y doble barra de empuje	Plástico ABS	
<u>I-Fly Fairy</u> [13]	12	26,67	20,96	-	600	2	Biplano	Frontal con una manivela y doble barra de empuje	Plástico ABS	
<u>Raven</u> (este documento)	47,2	46	26	-	-	2	Monoplano	Perpendicular con doble barra de empuje	Plástico ABS	

## 2.3 Alas

A continuación se detallan los antecedentes recopilados para el diseño y construcción de las alas.

### 2.3.1 Configuración

Uno de los principales retos para el diseño de robots de alas batientes es encontrar una correcta configuración de alas. Éstas son las encargadas de generar las fuerzas de levantamiento y empuje que permiten que el MAV vuele.

Entre los micro vehículos aéreos existentes y funcionales, se distinguen principalmente tres tipos de configuraciones de alas, monoplanos, biplanos y alas plegables. Los monoplanos consisten en un par de alas que oscilan en fase, como el caso del Microbat o el Small Bird. La ventaja que presentan es un menor peso final en el ornitóptero y como desventaja es una mayor inestabilidad y una mayor amplitud de balanceo.

Los biplanos consisten en dos pares de alas que se mueven en desfase, como por ejemplo el Delfly. Estas alas puede estar una sobre otra o en configuración tándem (un par atrás del otro). La ventaja que presenta esta configuración es una menor amplitud de balanceo y una mayor estabilidad. Como desventaja es un aumento en el peso del vehículo.

Finalmente las alas plegables 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. La desventaja de esta configuración es el excesivo peso de los actuadores por lo que es difícil de implementar en MAV. Un ejemplo de éste tipo de alas es el Festo Smart Bird [8], claro que por tamaño no entra en la categoría de micro vehículos aéreos.

Para definir el Delfly se probaron tres configuraciones de alas de manera de observar las características que cada una presenta en el vuelo [2]. Para ello se crearon 3 modelos en madera de balsa que presentarían los mismos pesos, envergaduras y frecuencias. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2.- Resultados del test en modelos para definir el concepto de Delfly

	<b>Velocidad promedio de vuelo</b>	<b>Consumo de potencia</b>	<b>Amplitud de balanceo</b>
Monoplano	2.35 m/s	0.75 W	~ 80 mm
Biplano	1.40 m/s	0.69 W	~ 0 mm
Tándem	1.36 m/s	1.00 W	~ 0 mm

## 2.3.2 Materiales

Prácticamente todos los MAV observados presentan una construcción similar de las alas. Básicamente es un marco rígido cubierto por una película plástica. Los materiales seleccionados buscan lograr un balance en la flexibilidad de éstas, puesto que si son demasiado flexibles no se genera suficiente levantamiento y si son demasiado rígidas no se produce suficiente empuje [5].

Los materiales comúnmente usados como refuerzos son tubos de fibra de carbono, aleaciones de titanio o polímeros como el PET, esto debido a que presentan buena rigidez y poco peso. Éstos refuerzos van cubiertos por laminas fabricadas principalmente de Mylar, un polímero termoplástico utilizado en la confección de velas.

## 2.4 Semejanza Geométrica

Se han realizado varios estudios estadísticos que buscan relacionar características físicas de aves o insectos con sus propiedades aerodinámicas. Estos han permitido llegar a relaciones matemáticas que permiten estimar parámetros como envergadura de alas y frecuencias de bateo en función de la masa del ave. En la siguiente tabla se muestran estas relaciones que fueron originalmente compiladas por Greenewalt, Norberg y Rayner [14] y obtenidas en base a datos empíricos.

Tabla 3.- Dimensiones de alas y parámetros de vuelo en función de la masa

Parámetro	Unidad	Correlación	Todos las aves	Todas las aves excepto colibrís	Colibrís
Envergadura	m	$m^{0.33}$	-	$1,17m^{0.39}$	$2,24m^{0.53}$
Área de alas	$m^2$	$m^{0.67}$	-	$0,16m^{0.72}$	$0,69m^{1.04}$
Carga alar	$N/m^2$	$m^{0.33}$	-	$62,2m^{0.28}$	$17,3m^{-0.04}$
Índice de aspecto	-	0	-	$8,56m^{0.06}$	$7,28m^{0.02}$
Frecuencia de bateo	Hz	$m^{-0.33}$	$3,87m^{-0.33}$	$3,98m^{-0.27}$	$1,32m^{-0.6}$

A estas relaciones se agrega la obtenida por Pennycuick [9] que relaciona la masa de un pájaro (m) con su velocidad crucero de vuelo (U)

$$U = 4,77m^{1/6} \quad (1)$$

## 2.5 Semejanza Aerodinámica

Para la aerodinámica clásica, los coeficientes de elevación y empuje para un ala se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

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

$$C_t = \frac{2T}{\rho U^2 S} \quad (3)$$

Donde:

$C_l$  : *Coefficiente de elevación*

$C_t$  : *Coefficiente de empuje*

$L$  : *Fuerza de elevación*

$T$  : *Fuerza de empuje*

$\rho$  : *Densidad de aire*

$U$  : *Velocidad de vuelo*

$S$  : *Area del ala en planta*

El MAV debe ser capaz de levantar su propio peso, por lo que la fuerza de elevación deberá ser mayor o igual al peso final del vehículo.

Además de la teoría clásica, existen dos parámetros adimensionales que permiten definir el vuelo para vehículos aéreos de alas batientes. Estos parámetros son la relación de avance y el número de Strouhal.

La relación de avance es el cociente entre la velocidad crucero del MAV con la velocidad de la punta del ala y está determinado por la siguiente ecuación:

$$J = \frac{U}{2\phi fb} \quad (4)$$

Dónde:

$J$  : *Coefficiente de avance*

$U$  : *Velocidad de vuelo*

$f$  : *Frecuencia de bateo*

$b$  : *envergadura de alas*

$\phi$  : *Angulo de bateo*

Para valores de  $J$  menores a 1 se considera que el vehículo se encuentra operando en un flujo transiente, mientras que para valores mayores a 1 es un flujo cuasi estacionario.

Ho *et al* [9] determina la velocidad de punta del ala para distintas aves y pequeños insectos y la gráfica en función de la masa con el fin de determinar el tipo de régimen al cual operan los MAV concluyendo que estos operan en régimen transiente.

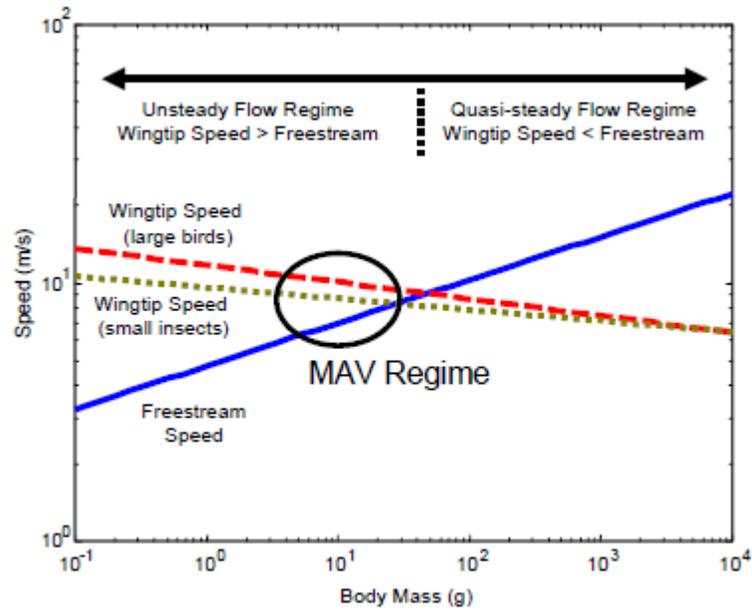


Figura 8.- Velocidad de punta de ala v/s masa [9]

El número de Strouhal es un parámetro adimensional que relaciona la oscilación de un flujo con su velocidad media por medio de la siguiente ecuación:

$$St = \frac{fA}{U} \quad (5)$$

Donde:

*St* : Numero de Strouhal

*A* : Amplitud de ala

*f* : Frecuencia de bateo

*U* : Velocidad crucero

Graham K. Taylor et al [15] demostraron que el número de Strouhal para aves, insectos y murciélagos se encuentra limitado a un estrecho rango de valores entre 0,2 y 0,4.

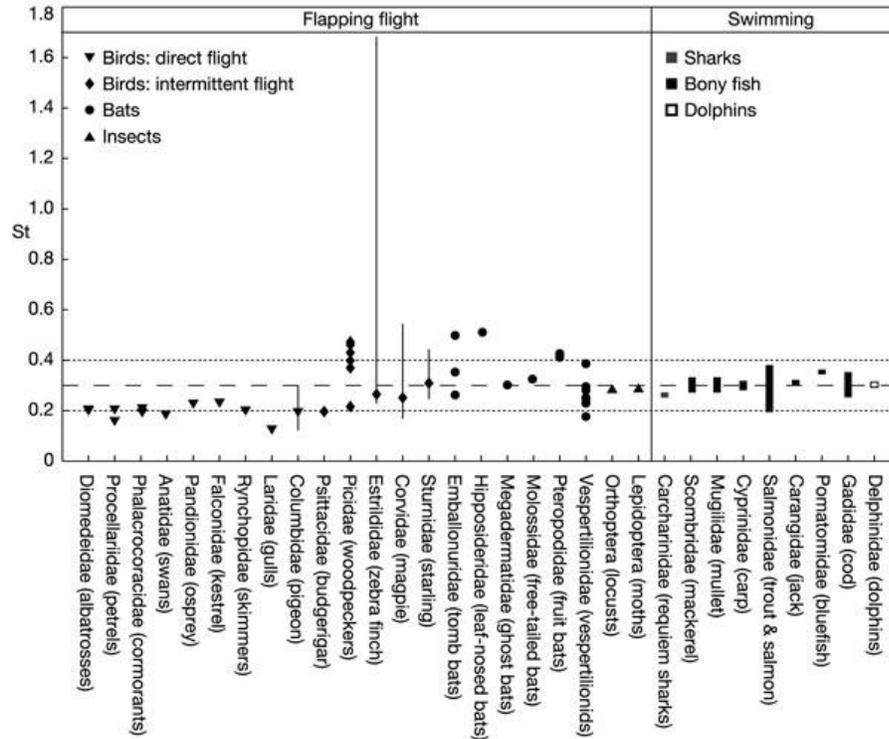


Figura 9.-Numero de Strouhal para especies voladoras de alas batientes y nadadores [15]

Finalmente Wilson y Wereley [10], utilizan un simple análisis aerodinámico sobre el vuelo en suspensión de insectos dejado por Ellington para obtener una ecuación que modela la capacidad de elevación de un MAV. La ecuación esta dada por:

$$m = 0,387 \left[ \frac{\phi^2 f^2 l^4 C_l}{Al} \right] \quad (6)$$

Donde:

$m$  : Masa [Kg]

$C_l$  : Coeficiente de elevación

$f$  : Frecuencia de bateo [Hz]

$l$  : Largo de alas [mt]

$A$  : Relación de aspecto  $\left( \frac{\text{Envergadura}}{\text{Ancho promedio}} \right)$

$\phi$  : Angulo de bateo [rad]

Esta ecuación permite ser utilizada con el fin de obtener parámetros preliminares para el diseño de las alas.

## 2.6 Dirección

Para maniobrar los MAV son necesarios mecanismos de control que permitan estabilizar las grandes fuerzas oscilantes que perturban la estabilidad. Para lograrlo se utilizan distintos sistemas ubicados principalmente en la cola del vehículo. A continuación se detallan los sistemas observados.

**Cola Estática:** Es la configuración más sencilla y menos controlable. Básicamente es una extensión que otorga estabilidad pero no se desplaza, similar a la función de un alerón en un automóvil.

**Cola Timón:** Es la forma tradicional de dirección de los vehículos aéreos. Consiste en una aleta vertical la cual rota por medio de actuadores magnéticos o servo motores. Una variante de este tipo de colas es el rotor utilizado en helicópteros.

**Cola en V:** Básicamente es una cola timón, solo que en vez de ser una sola aleta vertical son 2 en un determinado ángulo. Con esta configuración se puede lograr controlar ambas variables de la dirección con un solo movimiento, que son la elevación y giro.

**Alas independientes:** Este mecanismo es muy común en insectos pequeños. Básicamente controlan el giro alterando la fase de un ala con respecto a la otra. Este mecanismo es complejo puesto que se requieren mecanismo no tradicionales para el bateo de las alas.

## 2.6 Diseño de la Cola

Para el diseño de la cola es necesario determinar el centro de masa del MAV, así como la cuerda media aerodinámica de las alas (que corresponde a la cuerda de un ala rectangular con la misma área y fuerza aerodinámica del ala). Con estos dos datos más la posición de la cola se puede determinar el área que debe poseer esta. Para el diseño de la cola se definen los coeficientes de volumen horizontal y vertical por las siguientes ecuaciones:

$$V_h = \frac{S_h l_h}{S c} \quad (7)$$

$$V_v = \frac{S_v l_v}{S b} \quad (8)$$

Dónde:

$V_h$  : Coeficiente de volumen horizontal

$V_v$  : Coeficiente de volumen vertical

$S_h$  : Área horizontal de la cola

$S_v$  : Área vertical de la cola

$l_h$  : Distancia horizontal de la cola al centro de masa

$l_v$  : Distancia vertical de la cola al centro de masa

$S$  : Área del ala

$c$  : Media aerodinámica del ala

$b$  : Envergadura

Para un buen comportamiento del aeroplano se recomienda un volumen horizontal entre los 0,3 y 0,6 mientras que para el coeficiente de volumen vertical debiera caer entre los rangos 0,02 y 0,05.

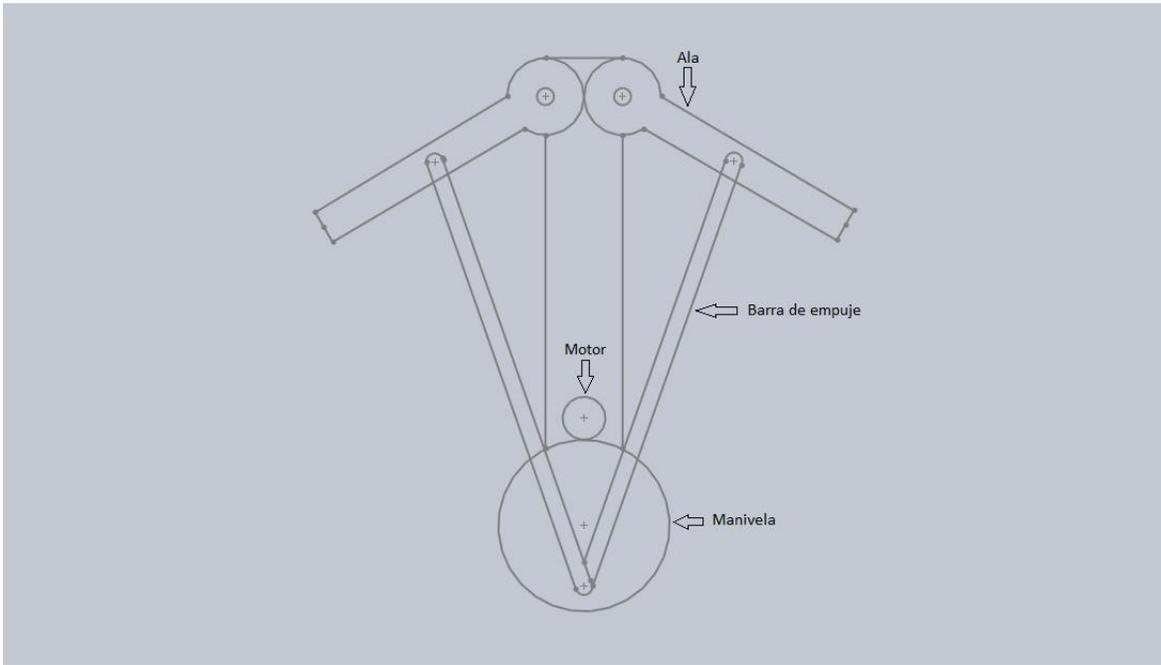
Si el coeficiente de volumen horizontal es muy pequeño el vehículo será muy sensible a la posición del centro de masa, por lo que mostrara una pobre tendencia a resistir ráfagas u otro tipo de perturbaciones, por otra parte si el coeficiente de volumen vertical es muy pequeño el MAV tendera a oscilar de manera vertical dificultando el control del vehículo.

## 2.7 Mecanismos Motrices

Las principales preocupaciones en el diseño del mecanismo motriz es que debe ser capaz de soportar los esfuerzos generados por las fuerzas aerodinámicas y presentar poco peso. Además el diseño del sistema debe diseñarse de manera que se consiga la frecuencia y fuerza necesaria para el bateo de las alas.

Básicamente todos los mecanismos utilizados en los MAV consisten en sistemas de manivelas los cuales transforman el movimiento rotacional de un motor eléctrico en movimiento lineal. Las diferencias radican en la cantidad de manivelas o la posición del mecanismo con respecto a las alas. La bibliografía indica que los mecanismos orientados con el eje del motor perpendicular a la dirección de vuelo presentan menores desfases entre los distintos pares de alas, además de una reducción en las vibraciones producto del motor [2, 4]. A continuación se ilustran los mecanismos comúnmente utilizados.

**Frontal con una manivela y doble barra de empuje:** El motor hace girar una manivela la cual desde un único punto se conecta a ambas alas transformando el movimiento lineal en un desplazamiento vertical. La ventaja del mecanismo es que es simple de construir, liviano y fácil de reemplazar las piezas. Por otra parte, su principal desventaja es que debido a que ambas alas se encuentran a una distancia fija del centro de la manivela, las barras de empuje nunca se encuentran exactamente en la misma posición vertical, esto produce un pequeño desfase entre ambas alas. A mayores tamaños esta diferencia no es tan significativa, sin embargo a escalas menores dificulta mucho el control del MAV. La idea del mecanismo se ilustra el a siguiente figura.



**Figura 10.-Mecanismos frontal con una manivela y doble barra de empuje**

Una variante de este mecanismo es diseñar la manivela de tal forma que las barras de empuje no se sitúen en el mismo punto. Variando el ángulo entre ambos puntos de montaje se puede reducir el desfase entre ambas alas, sin embargo nunca se podrá lograr que se desplacen totalmente en fase.

**Frontal con doble manivela y doble barra de empuje:** Con el objeto de eliminar el desfase entre las alas se coloca otra manivela de igual diámetro de manera que cada barra de empuje se conecte a su respectiva manivela. La ventaja es que se logra un aleteo en fase, sin embargo la principal desventaja es el aumento del peso.

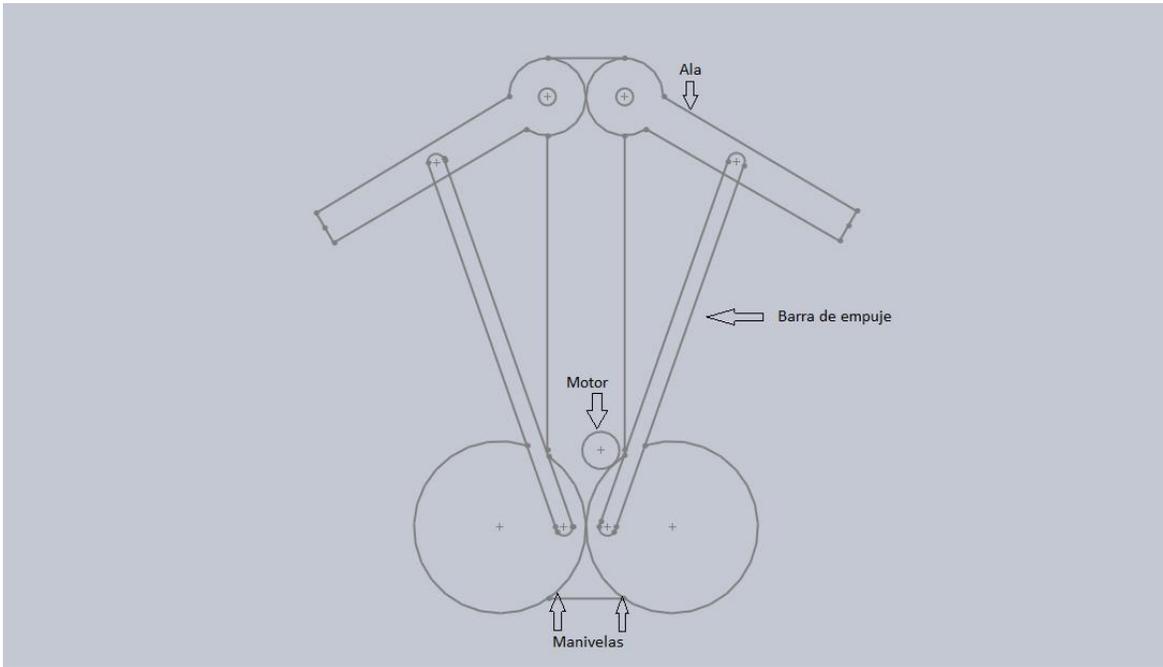


Figura 11.-Mecanismos frontal con doble manivela y doble barra de empuje

**Frontal con una manivela y una barra de empuje:** Este mecanismo une en un único punto la barra de empuje con ambas alas lo que permite que las alas se desplacen en fase durante todo el ciclo. La principal ventaja de este diseño es su poco peso y menor número de componentes, sin embargo su principal desventaja es que los esfuerzos sobre las piezas son mayores, además de la necesidad de un elemento flexible en el fuselaje que permita realizar el movimiento.

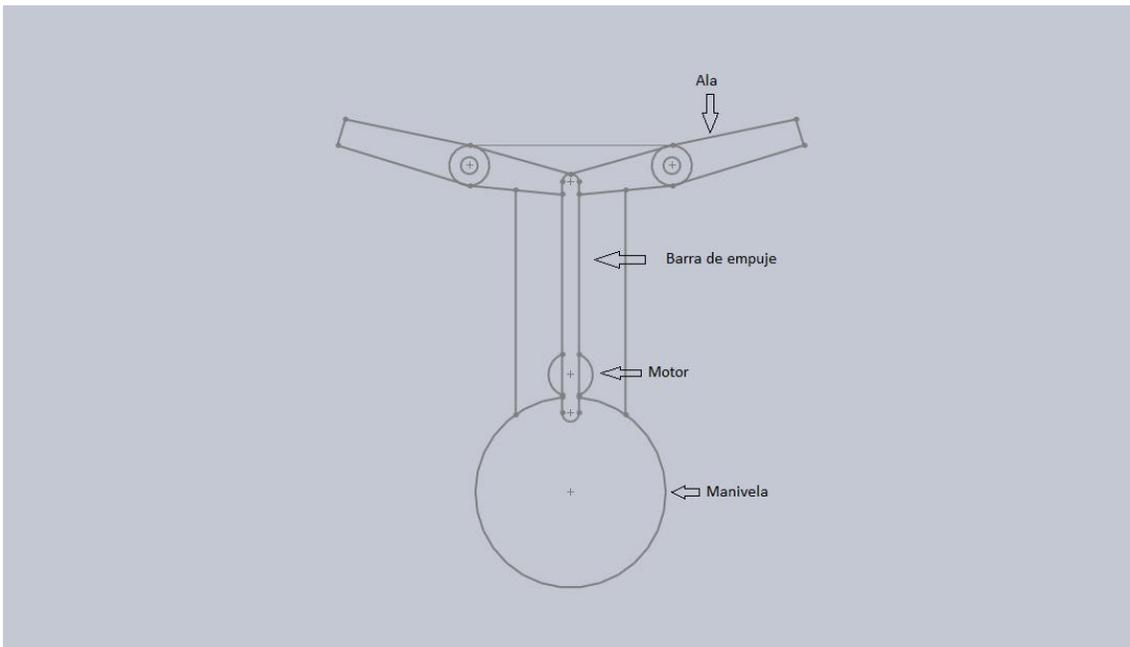


Figura 12.-Mecanismos frontal con una manivela y una barra de empuje

**Perpendicular con doble barra de empuje:** Este mecanismo consiste en colocar el motor de maneta perpendicular a la dirección de vuelo. Cada ala es conectada por medio de la barra de empuje a cada lado de la manivela. La ventaja de este mecanismo es que permite el movimiento de las alas en fase, además de reducir las vibraciones transmitidas al fuselaje. La principal desventaja es una implementación más compleja y que las barras de empuje quedan más expuestas.

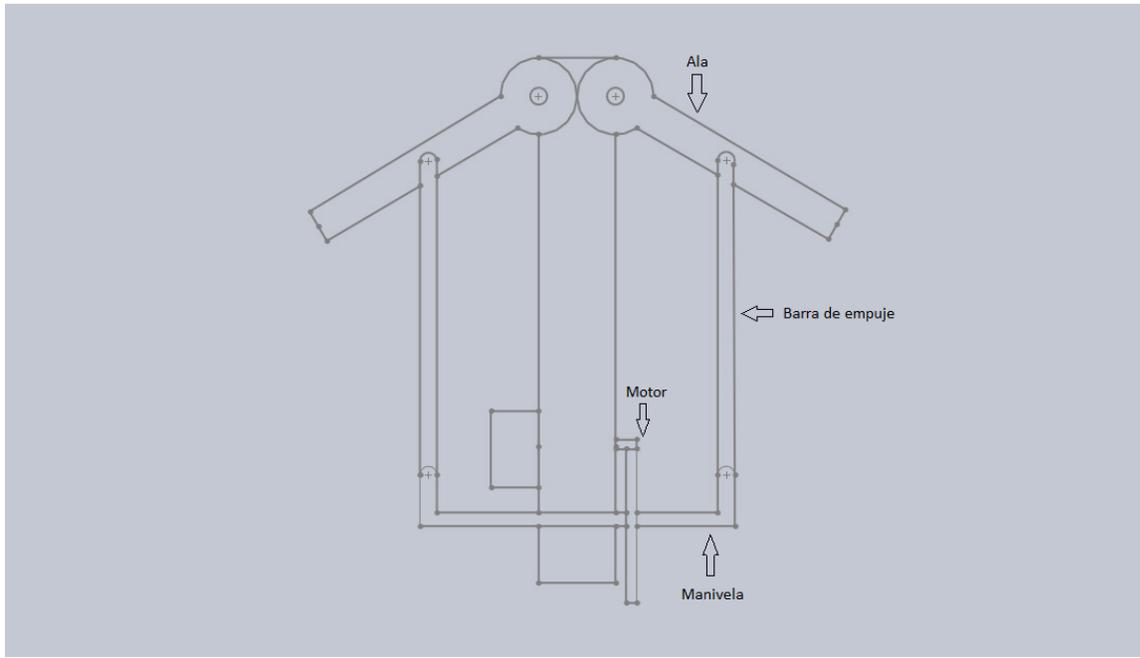


Figura 13.-Mecanismos perpendicular con doble barra de empuje

Para el diseño del mecanismo es necesario conocer la velocidad del motor y la frecuencia de bateo de alas requerida por el MAV. Luego con un análisis cinemático se puede determinar las distancias de manivelas y barras de empuje que entreguen la frecuencia requerida.

## 2.8 Otros Componentes

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

### 2.8.1 Motor

Como se menciona anteriormente, los micro vehículos aéreos utilizan motores eléctricos para generar el movimiento. Se prefieren por sobre los actuadores lineales o recíprocos 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.

### **2.8.2 Fuente de Poder**

La fuente de energía que utilizan la mayoría de los MAV 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).

### **2.8.3 Fuselaje**

La función del fuselaje es dar soporte a todos los componentes mecánicos y eléctricos que conforman el MAV. El criterio de diseño es un componente rígido y de poco peso, es por ello que los materiales más utilizados son polímeros o sándwich de fibras de carbono con una matriz de madera de balsa.

### **2.8.4 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 MAV 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.

## Capítulo 3.-Metodología

A continuación se describe la metodología a utilizar para el desarrollo de la memoria. Se prevé que luego del diseño original sea necesario realizar diversas iteraciones tanto en la etapa de construcción y rediseño, por lo que la construcción y diseño será un proceso iterativo que se realizara simultáneamente de manera de mejorar las propiedades del MAV.

- Recopilación de antecedentes bibliográficos. Se investigan las soluciones existentes, materiales y se definen los elementos a diseñar.
- Diseño de los distintos componentes mecánicos y análisis dinámico utilizando el software Ansys.
- Construcción de alas y pruebas. Se determinara experimentalmente el empuje y levantamiento que son capaces de ejercer.
- Rediseño de componentes. Dependiendo de los resultados obtenidos en el paso anterior, se rediseñan los componentes que puedan estar fuera de los parámetros establecidos.
- Construcción y montaje del MAV.
- Pruebas de vuelo y ajuste de parámetros de diseño.

## Capítulo 4.- Recursos

A continuación se detallan los recursos con los que se cuenta para la realización de la memoria.

### 4.1 Recursos No Financieros

- Computadores y equipos del laboratorio de robótica del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Chile.
- Softwares de dibujo CAD y de modelación en elementos finitos.
- Impresoras 3D:Fab@Home, Impresora de fotopolímeros Project 1000, Impresora FDM de plástico ABS.

### 4.2 Recursos Financieros

Los recursos financieros serán utilizados para la compra de materiales necesarios para la fabricación del MAV. Para ello se cuenta con fondos Fondecyt, ANR-Conicyt, etc. EL monto total para el proyecto es de \$400.000 pesos.

## Capítulo 5.- Carta Gantt

Tarea	Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio			
Semana	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Recopilación de antecedentes	■	■																		
Diseño componentes			■	■	■															
Fabricación alas y pruebas							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Rediseño							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Construcción y montaje							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Pruebas de desempeño															■	■	■	■	■	■
Diseño sistema de control																	■	■	■	■
Pruebas y ajustes finales																			■	■
Redacción de Informe																	■	■	■	■

## Capítulo 6.- Diseño y Construcción

## 6.1 Parámetros de Diseño

Por medio de las relaciones de geométricas de la tabla 3 se obtuvieron parámetros para el diseño del mecanismo motriz y alas del MAV. Para ello se consideró que el MAV no supere los 60 gramos. La siguiente tabla muestra los parámetros obtenidos.

**Tabla 4.- Parámetros de diseño**

Envergadura de alas [m]	0,391
Área alas [m <sup>2</sup> ]	0,0211
Carga de las alas [N/m <sup>2</sup> ]	30,112
Relación de aspecto	7,23
Frecuencia de bateo [Hz]	9,79
Velocidad [m/s]	9,44

Para obtener el ángulo de bateo que debe ejecutar el mecanismo motriz se puso como límites el rango de valores del número de Strouhal entre los que operan aves e insectos. Con estos valores y considerando la envergadura de las alas, por medio del teorema del coseno se obtuvo que el ángulo de bateo debe encontrarse entre los 60 y 161 grados. La tabla 5 muestra los resultados obtenidos así como la relación de avance obtenida.

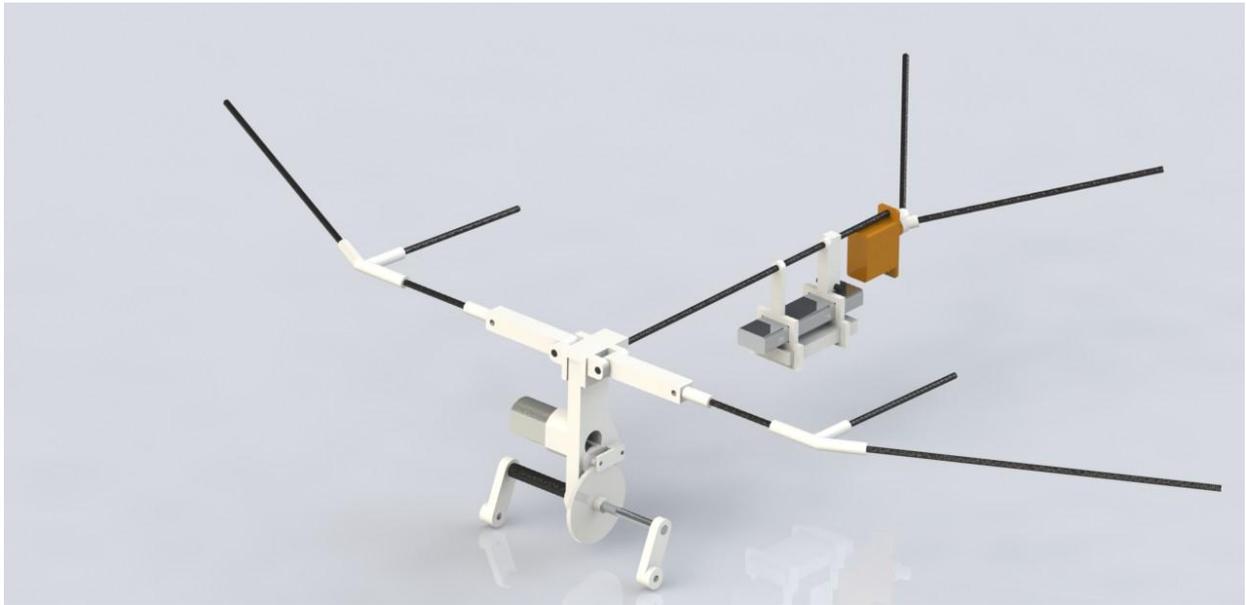
**Tabla 5.- Angulo de bateo y relación de avance**

Numero de Strauhal	0,2	0,4
Amplitud de bateo [m]	0,193	0,385
Angulo de bateo [°]	59,147	161,558
J	1,195	0,437

Hay que tener en cuenta que la relación de avance debe ser menor a uno para que el MAV opere en régimen transiente, por lo que el ángulo de bateo deberá ser ligeramente mayor que el límite inferior obtenido por este método de manera que se cumpla esto último.

## 6.2 Diseño Solución

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



**Figura 14.- Diseño propuesto**

Se eligió un mecanismo con el motor ubicado de manera perpendicular a la dirección de vuelo ya que esta configuración permite que no se produzca un desfase en el desplazamiento de ambas alas. Por medio de engranes se reducen las revoluciones del motor de manera que el eje ubicado en la parte inferior gire a las revoluciones que nos permita obtener la frecuencia deseada. Este eje gira solidario con dos manivelas en ambos extremos del eje, las cuales se unen a las alas en la parte superior por medio de una barra con rotulas en sus extremos de manera que el movimiento rotatorio se transforme en uno lineal permitiendo el bateo de las alas.

Para determinar las dimensiones de las bielas y dimensiones de la unión a las alas que permitan obtener el ángulo de bateo deseado, se realizó una simulación simplificada del mecanismo por medio del software Ansys. El modelo y el ángulo de bateo en función del tiempo se ilustran a continuación.

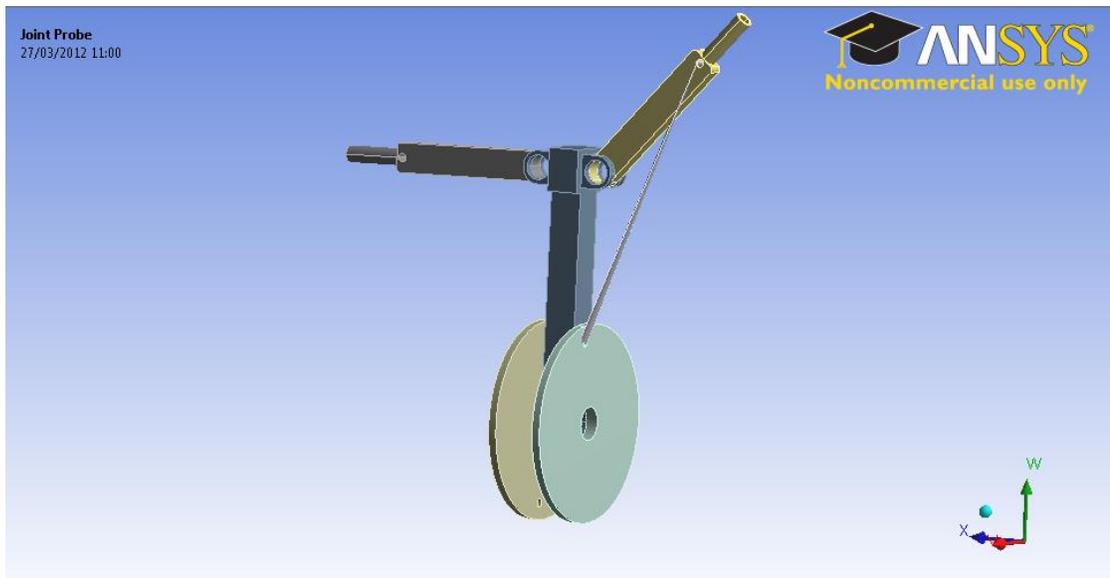


Figura 15.- Modelo simplificado utilizado en Ansys

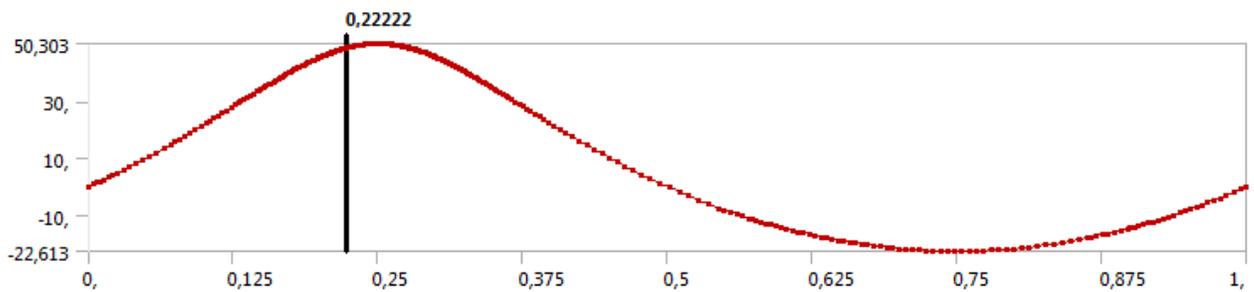


Figura 16.- Angulo de bateo en función del tiempo para una revolución

Se obtuvo que el ángulo de bateo del mecanismo es de 73 grados y que la dimensión de la biela debe ser de 1,5 cm. Además para lograr la frecuencia deseada de 9,79 Hz el eje debe girar a 582 rpm.

Para sostener los componentes eléctricos se diseñó un marco que sostenga la batería y el receptor de manera que calcen sin necesidad de pegamento u otro tipo de fijación. Este marco se adhiere por medio de pegamento a una varilla de fibra de carbono que se encarga de sostener la cola.

La cola consiste en un motor servo al cual se le adhiere una pieza construida con plástico ABS que contiene el marco de fibra de carbono que le dan forma. La figura 17 muestra un detalle de la cola y los componentes eléctricos.

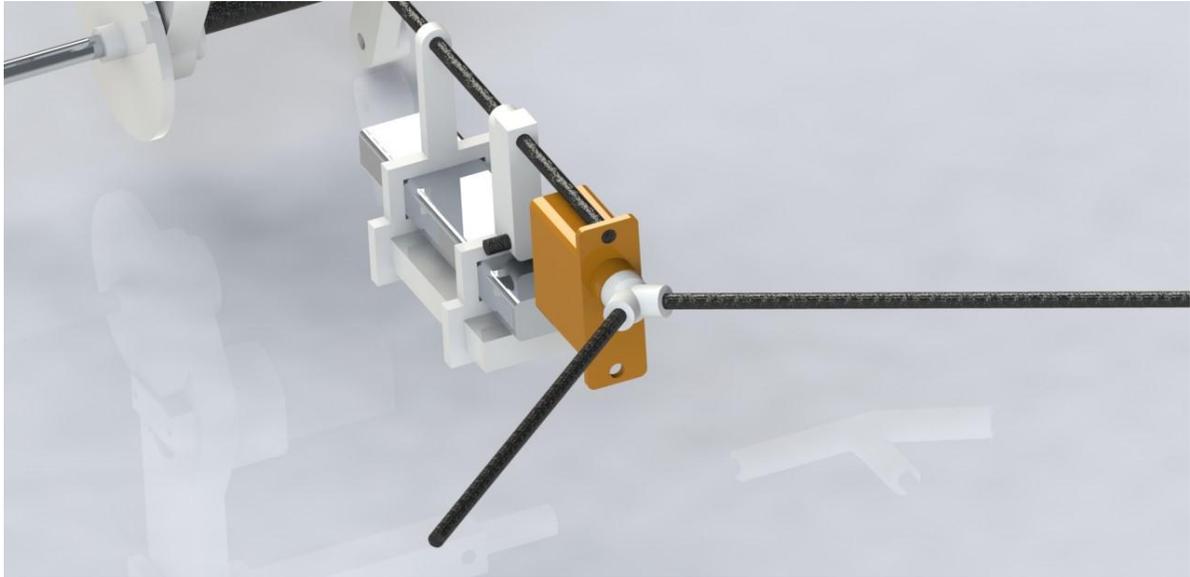


Figura 17.- Vista de la cola y componentes eléctricos

### 6.3 Construcción del Mecanismo

Para la fabricación del mecanismo se utilizó la impresora Makerbot, la cual es una impresora de deposición por hilo fundido, que permite fabricar piezas en materiales plásticos. La ventaja de esta impresora es que permite seleccionar el patrón y porcentaje de llenado de la pieza, permitiendo hacer piezas de mayor volumen sin que necesariamente se gane más en peso.

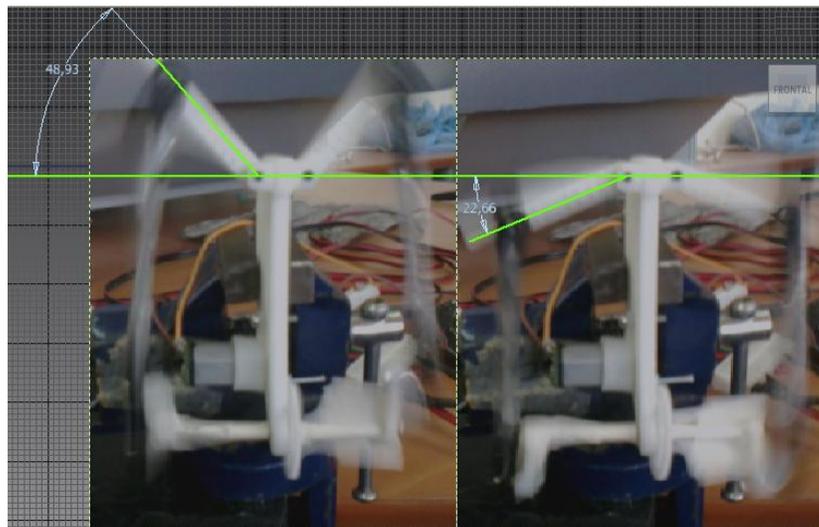
El material con el que se confeccionaron las piezas de las alas, fuselaje y bielas fue plástico ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) debido a su bajo peso y alta tenacidad y dureza, mientras que para el eje se utilizó un tubo de aluminio ya que es liviano y soporta mejor a la torsión que el plástico o la fibra de carbono.

El motor utilizado corresponde la motor eléctrico Arttech 3A025 de 3,7 volts. Para la generar la reducción, se compraron los engranes plásticos Hitec 55001 y Arttech 47081 que se utilizan en helicópteros de aeromodelismo. Con esto se logro una relación de transmisión de 10,95. Para la unión de la biela a las alas se utilizó un barra de aluminio con las rotulas Dubro 2139 en sus extremos. La siguiente imagen ilustra el mecanismo confeccionado.



**Figura 18.- Mecanismo motriz**

Para determinar la frecuencia obtenida y el ángulo de bateo del mecanismo se gravo un video y por medio de la cantidad de fotogramas que se demoraba en dar un aleteo se estimó la frecuencia de bateo que corresponde a 7,2 Hz y un ángulo de bateo de 71,59 grados.



**Figura 19.- Angulo de bateo del mecanismo**

### 6.3 Diseño de Alas

Para el diseño de las alas se tomaron vistas en plantas de alas de dos especies de familias de aves y se ajustaron sus dimensiones de manera que coincidiera con la envergadura de alas deseada, pero respetando la forma de estas. Esto con el objeto de determinar cuál de los dos perfiles propuestos presenta mejores propiedades aerodinámicas de sustentación y de empuje. La figura 20 muestra ambos perfiles de las alas propuesto, estos poseen un área de  $0,022 \text{ m}^2$ .

Inicialmente para la confección de las alas se utilizó varillas de carbono como marco, unidas por medio de una pieza de plástico ABS para mantener la forma. Mientras que para la membrana se utilizó tereftalato de polietileno (PET) que presenta alta tenacidad y resistencia a esfuerzos permanentes. Esta membrana se adhiere al marco envolviéndolo y sellándolo por medio de aplicación de calor con el objeto de evitar utilizar pegamento que sumaría peso a las alas.

Posteriormente se decidió remplazar el tereftalato de polietileno por polietileno de alta densidad que si bien presenta una resistencia a la fluencia menor que el PET ( $35 \text{ [N/mm}^2\text{]}$  contra  $63 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ) su densidad es menor y se puede encontrar en películas más delgadas. Con esto se redujo el peso en aproximadamente a un tercio del original de las alas.

Otro cambio realizado fue agregar patrones triangulares en el esqueleto de las alas de manera de tener más puntos de unión para el polietileno y así lograr una mayor tensión en la confección de las mismas. Este cambio significó un ligero aumento en el peso de las alas, sin embargo demostró una mejora en el desempeño del robot.

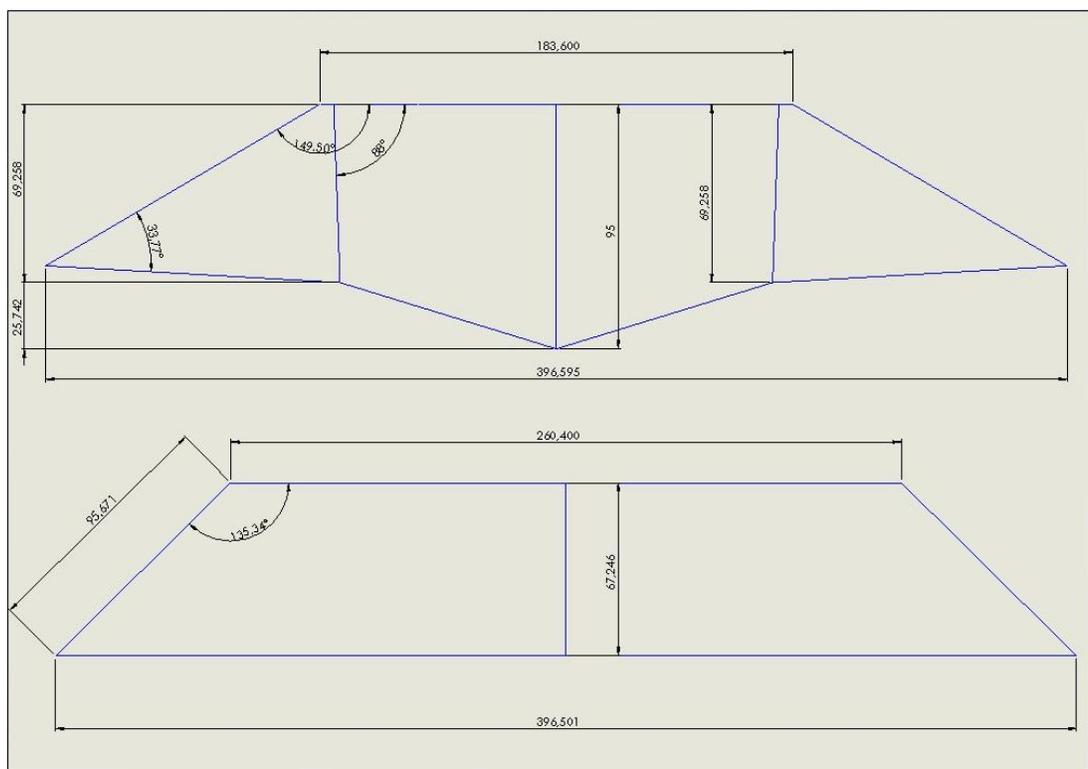


Figura 20.- Perfiles de alas

## 6.4 Componentes Eléctricos

Para la selección de la batería fue necesario medir el consumo de amperes del motor mientras este operaba en el mecanismo. Con el consumo de 0,43 [mA] del motor, se selecciono entre tres tipos de baterías disponibles y que presentaban el menor peso. Las baterías estudiadas son litio polímero y entregan un voltaje de 3,7 volts, que es el voltaje de operación del motor. La diferencia entre ellas está en su capacidad de descarga y peso. Si la capacidad de descarga de la batería es mayor a la corriente consumida por el motor, esta batería no podrá ser seleccionada puesto que se le produciría un daño irreversible.

La tabla 6 muestra las propiedades de las baterías estudiadas, además del tiempo de utilización teórico.

Tabla 6.- Características de baterías

Batería	Peso [g]	Capacidad [mAh]	Voltaje [V]	Descarga	Capacidad máxima de descarga [A]	Tiempo [min]
Nine Eagles replacement High-Cap 150mAh 1S LiPo	4,2	150	3,7	10C	1,5	20,9
ZIPPY 240mAh 20C single cell	5,9	240	3,7	20C	4,8	33,5
ZIPPY 240mAh 30C Single Cell	9,9	240	3,7	30C	7,2	33,5

La batería seleccionada corresponde a la Nine Eagles de 150 [mAh] puesto que presenta un menor peso y la capacidad de descarga máxima es mayor al consumo del motor. El tiempo de operación que entregaría la batería es de casi 20 minutos. Este tiempo es teórico puesto que el tiempo real depende de otros factores como el estado de la batería, eficiencia entre otros. La figura 21 muestra la batería seleccionada.

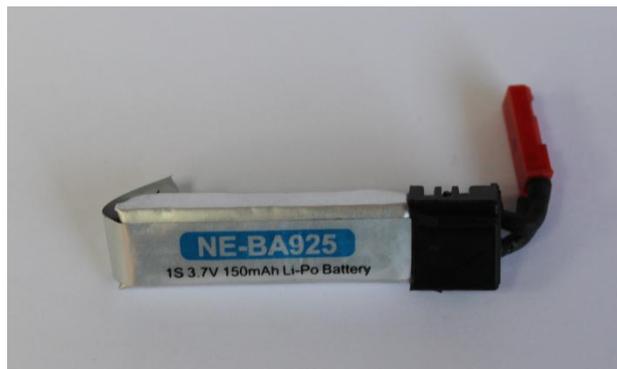
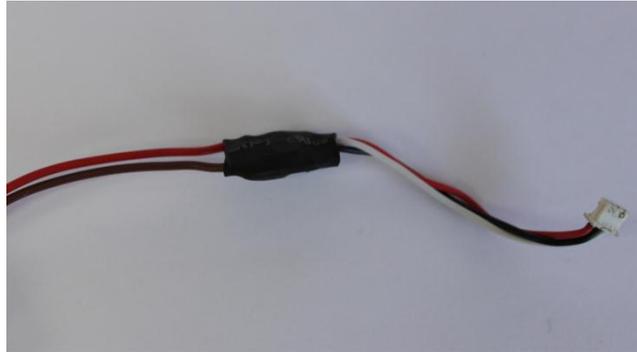


Figura 21.- Batería Nine Eagles de 150 mAh

Para variar la velocidad del motor es necesaria la utilización de un controlador de velocidad electrónico. Puesto que la velocidad del motor depende del voltaje que recibe, el

controlador electrónico ajusta el voltaje conectando y desconectando rápidamente la fuente del motor de manera que éste no siente los cortes, sino que el efecto general que significa una baja en el voltaje.

El controlador seleccionado es el Hobbyking 3A Single Cell ESC. La selección de este controlador se debe a su peso de 1,6 gramos, su voltaje de operación de entre 2,6 y 5,5 volts y su capacidad de entregar una corriente máxima de 3 amperes.



**Figura 22.- Controlador de velocidad electrónico HK3A ESC**

Para controlar el robot se optó por un sistema radio controlado debido al poco peso y facilidad de implementación. Para ello es necesario instalar en el robot un receptor al cual se conectan a cada uno de sus canales el controlador electrónico, la batería y los motores servo. Cada uno de los canales se conecta por medio de señales de radio a alguno de los comandos del transmisor lo que permite controlar cada uno de los sistemas.

El receptor seleccionado corresponde al Assan X8R4P de cuatro canales. Este receptor funciona a una frecuencia de 2,4 [GHz] y tiene un peso de 2,8 gramos. La imagen XX muestra el receptor seleccionado.



**Figura 23.- Receptor Assan X8R4P**

## 6.5 Construcción Cola

Utilizando las ecuaciones 7 y 8 con valores para los coeficientes de volumen horizontal y vertical de 0,4 y 0,03 respectivamente, se obtuvieron las áreas horizontal y vertical de la cola.

Tabla 7.- Áreas horizontal y vertical para la cola

Área horizontal [m <sup>2</sup> ]	0,00477
Área vertical [m <sup>2</sup> ]	0,00093

En un principio se decidió utilizar una cola de tipo timón debido a que permite que el control más simple del avión ya que cada alerón controla una sola variable de la dirección (altura o giro). Para este diseño se utilizaron dos tipos de perfiles Naca que presentan un bajo coeficiente de arrastre. Para el alerón vertical se utilizó el perfil HT12, mientras que para la horizontal se utilizó el perfil GOE9K, éste último seleccionado porque además del poco arrastre presenta un lado plano lo que facilitaba su impresión. La siguiente figura muestra los perfiles utilizados.

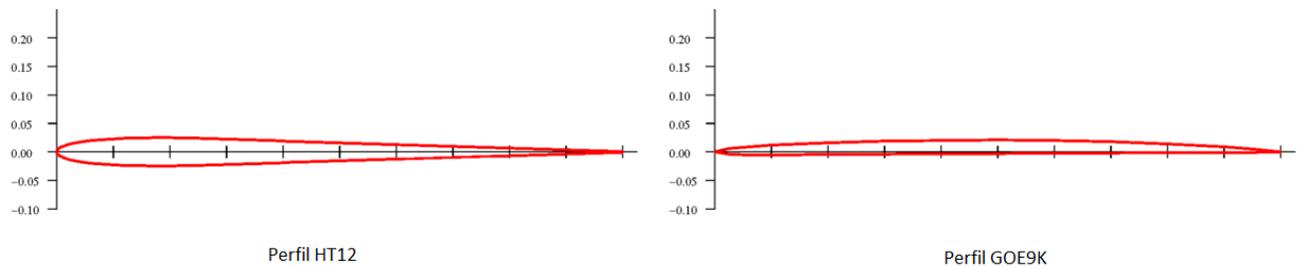


Figura 24.- Perfiles NACA para superficies vertical y horizontal de la cola

Para controlar el giro se utilizó un actuador lineal, el cual conectado por medio de una vara de empuje permite el desplazamiento del alerón vertical. A continuación se muestra la cola impresa en plástico ABS y el actuador utilizado.



Figura 25.- Cola tipo Timón junto al actuador lineal utilizado

El problema que surgió con este diseño fue que el peso total del sistema es de 11,9 gramos lo que se considero excesivo con el fin de lograr un peso total no superior a los 60 gramos. Fue por esto que se decidió modificar el tipo de cola a una en V y confeccionarla de la misma manera que las alas, es decir un esqueleto de fibra de carbono cubierto por polietileno. Para el control de la cola se utilizo el motor servo HKM-282A el cual entrega un torque de 0,2 [Kg] y posee un peso de 2 [gr].

La cola posee una inclinación de 10 grados con respecto a la horizontal de manera de que empuje la cola del MAV hacia abajo y así desplazar el centro de masa ligeramente hacia atrás. Esta se une directamente al motor servo lo que permite que rote para así controlar el giro. El peso total de este nuevo diseño es de 3,2 [gr] y se ilustra en la figura 26.



Figura 26.- Cola en V de 3,2 gramos

## 6.6 Parámetros del MAV

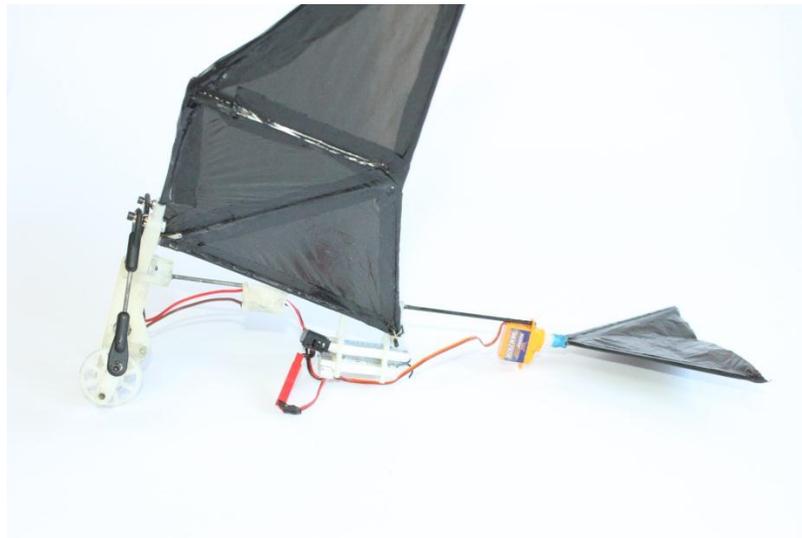
A continuación se presentan los parámetros finales del MAV construido así como algunas imágenes.

Tabla 8.- Parámetros finales del MAV

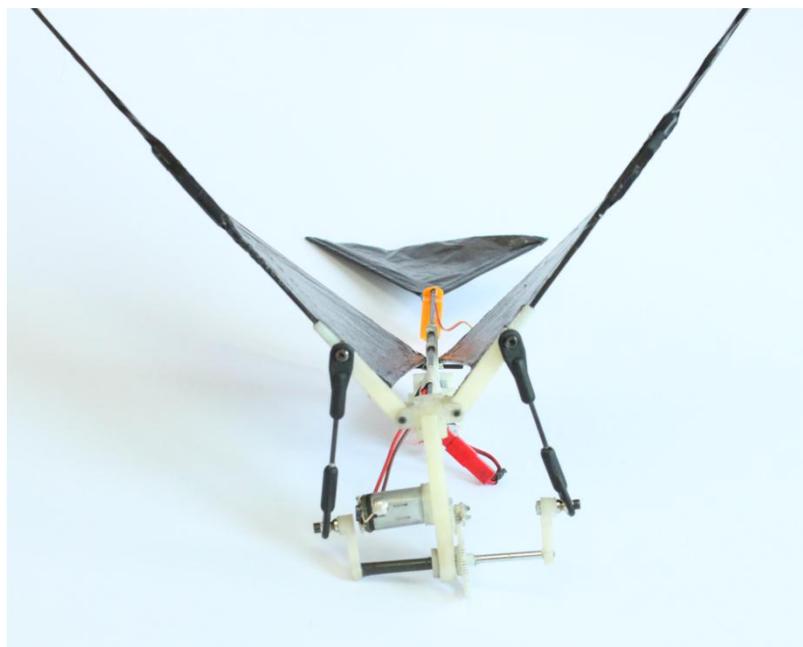
Peso [gr]	47,2
Envergadura de alas[m]	0,46
Área alas[m <sup>2</sup> ]	0,0299
Largo [m]	0,26
Relación de aspecto	7,23
Frecuencia de bateo[Hz]	7,2
Angulo de bateo[°]	71,6
Relación de transmisión	10,95
Capacidad de batería [mAh]	150



**Figura 27.- Vista superior del MAV**



**Figura 28.- Vista lateral del MAV**



**Figura 29.- Vista frontal del MAV**

## Capítulo 7.- Mediciones de sustentación y empuje

### 7.1 Montaje Experimental

Con el objeto de medir las fuerzas, tanto de sustentación como de empuje, que es capaz de generar el MAV se propuso el siguiente montaje experimental que se ilustra en la figura 30.

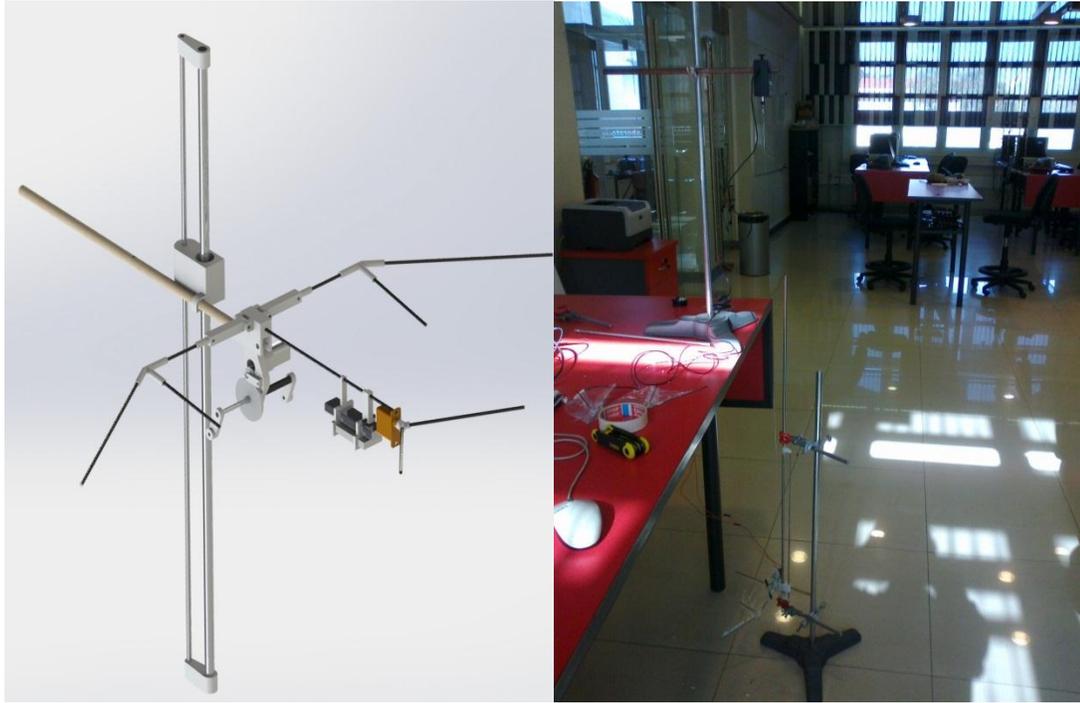
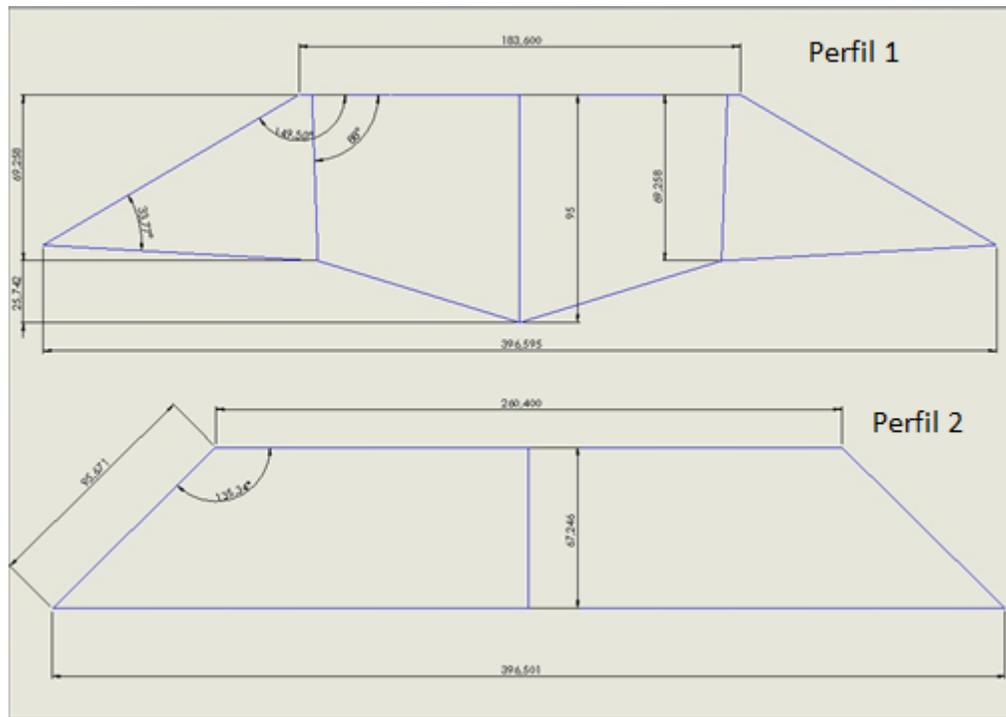


Figura 30.- Concepto e implementación del montaje experimental

El montaje consiste en un riel por el cual el MAV puede desplazarse de manera vertical por medio de un rodamiento lineal. El robot es conectado por medio de una cuerda de baja elasticidad a un sensor de fuerza Vernier Dual-Range. Este sensor registra las fuerzas ejercidas por el robot a una frecuencia de muestreo de 1 KHz por un periodo de 5 segundos. Para obtener la fuerza de empuje y sustentación del MAV simplemente se cambia su orientación con respecto al eje vertical.

Se crearon dos tipos de perfiles, inspirados en familias de pájaros distintas, para determinar cuál de estos presenta mejores propiedades aerodinámicas. Los perfiles utilizados son los que se muestran en la figura 31. El perfil inspirado en la familia de Halcones corresponde al perfil 1, mientras que el 2 está inspirado en la familia de los Buteo. Ambos perfiles cuentan con la misma área de manera que los resultados puedan ser comparables.



**Figura 31.- Perfiles de alas a estudiar**

Debido a que uno de los efectos que permiten el vuelo de los pájaros es la Circulación Rotacional, que implica la mayor generación de vórtices debido a la rotación que se genera entre el borde de ataque del ala y su parte posterior, es que se diseñaron tres modificaciones del perfil 1. Ésta rotación está determinada por la flexión del rigidizador (varilla de carbono que va de la parte delantera del ala a la posterior) por lo que se diseñaron perfiles que modificaran este parámetro. En el primer perfil el rigidizador posee el mismo diámetro que el resto de la estructura del ala, el segundo perfil se redujo el diámetro de rigidizador a la mitad (1 milímetro de diámetro) de manera que sea más flexible, mientras que el tercer perfil se confecciono sin ningún tipo de rigidizador.

Por otra parte, con el objeto de disminuir el efecto negativo que se produce en la sustentación al momento en que el MAV desplaza sus alas hacia arriba, es que se confeccionaron 3 tipos de alas del perfil 2. El primer tipo consiste en un ala con el esqueleto totalmente rígido, mientras que para el segundo y tercer tipo se confecciono una unión flexible que consiste en una varilla de fibra de carbono de 1 milímetro de diámetro la cual se flecta cuando el ala se desplaza hacia arriba. El concepto de la unión se puede observar en la figura 32. La diferencia entre la ala 2 y la 3 es el largo de la varilla de fibra de carbono de manera de obtener distintos ángulos de flexión.



Figura 32.- Concepto de la unión flexible

Las 6 alas confeccionadas se pueden observar en la siguiente figura, así como la denominación que se utilizara a continuación.

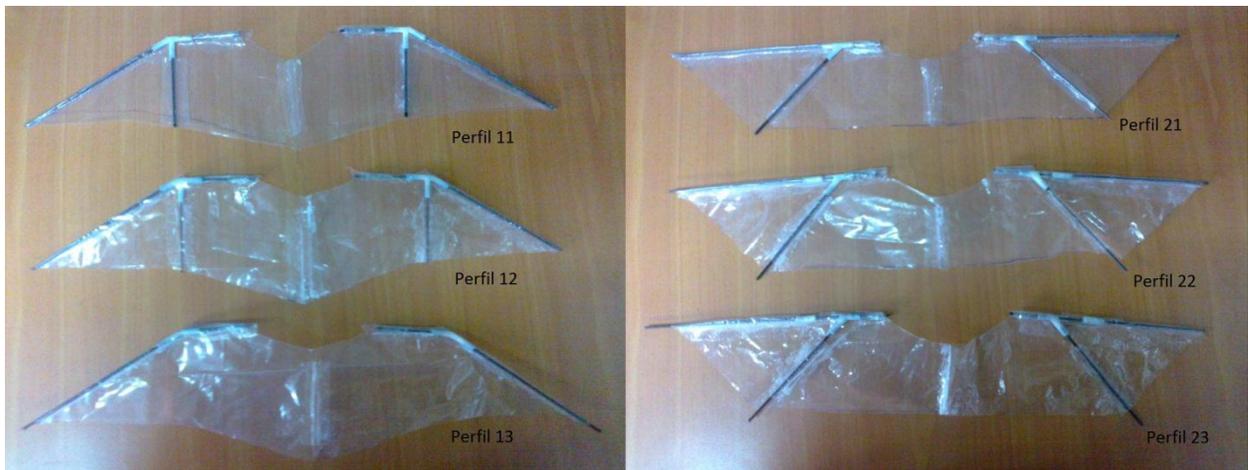
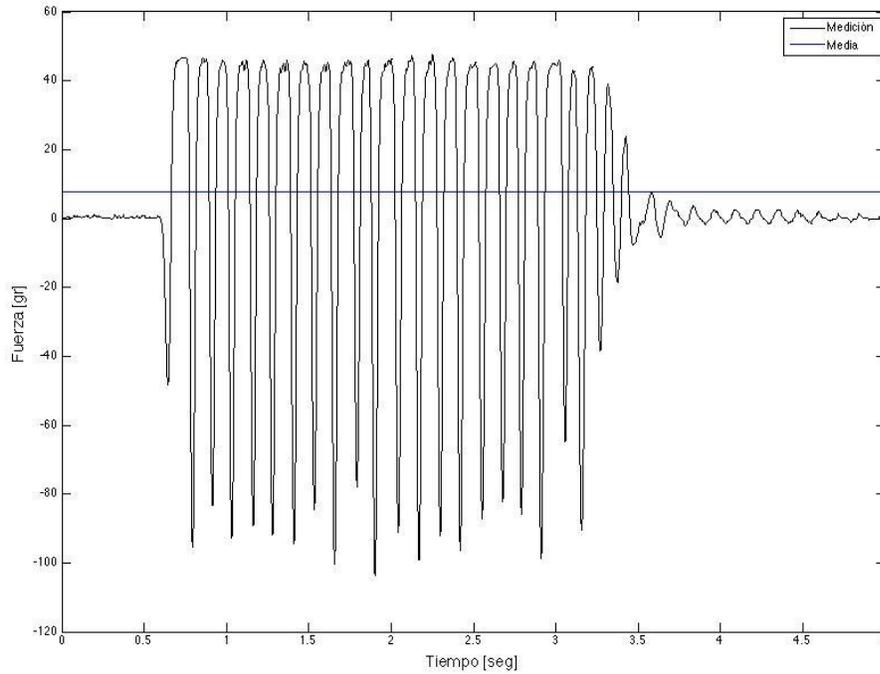


Figura 33.- Perfiles de alas estudiados

## 7.2 Resultados

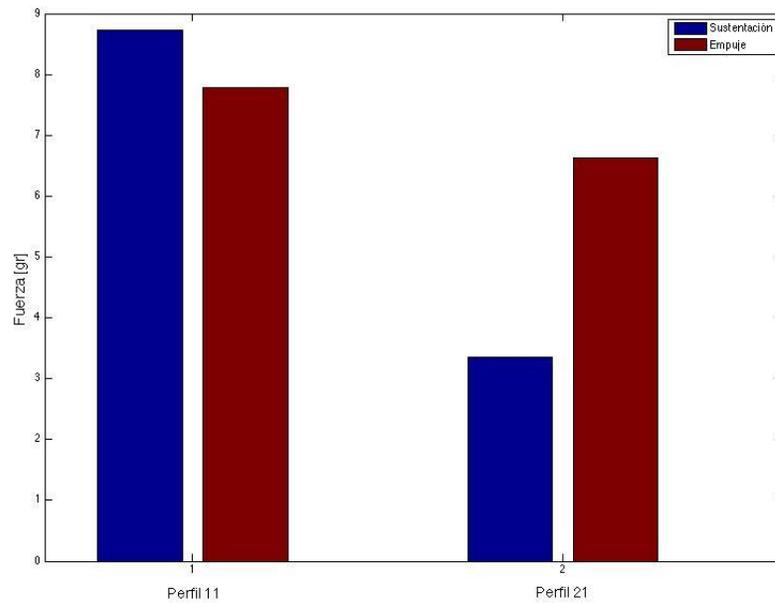
Se obtuvo para cada uno de los perfiles de alas diagramas de fuerza versus tiempo tanto para el empuje como sustentación.

Debido al ruido experimental que presenta el sensor fue necesario aplicar un filtro a los resultados. El filtro utilizado fue el de Butterworth debido a que privilegia la unicidad en la banda de paso, y debido a que el ruido experimental es de alta frecuencia se utilizó un pasa bajos de 20 Hz. Las curvas obtenidas son de la forma que ilustra la figura 5. Aquí se grafica la sustentación en gramos para el perfil 12 en función del tiempo. También se muestra el valor medio obtenido para la medición. Los gráficos para cada uno de los perfiles de alas se pueden encontrar en los anexos.



**Figura 34.- Sustentación vs Tiempo para perfil 12**

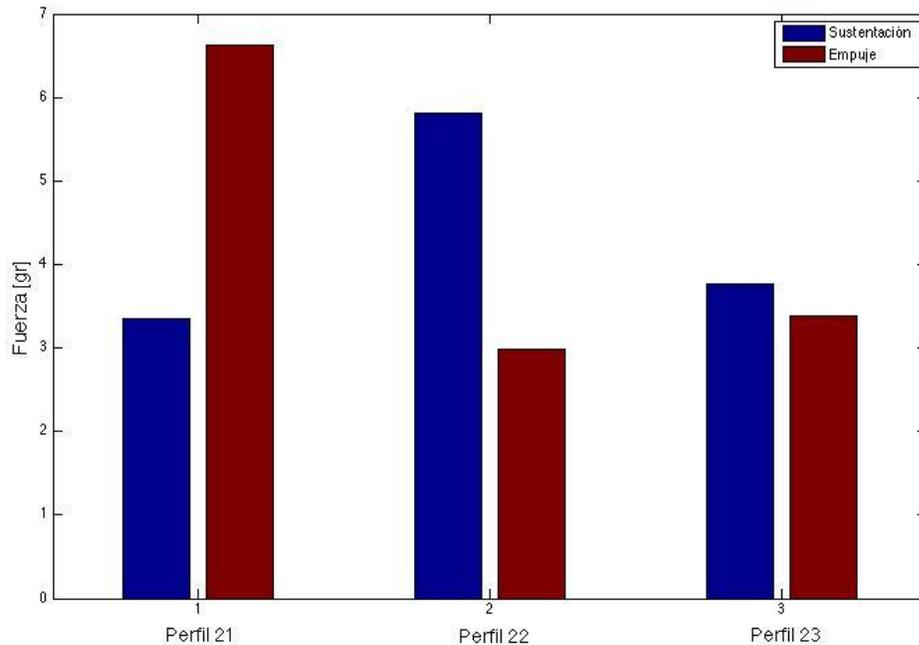
Lo primero que se desea comparar es cuál de los 2 perfiles diseñados presentan mejores propiedades aerodinámicas, el grafico a continuación compara la sustentación y empuje media de ambos perfiles rígidos.



**Figura 35.- Comparación de empuje y sustentación de perfiles 11 y 21**

Se puede observar que el perfil de ala de la familia de halcones presenta más sustentación y empuje que el otro perfil de alas. Si bien ambos perfiles poseen la misma área, la forma de estas parece favorecer las propiedades aerodinámicas.

El siguiente grafico compara el empuje y sustentación media para las alas con la varilla de carbono flexible y su símil rígido.

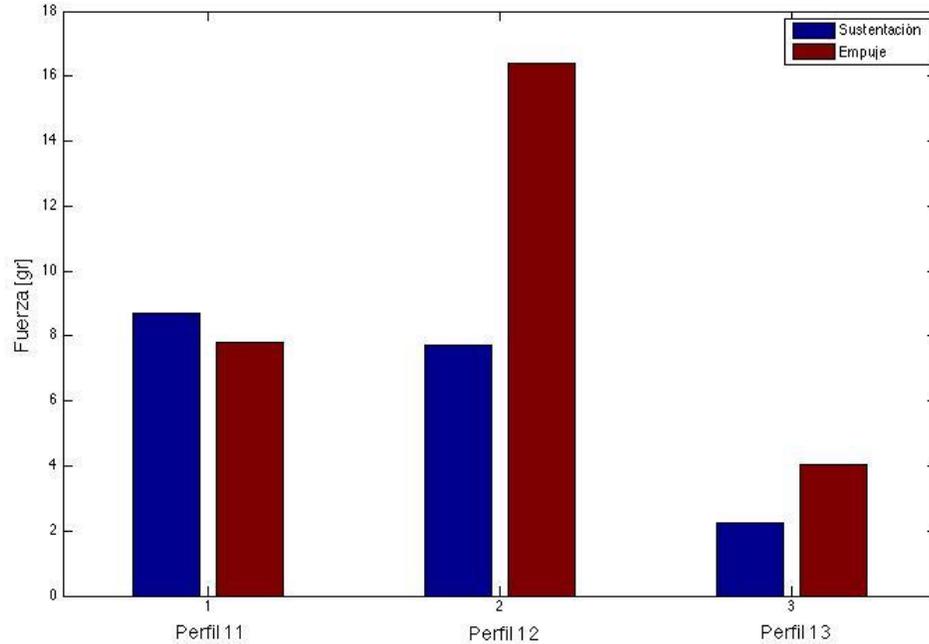


**Figura 36.- Comparación de empuje y sustentación de perfiles 21, 22 y 23**

Tal como se esperaba, se puede observar que la sustentación de ambos perfiles flexibles aumenta la sustentación del MAV, pero a cambio se produce un fuerte descenso en la fuerza de empuje del robot. Este aumento de sustentación se debe a que al flectarse el ala se disminuye el efecto negativo producido por el movimiento de las alas hacia arriba. Si bien se esperaba que el perfil 23 aumentara aún más la sustentación que el perfil 22, debido a que al poseer una varilla más larga se flecta mas, esto no sucedió. Esto se pudo haber producido por una disminución en la fuerza de sustentación cuando el ala aletea hacia abajo, lo que posiblemente se debe a que el ala también se flectó durante ese movimiento.

La disminución del empuje tanto en el perfil 22 y el perfil 23 se debe a que al flectarse el ala la rotación de esta disminuye, lo que por consiguiente produce una disminución considerable en el empuje que es capaz de generar.

Finalmente, el siguiente grafico compara la sustentación y empuje de las alas a las cuales se les modifico el diámetro del rigidizador con el fin de observar el efecto de la Circulación Rotacional.



**Figura 37.- Comparación de empuje y sustentación de perfiles 11, 12 y 13**

Como era esperable, al ser alas menos rígidas la sustentación que son capaces de generar disminuye. En el caso del perfil 13 que no posee rigidizador este descenso es mayor que en el caso del perfil 12 que solo disminuye en un gramo con respecto a su símil rígido. Por el contrario, el empuje generado por el perfil 12 prácticamente duplica al generado por el rígido, esto debido a que la rotación del ala es capaz de generar un mayor flujo de aire hacia la parte posterior del MAV. El perfil 13 en cambio el empuje también disminuye, si bien el ala posee una mayor rotación que los otros perfiles, la falta de rigidez de esta no es capaz de generar mayores fuerzas.

La importancia del empuje que puede generar el MAV se debe a que este determina la velocidad a la cual el vehículo es capaz de desplazarse. Esta velocidad influye en la sustentación que se producirá por efecto del flujo de aire a través de las alas, como lo propone la aerodinámica clásica, la cual se suma a la generada por las propias alas.

### 7.3 Mediciones en túnel de viento

Con el objeto de medir cuanto es la sustentación que se producen en las alas debido al efecto del paso de viento a través de éstas, se sometió al MAV a un estudio de sustentación en un túnel de viento. Para ello se utilizó el túnel de viento disponible en el laboratorio de estudios avanzados en fenómenos no lineales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.



Figura 38.- Túnel de viento utilizado para las mediciones.

Para medir la sustentación se conectó el MAV por medio de una barra al sensor de fuerza Vernier Dual-Range y se midió como variaba el peso a medida que se aumentaba la velocidad del aire en el túnel. Con esto se puede calcular la sustentación generada en las alas producto del paso del viento a través de éstas. Las alas utilizadas para el estudio corresponden a las del perfil 22 que presentó la mejor combinación entre sustentación y empuje. El gráfico a continuación muestra los resultados obtenidos en la prueba.

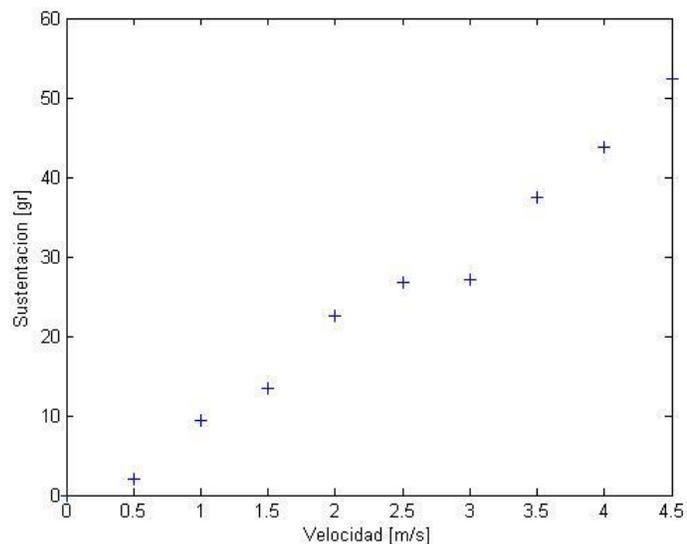


Figura 39.- Sustentación versus velocidad.

Se puede observar que a medida que el viento aumenta en velocidad la sustentación generada en las alas es mayor. Además se observa que cuando el viento alcanza una velocidad de los 4 [m/s] se genera una sustentación de 43,7 gramos, la que sumada a la sustentación generada por las alas supera el peso del MAV permitiendo que este se levante. Por lo tanto para lograr el vuelo el empuje generado por las alas debe ser capaz de permitir al MAV alcanzar dicha velocidad.

## Capítulo 8.- Pruebas de vuelo

Con el mecanismo finalizado, se procedió a realizar pruebas de vuelo para ver la capacidad del MAV de suspenderse en el aire. Las pruebas se realizaron al aire libre en el Parque O'higgins puesto que entregaba suficiente espacio sin obstáculos de áreas verdes que permitieran volar al robot sin el peligro de estrellarse contra algún objeto.

En la primera prueba de vuelo realizada, el MAV no fue capaz de emprender vuelo y cayo impulsado por el peso del motor al momento de ser lanzado. Ante este suceso, se consideró que la rigidez de las alas no era suficiente, por lo que se cambió el diseño de éstas formando un patrón de estructuras triangulares de manera que el polietileno tuviera más superficie de contacto que permitiera dejarlo más tenso. Por otra parte, el mecanismo mostro suficiente robustez para soportar caídas sin que se rompieran alguno de los componentes.

Con las alas modificadas, en la siguiente prueba de vuelo el MAV nuevamente fue incapaz de volar, sin embargo esta vez la caída fue menos abrupta que en la prueba anterior. Se decidió entonces aumentar el ángulo de ataque de las alas a 15 grados con respecto a la dirección de vuelo. Al aumentar el ángulo de ataque, el efecto negativo que se produce en la sustentación cuando el MAV desplaza sus alas hacia arriba disminuye, también se produce un aumento en el empuje. Por contraparte, si el ángulo es muy elevado el coeficiente de arrastre también aumenta [17].

En la siguiente prueba se observó que el desempeño del MAV mejoro gracias al nuevo ángulo de ataque, sin embargo no logro sostener vuelo por mucho tiempo. Al lanzar el robot se observó que fue capaz de sostenerse en el aire por unos instantes, pero luego se inclinó hacia la adelante produciendo su caída al suelo. Esto se debe a que el centro de masa del MAV se encuentra adelante del lugar de donde se genera la fuerza promedio de sustentación de las alas, que corresponde a la cuerda media del ala. Cuando el centro de masa se encuentra delante de la cuerda media el MAV, al producirse el aleteo la fuerza se genera detrás del centro de masa lo que produce que se levante la parte posterior del robot. Esto hace que el robot rote hasta el instante en que las alas dejan de generar fuerza hacia abajo, produciendo como consecuencia que el MAV caiga de cabeza. Para conseguir estabilidad en el vuelo es necesario que el centro de masa del robot se encuentre en la misma posición que la cuerda media del ala o muy cercana a esta.

El centro de masa del robot se encuentra adelante debido a que el peso del motor es de 9,2 gramos, que representa cerca del 20% del peso total del MAV. Este se ubica en la parte de adelante del robot para conseguir la transmisión de movimiento hacia las alas. Debido a esto se decidió trasladar el resto de los componentes de mayor peso, batería y receptor, a la parte posterior del MAV. Con esto se consiguió trasladar el centro de masa a una posición cercana a la cuerda media del ala.

Para la siguiente prueba, además de trasladar el centro de masa hacia atrás, se decidió agrandar la superficie de las alas hasta una envergadura de 46 centímetros, con el fin de generar más fuerza de sustentación. El resultado fue similar al de la prueba anterior, se suspendió un instante pero luego cayó al suelo salvo que esta vez no lo hizo de cabeza, sino que de manera más recta. Esto hace pensar que el empuje generado por las alas no es suficiente para mantener la velocidad que necesita el MAV para sustentarse, ya que la velocidad por la que pasa el aire a través de las alas influye en la fuerza de sustentación que este genera y que se suma a la generada por el movimiento de las alas.

## Capítulo 9.- Discusiones

Sin duda una parte crítica del trabajo es lograr un mecanismo motriz eficiente y de poco peso que sea capaz de transmitir las fuerzas. Uno de los problemas del mecanismo es el peso excesivo del motor en comparación del resto del MAV. Se probaron modelos de motor más pequeños sin embargo ninguno de los motores fueron capaces de generar suficiente torque para desplazar las alas. También se probaron distintos tipos de configuraciones para el mecanismo, sin embargo presentaron las limitantes de estos que se presentaron en la sección de antecedentes, como el esfuerzo excesivo de los componentes y el desfase entre el movimiento de las alas. Finalmente la configuración del motor perpendicular al sentido de vuelo fue la que mejor funciono.

La tecnología de fabricación 3D permitió fabricar el MAV en prácticamente su totalidad en plástico ABS. Este material mostro suficiente resistencia para soportar las cargas generadas tanto por el sistema motriz como por las alas, además de un bajo peso. Además la opción que presenta esta tecnología de modificar la cantidad de material de relleno en la pieza, permite confeccionar piezas de mayor volumen sin tener un aumento en el peso, lo que se facilita el diseño pensando en el montaje de los distintos componentes. La única limitante de este tipo de fabricación es la perdida de precisión cuando se reduce demasiado el tamaño de las piezas o los diámetros de orificios. Esto produce que el calce de componentes pequeños se dificulte, principalmente el de los engranes. Si los engranes no se instalan en la distancia correcta el sistema se traba o se produce un sobre esfuerzo en el motor, por lo que es importante conseguir una mejor resolución en la impresión si se quiere conseguir un diseño más compacto.

En cuanto al peso del MAV, se puede observar que son los componentes eléctricos los que más aporta al total, siendo el motor el componente más pesado. En total los componentes eléctricos corresponden a un 45% del total del peso. Las alas aportan con un 13% del peso, mientras que el fuselaje tiene un peso total de 17,7 gramos. La tabla 9 muestra un desglose de los pesos de los distintos componentes que componen el MAV.

**Tabla 9.- Pesos de los componentes del MAV**

Componente	Peso [gr]	Porcentaje [%]
Motor	9,2	19,5
Receptor	2,8	5,9
Batería	4,2	8,9
Controlador	1,6	3,4
Servo	2,0	4,2
Cola	1,2	2,5
Alas	6,2	13,1
Conectores y cables	2,3	4,9
Fuselaje	17,7	37,5
Total	47,2	100,0

Para futuros diseños es necesario conseguir baterías y un motor de menor peso que sea capaz de generar mayores torques. Esto permitiría reducir el peso del MAV lo que permitiría lograr un vuelo con menores fuerzas de sustentación.

El material utilizado para la construcción de las alas demostró ser capaz de resistir las fuerzas involucradas y sin significar en un peso considerable para el MAV. Las alas son capaces de generar una sustentación de 7,72 gramos y un empuje de 16,39 gramos. La revisión bibliográfica muestra que en micro vehículos aéreos de similar peso, la sustentación generada por las alas está dentro de valores similares, mientras que el empuje es ligeramente mayor al que se obtuvo con nuestro modelo. Para lograr un mayor empuje es necesario un rediseño de alas que permita una mayor torsión de manera que varíe de mejor manera el ángulo de ataque durante el desplazamiento de las alas. Otra opción sería un diseño de alas rígidas y confeccionar un mecanismo que además de desplazar las alas hacia arriba o abajo genere un movimiento de torsión en éstas, este mecanismo significaría un aumento de peso, pero tendría la ventaja de tener un movimiento controlado de la torsión de las alas.

## Capítulo 10.- Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones a las que se llegó en este trabajo de título.

Se diseñó y construyó un robot inspirado en las características biológicas de las aves. Este robot no fue capaz de volar de manera estable.

Se construyeron alas de un esqueleto de fibra de carbono cubierto de polietileno de alta densidad. Estas alas son capaces de generar 7,72 gramos de sustentación y 16,39 gramos de empuje.

Se analizó en qué manera los parámetros de torsión y flexión de las alas afectan en la capacidad que tienen estas de generar sustentación y empuje. La torsión genera una mayor fuerza de empuje del ala, mientras que la flexión del ala al momento de desplazarse hacia arriba genera un aumento en la sustentación.

Se construyó un fuselaje de 17,7 gramos que es capaz de soportar las cargas generadas tanto por el motor como por las alas, además de resistir impactos producto de fallas en el vuelo.

Se construyó un sistema motriz capaz de transformar el movimiento rotatorio del motor en un movimiento lineal a las alas.

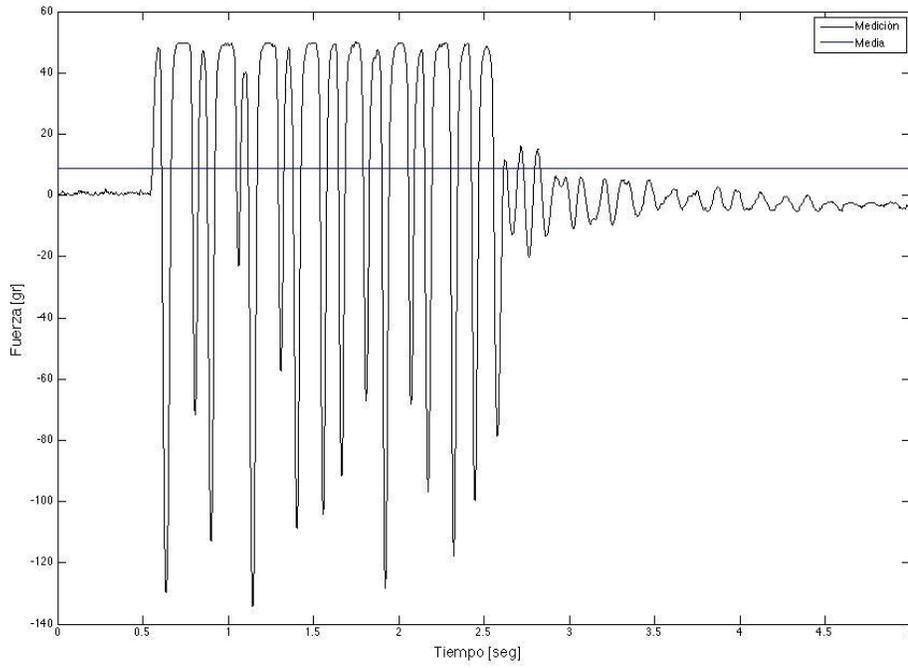
El proceso de fabricación 3D resultó ser una buena herramienta para la fabricación y optimización del MAV. La rapidez en la fabricación de los componentes permite construir distintos prototipos sin la demora de tiempo que se tiene con los procesos de manufactura tradicionales.

Se recomienda para futuros diseños buscar componentes eléctricos más eficientes y de menor peso que permitan minimizar el tamaño del MAV. También se recomienda ahondar en el estudio de la aerodinámica de las alas de manera de llegar a un diseño que sea capaz de generar una mayor cantidad de empuje para desplazar al MAV

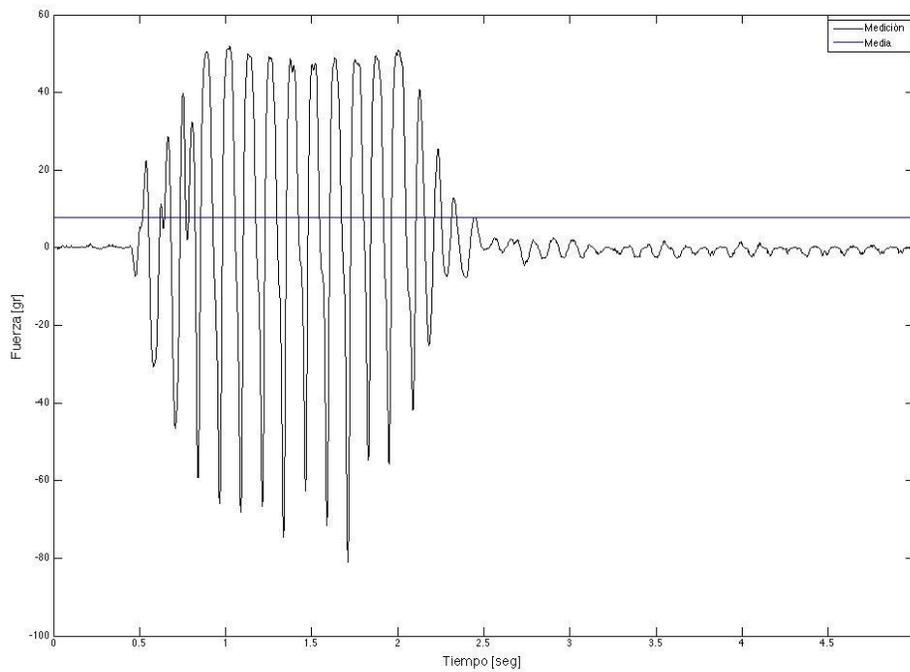
## Bibliografía

- 1.-D. Floreano, "***Flying Insects and Robots***", 1ra Edición, Springer Berlin Heidelberg(2009)
- 2.- G.C.H.E. de Croon, K.M.E. de Clerq, R. Ruijsink, B. Remes, C. de Wagter, "***Design, Aerodynamics, and Vision-Based Control of the DelFly***", The International Journal of Micro Air Vehicles, Volume 1, Number 2, pp. 71 - 97.(2009)
- 3.- T. N. Pornsin-Sirirak, Y. C. Tai, C. H. Ho, M.Keenon, , "***Microbat-A Palm-Sized Electrically Powered Omithopter***", NASA/JPL Trabajo enBiomorphic Robotics, Pasadena, CA.(2001)
- 4.-J.W. Gerdes, "***Design, Analysis, and Testing of a Flapping Wing Miniature Air Vehicle***", Tesis de grado Maestro en Ciencia, Universidad de Maryland.(2010)
- 5.-F. V.Breugel, Z. E. Teoh, H.Lipson, "***Demonstration of a Passively Stable, Untethered Flapping-Hovering Micro-Air Vehicle***", IEEE Robotics & Automation Magazine, pp. 68-74. (2009)
- 6.-A. Yilmaz, "***Design and Development of a Flapping Wing Micro Air Vehicle***", Tesis maestro Escuela Politécnica Federal de Zúrich.(2010)
- 7.- <http://www.wowwee.com/en/products/toys/flight/flytech>
- 8.-[http://www.festo.com/cms/en\\_corp/11369.htm](http://www.festo.com/cms/en_corp/11369.htm)
- 9.- 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)
- 10.-C. E. Svanberg, "***Biomimetic Micro Air Vehicle Testing Development and Small Scale Flapping Wing Analysis***", Tesis Instituto de Tecnología de la Fuerza Aerea de EEUU.(2003)
- 11.-[http://robotics.umd.edu/research/projects/Gupta\\_MAV.php](http://robotics.umd.edu/research/projects/Gupta_MAV.php)
- 12.-[www.123abctoys.com/I-Fly.htm](http://www.123abctoys.com/I-Fly.htm)
- 13.-<http://www.flyingtoys.com/reviews/ModelflyerDecembr08.pdf>
- 14.- S. Wei, L. Yongsheng, T. Jian, V. Dragos, L. Hao, "***Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers***", 1ra Edición, Cambridge University Press (2008)
- 15.- G. K. Taylor, R. L. Nudds, A. L. R. Thomas, "***Flying and Swimming Animals Cruise at a Strouhal Number Tuned for High Power Efficiency***" Nature 425, pp. 707-711 (2003)
- 16.- R. J. Wood, "***The First Takeoff of a Biologically Inspired at Scale Robotic Insect***" IEEE Transactions on Robotics, pp. 341-347 (2008)
- 17.- M. A. Malik, F. Ahmad, "***Effect of Different Design Parameters on Lift, Thrust, and Drag of an Ornithopter***" Proceedings of the World Congress on Engineering, (2010)

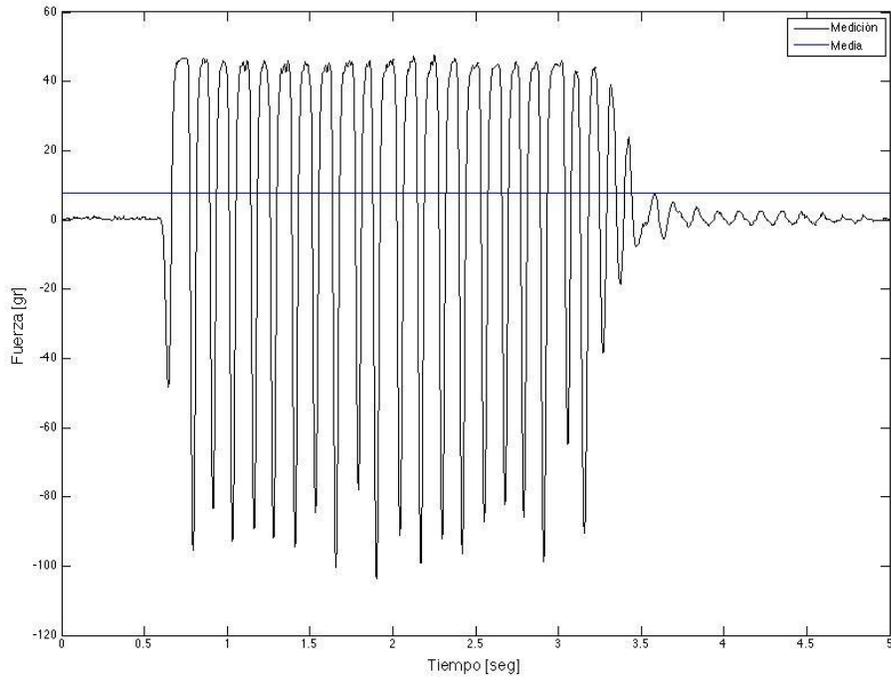
# Anexos



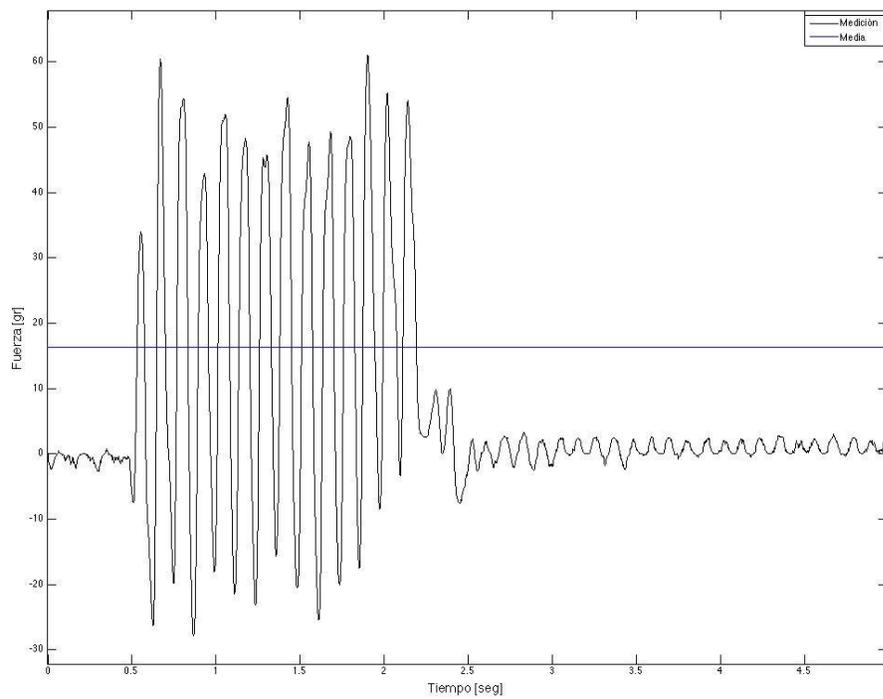
**Figura A1.- Sustentación vs Tiempo para perfil 11**



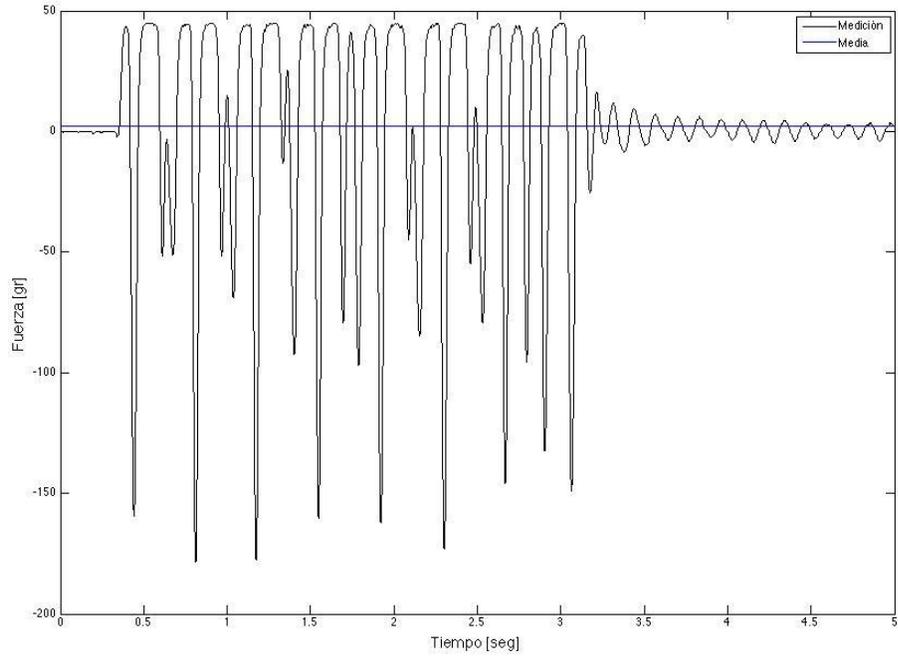
**Figura A2.- Empuje vs Tiempo para perfil 11**



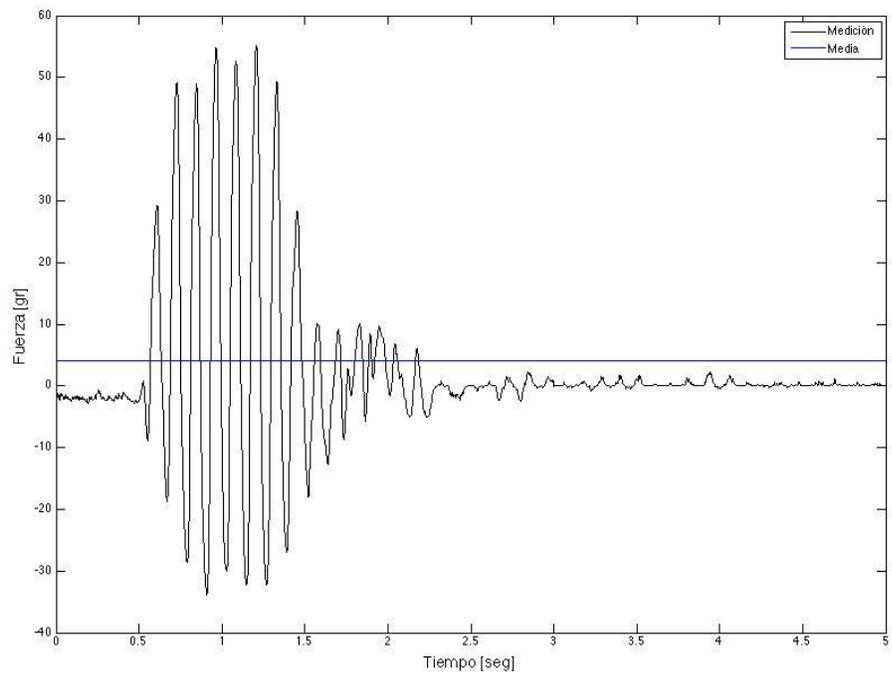
**Figura A3.- Sustentación vs Tiempo para perfil 12**



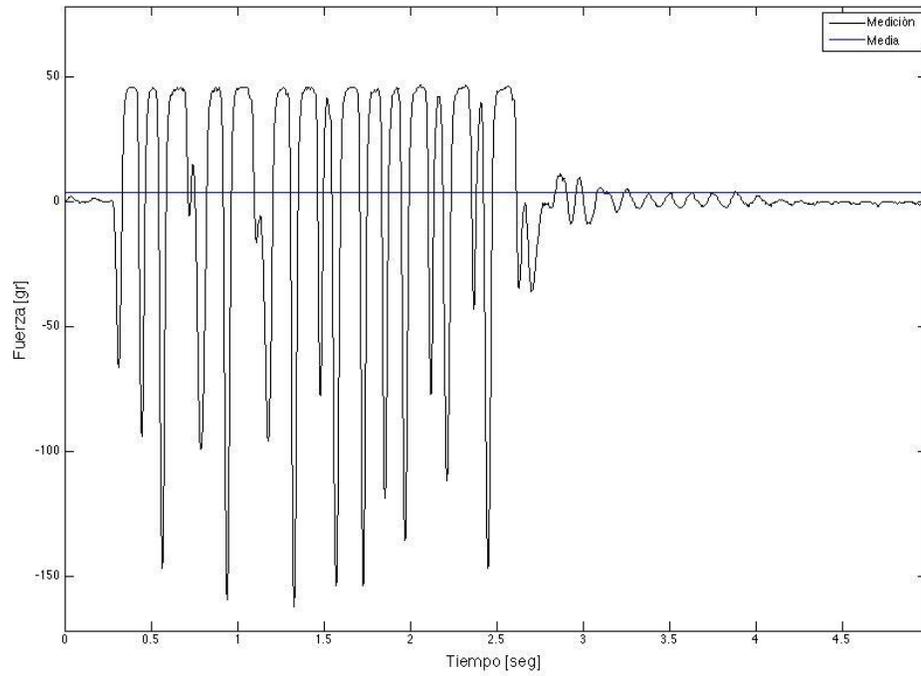
**Figura A4.- Empuje vs Tiempo para perfil 12**



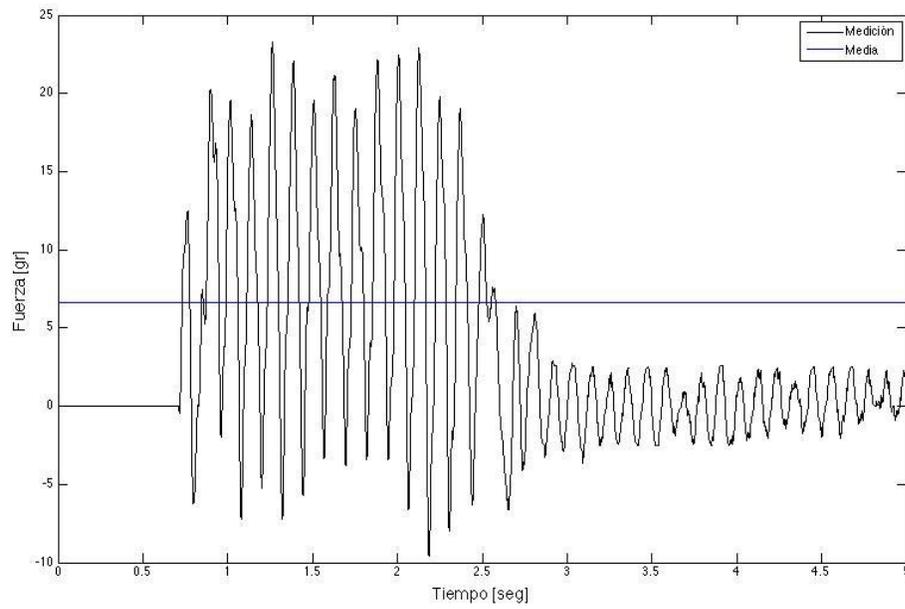
**Figura A5.- Sustentación vs Tiempo para perfil 13**



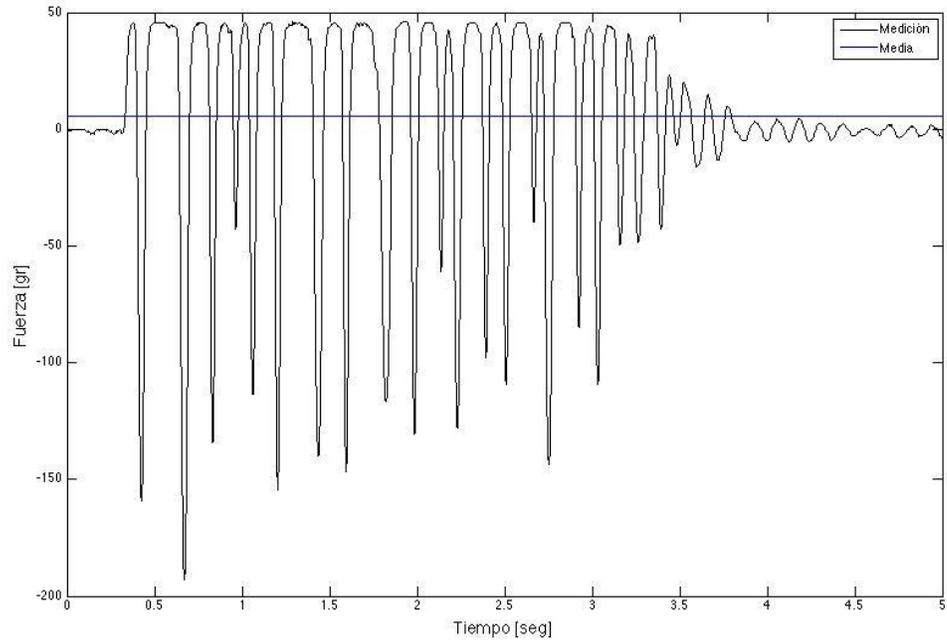
**Figura A6.- Empuje vs Tiempo para perfil 13**



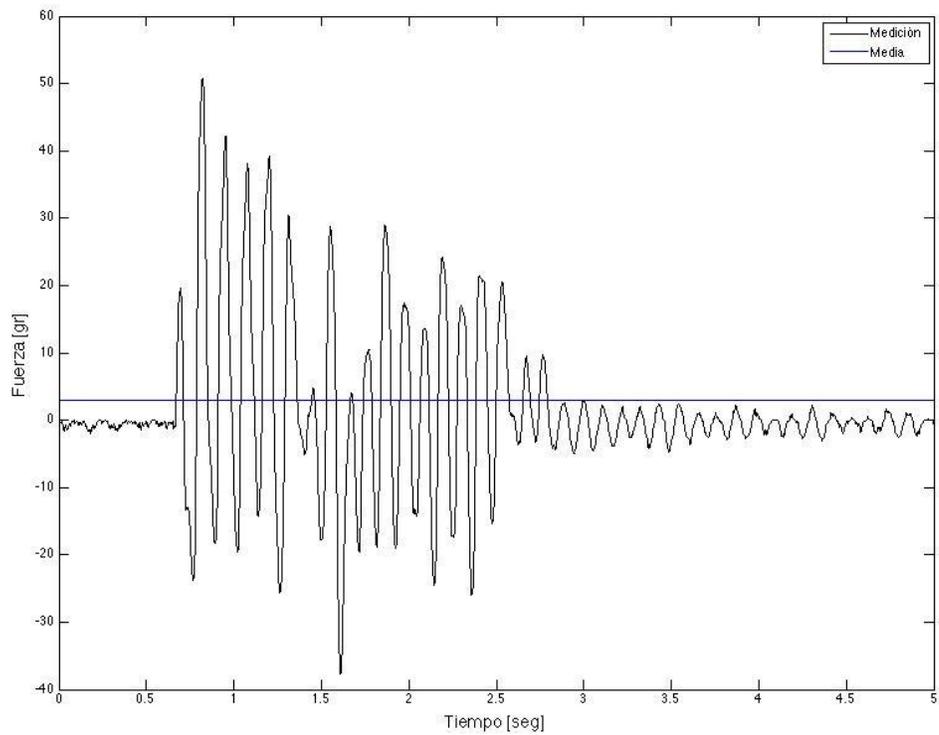
**Figura A7.- Sustentación vs Tiempo para perfil 21**



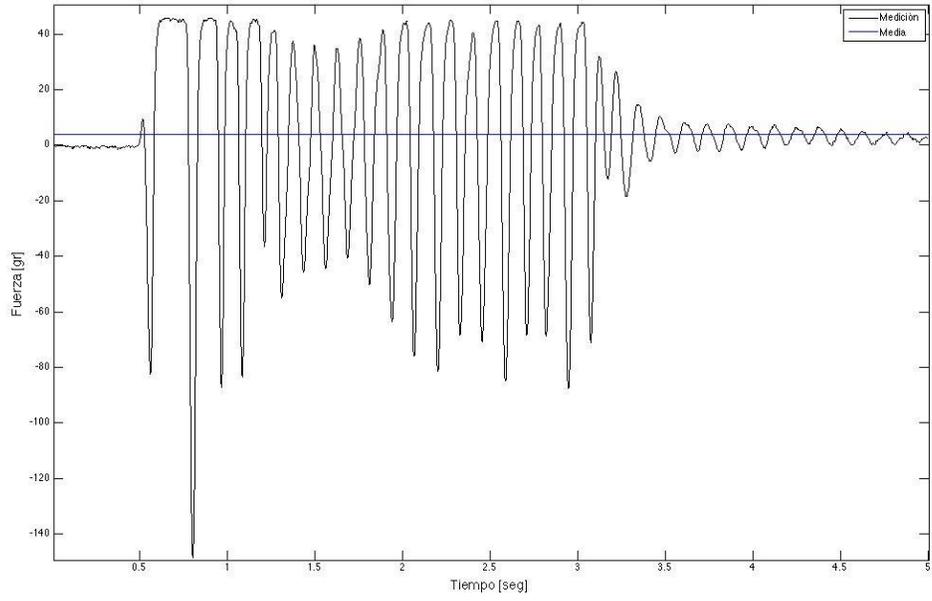
**Figura A8.- Empuje vs Tiempo para perfil 21**



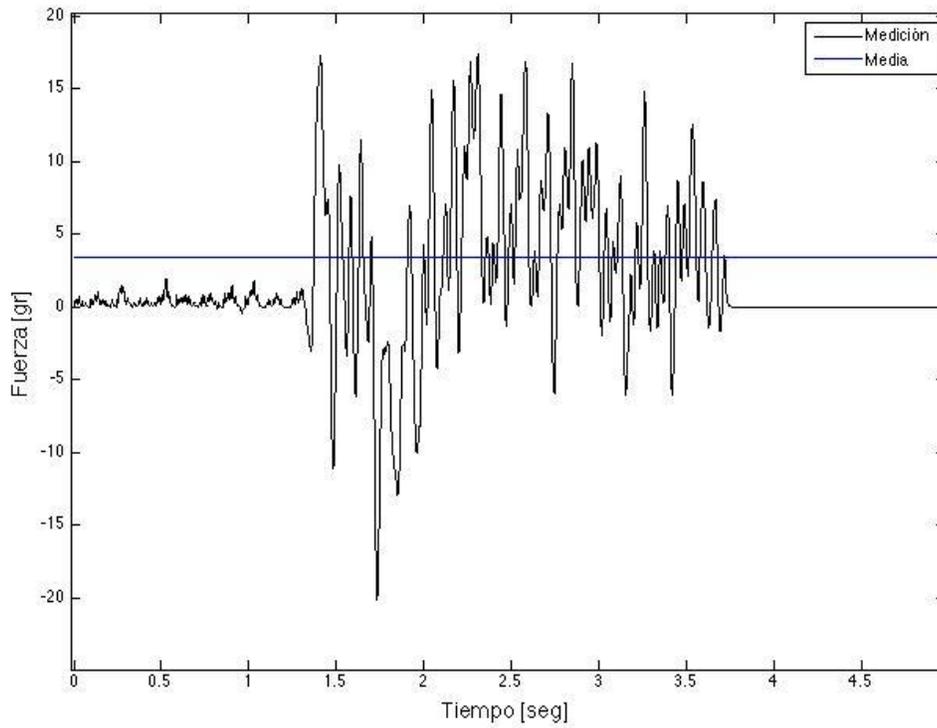
**Figura A9.- Sustentación vs Tiempo para perfil 22**



**Figura A10.- Empuje vs Tiempo para perfil 22**



**Figura A11.- Sustentación vs Tiempo para perfil 23**



**Figura A12.- Empuje vs Tiempo para perfil 23**