

PROJETO, DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ROBÔ VOADOR DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA

Micael Tiago Leite Vieira



Departamento de Engenharia Mecânica

Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Especialização em Construções Mecânicas

2015

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Mecânica

Candidato: Micael Tiago Leite Vieira, Nº 1081510, 1081510@isep.ipp.pt

Orientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, mss@isep.ipp.pt

Orientação científica: Fernando José Ferreira, fjf@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Mecânica

Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Especialização em Construções Mecânicas

2015

Agradecimentos

Queria agradecer ao engenheiro João Paulo Batista, que me orientou na fase de programação do controlador e ajudou-me muito na parte eletrónica, aos engenheiros Arnaldo Pinto e Raúl Campilho pela ajuda na seleção de adesivos úteis para a colagem de certos componentes e à minha namorada por me aconselhar à troca de tema de tese, pois foi a melhor opção que fiz. Em último, mas mais importante, um especial agradecimento aos engenheiros Manuel Silva e Fernando Ferreira pela orientação e por me terem apoiado nos momentos mais difíceis da dissertação.

Resumo

Este trabalho consiste no projeto, desenvolvimento e implementação de uma máquina voadora de inspiração biológica. Para a sua construção, é elaborado um estudo do voo nos seres biológicos de forma a obter alguma informação para o seu dimensionamento e é elaborada uma análise de projetos que utilizem as mesmas características de voo. Com os dados recolhidos neste estudo, é elaborado o projeto da máquina. Numa última fase, com recurso a materiais leves, é implementada uma máquina capaz de exercer as forças envolvidas no voo, força de propulsão e força de sustentação, e são elaborados estudos a fim de perceber quais os pontos fortes e os pontos fracos da mesma.

Palavras-Chave

Ornitóptero, Robô, Robô biologicamente inspirado, Aves, Voo.

Abstract

This work consists on the design, development, and implementation of bio-inspired flying machine. For its construction is studied the flight developed by biological beings in order to get some information for its sizing and is elaborated an analysis of the projects that uses the same flight characteristics. Using the data collected in this study, it is performed the design of the machine. In a final stage, using lightweight materials, is implemented a machine capable of developing the forces involved in flight, namely thrust and lift forces, and are performed studies to understand what are its strengths and weaknesses.

Keywords

Ornithopter, Robot, Bio-inspired robot, Birds, Flight.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
ACRÓNIMOS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS	2
1.3.ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	2
2. MECÂNICA DE VOO NOS SERES BIOLÓGICOS	5
2.1.PRINCÍPIOS BÁSICOS DE VOO NOS SERES BIOLÓGICOS	5
2.2.BIOMECÂNICA NOS SERES BIOLÓGICOS	8
2.3.FÍSICA DO VOO.....	11
2.4.AS ASAS	18
3. ESTUDO DE MÁQUINAS VOADORAS	23
3.1.BREVE HISTÓRIA DOS ORNITÓPTEROS	23
3.2.ANÁLISE DE PROJETOS REALIZADOS	25
3.3.CONCLUSÕES IMPORTANTES RETIRADAS DOS PROJETOS ANALISADOS	30
4. PROJETO DO ROBÔ DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA	33
4.1.ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO.....	33
4.2.PONTOS DE PARTIDA	34
4.3.EVOLUÇÃO DO PROJETO.....	37
4.4.VERSÃO FINAL DO PROJETO	49
5. CONSTRUÇÃO, MONTAGEM E ANÁLISE DE COMPORTAMENTO	53
5.1.CONSTRUÇÃO	53
5.2.TESTES E ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE VOO	66

6. CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	75
ANEXO A. DADOS DE ESTUDO DOS SERES VIVOS.....	79
ANEXO B. SERVOMOTORES.....	81
ANEXO C. MOTOR SEM ESCOVAS.....	83
ANEXO D. ESC.....	85
ANEXO E. ARDUINO NANO.....	87
ANEXO F. MODO DE CONTAGEM CTC.....	89
ANEXO G. DESENHOS TÉCNICOS.....	91

Índice de Figuras

Figura 1	Forças envolvidas no voo	5
Figura 2	Fluxo de ar num perfil alar [http://electron9.phys.utk.edu/balls/lift_and_drag.htm]	6
Figura 3	Forças envolvidas no batimento das asas [http://ornithopter.de/english/principle.htm]	7
Figura 4	Postura das asas durante o batimento [http://www.lilienthal-museum.de/olma/edokvo38.htm]	7
Figura 5	Vórtices de ar emergentes das pontas das asas [http://ornithopter.de/english/handbook.htm]	8
Figura 6	Músculos envolvidos na mecânica da asa [http://www.learner.org/jnorth/spring2002/species/humm/Update032802.html]	9
Figura 7	Posturas de voo intermitente em ordem à velocidade de voo [TOB07]	10
Figura 8	Movimento das asas durante a curva à esquerda [TOB07]	10
Figura 9	Comparação da linearidade para diferentes AR [http://adamone.rchomepage.com/index6.htm]	13
Figura 10	Relação entre o coeficiente de sustentação e o ângulo de ataque para vários perfis alares. [WHI98]	14
Figura 11	Número de Strouhal respetivo a um peneireiro-vulgar com uma velocidade constante de 8,1m/s [COR03]	15
Figura 12	Forças de sustentação ao longo de uma asa durante o movimento descendente [LIN07a]	16
Figura 13	Exemplo da forma da asa de uma águia [THE]	19
Figura 14	Gaiivota de marfim [http://ibc.lynxeds.com/photo/ivory-gull-pagophila-eburnea/lone-ivory-gull-point-barrow]	19
Figura 15	Forma da asa de um pardal [http://www.treklens.com/gallery/photo485094.htm]	20

Figura 16	Asas de uma andorinha [http://iow-birder.blogspot.pt/2011_07_10_archive.html]	20
Figura 17	Razão entre a frequência de batimentos observados e os esperados através de cálculo computacional [PEN01]	21
Figura 18	Ornitóptero de Lawrence Hargrave atualmente em exposição no National Air & Space Museum [ORN]	24
Figura 19	Nano Hummingbird [http://www.fromquarkstoquasars.com/the-nano-hummingbird/]	25
Figura 20	Posturas adquiridas pelas asas do <i>SmartBird</i> [FIS11]	26
Figura 21	Park Hawk [RCG02]	27
Figura 22	Cybird P1 [http://glimpho.com/ashley1988/are-we-walking-towards-an-artificial-future]	28
Figura 23	TechJect DragonFly [QUI12]	30
Figura 24	Gráfico de correlação entre a carga alar e a massa dos morcegos	35
Figura 25	Gráfico de correlação entre a frequência de batimento das asas e a massa dos morcegos	35
Figura 26	Gráfico de correlação entre frequência de batimento e a amplitude da asa	36
Figura 27	Número de Strouhal médio da amostra de morcegos estudada	36
Figura 28	Relação entre a área das asas dos morcegos e o seu comprimento	37
Figura 29	Esquema de ligações elétricas entre os componentes	40
Figura 30	Esquema da arquitetura de controlo utilizada	40
Figura 31	Desenho das asas do ornitóptero	41
Figura 32	Transmissão de força e movimento através de rótulas esféricas	42
Figura 33	Sentido de transmissão	43
Figura 34	Sistema mecânico de travamento	44
Figura 35	Definição dos servomotores com os respectivos movimentos efetuados	45
Figura 36	Sistema de servomotores de atuação da cauda do ornitóptero	46
Figura 37	Geometria do quadro principal	48

Figura 38	Determinação do centro de gravidade em relação ao comprimento da asa	49
Figura 39	Vista lateral do ornitóptero	51
Figura 40	Vista frontal do ornitóptero	51
Figura 41	Utilização da fita Dacron não adesiva	54
Figura 42	Utilização da fita Dacron adesiva	55
Figura 43	Asas interligadas	55
Figura 44	Peça de alumínio que dá entrada na bolsa central das asas	55
Figura 45	Construção da cauda	56
Figura 46	Construção do ornitóptero com recurso a peças metálicas	57
Figura 47	Zonas de colagem com recurso ao adesivo SikaForce 7752 FRW L60 (1 - raiz das hastes frontais, 2 - cauda, 3 – íman, 4 - raiz das hastes traseiras)	58
Figura 48	Detalhe construtivo do braço de travamento	58
Figura 49	Desgaste no furo roscado de uma roda Delrin	59
Figura 50	Realização de testes conforme a evolução do código	64
Figura 51	Versão final do protótipo	65
Figura 52	Vista superior do ornitóptero	65
Figura 53	Vista lateral mostrando a posição dos componentes eletrónicos	65
Figura 54	Massa do ornitóptero	66
Figura 55	Ensaio da força de propulsão	67
Figura 56	Teste de voo livre	69

Índice de Tabelas

Tabela 1 Parâmetros de referência do voo

38

Acrónimos

- AR – *Aspect Ratio*
- CNC – *Computer Numerical Control*
- CTC – *Clear Timer on Compare*
- DARPA – *Defense Advanced Research Projects Agency*
- ESC – *Electronic Speed Controller*
- GPS – *Global Positioning System*
- MAV – *Micro Air Vehicle*
- PWM – *Pulse Width Modulation*
- RC – *Radio Control*
- WL – *Wing Loading*

1. INTRODUÇÃO

Desde há muito tempo que o voo nos seres biológicos tem sido alvo de diversos estudos. Embora os princípios básicos de voo estejam bem adquiridos nos dias de hoje, as aves têm uma forma muito peculiar de voar pois não assumem uma posição estática. Através do batimento das asas, variação do ângulo de ataque ao longo da asa e as dimensões das mesmas é originada a tão desejada propulsão de voo. Este trabalho visa estudar esta dinâmica de voo e implementá-la num protótipo real.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A locomoção através do uso de pernas, barbatanas ou asas tem sido utilizada por grande parte dos seres vivos que existem. Estes meios de locomoção tornaram-se os grandes vencedores na seleção natural existente ao longo da história do planeta Terra e por isso merecem uma especial atenção.

Este projeto surgiu do desejo de implementar e desenvolver um robô voador inspirado no batimento de asas para se deslocar. Desta forma, emerge a necessidade de estudar esta forma de locomoção e procurar replicar as mecânicas utilizadas pelos seres vivos voadores.

Na atualidade existem vários projetos robóticos, concluídos ou não, que utilizam este meio de locomoção e é necessária uma análise dos mesmos de forma a ficar ao corrente do estado da arte e comparar as semelhanças que têm com os seres biológicos.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal do projeto é a construção de um robô voador de inspiração biológica. De forma a concluir este objetivo com sucesso, a execução do trabalho depende das seguintes ações:

- elaborar um levantamento dos estudos feitos acerca da mecânica e forças envolvidas no voo dos seres biológicos;
- fazer um levantamento do estado da arte na área dos robôs voadores de inspiração biológica;
- analisar os protótipos desenvolvidos a nível de arquitectura mecânica, sensores, atuadores e técnicas de construção;
- executar e desenvolver o projecto de um protótipo e efectuar o seu dimensionamento;
- Construir e testar o protótipo de robot voador.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se organizada de forma a promover uma fácil leitura de todo o processo envolvido no projeto. Numa fase inicial encontram-se os capítulos relativos ao estado da arte e informação que possa ser relevante ao projeto que é desenvolvido e documentado numa fase posterior da dissertação. Os temas abordados surgem pela seguinte ordem:

- No Capítulo 2 são apresentados alguns estudos efectuados em relação ao voo dos seres biológicos incluindo subtemas como a mecânica e princípios básicos de voo.
- No Capítulo 3 são enunciados alguns projetos concluídos na área dos robôs voadores de inspiração biológica.
- O Capítulo 4 é referente à evolução do projecto e engloba tanto as especificações de projecto como a sua versão final.

- O Capítulo 5 diz respeito à implementação e construção do protótipo e são feitos testes para análise do seu comportamento.
- No Capítulo 6 são reunidas as principais conclusões inerentes ao projecto bem como as perspectivas para futuros desenvolvimentos.

2. MECÂNICA DE VOO NOS SERES BIOLÓGICOS

2.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE VOO NOS SERES BIOLÓGICOS

Do ponto de vista físico, existem quatro forças responsáveis pelo voo de uma ave/aeronave, como se pode ver na Figura 1. O peso próprio é a força desenvolvida sobre a massa por ação da gravidade. A componente vertical da força de sustentação é responsável por contrariar a força do peso próprio. A força de propulsão é contrária à força de resistência ao ar, muitas vezes também chamada de força de “arrasto”, e, consoante a aceleração pretendida pela ave/aeronave, uma pode ser maior ou menor que a outra.

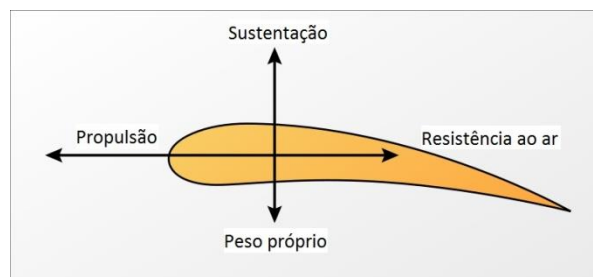


Figura 1 Forças envolvidas no voo

Durante o batimento, uma asa adquire diferentes formas, movimentos e inclinações. Durante este movimento a velocidade (intensidade e direcção) é constantemente alterada, resultando que durante um ciclo de batimento são assumidas diferentes velocidades e ângulos de ataque. Assim, durante o ciclo, a força de sustentação está constantemente a mudar de direcção e intensidade [BEN1]. Os fluxos de ar que são desviados surgem com uma força que é dada pela 2ª Lei de Newton e cuja aceleração será dada pela derivada da velocidade em ordem ao tempo. O valor da velocidade do ar, neste caso, deve ser exprimido tanto em intensidade como em direcção. De acordo com a 3ª Lei de Newton, quando um corpo exerce uma força num segundo corpo, este segundo corpo exerce uma força igual em intensidade mas oposta no sentido. Desta forma é possível prever que uma asa que esteja a receber grande parte do fluxo de ar na parte de baixo reflete o ar para uma direcção verticalmente negativa, como é mostrado na Figura 2. Esta mudança de direcção do ar proporciona à asa obter uma força igual em intensidade mas com uma direcção oposta (se o ar for desviado para baixo, a asa é desviada para cima).

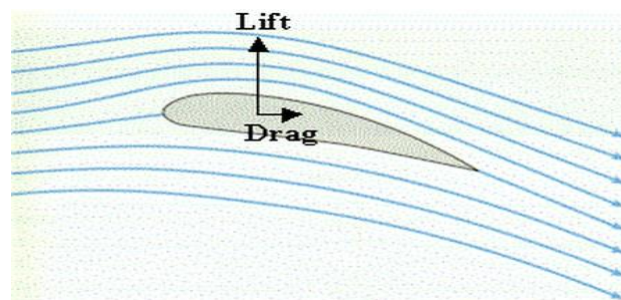


Figura 2 Fluxo de ar num perfil alar [http://electron9.phys.utk.edu/balls/lift_and_drag.htm]

O estudo das forças de propulsão e sustentação proporcionadas pelo batimento das asas é um desafio que tem sido alvo de vários melhoramentos ao longo do último século. Enquanto num avião as forças de propulsão são originadas pelos motores nele instalados, no caso das aves, o batimento das asas é responsável pela força de propulsão. A Figura 3 representa como esta propulsão é originada explicando que os diferentes ângulos de ataque usados pelas asas das aves no movimento ascendente e descendente originam a propulsão necessária ao voo. Estes ângulos de ataque dizem respeito à inclinação que a asa adquire em relação à direcção do ar (que é normalmente horizontal) e, no caso das aves, são provocados por adaptação da asa que, por mover em torno do membro frontal que a guia, traz o resto da membrana da asa por arrasto (Figura 4).

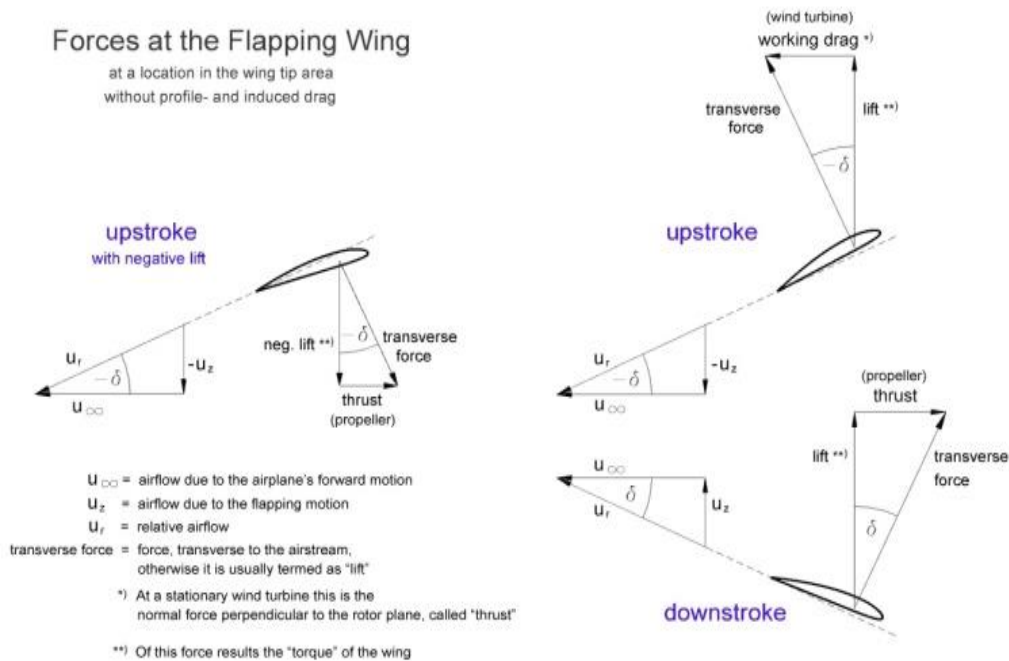


Figura 3 Forças envolvidas no batimento das asas [<http://ornithopter.de/english/principle.htm>]

A inclinação positiva durante a ascensão da asa permite que as forças de sustentação negativas se localizem maioritariamente na ponta da asa (lado esquerdo da Figura 3). A uma dada velocidade, no dado movimento, na raiz da asa é exercida uma sustentação positiva (lado direito superior da Figura 3) permitindo concluir que a sustentação decresce desde a raiz da asa até à ponta da asa. Embora na ponta da asa seja gerada uma sustentação negativa, a sua inclinação origina propulsão. Durante o movimento descendente da asa (lado direito inferior da Figura 3) existe uma sustentação maior na ponta da asa e menor na raiz e devido à inclinação que a ponta efectua, também é originada a propulsão [LIN07a].

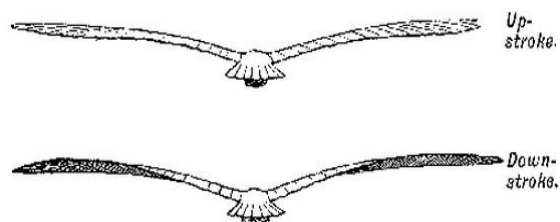


Figura 4 Postura das asas durante o batimento [<http://www.lilienthal-museum.de/olma/edokvo38.htm>]

Com o bater das asas, surgem vórtices de ar nas pontas das mesmas. Quanto maior for este vórtice maior a energia perdida no seio do ar e, desta forma, estes devem ser o menor possível. Durante o processo de batimento das asas, estes fluxos de ar são muito utilizados durante as migrações e ajudam as aves a obter certas inclinações na ponta das asas quando alinham esta ponta com o vórtice deixado pela ave que lhe precede. O fator mais importante deste fenómeno é criar o movimento ondulatório que vai desde a raiz até à ponta da asa. Desta forma é possível criar o ângulo desejado na ponta das asas numa forma natural. Quanto maior for o vórtice deixado pela ave líder, menor será o esforço exercido por uma segunda ave para obter os ângulos necessários à propulsão. Com base neste fenómeno, durante as migrações, as aves alinham as pontas das asas desenhando a tão conhecida forma em V do bando de forma a proporcionar grandes propulsões por um menor custo energético [AND03]. Na Figura 5 é mostrada a forma que estes vórtices adquirem.

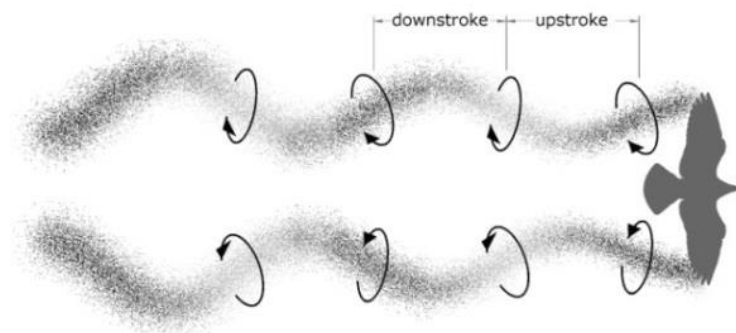


Figura 5 Vórtices de ar emergentes das pontas das asas
[<http://ornithopter.de/english/handbook.htm>]

2.2. BIOMECÂNICA NOS SERES BIOLÓGICOS

Nas aves existem dois grandes músculos responsáveis pelo movimento das asas. O maior deles é o *pectoralis* e é considerado o motor da asa devido ao seu tamanho. O segundo músculo é o *supracoracoideus*. Ambos os músculos encaixam no *humerus* e criam acelerações e desacelerações na asa durante os movimentos oscilatórios da mesma. A Figura 6 mostra como estes músculos interagem para criar os movimentos da asa.

O *pectoralis* é o grande responsável pelo movimento descendente da asa. Após uma longa extensão do músculo, este elabora uma contração de forma a trazer com ele o osso da asa. Este músculo é responsável por elaborar contrações na ordem dos 20-40% a uma velocidade de 4-10 comprimentos musculares por segundo, dependendo das espécies.

O *supracoracoideus* localiza-se no lado interno do *pectoralis* e tem acoplado um tendão que roda sobre o *Foramen Triosseum* que, por sua vez, encaixa no *humerus* pela parte de cima. Esta fisionomia dá ao músculo a responsabilidade de criar o movimento ascendente do osso da asa.

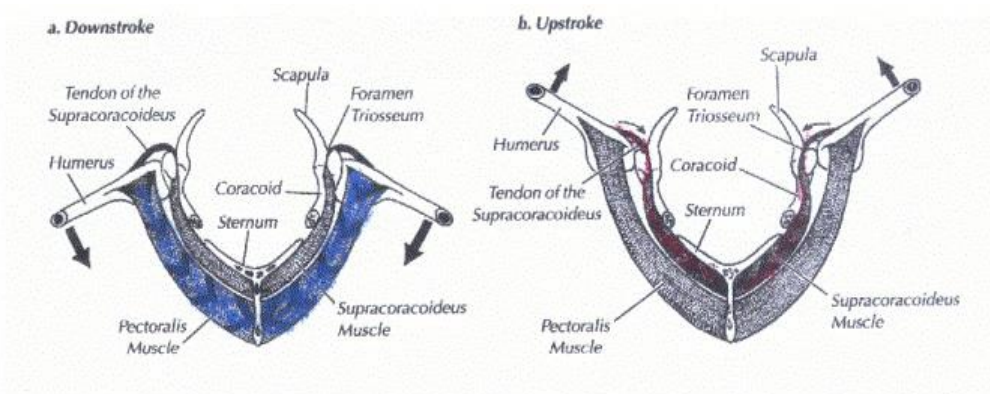


Figura 6 Músculos envolvidos na mecânica da asa

[<http://www.learner.org/jnorth/spring2002/species/humm/Update032802.html>]

Na descolagem o pássaro usa os membros traseiros para originar velocidade inicial. A partir do momento em que o animal se encontra com alguma velocidade inicial, os esforços energéticos produzidos por estes músculos peitorais são menores.

No caso de muitas espécies, o voo intermitente é uma técnica muito utilizada. Apesar desta técnica recorrer a um maior esforço energético por parte dos músculos peitorais, permite aos mesmos obter períodos de descanso. Dependente da velocidade de voo, depois das asas originarem alguma propulsão e sustentação, os pássaros podem escolher entre praticar um voo planado (com asas abertas) ou um voo limitado (com asas recolhidas). Para pássaros com peso até 300g ou com alta relação de aspeto das asas (relação entre a envergadura das asas e a sua largura) é confirmado o uso destes dois tipos de voo enquanto que nas aves de maior envergadura só é usado o voo planado. O *pectoralis* e *supracoracoideus* ficam inativos durante o voo limitado e mostram uma redução das contrações durante o voo

planado. A Figura 7 mostra como a velocidade pode influenciar nas posturas adquiridas durante a ausência de batimento das asas.

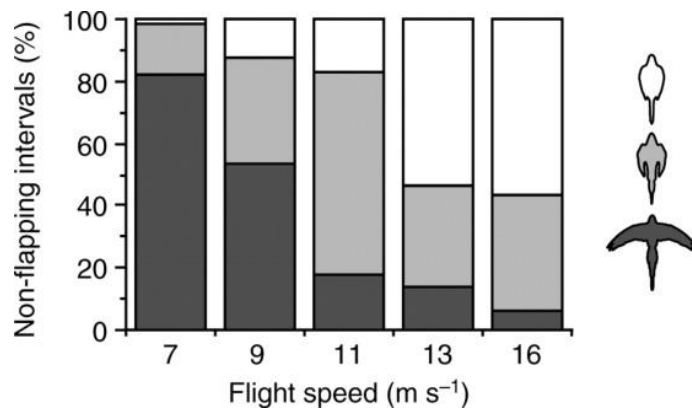


Figura 7 Posturas de voo intermitente em ordem à velocidade de voo [TOB07]

Algumas espécies, como por exemplo os pombos, praticam um movimento de rotação (*roll*) quando querem efetuar uma curva. De forma a obter este movimento, é praticada uma assimetria de forças no *pectoralis*, o que sugere que, durante o movimento descendente das asas, irá haver uma maior contração do músculo no lado para o qual a ave quer rodar. Neste caso particular (Figura 8), o pombo começa o movimento descendente das asas com uma maior velocidade na asa externa (A) e acaba com uma maior velocidade na asa interna (B).

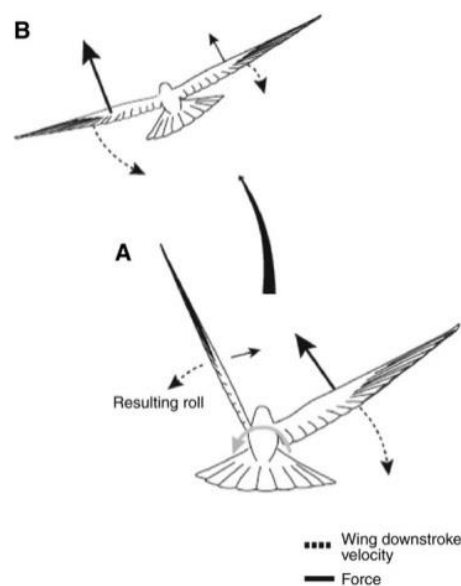


Figura 8 Movimento das asas durante a curva à esquerda [TOB07]

A cauda proporciona estabilidade de voo. Dependendo da sua morfologia e postura, esta pode proporcionar sustentação e resistência ao ar. Funciona como mecanismo de ajuda na elevação do corpo, em conjunto com as asas, e uma grande resistência ao ar provocado por uma cauda comprida pode favorecer a estabilidade horizontal.

O estudo da biomecânica das aves ainda tem um longo caminho pela frente. Existem muitas espécies por estudar e, por exemplo, devido à grande dimensão dos aparelhos de medição colocados no *pectoralis* ou no *humerus*, ainda não é possível praticar medições em aves de pequena dimensão. Contudo, à medida que o Homem desenvolve as suas tecnologias, poderão surgir novas experiências e por consequência reformular e atualizar os modelos matemáticos envolvidos no voo destas espécies [TOB07].

2.3. FÍSICA DO VOO

Pelos princípios básicos da aerodinâmica, a força de sustentação (F_L - *Lift Force*) exercida numa asa de área S_w , a uma velocidade v , é dada pela equação:

$$F_L = \frac{1}{2} \times C_L \times S_w \times \rho \times v^2 \quad (1)$$

Onde ρ é a densidade média do ar e C_L é um coeficiente de sustentação que depende do perfil alar e do ângulo de ataque (α - *Angle of Attack*). A relação de aspeto (AR - *Aspect Ratio*) da asa influencia no declive da curva traçada entre o C_L e o α . Este coeficiente normalmente toma valores máximos próximos do intervalo entre 1,5 e 1,7 correspondendo aos ângulos de ataque máximos para alguns estilos típicos de asa dos seres biológicos.

J Oliver Linton [LIN07b] explica como o coeficiente de sustentação é determinado para os seres biológicos. Neste documento, o autor indica duas componentes que interferem na força de resistência ao ar e relaciona-as com a força de sustentação para obter uma explicação, com auxílio das Leis de Newton, de como ambas estão interligadas.

As forças de resistência ao ar dividem-se nas seguintes componentes: força de resistência induzida (F_{ID} - *Induced Drag Force*) e força de resistência ao ar parasita (F_{PD} - *Parasitic Drag Force*). A força de resistência induzida é obtida pelas diferenças de pressão do ar entre a parte superior e a parte inferior da asa. Este fenómeno cria vórtices de ar

turbulentos nas extremidades das asas que, por consequência, criam resistência ao movimento. A força de resistência ao ar parasita é relacionada com vários fatores mas o mais significativo é gerado pela resistência que o ar oferece ao colidir com a área frontal do próprio avião/ave. Ambas as forças vão ter equações similares a (1) mas com as respectivas áreas e coeficientes:

$$F_{ID} = \frac{1}{2} \times C_{ID} \times S_w \times \rho \times v^2, \quad (2)$$

$$F_{PD} = \frac{1}{2} \times C_{PD} \times S_F \times \rho \times v^2. \quad (3)$$

As potências surgem da equação $P = F \times v$:

$$P_{ID} = \frac{1}{2} \times C_{ID} \times S_w \times \rho \times v^3, \quad (4)$$

$$P_{PD} = \frac{1}{2} \times C_{PD} \times S_F \times \rho \times v^3. \quad (5)$$

Pelas Leis de Newton, o autor consegue obter duas equações para a potência de resistência ao ar induzida e para a relação entre os coeficientes de sustentação e de resistência ao ar:

$$P_{ID} = \frac{M^2 \times g^2 \times (1 + 2/AR)}{2\pi \times S_w \times \rho \times v}, \quad (6)$$

$$R_{LD} = \frac{C_L}{C_{ID}} = \frac{2}{\alpha}. \quad (7)$$

Assumindo a equação (1), pode-se simplificar a igualdade entre as equações (4) e (6), obtendo assim uma relação entre os coeficientes de resistência ao ar induzido e de sustentação:

$$C_{ID} = \frac{C_L^2 \times (1 + 2/AR)}{4\pi}. \quad (8)$$

Tendo em consideração as equações (7) e (8), é obtida uma expressão para o coeficiente de sustentação:

$$C_L = \frac{2\pi \times \alpha}{(1 + 2/AR)}. \quad (9)$$

A variável AR (*Aspect Ratio*), presente nas equações (8) e (9), depende da envergadura, distância entre as pontas das asas (b), e a já referida área da asa (S_w) [BEN2]:

$$AR = \frac{b^2}{S_w}. \quad (10)$$

A variável α diz respeito ao ângulo de ataque efetuado entre a asa e o movimento. Embora este ângulo seja diretamente proporcional ao coeficiente de sustentação, a variável AR merece uma especial atenção pois afeta esta proporcionalidade como pode ser visto na Figura 9. Segundo Henderson [HEN08], as aves têm relações de aspeto com valores entre os 4,8 (para pássaros pequenos) e os 15 (para albatrozes).

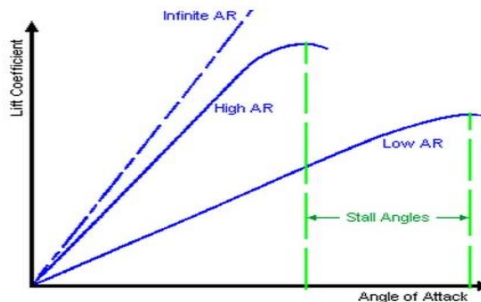


Figura 9 Comparação da linearidade para diferentes AR
[\[http://adamone.rchomepage.com/index6.htm\]](http://adamone.rchomepage.com/index6.htm)

Desta forma, verifica-se que o ângulo crítico a partir do qual a asa deixa de criar força de sustentação varia de acordo com a relação de aspeto. Na Figura 10 é demonstrada a relação entre o coeficiente de sustentação existente para vários perfis alares onde os perfis A e B são perfis simétricos. Frank White [WHI98] demonstra que neste gráfico, onde α de 0° corresponde a um C_L de 0, só se verifica em perfis alares simétricos e, no caso das aves, não existem perfis simétricos. Deve ser delineado que em grande parte dos casos das aves, os ângulos de ataque nunca devem exceder os 15° pois originam uma turbulência que impulsiona a força de resistência ao ar.

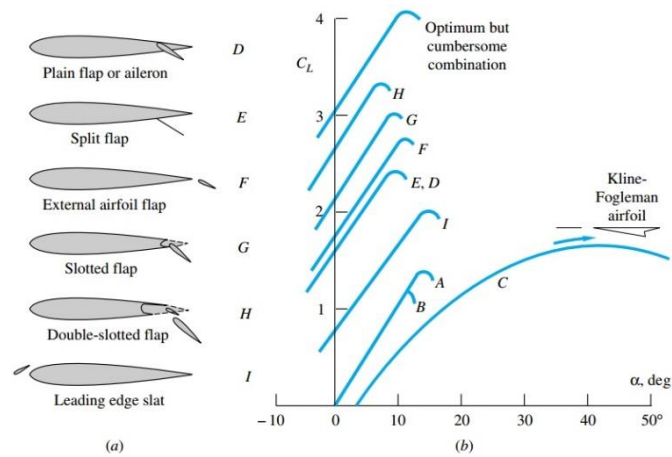


Figura 10 Relação entre o coeficiente de sustentação e o ângulo de ataque para vários perfis alares. [WHI98]

Taylor *et al* [TAY03] sugerem que para um animal voar a uma velocidade constante (*cruising flight*) é necessário que σ [Strouhal number (unidade adimensional)] esteja entre 0,2 e 0,4, sendo este dado pela equação:

$$\sigma = \frac{A_0 \times f}{v}, \quad (11)$$

Onde f representa a frequência de batimentos da asa e A_0 (Amplitude) diz respeito à distância que vai desde a ponta da asa no seu ponto mais alto até ao seu ponto mais baixo durante o ciclo de batimento. Este número adimensional encontra-se normalmente perto de 0,2 para aves a voar a uma velocidade constante enquanto os morcegos normalmente encontram-se mais próximos do limite de 0,4.

Na Figura 11 é representado como este valor é obtido para um peneireiro-vulgar que apresenta uma amplitude média de 0,339 m e uma frequência aproximada de 5,61 batimentos por segundo a uma velocidade constante de 8,1 m/s. Dados estes valores pode-se definir um único ciclo com o comprimento de 1,444 m. Segundo a expressão (11) pode-se determinar que esta ave apresenta $\sigma = 0,235$, enquanto graficamente este valor pode ser obtido pelo declive da reta que interceta a origem e o ponto em que a ave completa o ciclo ($\sigma = 0,339/1,444 = 0,235$) [COR03].

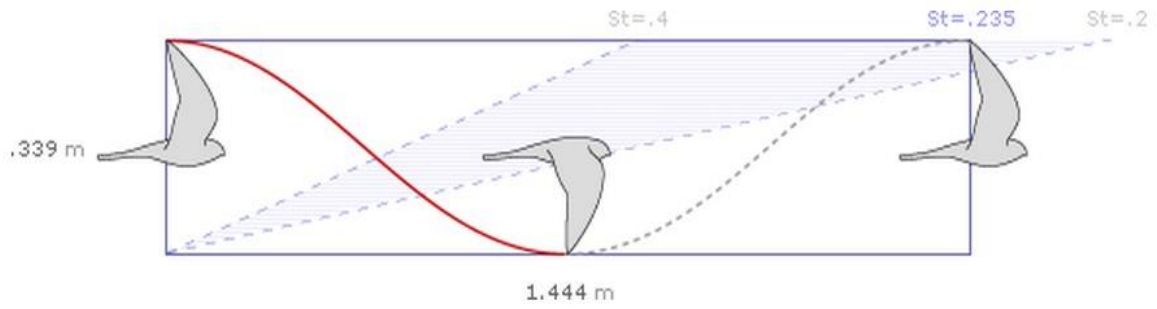


Figura 11 Número de Strouhal respectivo a um peneireiro-vulgar com uma velocidade constante de 8,1m/s [COR03]

De acordo com Linton [LIN07a], assumindo que as asas se movimentam para cima e para baixo a uma velocidade constante u (componente vertical da velocidade da asa), com um ângulo θ (ângulo do triângulo retângulo com v e u como catetos, medido em radianos), podem ser retiradas as seguintes equações:

$$u = 2 \times A_0 \times f, \quad (12)$$

$$\tan(\theta) = \frac{2 \times A_0 \times f}{v} = 2\sigma. \quad (13)$$

Se $\sigma = 0,2$, o ângulo de Strouhal será 22° . Isto indica que a ponta da asa estará a 22° relativamente ao corpo da ave durante o ponto mais alto e a -22° no ponto mais baixo. Como, no caso das aves, a asa roda em torno do ombro, é estimado que o ângulo de ataque provocado pela asa durante um movimento descendente da própria varie desde 0° junto ao início da asa até 22° na ponta da asa. A Figura 12 exemplifica as forças de sustentação ao longo de uma asa que se desloca no sentido descendente explicando que, à medida que um ponto se desloca da raiz para a ponta da asa, as forças de sustentação aumentam e inclinam-se cada vez mais para a frente. Desta forma, surge uma equação que relaciona a distância desde o início da asa, de comprimento b_0 , até uma distância r , com o ângulo de ataque que é feito nesse determinado ponto:

$$\alpha = \frac{2 \times A_0 \times f}{v} \times \frac{r}{b_0}. \quad (14)$$

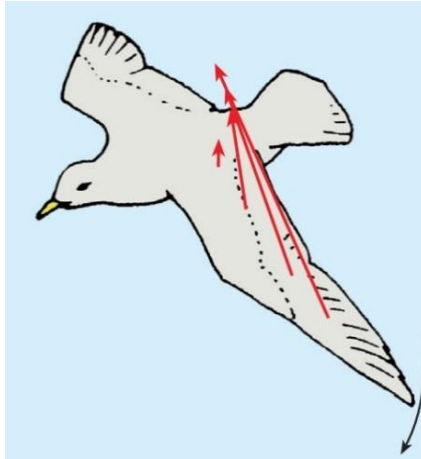


Figura 12 Forças de sustentação ao longo de uma asa durante o movimento descendente
[LIN07a]

Tomada esta situação em conta, o autor recorre a integrações, em ordem à distância r , que vão de 0 até b_0 para achar uma equação que reflete a força de propulsão (F_T) originada pela asa. Neste ponto, também convém referir que o mesmo recorre ao argumento da resultante entre a força de sustentação e de resistência ao ar para obter um ângulo inverso à relação entre os coeficientes de sustentação e resistência ao ar, ou seja, toma um valor de $\alpha/2$. Desta forma, a expressão para a força de propulsão originada é:

$$F_T = \frac{1}{3} \times \frac{2\pi}{(1 + 2 \times AR)} \times S_w \times \rho \times v^2 \times \sigma^2 . \quad (15)$$

Para a força de propulsão também é gerada uma nova expressão com base no batimento das asas. O ângulo de ataque α representa uma variação entre -22° e 22° nas extremidades da asa mas tem um valor neutro na raiz da asa. De forma a ser criada a sustentação na asa, ser-lhe-á adicionado um ângulo de incidência β (ângulo efetuado entre o corpo da ave e a direcção do ar, normalmente horizontal) que lhe dará a sustentação necessária ao voo nivelado.

$$F_L = \frac{1}{2} \times \frac{2\pi}{(1 + 2 \times AR)} \times S_w \times \rho \times v^2 \times \beta . \quad (16)$$

“É verdade que imensas quantidades de sustentação (e propulsão) são geradas no movimento descendente das asas, mas é inevitável que, no movimento ascendente, a asa curvada dum ave típica vai estagnar, e as forças geradas, tanto de propulsão e – provavelmente negativa – sustentação, vão ser muito reduzidas” [LIN07a].

Existem muitas formas de as aves diminuírem a força negativa de sustentação, que é obtida quando a asa faz um movimento ascendente. Entre elas, Linton [LIN07a] refere ter observado corvos a usar batimentos assimétricos entre as duas asas - enquanto uma está num forte movimento descendente, a outra está a fazer o movimento ascendente. Isso obrigou-o a concluir que certamente a força provocada pelo movimento descendente é superior à força contrária provocada pelo movimento ascendente.

“...em muitos casos, nós podemos provavelmente assumir que, para um vigoroso batimento das asas, a expressão que nós derivámos funciona razoavelmente bem para o movimento descendente mas assumindo que a ave tipicamente não ganha sustentação nem propulsão durante o movimento ascendente. A propulsão média e sustentação média será então aproximadamente metade, por exemplo...” [LIN07a].

$$F_{T\text{ Médio}} = \frac{1}{6} \times \frac{2\pi}{(1 + 2 \times AR)} \times S_w \times \rho \times v^2 \times \sigma^2, \quad (17)$$

$$F_{L\text{ Médio}} = \frac{1}{4} \times \frac{2\pi}{(1 + 2 \times AR)} \times S_w \times \rho \times v^2 \times \beta. \quad (18)$$

Quando uma ave se desloca a uma velocidade constante e para de bater as asas, de forma a obter um voo planado, pode-se obter uma relação de deslizamento (R_G – *Gliding ratio*) que é obtida pela relação entre a distância percorrida verticalmente sobre a distância percorrida horizontalmente. Desta forma, deduz-se que um pássaro em voo planado que desce 1 m por cada 10 m que se desloca horizontalmente tem $R_G = 0,1$. Com este fator em conta, é

$$\Phi = \frac{A_0}{b_0} = \frac{\sigma \times v}{f \times b_0} = \sqrt{\frac{6 \times M_g \times R_G}{\frac{2\pi}{(1 + 2 \times AR)} \times S_w \times \rho \times f \times b_0}}. \quad (21)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{6 \times M_g \times R_G}{\frac{2\pi}{(1 + 2 \times AR)} \times S_w \times \rho \times v^2}}, \quad (19)$$

$$\beta = \frac{4 \times M_g}{\frac{2\pi}{(1 + 2 \times AR)} \times S_w \times \rho \times v^2}, \quad (20)$$

possível desenvolver expressões que indiquem tanto o número de Strouhal como o ângulo de incidência e o ângulo de amplitude da asa (Φ - ângulo total obtido desde a posição mais elevada até à posição inferior da asa) a partir do peso próprio da ave:

Linton [LIN07a] estimou o R_G de diversas aves, característica que não foi medida nos trabalhos consultados pelo mesmo, e, depois de utilizar a expressão (19), fez o próprio concluir que o número de Strouhal é independente da massa e que definitivamente existem muitos casos de aves em que este número assenta num intervalo entre 0,07 e 0,18 (abaixo do intervalo de 0,2 a 0,4). Em contrapartida, o autor considera que os valores para o ângulo de amplitude através da expressão (21) são plausíveis e dependem em grande parte dos casos da massa, com apenas os pombos, corvos e melros a terem que se esforçar mais do que a média.

2.4. ASASAS

As asas merecem uma atenção especial por causa da responsabilidade que têm neste meio de locomoção. Nos seres biológicos, esta zona abrange muitos fenómenos e correlações que explicam como diversos tipos de asas promovem o sucesso do respetivo ser voador. Nas seguintes subsecções são apresentados, de uma forma sintetizada, alguns estudos feitos até ao momento sobre este tópico.

2.4.1. CARGA ALAR

A carga alar (WL – *Wing Loading*) é o cociente entre o peso do ser biológico (m) e a área das asas, em vista em vista superior (vertical), e indica o carregamento que está a ser feito, por unidade de área, durante o voo [STE97]:

$$WL = \frac{m}{S_w}. \quad (22)$$

Os valores de WL têm sido alvo de debate ao longo da história da aviação, pois são dependentes das aplicações em vista. Por exemplo, se um avião (A) tem uma carga alar inferior a um avião (B), isto indica que (A) obtêm uma menor velocidade máxima mas consegue descolar e aterrar numa menor distância, efetuar manobras e elevações com maior facilidade, entre outros aspetos. Isto explica porque um Boeing 747 (WL grande) tende a ter dificuldades de manuseamento e sustentação mas atinge valores de velocidade enormes em relação a uma ave (WL pequeno).

Segundo a *Sciencelearning* [SCI11], a carga alar nas aves assume normalmente valores entre 1 e 20 kgf/m² e o valor máximo admissível, antes da ave ser demasiado pesada para a respetiva área das asas, é de cerca de 25 kgf/m².

2.4.2. FORMA DA ASA

De acordo com o *The Cornell Lab of Ornithology* [THE], existem quatro tipos de configuração nas asas dos seres biológicos:

- asas de ascensão passiva: conhecidas por possuírem penas primárias, situadas na extremidade da asa, espalhadas para fora da asa e abertas de forma a apanharem as colunas de ar quente verticais que ajudam o ser vivo a elevar-se no ar. Os exemplos mais comuns de animais que utilizam esta forma de asa são as cegonhas, falcões e águias (Figura 13);



Figura 13 Exemplo da forma da asa de uma águia [THE]

- asas de ascensão ativa: são asas que têm um grande comprimento e são estreitas (grande relação de aspecto), o que permite à ave aproveitar melhor as correntes de ar e conseguem planar durante muito tempo. Albatrozes e gaivotas (Figura 14) são bons exemplos de animais com este tipo de asa;



Figura 14 Gaivota de marfim [<http://ibc.lynxeds.com/photo/ivory-gull-pagophila-eburnea/lone-ivory-gull-point-barrow>]

- asas elíticas: são muito úteis para as aves obterem pequenos intervalos de alta velocidade com facilidade mas não conseguem mantê-la. Segundo a ACS Distance Education [ACS], esta forma de asa promove melhor controlo de voo e manuseamento e a sua frequência de batimento é normalmente rápida. Esta forma de asa é pequena e arredondada e pode ser encontrada em morcegos, pardais (Figura 15), corvos e melros;



Figura 15 Forma da asa de um pardal [<http://www.treklens.com/gallery/photo485094.htm>]

- asas de alta velocidade: estas asas são longas e finas mas não chegam a ser tão longas quanto as asas de ascensão ativa. Os seres vivos que têm esta forma de asa são aves muito velozes e que conseguem manter uma velocidade elevada, ao contrário dos seres com asas elíticas. As andorinhas (Figura 16), patos e aves marinhas são bons exemplos de seres que recorrem a este tipo de asa.



Figura 16 Asas de uma andorinha [http://iow-birder.blogspot.pt/2011_07_10_archive.html]

2.4.3. FREQUÊNCIA DE BATIMENTO E AMPLITUDE NAS ASAS

Pennycuick desenvolveu um *software* de voo denominado “Flight.bas” para calcular certos parâmetros de voo nos seres biológicos. Tendo em conta as medidas das asas S_w e b , o peso da ave m , e a densidade do ar ρ , é possível calcular a frequência de batimento das asas no programa através da seguinte expressão [PEN96]:

$$f_{REF} = m^{3/8} \times g^{1/2} \times b^{-23/24} \times S_w^{-1/3} \times \rho^{-3/8}. \quad (23)$$

De forma a perceber se os resultados do seu *software* coincidiam com valores reais, Pennycuick [PEN01] realizou medições num determinado grupo de aves, com auxílio de uma câmara Panasonic NV-S7B, para a determinação do número de batimentos das asas por segundo. Determinada a razão entre o ρ do ar à altura do mar e o ρ do ar à altitude de voo, o autor utilizou todos os meios ao seu dispor para os resultados esperados serem determinados com a maior exatidão possível pela sua aplicação computacional. Na Figura 17 é mostrado como estes valores oscilaram.

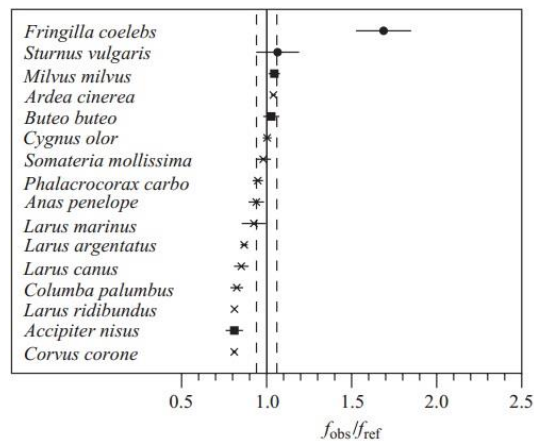


Figura 17 Razão entre a frequência de batimentos observados e os esperados através de cálculo computacional [PEN01]

Um aspeto importante a reter destes resultados é o facto das duas primeiras espécies (*Fringilla coelebs* e *Sturnus vulgaris*) serem aves de massa relativamente pequena, que utilizam várias posturas de voo consoante a velocidade instantânea. Neste caso, estas espécies utilizam um forte batimento de asas para gerar propulsão e sustentação e, quando atingem a velocidade desejada, recolhem as asas (voo limitado) até perceberem que devem batê-las novamente. O autor refere que no caso da espécie *Fringilla coelebs*, tem de ser

exercida uma força de 2,9 g (2,9 vezes a força da gravidade) para retomar a velocidade desejada durante o batimento das asas. Isto sugere, por exemplo, que a ave tem de bater as asas 1,7 vezes mais que o previsto.

Bullen e McKenzie [BUL02] explicam que, nos morcegos, as frequências de batimento variam de forma diferente às previamente calculadas por Pennycuick [PEN96]. Desta forma, estes autores determinaram um novo coeficiente para acrescentar à equação da frequência de batimento das asas de Pennycuick, no caso do morcego:

$$f_{Morcego} = 1,498 \times f_{REF} . \quad (24)$$

Contudo, esta equação obtém uma correlação de 0,775 e os autores conseguem achar maiores correlações ao longo do artigo, quando relacionam a frequência de batimento das asas dos morcegos com a massa m num determinado intervalo para a velocidade V do ar de ensaio:

$$f_{w1} = 3,65 - 3,312 \times \log_{10}(m) , \text{ quando } V < 6 \text{ m/s} , \quad (25)$$

$$f_{w2} = 2,4 - 3,444 \times \log_{10}(m) , \text{ quando } V > 6 \text{ m/s} , \quad (26)$$

$$f_w = 5,54 - 3,068 \times \log_{10}(m) - 2,857 \times \log_{10}(V) . \quad (27)$$

A correlação de f_{w1} é de 0,875 e para f_{w2} a correlação é de 0,905. De forma a englobar todas as espécies do estudo, f_w é dada com uma correlação de 0,748.

No mesmo artigo, é determinada uma expressão para prever o ângulo de amplitude, em graus, em função de V e da área das asas S_w com uma correlação de 0,417 [BUL02]:

$$\phi = 56,92 + 5,18V + 16,06 \log_{10}(S_w) . \quad (28)$$

Nos dias de hoje, os ângulos de amplitude são muito difíceis de serem obtidos experimentalmente, pois os seres biológicos adequam, tanto a frequência, como a amplitude, às várias velocidades que lhe são impostas, como é explicado por Taylor *et al* [TAY03]. No entanto, o artigo elaborado por Bullen e McKenzie [BUL02], sobre as amplitudes e frequências de batimento nos morcegos, apresenta um extenso número de medições que ajudam o leitor a tirar as suas próprias conclusões.

3. ESTUDO DE MÁQUINAS VOADORAS

3.1. BREVE HISTÓRIA DOS ORNITÓPTEROS

Embora tenham havido pessoas interessadas no estudo do voo das aves, o registo de ornitópteros não foi muito bem preservado devido à falta de publicidade, ou até por sequestros deliberados aos trabalhos. Era um tópico que, aos olhos da aviação, não era recebido de braços abertos e, embora haja indícios de haver estudos na matéria desde há muito tempo, os primeiros registos de projetos de sucesso datam da segunda metade do século XIX [ORN].

O pioneiro de todos os projetos de ornitópteros foi Leonardo Da Vinci que, por volta de 1490, concebeu um estudo engenhoso e metódico que se sustentava na motorização humana. Embora não tenha tido sucesso no objetivo, ele já demonstrava algum conhecimento sobre o assunto. Muitas das conclusões a que ele chegou, como por exemplo não ser necessário utilizar penas na membrana da asa, ainda são utilizadas nos dias de hoje.

O primeiro registo acerca de um ornitóptero que tenha desempenhado o objetivo com sucesso remonta ao ano de 1874, em França. Visto que a única opção de voo entendida até à altura era com o balão de ar quente, os ornitópteros começaram a pavimentar o caminho

para o ser humano arranjar formas mais eficazes de voo. De forma a originar o binário necessário ao batimento das asas, era usada uma borracha torcida até certo ponto, e cujo retorno elástico originava energia por um tempo definido.

Em 1890, Lawrence Hargrave mostrou pela primeira vez ornitópteros a voar com auxílio de vapor de água e ar comprimido. Este projeto (Figura 18) era constituído por uma asa fixa na traseira que suportava um maior peso e eliminava a necessidade de redução na engrenagem. Este seria o primeiro de muitos ornitópteros projetados para recorrer à motorização por combustão interna. Entre eles surgiram modelos movidos com motores a gasolina de 4 cc e motores de quatro cilindros com refrigeração de ar. Nesta fase também foi lançado um brinquedo chamado “Wham-O Bird” que serviu para introduzir as crianças aos sistemas de batimento de asas mecanizado. [ORN]



Figura 18 Ornitóptero de Lawrence Hargrave atualmente em exposição no National Air & Space Museum [ORN]

Alexander Lippisch, em 1929, produziu o primeiro ornitóptero com recurso à motorização humana. Este ornitóptero era único pois conseguia executar voos planados. Aliados à construção, o projetista também publicou artigos a explicar a teoria do batimento das asas. Durante a década de 1930, Alexander Lippisch liderou uma equipa de estudantes de aviação realizando grandes ornitópteros baseados tanto no comportamento elástico de bandas de borracha como de combustão interna (por exemplo, o já referido motor de quatro cilindros com refrigeração de ar). [ORN]

À medida que os projetos iam sendo otimizados, a implementação de motores elétricos tornou-se uma necessidade para os modelos de teste e, por simplicidade, adquiriram favoritismo na área da motorização dos ornitópteros de pequena dimensão. Com a crescente globalização da eletrónica, e uma pequena ajuda dos controlos por rádio (Radio Controlo – RC), este fator tornou-se numa justificação para a comercialização em massa de modelos como o “Cybird” ou “Sean Kikade’s Park Hawk” na década de 1990.

Por volta da década de 1970, surgiram os *Micro Air Vehicles* (MAV) da necessidade das forças militares dos Estados Unidos da América realizarem operações de espionagem. Equipados com uma pequena máquina fotográfica ou um microfone, estes ornitópteros tinham o intuito de se fazerem parecer com um simples inseto ou um pequeno pássaro e realizar o trabalho de infiltração. Contudo, os registos indicam que as técnicas de pairar no ar e voar em frente, ou até a transição entre as duas, usadas pelos MAV, só foram alcançadas nos anos de 2000 a 2010. Em 2007, Nathan Chronister desenvolveu um ornitóptero com o mesmo peso e o tamanho de um beija-flor capaz de realizar várias manobras acrobáticas. Em 2010, surgiu o Nano Hummingbird (Figura 19) que revolucionou o estudo científico da área com o seu voo giroscopicamente estabilizado. [ORN]

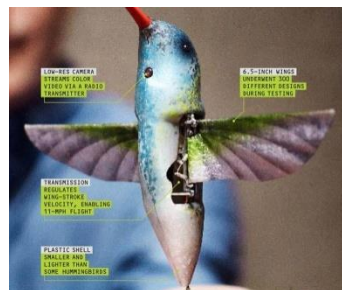


Figura 19 Nano Hummingbird [<http://www.fromquarkstoquasars.com/the-nano-hummingbird/>]

3.2. ANÁLISE DE PROJETOS REALIZADOS

Existem diversos projetos na área dos ornitópteros mas grande parte deles só foram implementados com sucesso após várias tentativas falhadas. O conhecimento da dinâmica de voo ainda se encontra muito limitado e abrange mais o espaço das aves de grande porte. Contudo, os micro veículos aéreos têm surgido nos últimos anos e têm estendido os limites dos conhecimentos do voo estabilizado biologicamente inspirado. Por norma, os criadores destes projetos disponibilizam a informação relevante ao consumidor mas a nível de projeto e dimensionamento é necessário recorrer a várias fontes para perceber o que têm em comum, o que as diferencia e o que as beneficia. A partir destes dados é possível retirar certos detalhes que sejam importantes para o projeto e dimensionamento da máquina.

Nesta secção são apresentados alguns projetos que foram selecionados tendo em consideração a inspiração biológica, a robótica e a mecânica de voo através do batimento das asas.

3.2.1. SMARTBIRD

O “Smartbird” é um modelo desenvolvido pela Festo, em 2011, que relaciona a aerodinâmica de voo com a agilidade de uma gaivota. Como pode ser visto na Figura 20, as suas asas, para além de se moverem para cima e para baixo, também torcem de forma a obter ângulos específicos nas pontas das mesmas. Com a ajuda de sensores que detetam a posição instantânea da asa, é ativado um servomotor na ponta da asa de forma a rodá-la para o ângulo desejado. Também existe uma divisão da asa de forma a provocar uma recolha durante a subida e um alongamento durante a descida. Desta forma, durante a subida da asa, é provocada sustentação na parte interna da asa e impulsão na sua parte externa. Devido à eficiência na geração de sustentação e propulsão, este ornitóptero consegue levantar voo e aterrar de forma autónoma [FIS11].

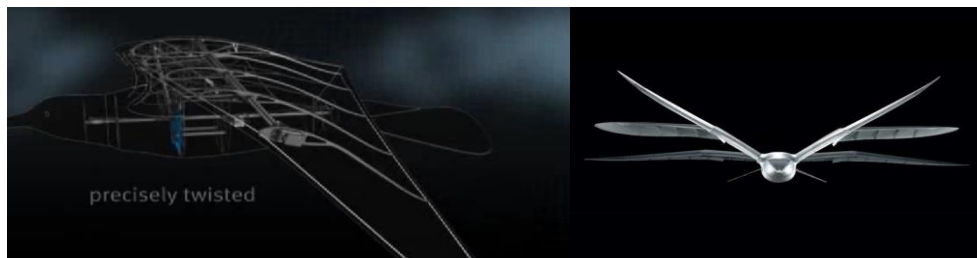


Figura 20 Posturas adquiridas pelas asas do *SmartBird* [FIS11]

Para o controlo da cabeça e da cauda do ornitóptero são usados dois servomotores com 3,5 kg de força de atuação. De maneira a executar uma curva é originada uma inclinação na cauda. Quando é exercida uma rotação sobre o eixo longitudinal, é exercido um momento em relação ao seu eixo vertical, provocando a mudança de direção do ornitóptero. De forma a originar sustentação, a cauda também pode deslocar-se para cima ou para baixo provocando um momento que tem como eixo a linha que liga as pontas das duas asas.

A estrutura mecânica deste ornitóptero é constituída por peças de fibra de carbono e o revestimento é feito de espuma de poliuretano plástico. Estes materiais são extremamente leves e proporcionam uma grande eficiência energética. O peso total da estrutura é de cerca de 450 gramas e o requisito energético deste modelo é de cerca de 25 W, descendo até a um intervalo entre os 16 e 18 W quando se encontra em voo.

3.2.2. PARK HAWK

Este projeto foi desenvolvido por Sean Kinkade e é comercializado em massa para os entusiastas dos ornitópteros. O Park Hawk, representado na Figura 21, pesa cerca de 0,4 kg e voa com controlo de três eixos (o controlo da cauda proporciona a sustentação ou a direção do voo e o controlo do batimento das asas proporciona maior ou menor propulsão). Este ornitóptero consegue efetuar voos planados com a ajuda de um sensor implementado na roda de transmissão e consegue obter os ângulos de ataque pretendidos através de uma secção na traseira da asa que é propositadamente deformável. Este modelo consegue atingir velocidades de cerca de 30 km/h e uma frequência de batimento das asas de 6 ciclos/s quando o motor está à velocidade máxima.

Para o controlo da cauda existem dois micro servomotores. Um deles exerce o incremento ou decremento na inclinação da cauda. Quanto maior for a inclinação da cauda, mais resistência criará ao ar, provocando um momento em torno do eixo que tem como reta a linha que liga as duas pontas das asas. O segundo micro servomotor é responsável pelo movimento rotacional da cauda em torno do eixo vertical. Com a cauda a uma certa inclinação, quando é pretendida uma curva à direita, a cauda roda para a direita. Este movimento vai criar um momento em torno do eixo longitudinal do ornitóptero obrigando-o a praticar uma rotação como se observa no voo das aves biológicas.

Este modelo recorre a uma fuselagem em fibra de vidro, implicando uma boa resistência e deformabilidade quando sujeito a acidentes. As asas são equipadas com hastes de fibra de carbono e tanto estas como a cauda são constituídas por “Ripstop Nylon”, que é um material muito utilizado em para-quedas ou balões de ar quente. As rodas dentadas são de plástico. Tem cerca de 1,170 m de envergadura das asas, um comprimento de 0,635 m e a asa tem uma área de 0,245 m². O motor utilizado é um Speed 300 [RCG02].



Figura 21 Park Hawk [RCG02]

3.2.3. CYBIRD P1

Criado na Coreia do Sul, pela empresa Neuros Company, o Cybird P1, representado na Figura 22, é um modelo que foi produzido em massa com características muito simplistas. Detém um peso de cerca de 0,200 kg, tem uma envergadura das asas de cerca de 0,736 m, um comprimento de 0,381 m e a área da asa é de aproximadamente 0,243 m². Este modelo não é vendido com os acessórios todos tornando obrigatória a procura de componentes muito leves por parte do comprador. O peso referido é dado como o peso máximo suportado pelo ornitóptero e esse fator torna a pesquisa de componentes muito limitada [RCG08].

A cauda é controlada apenas por um servomotor que roda em torno do eixo vertical e é responsável pelas curvas efetuadas pelo robô durante o voo. Durante a montagem do ornitóptero, a cauda deve ser ajustada para um dado ângulo que proporcionará sustentação ao robô. Quanto maior for o ângulo com o eixo longitudinal, maior será a estabilidade e menor será a velocidade. Para pequenos ângulos, a estabilidade decresce mas obtêm-se maiores velocidades.

O material utilizado para as asas e cauda é o “Ripstop Nylon” e as hastes são feitas em fibra de carbono. Tem uma frequência máxima de batimento das asas de cerca de 10 Hz e tem um ângulo de amplitude da asa que varia entre os -10° e os 20°.



Figura 22 Cybird P1 [<http://glipho.com/ashley1988/are-we-walking-towards-an-artificial-future>]

3.2.4. NANO HUMMINGBIRD

Em 2010, a empresa AeroVironment desenvolveu este modelo com suporte da Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). Este projeto teve como objetivo criar um ornitóptero, inspirado no beija-flor, capaz de pairar no ar e voar em frente apenas com recurso às asas. O Nano Hummingbird é capaz de se deslocar verticalmente, para os lados e para a frente ou para trás. O seu peso é de cerca de 19 gramas e tem 16 centímetros de envergadura das asas tornando-o um pouco maior e mais pesado que o peso médio das várias espécies de beija-flores [AER].

O Nano Hummingbird é um robô que utiliza um sistema de batimento de asas giroscopicamente estabilizado, que lhe permite passar de um voo a pairar no ar para um voo em frente a uma velocidade de cerca de 5 m/s. As asas também são responsáveis por diversas acrobacias aéreas. Dependendo da técnica de voo que é pretendida, o mecanismo das asas segue diferentes automações mecânicas.

Este ornitóptero inclui uma câmara que permite ao operador ver o ângulo de visão do robô dando-lhe a vantagem de poder infiltrar-se em edifícios e voltar a sair sem o contacto visual direto entre o homem e a máquina.

3.2.5. TECHJECT DRAGONFLY

Este robô foi projetado pela TechJect, uma empresa de estudantes da Georgia Institute of Technology concebida para a criação de robôs voadores [TEC]. Este projeto envolveu um estudo científico de quatro anos que lhes proporcionou a criação de três patentes em eficiência energética, fator em evidência na Figura 23, e teve o patrocínio de um milhão de dólares por parte da United States Air Force. É um produto projetado para a comercialização em massa mas a empresa tem imensas ideias para as aplicações que este robô possa ter fora do mercado geral. É inspirado na libelinha e recorre a quatro asas para efetuar um voo similar às aves ou pode pairar no ar como os insetos. Pesa cerca de 25 gramas e mede cerca de 15 cm.

Este produto é vendido em vários modelos e o cliente pode personalizá-lo a nível de cores, desenhos da asa e outros componentes para uso próprio. Entre os vários modelos, pode-se optar por soluções de melhor gama a nível computacional e de transmissão a troco de preços mais elevados [QUI12]. A nível de componentes, o ornitóptero utiliza giroscópios para executar as técnicas de voo desejadas e consegue transportar câmaras com visão

estereoscópica de alta definição, Global Positioning System (GPS) e comunicação sem fios. Estes componentes permitem o uso de aplicações para iPhone ou iPad a nível de controlo de voo, controlo fotográfico e controlo de localização.

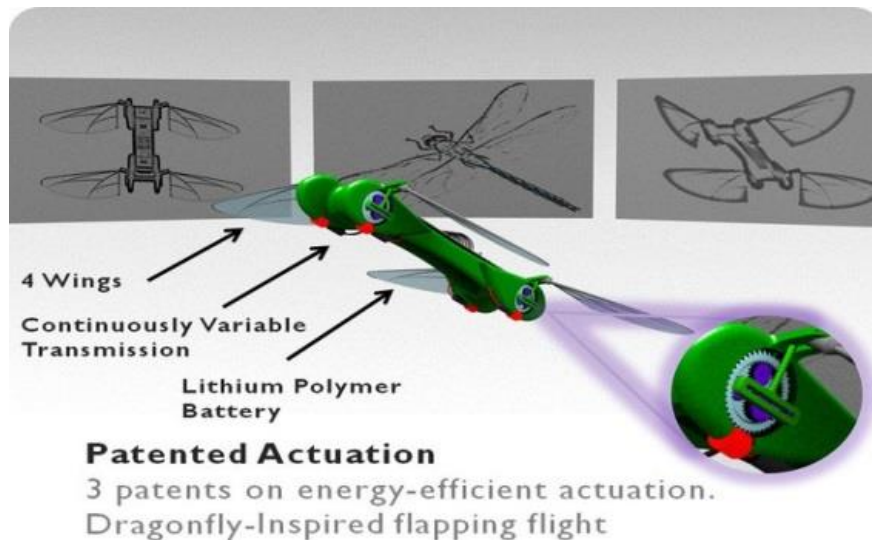


Figura 23 TechJect DragonFly [QUI12]

3.3. CONCLUSÕES IMPORTANTES RETIRADAS DOS PROJETOS ANALISADOS

Nos projetos analisados na secção anterior foram identificadas algumas especificações similares que os tornam viáveis para efetuar o voo. Nesta subsecção é feita uma comparação entre esses vários projetos para encontrar as soluções mais viáveis para o projeto a desenvolver.

Foi visto no SmartBird que as asas atingem certos ângulos de ataque que são implementados através do uso de servomotores nas pontas das mesmas. Contudo, o Park Hawk e o Cybird P1 utilizam uma haste traseira que desempenham o papel de estabelecer uma fronteira entre a zona não deformada e a zona deformada da asa. Desta forma, estes últimos têm asas que adquirem ângulos de ataque recorrendo à força natural do ar e tornam esta solução menos dispendiosa. Estes ornitópteros não utilizam o recolher de asas efetuado no SmartBird, que diminui as forças negativas de sustentação na ponta da asa durante a sustentação da mesma, mas devido aos ângulos de ataque adquiridos conseguem elevar-se. A frequência de batimento máxima utilizada pelo Park Hawk é de cerca de 6 Hz enquanto a frequência de batimento do Cybird P1 chega aos 10 Hz.

A cauda existente no SmartBird, Cybird P1 e Park Hawk está acoplada a dois servomotores. Um deles tem a função de aumentar ou diminuir o ângulo de incidência do ornitóptero através da resistência ao ar e o segundo tem como principal função deslocar a cauda para os lados provocando um momento que utiliza a linha longitudinal do ornitóptero como eixo de rotação.

O peso dos componentes é um fator importante pois determina se a força de sustentação consegue ou não ultrapassar a força da gravidade. A utilização de reforços em fibra de carbono e fibra de vidro confere bons níveis de rigidez bem como reduzido peso em grande parte dos componentes.

Tanto o Nano HummingBird como o Tech Ject DragonFly efetuam voos horizontais e conseguem pairar no ar. Estes tipos de voo obrigaram os projetistas a investir muito tempo em estudos pois os MAV são muito recentes e ainda não existem grandes bases para a sua implementação. Embora estes projetos apresentem grandes vantagens em relação aos ornitópteros anteriores a nível de peso, utilidade e estabilidade, a sua conceção microscópica requer dimensionamentos muito precisos e, por consequência, tornam-se modelos dispendiosos e mais suscetíveis a erros.

4. PROJETO DO ROBÔ DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA

4.1. ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

Examinando os conhecimentos adquiridos, torna-se evidente que este projeto terá um grande inter-relacionamento entre as áreas da mecânica, robótica e biologia.

A especificação principal de um robô voador de inspiração biológica é aguentar o voo sobre condições calmas através do batimento das asas. O fator mais importante assenta em gerir o peso dos vários componentes que vão constituir o robô e desenvolver uma máquina com o menor peso possível. A posição do seu centro de massa é, de certa forma, ajustável pois pode ser desviado por movimentos efetuados na orientação do corpo e na posição adquirida pelas asas e cauda. O estudo de pontos críticos completa este objetivo a fim de prevenir o bom funcionamento da máquina.

Em segundo plano, mas igualmente importante, encontram-se os componentes eletrónicos que são responsáveis pelo controlo da máquina. Um equipamento de computação é essencial para o processamento de dados e a respetiva transmissão de comandos para determinados atuadores de forma a ajustar os parâmetros de voo. O dimensionamento dos

vários componentes do robô deve ter em consideração todos estes componentes de forma a obter ligações simples entre os mesmos.

Em suma, o projeto em si não envolve um grande número de especificações iniciais. De forma a garantir o correto funcionamento da máquina é necessário um processo iterativo assente nos ajustes de dimensionamento e de eletrónica. Por exemplo, para o mesmo desenho de asas e cauda, diversos tipos de motor podem levar a diferentes resultados e vice-versa.

4.2. PONTOS DE PARTIDA

O principal ponto de foco no projeto do ornitóptero é o desenho da asa. Certos parâmetros têm de ser escolhidos com alguma cautela e têm de abranger os valores observados em seres biológicos para salvaguardar o bom funcionamento da máquina.

Como ponto de partida, a forma das asas será do tipo elítico. Esta forma da asa assegura o fácil manuseamento da máquina em espaços limitados mas requer um maior consumo energético. Estas asas são conhecidas por serem pequenas e arredondadas, sugerindo que os animais que as adotam fazem uma redução de momento desenvolvido no braço e têm um pequeno AR . De forma a perceber se esta informação se confirma, reuniram-se 7 aves com este tipo de asa dos estudos efetuados por Pennycuick [PEN96] [PEN01] e outros 23 morcegos que foram estudados no estudo de Bullen e McKenzie [BUL02] para saber se o AR se encontra perto do seu mínimo 4,8. De facto, dentro do referido intervalo [4,8; 15], os morcegos têm uma relação de aspeto com média de 6,3 e as aves estudadas por Pennycuick encontram-se mais aquém, com um valor médio de 8,6. Também foi feita a confirmação de que todos os seres estudados nestes três artigos se enquadram no intervalo de AR , à exceção de um albatroz que apresenta um valor de 15,5. Todos os dados recolhidos nestes artigos encontram-se enunciados no Anexo A.

Com os dados da amostra referida no parágrafo anterior, é possível reparar que os morcegos diferem muito das aves no valor da carga alar. Os morcegos têm um valor médio de $0,69 \text{ kgf/m}^2$ enquanto as sete aves obtêm uma média de $6,02 \text{ kgf/m}^2$. De facto, o intervalo sugerido pela ScienceLearning [SCI11] não se adequa aos morcegos mas todas as aves envolvidas nos dois estudos de Pennycuick encontram-se no intervalo [1; 20]. Ao todo, a amostra de 23 morcegos e 7 aves que dispõem de asas elíticas apresentam uma média de $0,97 \text{ kg/m}^2$ e, como são valores próximos do Park Hawk ($1,65 \text{ kg/m}^2$) e do

Cybird P1 (0,82 kg/m²) (ornitópteros com asas elíticas), tudo indica que os morcegos são a fonte de inspiração para as asas destes projetos. Contudo, no contexto deste trabalho e para auxiliar a decisão das dimensões das asas, foram elaborados gráficos que relacionem parâmetros utilizados nos seres biológicos. No gráfico seguinte é correlacionada a carga alar com a massa dos morcegos (Figura 24).

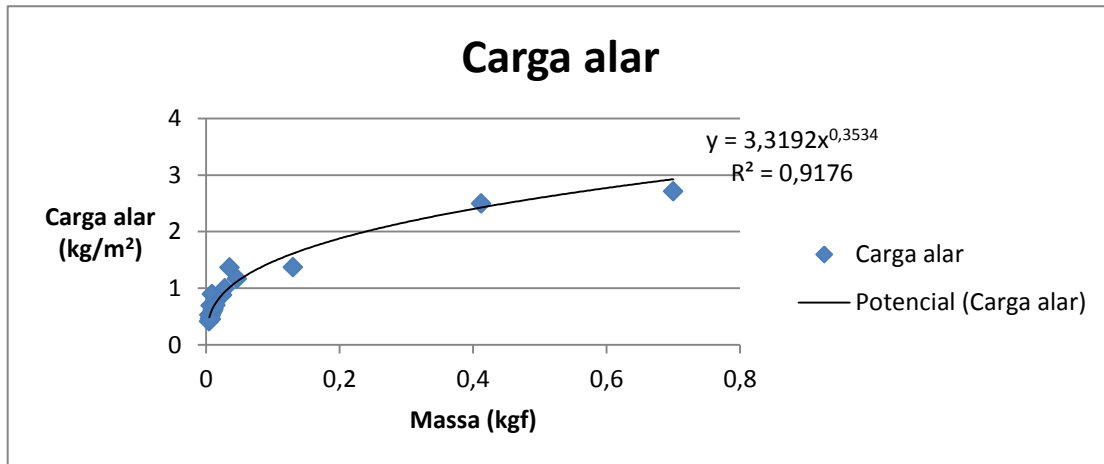


Figura 24 Gráfico de correlação entre a carga alar e a massa dos morcegos

Os estudos feitos acerca das frequências mostraram-se pouco conclusivos, pois diferem entre as aves e os morcegos, e as correlações obtidas para o voo dos morcegos merecem um estudo mais aprofundado. Contudo, pode ser concluído que todos os autores dos artigos estudados relacionam a frequência de batimento das asas com a massa do ser voador. Por este motivo, foi analisada a sua correlação, que se apresenta na Figura 25.

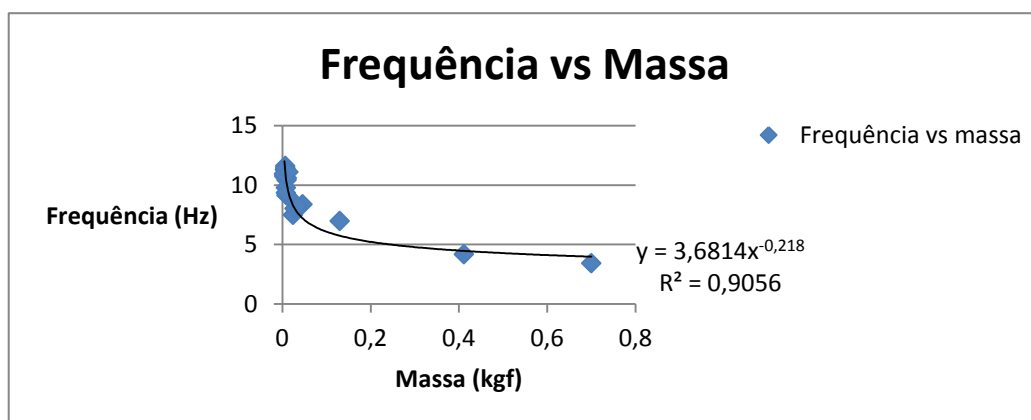


Figura 25 Gráfico de correlação entre a frequência de batimento das asas e a massa dos morcegos

No seguimento da mesma amostra de morcegos, os ângulos de amplitude dados pelas expressões de Bullen e McKenzie [BUL02] não atingiram correlações muito significativas. Contudo, é possível prever que este parâmetro varie em função da frequência de batimento das asas a fim de garantir que o ser biológico encontra o seu número de Strouhal desejado [TAY03]. Desta forma, foi também analisada a correlação entre a frequência de batimento das asas e a amplitude (A_0 , medida em metros), como visto na Figura 26, e foi estimado que, no geral, os morcegos voam com um número de Strouhal de 0,27 (Figura 27).

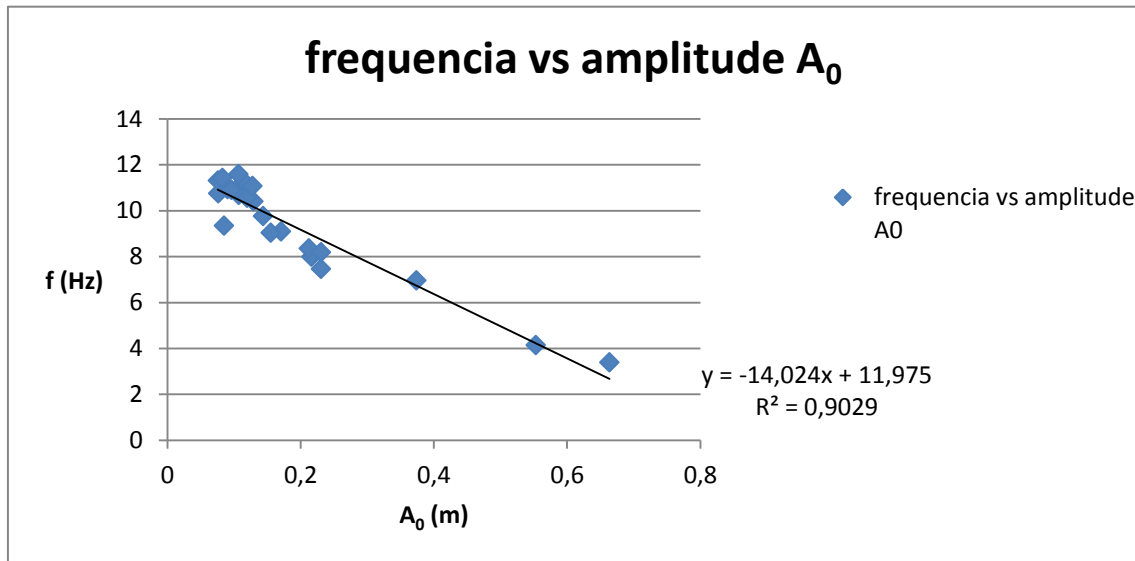


Figura 26 Gráfico de correlação entre frequência de batimento e a amplitude da asa

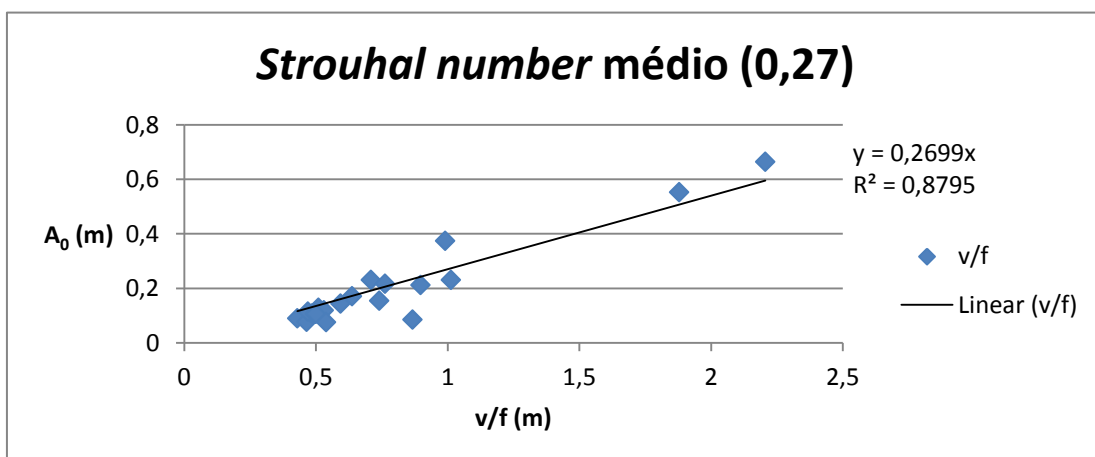


Figura 27 Número de Strouhal médio da amostra de morcegos estudada

Tomando estas correlações em conta, o ornitóptero será projetado para apresentar um número de Strouhal de 0,27. No entanto, optou-se por considerar o parâmetro da amplitude fixo, levando a frequência de batimento das asas a ser ajustada conforme a velocidade de voo.

Também convém referir que existe uma relação entre a área das asas e o seu comprimento, como pode ser visto na Figura 28. Desta forma estão encontrados todos os parâmetros de referência para a asa que vai ser utilizada no projeto, inspirada na asa dos morcegos. A título de nota, todos os valores presentes nas correlações anunciadas nesta secção foram obtidos através das medições observadas nos estudos de Pennycuick [PEN96] [PEN01] e Bullen e McKenzie [BUL02] e não através dos valores calculados pelos seus autores.

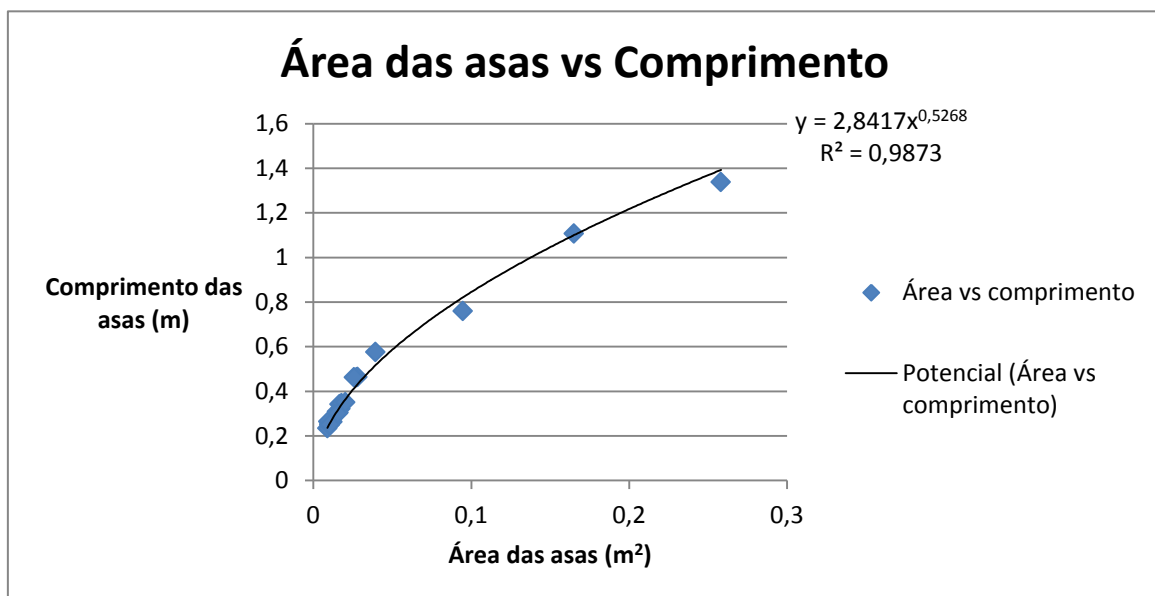


Figura 28 Relação entre a área das asas dos morcegos e o seu comprimento

4.3. EVOLUÇÃO DO PROJETO

Para o dimensionamento do robô voador de inspiração biológica foi tomada a decisão de criar um ornitóptero com dimensões semelhantes às do Park Hawk, pois é um dos modelos com maior grau de informação disponibilizada (grande parte dela fornecida por consumidores que exploram os ornitópteros como *hobby*) e utiliza técnicas de construção simplistas que se tornam úteis para a criação do projeto. Embora algumas dimensões sejam calculadas de forma a prevenir o bom funcionamento da máquina, nesta secção é possível

testemunhar várias similaridades entre os dois ornitópteros. De forma a facilitar a leitura desta secção, é feita uma divisão de acordo com os vários componentes do robô e é feita em cada uma delas a respetiva descrição da sua evolução ao longo do projeto.

Na fase final do projeto, com modelação dos componentes no *software* SolidWorks 2013, foi possível prever uma massa de 0,593 kg para o ornitóptero a desenvolver. Tomando em conta este valor, foi possível fazer alguns ajustes no dimensionamento das peças de forma a criar os movimentos pretendidos para um voo estabilizado. Os parâmetros da Tabela 1 foram obtidos a partir das correlações apresentadas na secção anterior.

Tabela 1 Parâmetros de referência do voo

Parâmetro	Valor	Unidade	Expressão
Massa	0,593	kg	-
Carga alar (WL)	2,760	kgf/m ²	$3,3192 \cdot m^{0,3534}$
Área das asas (S_w)	0,215	m ²	$\frac{m}{WL}$
Comprimento das asas (b)	1,264	m	$2,8417 \cdot S_w^{0,5268}$
Relação de aspeto (AR)	7,436	-	$\frac{b^2}{S_w}$
Frequência (f)	4,126	Hz	$3,6814 \cdot m^{-0,218}$
Amplitude (A_0)	0,560	m	$\frac{f - 11,975}{-14,024}$
Ângulo de amplitude	52,56	graus	$\text{Arcsen}(2 \cdot (A_0/2)/(b/2))$

4.3.1. ELETRICIDADE E ELETRÓNICA

Os componentes elétricos desempenham um papel fundamental na máquina e assumem a responsabilidade de converter energia elétrica em energia mecânica. Desta forma é necessário uma fonte de energia, meios de comunicação, unidade controladora, sensores e atuadores.

A energia é fornecida através de uma bateria de lítio polímero LiPo de duas células. Esta oferece uma tensão de 7,4 V com uma capacidade de 1300 mAh. Em modelismo, este tipo de bateria tem uma grande utilidade devido ao seu peso reduzido e o seu uso é obrigatório quando se utilizam motores sem escovas.

Os motores são responsáveis pelo trabalho mecânico do robô e, na secção das asas, o binário envolvido requer um motor mais “forte” que na cauda, que sofre pequenos deslocamentos. A atuação destas duas secções fica repartida por dois tipos de motores: dois servomotores HD-1160A (cujas especificações se encontram no Anexo B), responsáveis pela elevação e direção da cauda, e o motor sem escovas Sunnysky Angel A2212, de 800 KV como descrito no Anexo C, que fica a cargo do deslocamento das asas. Os motores sem escovas obrigam ao uso de um *Electronic Speed Controller* (ESC), por diversas razões, tais como regulação da tensão, conversão de corrente contínua em corrente alternada e transformação do sinal *Pulse Width Modulation* (PWM) na velocidade de rotação do motor. O ESC utilizado é o Turnigy Plush de 30 A e as respectivas características estão descritas no Anexo D.

A máquina é controlada remotamente, através de um conjunto constituído por um controlador de Rádio Controlo (RC) e um recetor, já pré-programados entre si. Este recetor tem o objetivo de enviar o sinal recebido do controlador RC para os vários componentes. Como os motores e o próprio recetor funcionam a 5 V, o ESC tem o papel de regular a tensão que é enviada para o último. Na Figura 29 são esquematizadas as conexões entre os vários componentes para uma melhor compreensão.

As asas não podem parar em qualquer posição. Devido à envergadura da máquina, o voo planado é um requisito para o bom funcionamento da mesma. Desta forma, é acoplado um íman na última roda dentada do sistema de redução responsável por cortar a corrente de um sensor de efeito de Hall. A informação transmitida por este sensor, que deteta a posição do íman, tem responsabilidade no momento em que o motor sem escovas deve parar, permitindo assim efetuar um voo planado. Este sensor funciona em conjunto com um sistema de travamento mecânico, que é referido na subsecção 4.3.3.

Os dados que exigem processamento, como por exemplo os dados do sensor de efeito de Hall, são transmitidos para um controlador Arduino Nano v3 e as suas características estão discriminadas no Anexo E. Esta unidade é responsável por controlar a resposta do motor

sem escovas, com o fim de efetuar o tipo de voo: através do batimento de asas ou planado. Este controlador apresenta dimensões e massa muito pequenos tornando-se assim uma mais-valia para o projeto em questão.

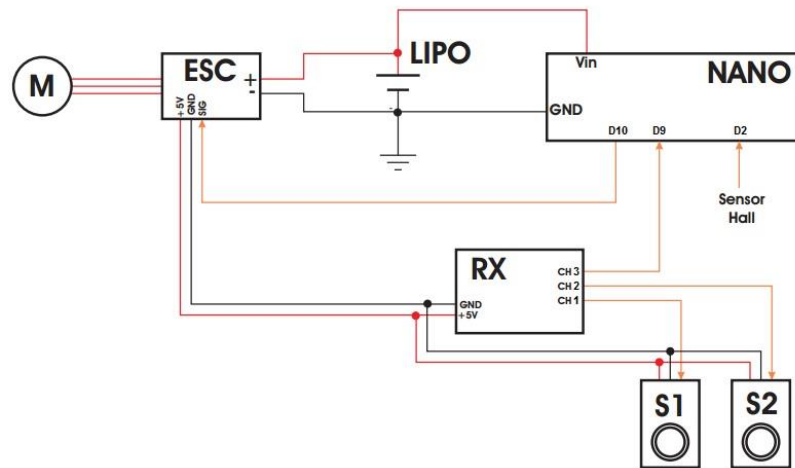


Figura 29 Esquema de ligações elétricas entre os componentes

Utilizando as ligações elétricas representadas anteriormente, é obtida a arquitetura de controlo representada na Figura 30 onde os servomotores são diretamente controlados pelo recetor enquanto que o ESC recorre ao Arduino como intermediário para a comunicação que efetua com o recetor.

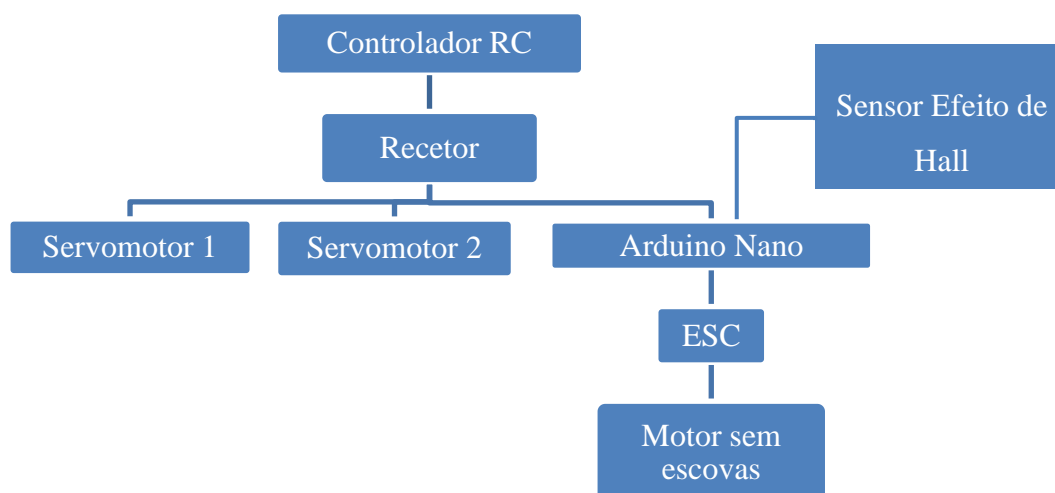


Figura 30 Esquema da arquitetura de controlo utilizada

4.3.2. ASAS

O desenho das asas é inspirado nas dos morcegos. Tal como o Park Hawk, de Sean Kinkade, este modelo de asa foi desenvolvido ao longo de anos e já provou obter bons resultados, permitindo libertar grande parte do tempo disponível para as restantes áreas do ornitóptero. De acordo com a análise efetuada, este desenho (Figura 31) assenta numa área triangular suportada por uma estrutura que envolve duas hastes e o quadro como principais arestas. A haste dianteira situa-se na aresta frontal da asa e é responsável pela subida e descida da asa. A haste traseira é ligada desde a parte traseira do ornitóptero e o seu eixo é direcionado ao eixo da haste dianteira de forma a criar uma interceção perto da ponta da haste traseira. Desde a haste traseira até vários pontos nas bordas traseiras da asa existem pequenas varetas que desenvolvem um movimento livre. Resumindo, a área triangular comandada pela haste dianteira vai proporcionar sustentação na máquina e a área que se desloca livremente na traseira da asa será deslocada pela força do ar e provocará o movimento oscilatório necessário à formação das forças de propulsão.

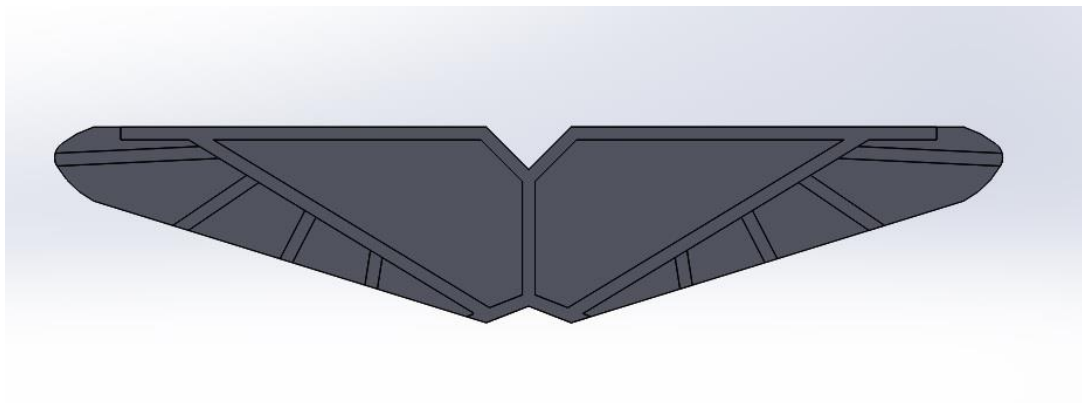


Figura 31 Desenho das asas do ornitóptero

O material escolhido para a construção da asa é o ripstop nylon. Com recurso a técnicas de reforço que lhe conferem boa resistência às concentrações de tensões que causam os rasgos, este material torna-se uma mais-valia em aplicações da aeronáutica, como balões de ar quente, paraquedas e papagaios. As áreas correspondentes à interceção das asas com as hastes e o quadro recorrem ao uso de uma fita Dacron que é colada ao referido tecido. O veio de transmissão que intercepta perpendicularmente a haste dianteira transporta a energia da caixa de transmissão para as asas através do uso de rótulas esféricas (lado

esquerdo da Figura 32). As hastes traseiras são encaixadas na parte traseira do ornitóptero, também com auxílio de duas rótulas esféricas (lado direito da Figura 32).

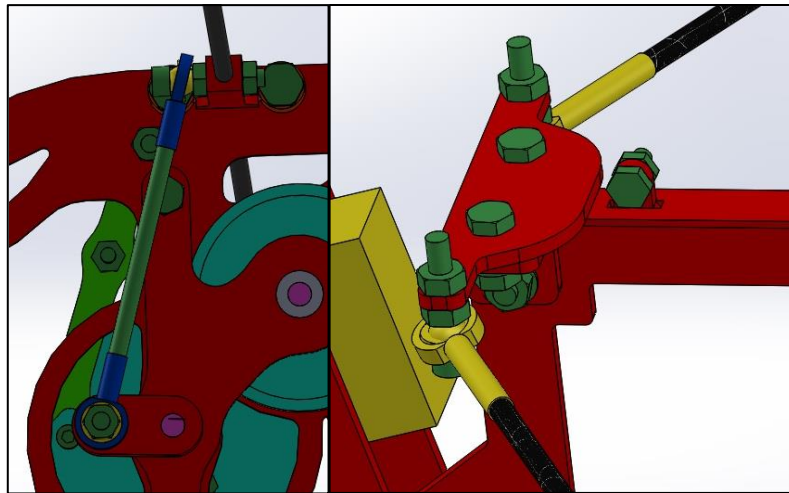


Figura 32 Transmissão de força e movimento através de rótulas esféricas

O perno de ligação entre as duas rótulas esféricas de transmissão é dimensionado de forma a promover uma amplitude de 0,560 m ao longo de um ciclo de batimento das asas. Esta deslocar-se-á $28,4^\circ$ para cima e $23,8^\circ$ para baixo, totalizando um ângulo de amplitude de $55,2^\circ$. Como a frequência de batimento das asas é um valor limitado pelas rodas dentadas em catálogo e pelo motor escolhido, e encontra-se um pouco acima da frequência de referência, a amplitude foi ligeiramente reduzida com a finalidade de manter o número de Strouhal pretendido.

As hastes dianteiras, responsáveis pela transmissão de força, têm um diâmetro de 3 mm e um comprimento de 520 mm. A força que cada uma tem que suportar é de cerca de 2,91 N (metade do peso). Embora esta força esteja distribuída pelo comprimento da asa, foram feitos cálculos para o caso mais crítico onde esta força se encontra concentrada num único ponto a 0,52 m do ponto de apoio. Neste pior cenário a tensão dada no ponto de apoio da haste é de 35,66 MPa, valor muito menor que a tensão de cedência dada por grande parte dos fornecedores (a menor tensão de cedência encontrada foi de cerca de 1600 MPa).

O sistema de redução utiliza rodas dentadas Delrin, fornecidas pela empresa RS Amidata, e promove uma redução de 13,3:1 no binário exercido ao motor. Na ligação entre o veio do motor e o segundo veio de transmissão é usada uma engrenagem com diâmetros primitivos de 9,6 mm e de 38,4 mm. A ligação entre o segundo eixo e o terceiro eixo de transmissão utiliza diâmetros primitivos de 14,4 mm e 48 mm, respectivamente. Ambas as engrenagens são de módulo 0,8.

De forma a complementar o sistema de travamento, e permitir travar as asas na posição indicada pelo sensor de efeito de Hall (em função da posição do íman), é colocado um braço de travamento que está constantemente a ser retraído para a sua posição original através de uma mola de tensão. Assim que o sensor envia a informação necessária para o motor parar, as asas encontram-se no sentido descendente e, por consequência, estas passam a sentir apenas a força do ar que as empurra no sentido ascendente. Desta forma, a roda de transmissão entra no sentido anti-horário e o parafuso que está acoplado à roda fica preso no braço de travamento. Na Figura 34 mostram-se estas duas secções que formam o conjunto de travamento. Este sistema serve para garantir que as asas ficam na posição desejada mesmo que o binário efetuado ultrapasse o binário que o motor exerce para se manter estático.

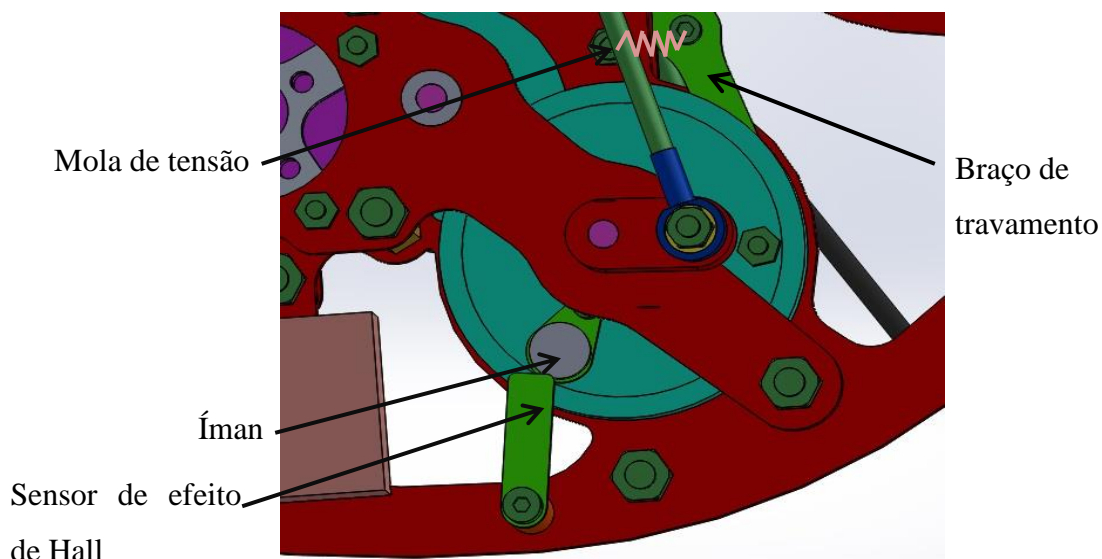


Figura 34 Sistema mecânico de travamento

4.3.4. CAUDA

A atuação da cauda é dividida em duas partes, ou seja, é efetuada através de dois servomotores, de forma a obter diversos tipos de manobras na máquina. Estes dois servomotores serão distinguidos como o servo-leme (que está diretamente acoplado à cauda, representado por 1 na Figura 35) e o servo-elevador (que está ligado ao servo-leme, representado por 2 na Figura 35). Esta secção da máquina é capaz de controlar diversos graus de liberdade que influenciam a estabilidade de voo, a realização de curvas e a ascensão.

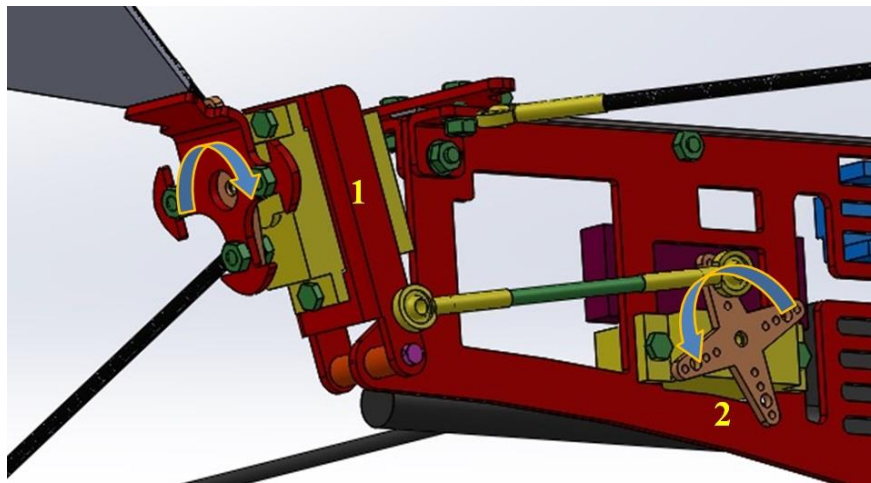


Figura 35 Definição dos servomotores com os respectivos movimentos efetuados

O servo-leme é responsável por criar binários ao longo do eixo longitudinal do ornitóptero possibilitando as manobras de rolamento efetuadas durante o voo. Este servomotor está ligado à cauda com um determinado ângulo que possibilita a sua rotação em forma de cone. Este ângulo de acoplamento da cauda é um aspeto muito importante pois permite à mesma deslocar-se na vertical enquanto se desloca na horizontal, mantendo assim o ângulo de incidência proposto pelo servo-elevador. Este tipo de montagem promove uma melhoria de controlo pois separa as funções dos dois servomotores.

O servo-elevador tem como objetivo a elevação da cauda e provocar-lhe um certo ângulo de incidência. Este servomotor é encaixado no quadro principal, um pouco mais à frente do servo-leme, de forma a deslocar o centro de gravidade da máquina para uma posição mais dianteira. Ao distanciar os dois servomotores um do outro será necessária uma menor variação de deslocamento por parte do servo-elevador e, recorrendo à utilização do ângulo

entre o servo-leme e a cauda, é proporcionado um benefício mecânico que permite uma eventual escolha de um servo-elevador com menor binário máximo. Ao mesmo tempo, devido à utilização de vários componentes ao longo do quadro que devem ser montados numa forma simples, não convém distanciar muito os servomotores. A ligação feita entre os dois servomotores deve ser o mais leve possível e, por isso, é composta por duas rótulas esféricas e um perno M3 de 60 mm de comprimento. O sistema encontra-se representado na Figura 36.

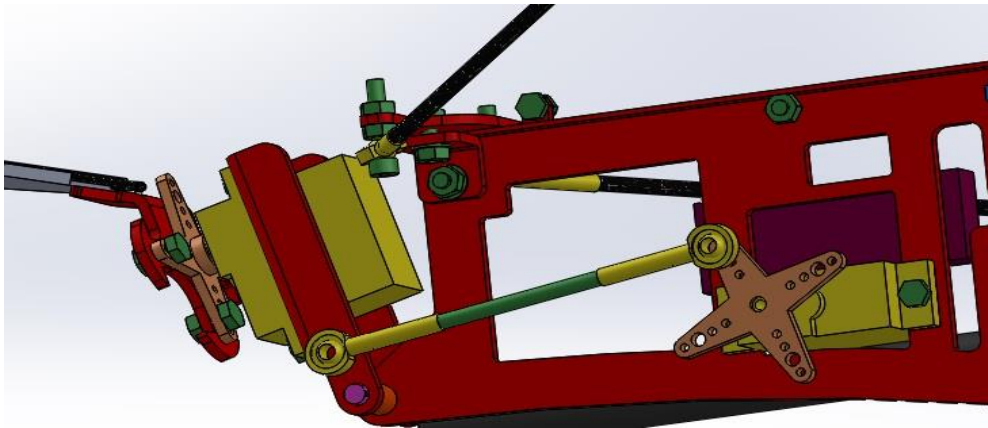


Figura 36 Sistema de servomotores de atuação da cauda do ornitóptero

A área de superfície da cauda é de $1,31 \text{ dm}^2$ e para a sua atuação são utilizados dois mini servomotores HD-1160A, que disponibilizam um binário máximo de $2,0 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ com uma tensão de 5 V . Este binário será responsável por suportar a força de resistência exercida pelo ar na cauda. O fenómeno previsto quando a cauda efetuar os movimentos determinados é ser criada uma mudança nos graus de liberdade e por isso esta força exercida pelo ar é sempre diminuída pelos ajustes de posição do ornitóptero. Os servomotores utilizados no Park Hawk são os HiTec HS-55, que disponibilizam um binário de $1,3 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ e, como o projeto do ornitóptero pretende assumir pesos e dimensões idênticas, é esperado que estes servomotores disponibilizem a força motora necessária ao bom funcionamento da máquina.

Contudo, de forma a prever o bom funcionamento dos servomotores, foram feitos cálculos para o pior cenário possível. O componente crítico neste sistema é o servo-elevador. Para a determinação do binário máximo exercido no mesmo é necessário prever algumas velocidades de voo. De acordo com as expressões desenvolvidas por Linton [LIN07a], a

velocidade necessária para efetuar o voo com um ângulo de incidência de 12° variará entre os 9,75 m/s e os 11,5 m/s (correspondente ao número de Strouhal mínimo de 0,20). Assumindo que, de repente, o servo-elevador movimentada a cauda para a posição mais alta, obtém-se um coeficiente de resistência ao ar de cerca de 0,67 (coeficiente obtido apenas por iteração) e o vento desloca-se a uma velocidade de 11,5 m/s, pelo que a área máxima da cauda de forma a não ultrapassar o binário máximo do servomotor é de $3,8 \text{ dm}^2$. Estes resultados são estimados e podem apresentar desvios face à situação real, pois existem parâmetros que só podem ser medidos em laboratório.

4.3.5. QUADRO

Para este projeto foi refletido o desenho de uma estrutura compacta, capaz de fornecer as capacidades mecânicas existentes nos ornitópteros, sem colocar em risco o peso da máquina e de forma a garantir simplicidade na união dos diversos componentes. Com inspiração no quadro utilizado pelo Park Hawk, este quadro reflete a figura de um falcão numa chapa com 2 mm de espessura que engloba o sistema de transmissão na zona dianteira, os componentes eletrónicos a meio do quadro e o sistema de servomotores e cauda na sua traseira.

O material utilizado para a construção desta plataforma é o alumínio 5083, cujas características se assemelham às dos materiais utilizados no Park Hawk ou no Cybird P1. O seu peso estimado é de 80 gramas e a geometria pode ser vista na Figura 37. Embora o alumínio possua uma maior densidade que os materiais utilizados nesses dois projetos, e contribua para um maior peso da máquina, o seu uso neste componente pretende facilitar a sua construção que detém geometrias complexas. Esta chapa não tem de ser muito rígida em qualquer uma das direções pois os esforços mecânicos executados pelos componentes são transmitidos para o exterior do ornitóptero de forma a exercer resistência ao ar. De acordo com a área das asas e o seu comprimento, foram determinadas as dimensões do quadro com o fim de promover um fácil acoplamento entre as asas e esta peça.

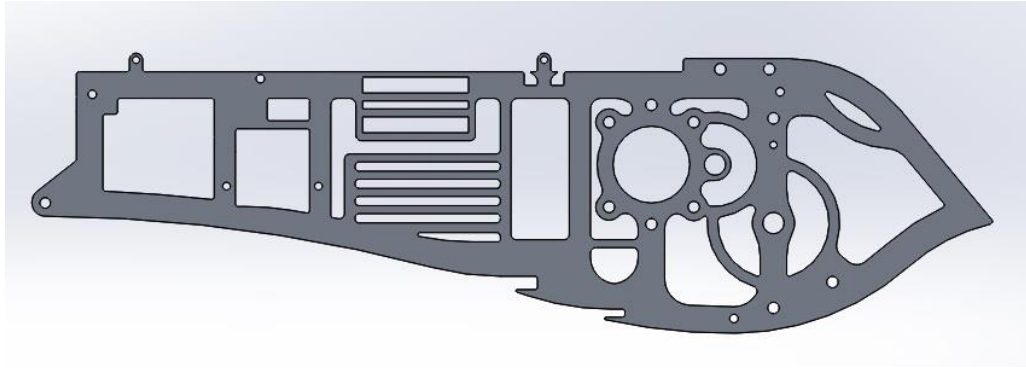


Figura 37 Geometria do quadro principal

O principal desafio na construção desta peça prende-se com os componentes que se pretendem acoplar à máquina e arranjar uma forma de colocar o centro de gravidade no local pretendido. As pesquisas sugerem que o centro de gravidade depende do projeto e deve encontrar-se a cerca de $1/3$ a $1/4$ da asa, ao longo do eixo longitudinal. Normalmente, a sua posição encontra-se na zona intermédia do quadro onde se localizam os componentes elétricos mais pesadas, como a bateria e controladores. Desta forma, todos os componentes são modelados no programa Solidworks e são atribuídas as respetivas massas de forma a entender onde se encontra o centro de gravidade e, à posteriori, incorpora-se a bateria numa posição que transfira este ponto para o local desejado. Esta posição pode, eventualmente, ser deslocada através do posicionamento do servo-elevador. Na secção transversal ao quadro, o centro de gravidade deve localizar-se dentro dos 2 mm de espessura da chapa.

No final da modelação, o centro de gravidade foi deslocado para um ponto a 0,319 (inferior a $1/3$) do comprimento da asa, como pode ser visto na Figura 38, e está a cerca de 1,2 mm (dentro dos 2 mm) de uma das paredes da chapa.

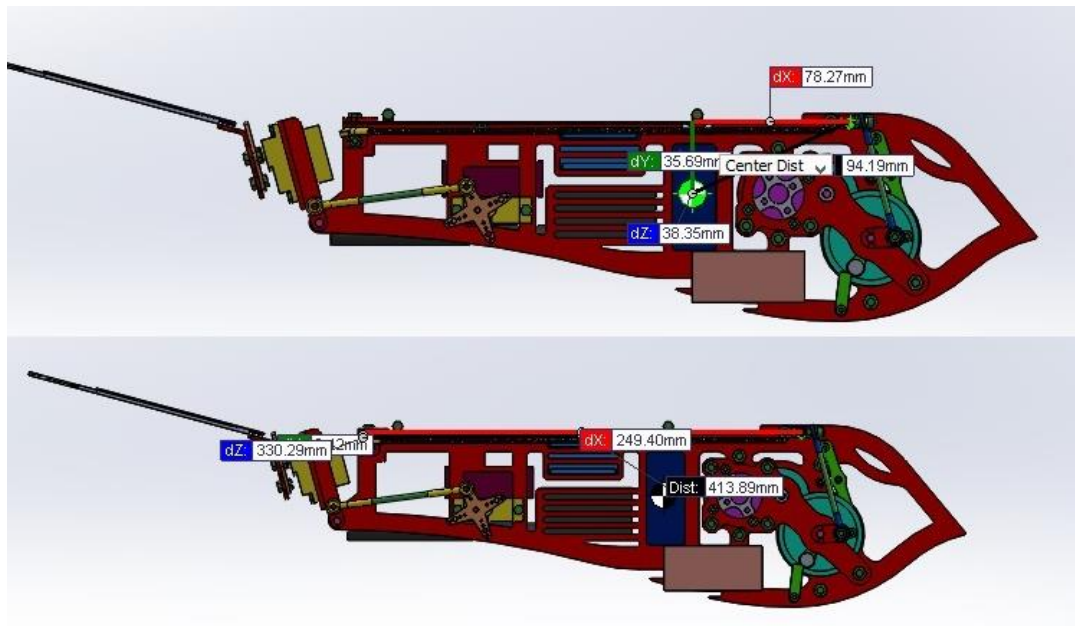


Figura 38 Determinação do centro de gravidade em relação ao comprimento da asa

4.4. VERSÃO FINAL DO PROJETO

Este tipo de projeto envolve processos iterativos constantes a fim de promover um equilíbrio entre o dimensionamento da máquina e o seu desempenho. Por exemplo, se é necessário utilizar um motor mais pesado a fim de obter maior binário, a massa da estrutura será aumentada e, por consequência, as dimensões da asa também aumentam. Na mesma linha de raciocínio, aumentando a asa é aumentado o binário exercido no motor por aumentar a distância desde o centro de pressão da asa até ao centro de rotação das hastes frontais.

Mecanicamente, a estrutura não deve apresentar qualquer tipo de problema pois são utilizados materiais leves e bastante resistentes para os esforços em questão. As massas dos componentes é facilmente obtida através da biblioteca de materiais do SolidWorks 2013. Eletricamente, os componentes escolhidos oferecem boa viabilidade mas, em alguns casos, torna-se difícil de prever a contribuição que vão ter na massa total da máquina devido ao uso de fios, conectores ou também por a ficha técnica indicar a massa de um componente que vem com mais peças de acoplamento. Contudo, depois de aumentar a massa de uma

máquina de 400 gramas para uma de cerca de 600 gramas, foi dado por concluída a fase de projeto.

Os parafusos a utilizar também são um bom desafio em projetos desta envergadura porque não são fáceis de se arranjar. Em casos como a caixa de redução, e zonas expostas a maiores esforços, foram utilizados parafusos M3 e M4 mas, no caso dos servomotores e outras zonas de menores esforços, o ideal é utilizar os parafusos mais pequenos que sejam encontrados. Neste caso, os menores parafusos encontrados são M2,5.

No motor sem escovas, depois da redução, o binário imposto é de 0,046 N·m. Para vencer este binário foi calculada uma intensidade de corrente a ser fornecida pela bateria de 4,13 A. Para atingir uma frequência de batimento das asas de 4,1 Hz são necessários 4,4 A e as especificações do motor referem uma intensidade máxima de corrente de 10 A. Tendo em conta este valor máximo de corrente, à partida, é possível prever que o motor pode levar as asas a atingir uma frequência de batimento de 9,7 Hz mas, na realidade, este valor pode ficar limitado pelo controlador RC. O sinal PWM enviado por este controlador varia teoricamente entre 1 ms a 2 ms mas, neste caso específico, este sinal é enviado apenas no intervalo de 1,1 ms a 1,7 ms. A isto, junta-se o facto de o motor ter uma eficiência de cerca de 80 a 90%, aumentando assim a corrente necessária ao seu funcionamento.

Numa primeira fase, o meio de comunicação delineado para este projeto consistia num rádio 3DR de telemetria. Este meio de comunicação permite enviar dados para a máquina e também recebê-los, mas exige a criação de uma aplicação em Java que faça a transformação dos dados enviados pelo controlador em sinais PWM. Apesar do grande potencial de receber dados que estejam a ser obtidos em voo, por motivos de simplicidade, o meio de comunicação utilizado passou a ser apenas num sentido, recorrendo ao controlador RC. Para efeitos de teste, ambos os rádios ficam acoplados à máquina com a finalidade do rádio 3DR enviar dados referentes à frequência de batimento das asas bem como a qualquer outro tipo de sensorização que seja requerido para a aplicação em causa. No entanto, para efeitos de voo, o ornitóptero é testado apenas com o rádio RC.

Nesta etapa da construção da máquina é possível rever que a adição de algum componente extra não terá grande impacto na localização do centro de massa, pois os componentes mais pesados encontram-se na parte da frente, como pode ser visto na Figura 39 e na Figura 40. A caixa de redução recorre ao uso de nove parafusos M4 com separadores

roscados metálicos e, em conjunto com a bateria, o motor sem escovas e pequenas peças envolvidas no sistema de travamento e articulação da asa, o centro de massa, representado nas figuras com o símbolo preto e branco, tende sempre a localizar-se nesta zona.

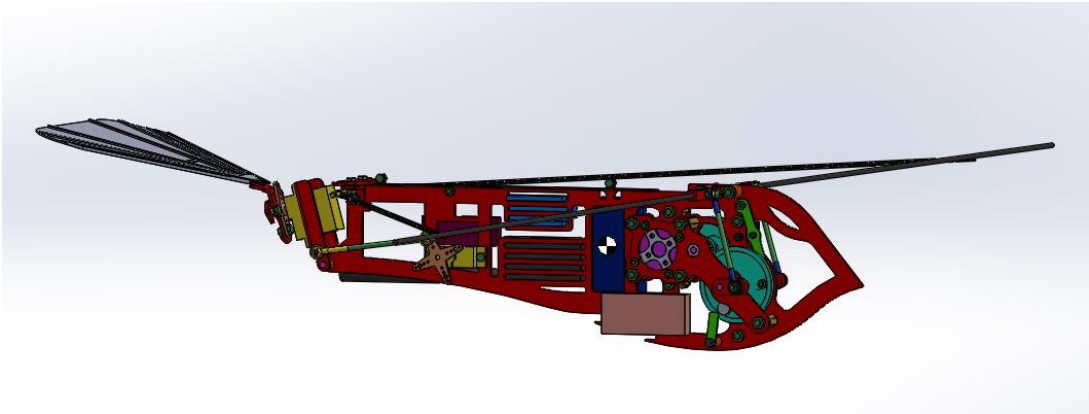


Figura 39 Vista lateral do ornitóptero

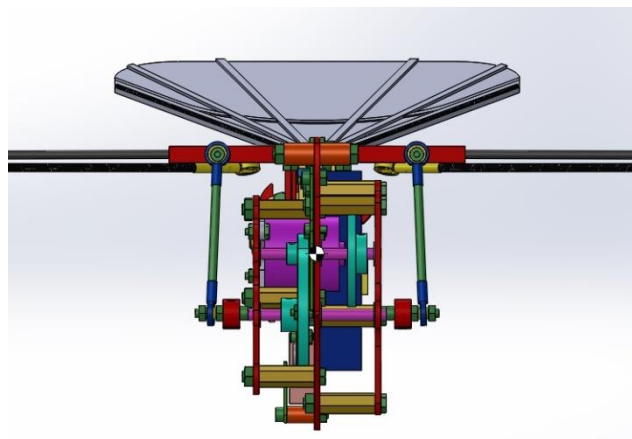


Figura 40 Vista frontal do ornitóptero

A parte mais exigente deste projeto é saber como trabalhar o equilíbrio de forças exercidas. As asas e a cauda têm de trabalhar em conjunto para o equilíbrio das forças que contrariam a força exercida pelo peso. Devido ao facto das asas se encontrarem em diversas posições e não haver uma posição estática, este equilíbrio é difícil de ser calculado. Esta análise pode ser feita através de simulações estáticas nas várias posições da asa, mas continua a ser dependente da velocidade do vento incidente que, por sua vez, pode variar com a frequência de batimento, como visto anteriormente.

5. CONSTRUÇÃO, MONTAGEM E ANÁLISE DE COMPORTAMENTO

5.1. CONSTRUÇÃO

A fase de construção do protótipo é uma etapa que acaba por estar associada à fase de projeto. Embora o projeto possa ser dado por concluído, a sua implementação acaba por, muitas vezes, levar à necessidade de efetuar certos ajustes ao projeto que acabam por alterar a ideia inicial para a máquina. Nesta secção são apresentados alguns aspetos importantes a ter em consideração na construção do ornitóptero projetado com a indicação de alguns ajustes que, neste caso, foram necessários efetuar com vista ao bom funcionamento da máquina.

5.1.1. ASAS E CAUDA

Como referido anteriormente, o principal material utilizado nas asas e cauda é o ripstop nylon. De forma a promover a fixação entre este material e a estrutura mecânica são

necessários alguns materiais de fixação a fim de transmitir o esforço de uma zona para a outra.

A utilização apropriada das fitas Dacron é um aspeto fulcral nestas zonas pois pode definir o insucesso na fase de experimentação. Estas fitas ficam dispostas nas zonas de maior solicitação pois são elas que vão albergar as hastes de carbono que transmitem os esforços para a máquina. Para isso, é necessário utilizar dois tipos de fitas Dacron: adesivas e não adesivas. As fitas não adesivas são responsáveis pela criação das bolsas onde se encontram as hastes e têm a responsabilidade de promover um movimento livre da haste sem ocorrer grande desgaste dos materiais. As fitas adesivas constituem um reforço às fitas não adesivas, devido à necessidade de existir fixação entre as hastes e o ripstop nylon.

Numa primeira fase, com recurso a uma fita-cola 3M VHB de dupla face, as fitas não adesivas (fitas azuis) são incorporadas na asa, como pode ser visto na Figura 41. A seguir, de forma a criar a parte ondulatória da asa, são incorporadas as hastes pequenas com recurso à referida fita-cola e cobertas por faixas pequenas de ripstop nylon. Como estas hastes não se movimentam, podem ser diretamente fixadas desta forma. Numa terceira e última fase, é utilizada a fita adesiva (fita preta) para reforçar a fixação das fitas não adesivas ao tecido (Figura 42).



Figura 41 Utilização da fita Dacron não adesiva

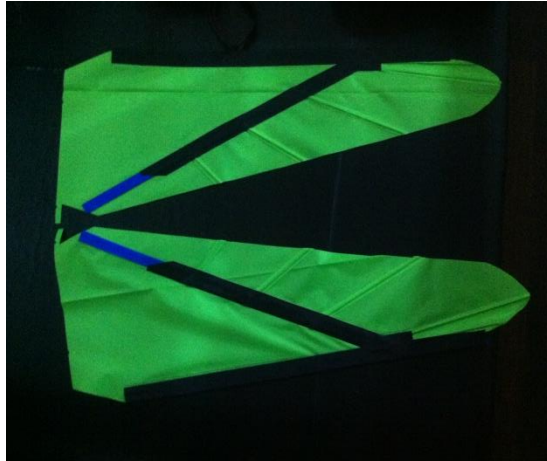


Figura 42 Utilização da fita Dacron adesiva

As asas são feitas em separado e, no final, são acopladas uma à outra. Nesta ligação é utilizada a fita não adesiva em conjunto com a fita-cola de dupla face para criar uma bolsa que funciona como a espinha dorsal de um ser humano. Uma peça em alumínio é acoplada por dentro desta bolsa para, à posteriori, ficar fixa à estrutura. A Figura 43 demonstra como esta zona também acaba por ser reforçada com a fita Dacron adesiva. Na Figura 44 é assinalada a peça que entra na bolsa central das asas.

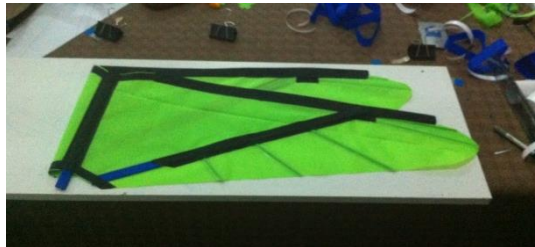


Figura 43 Asas interligadas

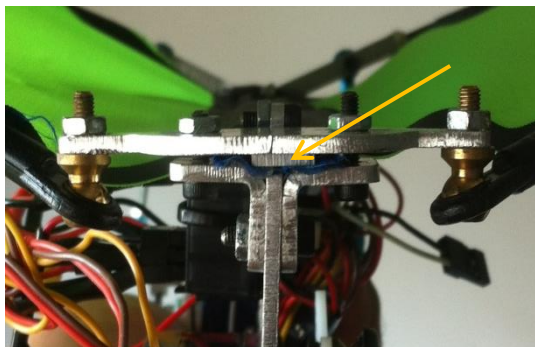


Figura 44 Peça de alumínio que dá entrada na bolsa central das asas

A cauda recorre ao mesmo método de construção. São utilizadas quatro hastes de 1 mm de diâmetro para garantir que a cauda fica sempre esticada no sentido vertical (do ponto de vista da Figura 45). Estas hastes são acopladas ao tecido, com recurso à fita-cola VHB de dupla face da 3M, e cobertas por faixas pequenas de ripstop nylon, tal e qual como as hastes da zona de ondulação da asa. Com o fim de garantir que a cauda fica esticada no sentido horizontal, é colocada uma haste fletida de uma ponta à outra que fica fixa nas camadas de fita-cola das hastes principais situadas nas laterais.

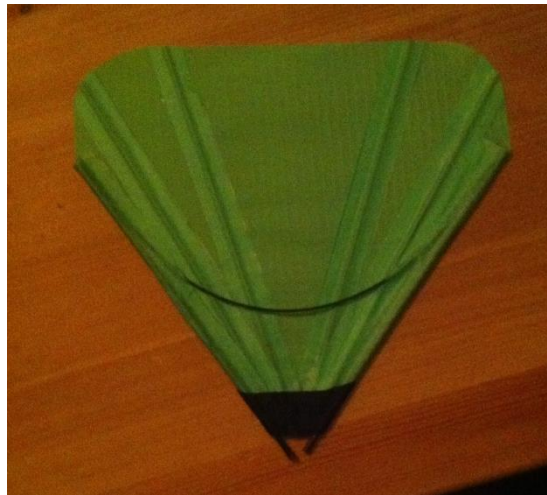


Figura 45 Construção da cauda

5.1.2. ESTRUTURA MECÂNICA

Neste caso, as peças principais da estrutura mecânica exigem uma tolerância na ordem da décima de milímetro devido ao facto de alguns parafusos serem estruturalmente importantes. Em casos normais, a fibra de carbono é o material utilizado para as peças de maior envergadura que não sofram esforços elevados mas, no caso do sistema de transmissão, é necessária a utilização de peças metálicas para garantir o bom funcionamento da máquina. Como as peças em fibra de carbono obrigam ao uso de moldes e da impressão do protótipo que é feita com pouco rigor, por motivos de simplicidade, a produção destas peças principais é feita com recurso ao alumínio e processadas através de corte a laser, corte por jato de água e quinagem. Desta forma, tanto as peças de maior envergadura como as peças do sistema de transmissão são obtidas com as desejadas tolerâncias e garantem que a máquina funciona com os requisitos desejados.

As peças cilíndricas, como por exemplo as peças onde se encontra o eixo de rotação das hastes frontais e os separadores do eixo de rotação transversal da cauda, são processadas com recurso ao torno mecânico. No caso dos veios de transmissão, em aço, que necessitam de facejamentos precisos e alinhados, é utilizada a fresadora. Para fazer furos com precisão e profundidade controlada, a máquina de comando numérico computadorizado [*Computer Numerical Control* (CNC)] é a escolha ideal.

Todos os processos aqui enunciados são utilizados para a obtenção das peças envolvidas no ornitóptero. Apesar de algumas peças serem fornecidas conforme o desenho que é apresentado, nestes casos é necessária a maquinagem para dar a forma pretendida a todas as peças. Na Figura 46 é possível ver grande parte das peças que foram processadas por corte e quinagem. Algumas delas ainda foram maquinadas de forma a obter as dimensões pretendidas.



Figura 46 Construção do ornitóptero com recurso a peças metálicas

Também é necessário fixar algumas peças com recurso a adesivos. No caso das hastes das asas e da cauda, é necessário que haja uma forte ligação mas também alguma ductilidade. Para estas ligações foi utilizado o adesivo SikaForce 7752 FRW L60 que recorre a um endurecedor, à razão de dois para dez. Desta forma, deixa de ser necessário efetuar uma superfície roscada nas hastes frontais, bem como garantir que as hastes da cauda assentam paralelamente à superfície feita para acoplar as mesmas ao servomotor. Na Figura 47 é possível ver as zonas onde este adesivo foi utilizado.



Figura 47 Zonas de colagem com recurso ao adesivo SikaForce 7752 FRW L60 (1 - raiz das hastes frontais, 2 - cauda, 3 – íman, 4 - raiz das hastes traseiras)

No caso dos rolamentos utilizados na caixa de transmissão verifica-se a necessidade de uma colagem através da utilização do adesivo Loctite 603. Este garante a fixação entre peças de contacto radial. Após a realização de alguns testes da máquina, e concluir que a utilização de freios não garantem que estes rolamentos fiquem na posição desejada, a sua utilização torna-se necessária com vista a prevenir que os veios oscilem em torno do seu eixo longitudinal.

O braço de travamento mecânico precisa de estar numa posição fixa e ter uma rotação livre. Com recurso a um casquilho com aba, é possível colocar esta peça na posição certa através do uso de anilhas e obter uma fixação permanente através do parafuso que passa pelo seu centro. A Figura 48 ilustra como este braço é acoplado. O sensor envolvido no sistema de travamento demora alguns microssegundos (o Arduino lê ciclos a cada 20 ms) a enviar o sinal e, por esta razão, a posição dele deve ser ajustável com o fim de garantir que a asa para no momento desejado. Desta forma é garantido que o braço mecânico desempenha sempre o seu papel no voo planado.

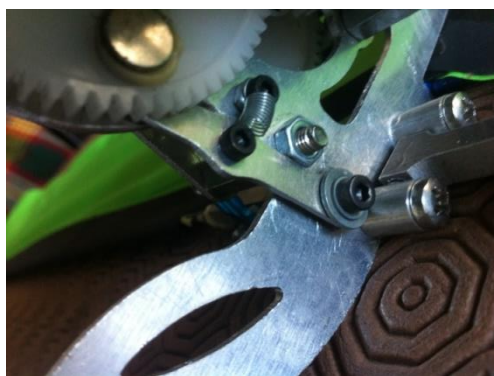


Figura 48 Detalhe construtivo do braço de travamento

As rodas dentadas Delrin são leves e muito utilizadas em aplicações de modelismo. Contudo, a sua utilização pode envolver um número elevado de manutenções. Como são rodas de plástico, os furos roscados produzidos para fixar as mesmas ao veio podem ser facilmente estragados. Na fase de acoplamento, basta, por exemplo, dar uma volta a mais no perno de fixação para este estragar a rosca criada na roda. Desta forma, é recomendado um uso muito cuidado quando se trabalha com estas rodas. A Figura 49 ilustra como uma roda Delrin pode sofrer deste tipo de desgaste. À esquerda desta figura encontra-se uma imagem da roda sem qualquer tipo de esforço e à direita é possível notar que o furo está desgastado colocando em risco a transmissão do binário requisitado.

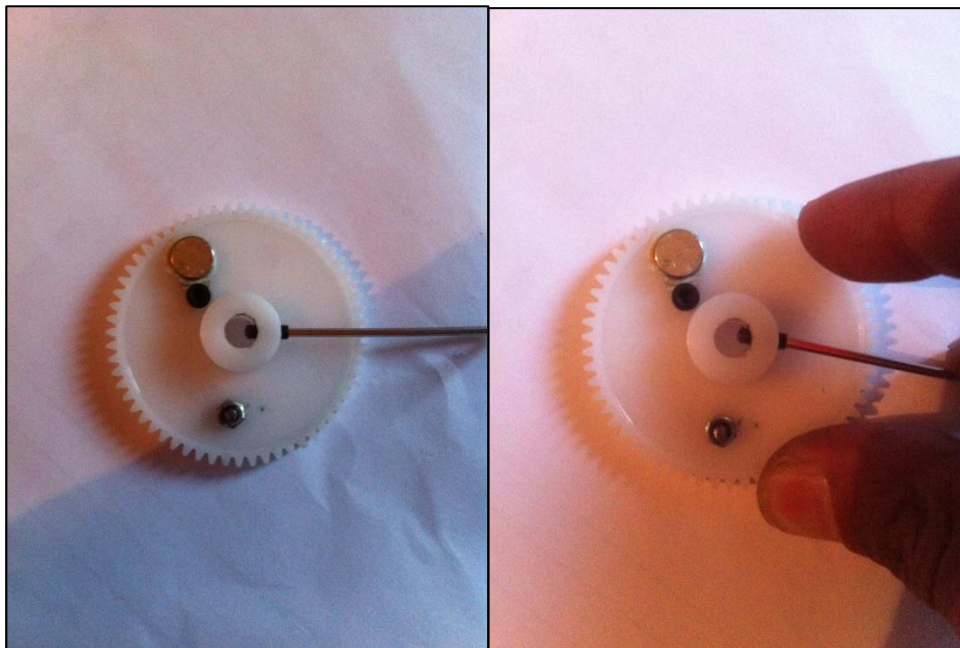


Figura 49 Desgaste no furo roscado de uma roda Delrin

5.1.3. PROCESSAMENTO DE DADOS

Para o controlo preciso do ornitóptero, é indispensável que o motor sem escovas efetue uma resposta eficaz aos comandos dados pelo controlador. Com esta finalidade, foi desenvolvido código no Arduino Nano para funcionar de intermediário entre o recetor, o sensor de efeito de Hall e o próprio motor. Para efeitos de teste, o rádio 3DR foi utilizado com o intuito de receber dados fornecidos pelo sensor de efeito de Hall e obter um valor numérico para a frequência de batimento das asas. Nesta fase, também foi incorporado um acelerómetro como forma de testar outro tipo de sensorização e verificar o seu envio

através do rádio 3DR. Desta forma, é possível perceber se os dados enviados pelo rádio 3DR são fidedignos através da movimentação deste sensor.

O código expresso nesta subsecção está dividido em quatro partes distintas. Para efeitos de compreensão são feitas pequenas composições a explicar cada secção do código antes do mesmo ser listado. A primeira parte refere qual a pasta da biblioteca do Arduino que é necessária ao funcionamento do motor. Neste caso é a pasta “Servo.h”, que define quais são os pinos que estão a ser utilizados, dando-lhes um nome específico para melhor compreensão e atribui valores ou incógnitas a variáveis que são utilizadas ao longo do código.

```
#include <Servo.h>

#define sensorHall 2
#define ESC 10
#define canalRF 9
#define eixoX 0
#define eixoY 1
#define eixoZ 3

Servo myservo;

unsigned long x;
unsigned int parado = 1;
int leituraX = 0;
int leituraY = 0;
int leituraZ = 0;
int cntLeituras = 4;
static int cntInterrupts = 100;
static int bps;
static int cntBatidas = 0;
```

Na segunda parte do código é indicada a informação que o Arduino vai processar quando iniciar. Esta informação é importante para o Arduino perceber quais são as Entradas (os *Inputs*) e as Saídas (*Outputs*) e expressar em qual dos pinos é que está acoplado o ESC do motor sem escovas. O modo de contagem utilizado pelo processador ATmega328 foi o *Clear Timer on Compare* (CTC), cujas especificações se encontram no anexo F. Neste modo de contagem, com o valor do *prescaler* igual a 1024, dado pelo binário representado

em TCCR2B, e uma frequência de oscilação de 16 MHz, o OCR2A toma o valor de 155 com a finalidade de cada interrupção obter um valor aproximado de 10 ms.

```
void setup()
{
  parado = 1;
  pinMode(canalRF, INPUT);
  pinMode(sensorHall, INPUT);
  pinMode(ESC, OUTPUT);
  Serial.begin(57600);
  myservo.attach(ESC);
  myservo.writeMicroseconds(1000);
  analogReference(EXTERNAL);

  noInterrupts();

  TCCR2A = 0;
  TCCR2B = 0;
  TIMSK2 = 0;
  OCR2A = 155;
  TCCR2A = (1 << WGM21);
  TCCR2B = (1 << CS22) | (1 << CS21) | (1 <<
CS20);
  TIMSK2 = (1 << OCIE2A);

  EICRA = 0;
  EIMSK = 0;
  EICRA = (1 << ISC01);
  EIMSK = (1 << INT0);

  interrupts();
}
```

A terceira parte do código é dada pelos dois excertos seguintes e dizem respeito ao código para leitura dos sensores. No primeiro excerto é feita a contagem dos batimentos da asa, através das interrupções feitas pelo pino 2, denominado de INT0. Depois de serem decrementadas 100 interrupções de 10 ms, o valor dos batimentos por segundo é retirado e logo a seguir a variável `cntBatidas` volta ao valor 0. Desta forma é possível obter o valor ao longo de um segundo.

```

ISR(TIMER2_COMPA_vect)
{
  cntInterrupts--;
  if(cntInterrupts == 0)
  {
    cntInterrupts = 100;
    bps = cntBatidas;
    cntBatidas = 0;
  }
}

ISR(INT0_vect)
{
  cntBatidas++;
}

```

O segundo excerto desta parte do código é relativo ao tratamento da leitura que é feita pelos dois sensores. Neste caso específico, é feita uma leitura de quatro amostras para cada um dos três eixos do acelerómetro e depois é efetuada a média dessas amostras. De seguida é feita uma conversão dos valores recebidos (entre 0 e 1023) para valores de leitura mais práticos (entre -512 e 511) de forma a distinguir as forças negativas das positivas. Por último, estes valores são transmitidos por comunicação série para o monitor, juntamente com a contagem dos batimentos das asas por segundo, determinada anteriormente.

```

void lerADXL(void)
{
  leituraX = leituraX + analogRead(eixoX);
  leituraY = leituraY + analogRead(eixoY);
  leituraZ = leituraZ + analogRead(eixoZ);
  cntLeituras--;
  if(cntLeituras == 0)
  {
    cntLeituras = 4;
    leituraX = leituraX >> 2;
    leituraY = leituraY >> 2;
    leituraZ = leituraZ >> 2;
    leituraX = map(leituraX, 0, 1023, -512,
511);
    leituraY = map(leituraY, 0, 1023, -512,
511);
    leituraZ = map(leituraZ, 0, 1023, -512,
511);
    Serial.print(leituraX);
    Serial.print("\t");

```

```

Serial.print(leituraY);
Serial.print("\t");
Serial.print(leituraZ);
Serial.print("\t");
leituraX = leituraY = leituraZ = 0;
Serial.println(bps);
}
}

```

A parte do código que se segue é de extrema importância, pois segue uma linha de processamento cíclico. O ciclo apresentado abaixo retorna ao início, a cada 20 milissegundos, para voltar a ler os valores que são transmitidos pelo controlador. Basicamente este código indica ao ESC que para iniciar o batimento das asas, é necessário um sinal de PWM com a largura de 1400 ms. Se as asas já estiverem em movimento, podem ser lidos valores acima de 1350 ms. Quando o sinal enviado estiver abaixo dos 1350 ms, é enviado pelo Arduino um sinal de 1410 ms até as asas atingirem a posição desejada. No final de cada ciclo são retornados os valores de leitura processados pelos sensores.

```

void loop()
{
  x = pulseIn(canalRF, HIGH);

  if(parado == 1)
  {
    if(x >= 1400)
    {
      parado = 0;
      myservo.writeMicroseconds(x);
    }
  }
  else
  {
    if(x >= 1350)
    {
      parado = 0;
      myservo.writeMicroseconds(x);
    }
    else
    {
      if(parado == 0)
      {

```

```
myservo.writeMicroseconds(1410);  
while(digitalRead(sensorHall) != 0);  
myservo.writeMicroseconds(1000);  
parado = 1;  
}  
}  
}  
lerADXL();  
}
```

O desenvolvimento do código do Arduino diz respeito à última etapa da construção do ornitóptero. No entanto, é necessária a realização de testes, em conjunto com o desenvolvimento desta etapa, para verificar se o sistema funciona de acordo com o esperado. A Figura 50 demonstra como estes testes foram realizados.

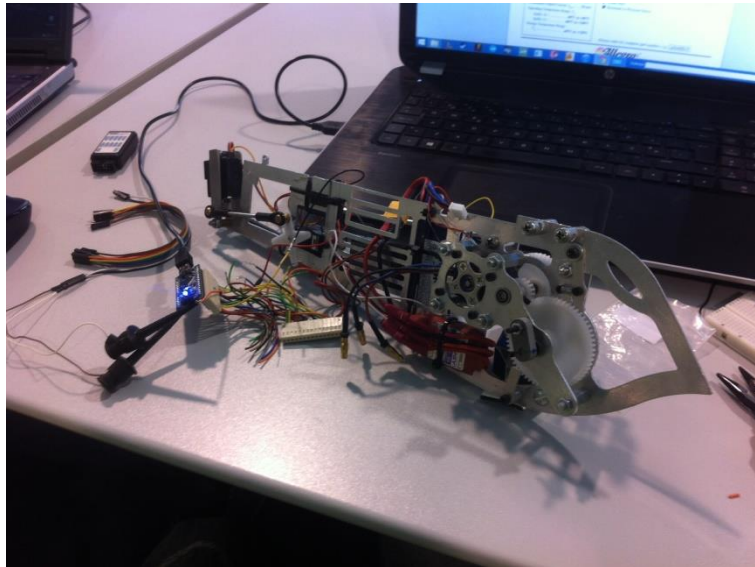


Figura 50 Realização de testes conforme a evolução do código

No final deste processo, a máquina encontra-se pronta a ser montada com os restantes componentes como as asas e cauda. Na Figura 51 pode ser vista uma vista geral do protótipo final. A Figura 52 representa a máquina vista por cima e a Figura 53 mostra a vista lateral com os componentes eletrónicos instalados na máquina em destaque. Nesta fase todos os componentes encaixaram-se conforme esperado e os desenhos técnicos das peças maquinadas podem ser vistos no Anexo G.

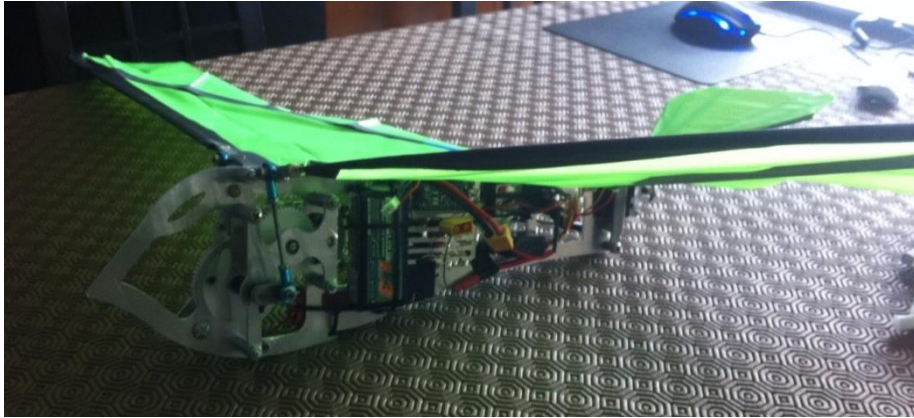


Figura 51 Versão final do protótipo



Figura 52 Vista superior do ornitóptero

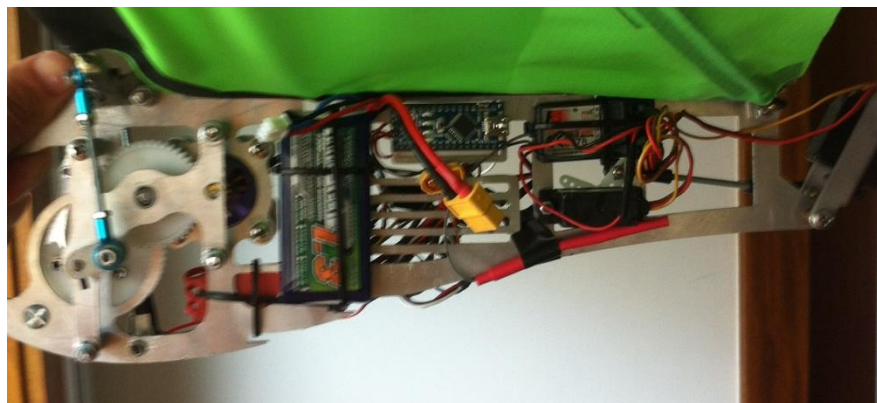


Figura 53 Vista lateral mostrando a posição dos componentes eletrônicos

5.2. TESTES E ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE VOO

Depois de completar a construção da máquina, e implementar o respetivo código de processamento, é necessária a realização de alguns testes a fim de perceber se o seu funcionamento está de acordo com o planeado.

Numa primeira fase é determinada a massa total da máquina, como pode ser visto na Figura 54. Apesar de se ter efetuado um estudo rigoroso da massa dos componentes individuais, é concluído que o valor da massa não coincide com o valor esperado. Na altura da conceção das asas e cauda, é possível perceber que a massa esperada para estes componentes varia imenso da massa obtida na realidade. Por exemplo, para as asas foi esperado uma massa de 12 gramas, visto que a densidade do ripstop nylon é de 56 grama/m² e a área destas é de 0,215 m². Contudo, depois da sua construção, conclui-se que este componente pesa entre 40 a 50 gramas. Isto deve-se à incorporação das hastes de 1 mm, das fitas Dacron e da fita-cola de dupla face que conferem a este componente as características projetadas para ele. Este fator explica a subida de um valor de 0,593 kg para 0,647 kg. No entanto, os valores determinados em cálculos para a frequência de batimento das asas, área da asa, entre outros, não são alvo de grandes diferenças face às medições no protótipo implementado.

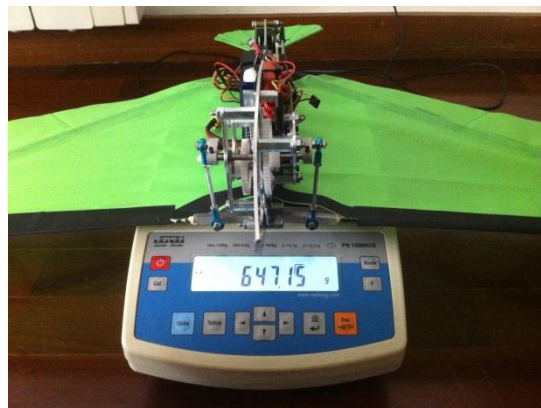


Figura 54 Massa do ornitóptero

Para determinar se as fórmulas fornecidas por Linton [LIN07a] estão corretas e fornecem valores coerentes foram feitos alguns testes para determinar os valores da força de propulsão e da força de sustentação.

5.2.1. TESTE DA FORÇA DE PROPULSÃO

Com o intuito de determinar a força de propulsão que o ornitóptero exerce, realizou-se a experiência que se segue. Esta assenta na suspensão do ornitóptero através de uma corda que está alinhada com o seu centro de massa, tendo sido amarradas duas cordas lateralmente para garantir que a força de propulsão será dada apenas numa direção (em frente) e também é amarrada uma corda à zona traseira que está acoplada a um dinamómetro. Esta última corda recorre ao uso de uma vareta de madeira para ajudar ao alinhamento entre o dinamómetro e o ornitóptero. A Figura 55 demonstra como este ensaio é montado.



Figura 55 Ensaio da força de propulsão

Devido ao facto do ornitóptero apenas exercer a força de propulsão na fase em que as asas estão no sentido descendente, o valor que é dado pelo dinamómetro oscila. Contudo, os valores máximos registados encontram-se entre 1 e 2 N, para uma frequência de batimento de 5 Hz e uma amplitude de 0,55 m, valores muito próximos do resultado obtido pela expressão (17) da força de propulsão de Linton [LIN07a] que indica um valor de 1,31 N.

5.2.2. TESTE EM SUSPENSÃO

Suspenso numa corda que está alinhada com o seu centro de massa, é realizado um ensaio com vista a perceber se o ornitóptero consegue obter força de sustentação suficiente para igualar o próprio peso. Este ensaio consiste em atirar o ornitóptero numa trajetória circular, onde o centro é o ponto de fixação da corda, e verificar se ele consegue praticar um voo estabilizado. Devido ao comportamento pouco elástico da corda, este teste acaba por ser pouco conclusivo devido ao facto da força de tensão exercida pela corda influenciar a estabilidade do ornitóptero. De forma a reduzir a força de tensão externa, repetiu-se a experiência, recorrendo à utilização de uma corda elástica que, por sua vez, não garante a trajetória circular e acaba por influenciar também as forças de voo.

Neste teste, não são utilizados dinamómetros nem qualquer outro tipo de instrumentos de medição da força, mas foi possível concluir que a máquina não desenvolve a força de sustentação necessária à prática de voo sustentado. Como o ornitóptero está dimensionado para voar a uma velocidade de 10 ou 11 m/s, e este parâmetro influencia a força de sustentação, o espaço onde é efetuado o teste demonstra ser muito pequeno (cerca de 5×5 m²) para se atingir esta velocidade.

5.2.3. TESTE DE VOO LIVRE

Visto que o teste em suspensão não garante as condições necessárias para a prática de voo deste ornitóptero específico, é necessário perceber se o problema reside na máquina ou nas condições de teste. Este robô demonstra alguma resistência a nível estrutural e, por isso, apresenta ter condições para ser testado sem qualquer tipo de apoio externo sem o perigo de comprometer os componentes nele envolvidos. Para a realização deste teste torna-se então necessária a utilização de um terreno com alguma vegetação densa de forma a aparar as quedas feitas pelo ornitóptero e um “pouco de fé”.

Neste meio é possível verificar que o ornitóptero se comporta numa forma mais independente e estável. Na Figura 56 é possível verificar alguns *frames* do voo que foi alcançado ao longo de aproximadamente 2 segundos e que teve o alcance de cerca de 10 metros. Contudo, a força de sustentação necessária não é atingida. Como foi anunciado

anteriormente, a velocidade necessária para a obtenção da força de sustentação necessária é de cerca de 10 m/s para as dimensões de asa em questão. O modelista que está no controlo do ornitóptero também pode afetar a execução do voo em boas condições tanto na altura do lançamento como no momento em que ele se encontra a voar.



Figura 56 Teste de voo livre

6. CONCLUSÕES

Nos dias de hoje, existe muita informação consolidada sobre a mecânica de voo das aeronaves de asas fixa e seu perfil alares, mas apenas alguma informação ainda não consolidada inerente ao tipo de voo utilizado por seres biológicos. Existe ainda muita informação por ser descoberta. A evolução da tecnologia na área dos sensores, actuadores e controladores pode ajudar neste campo e o facto dos componentes tecnológicos virem a tornar-se cada vez mais pequenos pode ajudar à implementação de sensores nos seres vivos de forma a perceber melhor os esforços envolvidos no voo. Atualmente, as câmaras de filmagem representam a principal tecnologia utilizada para perceber os movimentos utilizados pelos seres vivos, mas não conseguem fornecer medições precisas. De forma a efetuar estudos mais precisos é necessário estar a par dos avanços tecnológicos que estão a ser feitos nestas áreas e adequá-los a estes casos em específico.

O desenvolvimento deste projeto tem a potencialidade de abrir imensas portas no estudo do voo dos seres vivos mas também fornecer certas aplicações práticas como, por exemplo, ao nível de reconhecimento de áreas com recurso aos sensores adequados para determinar as características de um local. Com a implementação de uma câmara fotográfica também é possível obter imagens de um local, de uma forma mais dissimulada, pois o estilo de voo e o próprio desenho da máquina é idêntico ao dos seres vivos.

O tipo de asas utilizado neste projeto consiste num desenho elítico que possui melhores relações entre a sustentação e resistência ao ar e promovem diminuição dos vórtices na ponta da asa. Esta característica permite que sejam usadas algumas ideias retiradas de projetos feitos por outros, neste caso do Sean Kinkade Park Hawk. Com esta ideia em mente, é possível realizar estudos em seres vivos que têm tipos de asas idênticos e perceber como dimensionar as mesmas. Os gráficos obtidos na Secção 4.1 fornecem correlações muito próximas de 1, assegurando assim que o desenho das asas segue minimamente os princípios utilizados pela Natureza.

A fase de projeto envolve muitos avanços e recuos devido ao facto de haver muitos parâmetros interdependentes. Por exemplo, a frequência de batimento das asas depende da massa e está, ao mesmo tempo, interligada com a amplitude, de forma a obter um número de Strouhal dentro do intervalo $[0,2; 0,4]$. No caso de alguma modificação ser necessária, convém que todo o projeto seja revisto a fim de não comprometer o funcionamento da máquina.

A fase de construção demonstra a existência de pormenores que, por vezes, não são perceptíveis na fase de projeto. Algumas peças são complicadas de maquinar, devido às suas pequenas dimensões, e exigem um grande cuidado na sua conceção, pois a décima de um milímetro pode fazer a diferença entre o sucesso e o fracasso do funcionamento da máquina. No projeto em questão, os componentes que apresentaram maiores desafios foram as rodas Delrin, devido ao seu material. O polioximetileno garante boa estabilidade mecânica e rigidez, porém, os pernos de fixação envolvidos no sistema de fixação desgastam rapidamente o material. Desta forma, estes componentes obrigam a uma manutenção cuidada e periódica. Neste caso, a utilização de rodas dentadas de metal seria a solução ideal mas são precisos ter em conta imensos fatores para implementar esta substituição. As rodas dentadas de metal apenas são comercializadas com módulos de 1 ou superior e, como o sistema de redução utilizado é dimensionado com um módulo de 0.8, esta alteração só tem viabilidade se forem alteradas e substituídas algumas das peças principais da estrutura. Outro fator a ter em conta para esta alteração ser feita é a compra de outros componentes como, por exemplo, os rolamentos que se encontram colados às respetivas peças de alumínio, através do adesivo Loctite 603.

O comportamento mecânico da estrutura comporta-se conforme o esperado. Os servomotores transmitem as forças necessárias à estabilização da cauda numa posição fixa

e o motor sem escovas garante uma frequência máxima de batimento das asas de 5 Hz. Pelo ensaio em suspensão dá para entender que o centro de massa se encontra praticamente no ponto esperado. As hastes fornecem uma boa resistência à flexão e garantem que o binário transmitido às asas é utilizado. Uma das características que torna este projeto único é a utilização de alumínio que tem uma densidade idêntica à da fibra de carbono e apresenta uma grande resistência ao choque que é usual neste tipo de máquinas.

Ao nível eletrônico, todos os componentes trabalham como esperado e encontram-se bem dimensionados. As limitações deste sistema apenas ocorrem por causa do controlador RC que apenas transmite sinais PWM entre os 1,1 e 1,7 ms. Com um investimento mais alargado, é possível obter controladores que obedeçam a um intervalo entre os 1 e 2 ms sendo, desta forma, obtido um maior binário por parte do motor sem escovas.

Os testes efetuados permitem obter boas indicações acerca do funcionamento da máquina e das forças que esta exerce para se deslocar. No teste da força de propulsão é concluído que o valor esperado de 1,31 N se encontra dentro do intervalo de valores obtidos experimentalmente (que se situam entre 1 e 2 N). No teste de voo livre é possível entender que o ornitóptero obtém alguma estabilidade de voo mas não consegue atingir a força necessária de sustentação. Contudo, esta estabilidade está sempre dependente das rajadas de vento no local da experimentação, da forma como a máquina é lançada (como pode ser visto na Figura 56, a máquina é lançada já a fazer uma curva para a esquerda) e da habilidade do rádio modelista. Foi visto através de cálculos que é necessário atingir uma velocidade entre 10 e 11 m/s para garantir que a força do ar desloque a máquina para cima e, por este motivo, a utilização de um utensílio idêntico a uma fisga (ou uma rampa de lançamento) seria o ideal para transmitir a velocidade necessária, bem como para garantir uma trajetória estável na altura do lançamento. Neste teste também é possível verificar que a máquina faz um movimento balístico onde a extremidade da frente começa a deslocar-se para baixo. Por esta razão, duas alterações a serem experimentadas seriam aumentar a área da cauda ou aumentar a sua inclinação em relação à linha de raiz da asa, de forma a obter maior contribuição no ângulo de ataque obtido pelo ornitóptero. Esta alteração também envolve o investimento em novas peças, como as hastes e a peça onde a mesma é colada.

Segundo os testes elaborados, é possível verificar que a força de propulsão depende da frequência de batimento das asas. Através das equações obtidas por Linton, confirma-se este ponto no sentido em que ele diz que a força de propulsão depende da frequência de

batimento, da amplitude e das dimensões da asa, enquanto a força de sustentação depende da velocidade de voo, das dimensões da asa e do ângulo de ataque. Por este motivo, uma questão que pode ajudar no redimensionamento do ornitóptero é aumentar a área da asa tendo sempre em conta os valores para o número de Strouhal e relação de aspeto e, desta forma, diminuir a carga alar. Assim é possível realizar as forças necessárias ao voo com valores de velocidade ou frequência de batimento mais pequenos.

Referências Documentais

- [ACS] ACS Distance Education – Bird Wings,
<http://www.acsedu.co.uk/Info/Environment/Environmental-Science/Bird-Wings.aspx>.
- [AER] AeroVironment – Nano Hummingbird - <http://www.avinc.com/nano>.
- [AND03] ANDERSSON, Malte; WALLANDER, Johan – Kin selection and reciprocity in flight formation.
<http://beheco.oxfordjournals.org/content/15/1/158.full>, Behaviour Ecology 15: 158-162.
- [BEN1] BENSON, Tom – Lift from flow turning. Glenn Research Center,
<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/right2.html>.
- [BEN2] BENSON, Tom – Wing Geometry Definitions. Glenn Research Center,
<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/geom.html>.
- [BUL02] BULLEN, R.D; MCKENZIE, N.L – Scaling bat wingbeat frequency and amplitude. <http://jeb.biologists.org/content/205/17/2615.long>, J Exp Biol 205, 2615-2626, 2002.
- [COR03] CORUM, Jonathan – The Strouhal Number in Cruising Flight.
<http://style.org/strouhalflight>, 2003.
- [FIS11] FISCHER, Markus – Smartbird – bird flight deciphered. Festo -
http://www.festo.com/cms/en_corp/11369.htm, 54760 en 4/2011.
- [HEN08] HENDERSON, Carrol L. – Birds in Flight: The Art and Science of How Birds Fly. Voyageur Press, 2008.
- [LIN07a] LINTON, J Oliver – The physics of flight: II. Flapping Wings.
http://www.researchgate.net/publication/231013364_The_physics_of_flight_II_Flapping_wings, Phys. Edu. 42 358, 2007.
- [LIN07b] LINTON, J Oliver – The physics of flight: I. Fixed and Rotating Wings.
<http://iopscience.iop.org/0031-9120/42/4/003>, Phys. Edu. 42 351, 2007.

- [ORN] Ornithoper Zone – Full history of Ornithopters,
<http://www.ornithopter.org/history.full.shtml>
- [PEN01] PENNYCUICK, CJ – Speeds and wingbeat frequencies of migrating birds compared with calculated benchmarks.
<http://jeb.biologists.org/content/204/19/3283.full.pdf>, J Exp Biol 204, 3283-3294, 2001.
- [PEN96] PENNYCUICK, CJ – Wingbeat frequency of birds in steady flight: new data and improved predictions.
<http://jeb.biologists.org/content/199/7/1613.full.pdf>, J Exp Biol 199, 1613-1618, 1996.
- [QUI12] QUICK, Darren – TechJect’s DragonFly micro UAV flies like a bird and hovers like na insect. Gizmag - <http://www.gizmag.com/techject-dragonfly-microav/24900/>, 11/12.
- [RCG02] RC Groups Forum -
<http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=189849>, 10/02.
- [RCG08] RC Groups Forum -
<http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=822285>, 08/08.
- [SCI11] ScienceLearning – Wing Loading,
<http://www.sciencelearn.org.nz/Contexts/Flight/Science-Ideas-and-Concepts/Wing-loading>, 2011.
- [STE97] STERN, April A; KUNZ, Thomas H; BHATT, Sonal S. – Seasonal wing loading and the ontogeny of flight in phyllostomus hastatus (chiroptera: phyllostomidae).
<http://www.bu.edu/cecb/files/2009/08/jmamm19977841199-1209.pdf>, Journal of Mammalogy 78(4): 1199-1209, 1997.
- [TAY03] TAYLOR, Graham K; NUDDS, Robert L; THOMAS, Adrian L. R. – Flying and Swimming Animals Cruise at a Strouhal Number Ttuned for High Power Efficiency.
<http://www.see.ed.ac.uk/~shs/Climate%20change/Flettner%20ship/nature%20strouhal%20dolphin.pdf> - Nature 425 707-111, 2003.

- [TEC] TechJect - <http://techject.com>
- [THE] The Cornell Lab of Ornithology – Four Common Wing Shapes in Birds,
<http://www.birds.cornell.edu/education/kids/books/wingshapes>.
- [TOB07] TOBALSKE, Bret W. – Biomechanics of bird flight.
<http://jeb.biologists.org/content/210/18/3135.full>, J Exp Biol 210, 3135-3146.
- [WHI98] WHITE, Frank M. – Fluid Mechanics (Fourth Edition). McGraw-Hill Higher Education (December 28, 1998).

Anexo A. Dados de estudo dos seres vivos

[PEN96]

Table 2. *Species observed and wing measurements*

Taxonomic name	English name	Mass (kg)	Span (m)	Area (m ²)	Frequency	V (m s ⁻¹)	λ (m)	H
					\pm s.d. (Hz)			
<i>Diomedea exulans</i>	Wandering albatross	8.55	3.01	0.583	2.49 \pm 0.11	15.0	6.02	2.00
<i>Diomedea melanophris</i>	Black-browed albatross	3.08	2.19	0.354	2.97 \pm 0.15	13.3	4.48	2.04
<i>Macronectes giganteus/M. halli</i>	Giant petrel	3.24	1.98	0.326	3.14 \pm 0.19	15.2	4.84	2.44
<i>Procellaria aequinoctialis</i>	White-chinned petrel	1.23	1.41	0.167	3.93 \pm 0.10	–	–	–
<i>Daption capensis</i>	Cape pigeon	0.418	0.875	0.0773	5.61 \pm 0.55	12.3	2.19	2.51
<i>Pachyptila desolata</i>	Dove prion	0.155	0.635	0.0469	5.42 \pm 0.36	11.1	2.05	3.23
<i>Oceanites oceanicus</i>	Wilson's storm-petrel	0.035	0.396	0.0215	7.65 \pm 0.60	10.4	1.36	3.43
<i>Pelecanoides georgicus</i>	South Georgia diving petrel	0.122	0.388	0.0197	12.3 \pm 0.64	–	–	–
<i>Pelecanoides urinatrix</i>	Common diving petrel	0.133	0.408	0.0221	12.3 \pm 0.64	–	–	–
<i>Phalacrocorax atriceps</i>	Blue-eyed shag	2.23	1.13	0.183	5.85 \pm 0.25	–	–	–
<i>Catharacta skua</i>	Southern skua	1.69	1.43	0.241	3.95 \pm 0.21	–	–	–
<i>Larus dominicanus</i>	Kelp gull	0.890	1.41	0.228	3.46 \pm 0.16	–	–	–
<i>Chionis alba</i>	Sheathbill	0.610	0.822	0.105	6.35 \pm 0.29	–	–	–
<i>Anas georgica</i>	South Georgia pintail	0.437	0.682	0.0646	7.62 \pm 0.23	–	–	–
<i>Cygnus cygnus</i>	Whooper swan	8.50	2.26	0.589	3.56 \pm 0.11	–	–	–

The last three columns are included for comparison with Pennycuik (1990).

V , observed mean air speed from Pennycuik (1982); λ , wavelength; H , advance ratio assuming a stroke angle of 1 rad.

Frequencies based on 63–1118 wingbeats per species (mean 310).

[PEN01]

Table 1. *Wing measurements of the study species and numbers of speed runs and video recordings obtained for each*

Species		Mass (kg)	Wing span (m)	Wing area (m ²)	Speeds (N)		Video (N)	
					Runs	Observations	Records	Wingbeats
<i>Corvus corone</i>	Hooded crow	0.553	0.925	0.147	20	46	2	50
<i>Sturnus vulgaris</i>	Starling	0.0884	0.384	0.0251	11	13	20	1157
<i>Fringilla coelebs</i>	Chaffinch	0.0228	0.262	0.0130	101	213	12	146
<i>Buteo buteo</i>	Common buzzard	0.964	1.29	0.254	58	210	16	1003
<i>Accipiter nisus</i>	Sparrowhawk	0.196	0.611	0.0642	21	47	3	119
<i>Milvus milvus</i>	Red kite	0.851	1.50	0.304	41	209	8	403
<i>Ardea cinerea</i>	Grey heron	1.21	1.60	0.358	61	333	3	278
<i>Cygnus olor</i>	Mute swan	9.01	2.31	0.682	25	107	2	98
<i>Anas penelope</i>	Wigeon	0.770	0.822	0.0829	7	11	9	580
<i>Somateria mollissima</i>	Eider	1.39	0.978	0.131	2	2	34	1029
<i>Phalacrocorax carbo</i>	Cormorant	2.56	1.35	0.224	38	88	24	2064
<i>Columba palumbus</i>	Wood pigeon	0.495	0.751	0.0797	19	31	8	200
<i>Larus ridibundus</i>	Black-headed gull	0.280	0.963	0.0985	9	17	1	20
<i>Larus canus</i>	Common gull	0.364	1.10	0.138	40	164	6	520
<i>Larus argentatus</i>	Herring gull	0.925	1.35	0.200	112	444	2	166
<i>Larus marinus</i>	Great black-backed gull	1.51	1.66	0.290	88	398	7	493

[BUL02]

Table 1. Primary flight performance parameters (mean values) for species included in the study

Species	N	Mass, <i>m</i> (kg)	Wing span (m)	Wing area, <i>S</i> _{REF} (m ²)	Aspect ratio, span ² / <i>S</i> _{REF}	Wing loading, weight/ <i>S</i> _{REF} (N m ⁻²)
<i>Chalinolobus gouldii</i> ^a	24	0.0134	0.3457	0.01788	6.70	7.35
<i>Chalinolobus morio</i> ^a	13	0.0070	0.2877	0.01351	6.14	5.08
<i>Chalinolobus nigrogriseus</i> ^c	1	0.0065	0.2780	0.01218	6.35	5.24
<i>Hipposideros ater</i> ^c	13	0.0044	0.2489	0.01061	5.84	4.07
<i>Macroderma gigas</i> ^c	5	0.130	0.7590	0.09478	6.08	13.44
<i>Miniopterus schreibersii</i> ^c	15	0.0101	0.3409	0.01674	6.94	5.91
<i>Mormopterus planiceps</i> ^a	8	0.0086	0.2635	0.00959	7.25	8.69
<i>Nyctophilus arnhemensis</i> ^c	1	0.0071	0.3014	0.01561	5.82	4.46
<i>Nyctophilus geoffroyi</i> ^a	12	0.0057	0.2631	0.01222	5.68	4.74
<i>Nyctophilus gouldi</i> ^d	17	0.0100	0.3046	0.01597	5.82	6.14
<i>Nyctophilus timoriensis</i> ^g	12	0.0110	0.3219	0.01734	5.98	6.22
<i>Nyctophilus timoriensis</i> _{s/w} ^c	8	0.0142	0.3495	0.02027	6.03	6.88
<i>Pteropus poliocephalus</i> ^c	1	0.700	1.338	0.2582	6.93	26.59
<i>Pteropus scapulatus</i> ^c	3	0.412	1.106	0.1650	7.41	24.50
<i>Rhinonycteris aurantius</i> ^c	5	0.0086	0.3080	0.01507	6.29	5.60
<i>Saccolaimus flaviventris</i> ^b	4	0.0462	0.5750	0.03945	8.38	11.49
<i>Scotorepens balstoni</i> ^a	9	0.0080	0.2660	0.01130	6.27	6.95
<i>Scotorepens greyi</i> ^b	5	0.0070	0.2500	0.01010	6.19	6.80
<i>Tadarida australis</i> ^a	9	0.0353	0.4625	0.02584	8.28	13.40
<i>Taphozous georgianus</i> ^c	11	0.0281	0.4637	0.02811	7.74	9.81
<i>Taphozous hilli</i> ^c	11	0.0241	0.4616	0.02736	7.79	8.64
<i>Vespadelus finlaysoni</i> ^b	2	0.0056	0.2549	0.01042	6.24	5.27
<i>Vespadelus regulus</i> ^a	13	0.0047	0.2335	0.00891	6.12	5.17

^aBullen and McKenzie (2001); ^bR. D. Bullen and N. L. McKenzie, unpublished data; ^cMcKenzie et al. (1995a); ^dFullard et al. (1991); ^ethis study.

Although measurements are based on a single animal, *Pteropus poliocephalus* is included as an equivalent to the 700 g fruit bat studied by Carpenter (1985).

Refer to Materials and methods for the explanation of the two different populations of *Nyctophilus timoriensis*.

Anexo B. Servomotores

Neste anexo seguem as especificações dos servomotores HD-1160A


Apply Environmental Condition :			
No.	Item	Specification	
1-1	Storage Temperature Range	-20°C ~ 60°C	
1-2	Operating Temperature Range	-10°C ~ 50°C	
1-3	Operating Voltage Range	4.5V ~ 6V	
Standard Test Environment :			
2-1	Standard Test Environment	Every characteristic of the inspect must be normal temperature and humidity carry out the test , temperature 25±5°C and relative humidity 65±10% of judgment made in accordance with this specification standard testing conditions.	
Electrical Specification (Function of the Performance) :			
No.	Item	4.8V	6.0V
4-1	Operating speed (at no load)	0.12 sec/60°	0.11 sec/60°
4-2	Running current (at no load)	160 mA	180 mA
4-3	Stall torque (at locked)	2.0 kg-cm	2.7 kg-cm
4-4	Stall current (at locked)	680 mA	800 mA
4-5	Idle current (at stopped)	4 mA	5 mA
<i>Note: Item 4-2 definition is average value when the servo running with no load</i>			
Mechanical Specification :			
No.	Item	Specification	
5-1	Overall Dimensions	See the drawing	
5-2	Limit angle	180°± 10°	
5-3	Weight	17 ± 1 grams (without servo horn)	
5-4	Connector wire gauge	# 26 PVC	
5-5	Connector wire length	150 ± 5 mm	
5-6	Horn gear spline	25T/ φ 5.77	
5-7	Horn type	Cross , Disk , Star , Bar	
5-8	Reduction ratio	1/313	
Control Specification :			
No.	Item	Specification	
6-1	Control system	Pulse width modification	
6-2	Amplifier type	Analog controller	
6-3	Operating travel	90° (when 1000 → 2000 μ sec)	
6-4	Neutral position	1500 μ sec	
6-5	Dead band width	7 μ sec	
6-6	Rotating direction	Clockwise (when 1500 → 2000 μ sec)	
6-7	Pulse width range	800 → 2200 μ sec	
6-8	Maximum travel	Approx 165° (when 800 → 2200 μ sec)	

Anexo C. Motor sem escovas

Neste anexo são enunciadas as características do motor sem escovas SunnySky Angel Series A2212 de 800 KV.

SUNNYSKY Angel Series A2212 800KV 2-3S Airplane Outrunner Brushless Motor

Specification:

Motor:A2212 KV:800					
Technical Datas		Recommended Prop(inch)			
KV	800	Standard	2S-1245	Max thrust	3S-114
Configuration	12N14P		3S-1038/1045		
Stator Diameter	22mm				
STator Length	12mm				
Shaft Diameter	3mm				
Motor Dimension(Dia. * Len)	Φ27*30mm				
Weight(g)	50				
Idle current(10)@10v(A)	0.3				
No. of Cells(Lipo)	2-3S				
Max Continuous current(A)180S	10.5A				
Max Continuous Power(W)180S	115W				
Max. efficiency current	(3-8A)>81%				
Internal resistance	158mΩ				

Anexo D. ESC

Neste anexo são dadas as especificações do ESC utilizado.

Specifications:

PLUSH Series										
Class	Model	Cont. Current	Burst Current (>10s)	BEC Mode	BEC Output	Battery Cell		User Programmable	Weight	Size
						Li-ion Li-poly	NiMH NiCd			L*W*H
6A	PLUSH-6A	6A	8A	Linear	5V/0.8A	2	5-6	Available	6g	32*12*4.5
10A	PLUSH-10A	10A	12A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	9g	38*18*6
12A	PLUSH-12EA	12A	15A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	10g	38*18*7
18A	PLUSH-18A	18A	22A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	21g	55*25*6
25A	PLUSH-25A	25A	35A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	25g	55*25*9
30A	PLUSH-30A	30A	40A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	25g	55*25*9
40A	PLUSH-40A	40A	55A	Switch	5V/3A	2-6	5-18	Available	39g	60*28*12
	PLUSH-40A-OPTO	40A	55A	N/A	N/A	2-6	5-18	Available	35g	60*28*12
60A	PLUSH-60A	60A	80A	Switch	5V/3A	2-6	5-18	Available	63g	83*31*16
	PLUSH-60A-OPTO	60A	80A	N/A	N/A	2-6	5-18	Available	60g	83*31*14
80A	PLUSH-80A	80A	100A	Switch	5V/3A	2-6	5-18	Available	72g	83*31*16
	PLUSH-80A-OPTO	80A	100A	N/A	N/A	2-6	5-18	Available	69g	83*31*14

BASIC Series										
Class	Model	Cont. Current	Burst Current (>10s)	BEC Mode	BEC Output	Battery Cell		User Programmable	Weight	Size
						Li-ion Li-poly	NiMH NiCd			L*W*H
18A	BASIC-18A	18A	22A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	21g	55*25*6
25A	BASIC-25A	25A	35A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	25g	55*25*9

BEC Output Capability	Linear Mode BEC(5V/2A)				Switch Mode BEC(5V/3A)	
	2S Li-Poly	3S Li-Poly	4S Li-Poly	5S Li-Poly	2S — 4S Li-Poly	5S Li-Poly
Standard micro servos(Max.)	5	4	3	2	5	4

Note1: BEC means the "Battery Elimination Circuit". It is a DC-DC voltage regulator to supply the receiver and other equipments from the main battery pack. With the build-in BEC, the receiver needn't to be supplied with an additional battery pack.

Anexo E. Arduino Nano

Neste anexo são dadas as especificações do Arduino Nano 3.0 fornecidas no *site* da Arduino.

Specifications:

Microcontroller	Atmel ATmega168 or ATmega328
Operating Voltage (logic level)	5 V
Input Voltage (recommended)	7-12 V
Input Voltage (limits)	6-20 V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	8
DC Current per I/O Pin	40 mA
Flash Memory	16 KB (ATmega168) or 32 KB (ATmega328) of which 2 KB used by bootloader
SRAM	1 KB (ATmega168) or 2 KB (ATmega328)
EEPROM	512 bytes (ATmega168) or 1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz
Dimensions	0.73" x 1.70"
Length	45 mm
Width	18 mm
Weight	5 g

Anexo F. Modo de contagem CTC

Neste anexo são descritos os parâmetros necessários ao código do Arduino de forma a obter um modo de contagem específico para o processador ATmega328.

Table 18-8. Waveform Generation Mode Bit Description

Mode	WGM22	WGM21	WGM20	Timer/Counter Mode of Operation	TOP	Update of OCRx at	TOV Flag Set on ⁽¹⁾⁽²⁾
0	0	0	0	Normal	0xFF	Immediate	MAX
1	0	0	1	PWM, Phase Correct	0xFF	TOP	BOTTOM
2	0	1	0	CTC	OCRA	Immediate	MAX
3	0	1	1	Fast PWM	0xFF	BOTTOM	MAX
4	1	0	0	Reserved	-	-	-
5	1	0	1	PWM, Phase Correct	OCRA	TOP	BOTTOM
6	1	1	0	Reserved	-	-	-
7	1	1	1	Fast PWM	OCRA	BOTTOM	TOP

Notes: 1. MAX= 0xFF
2. BOTTOM= 0x00

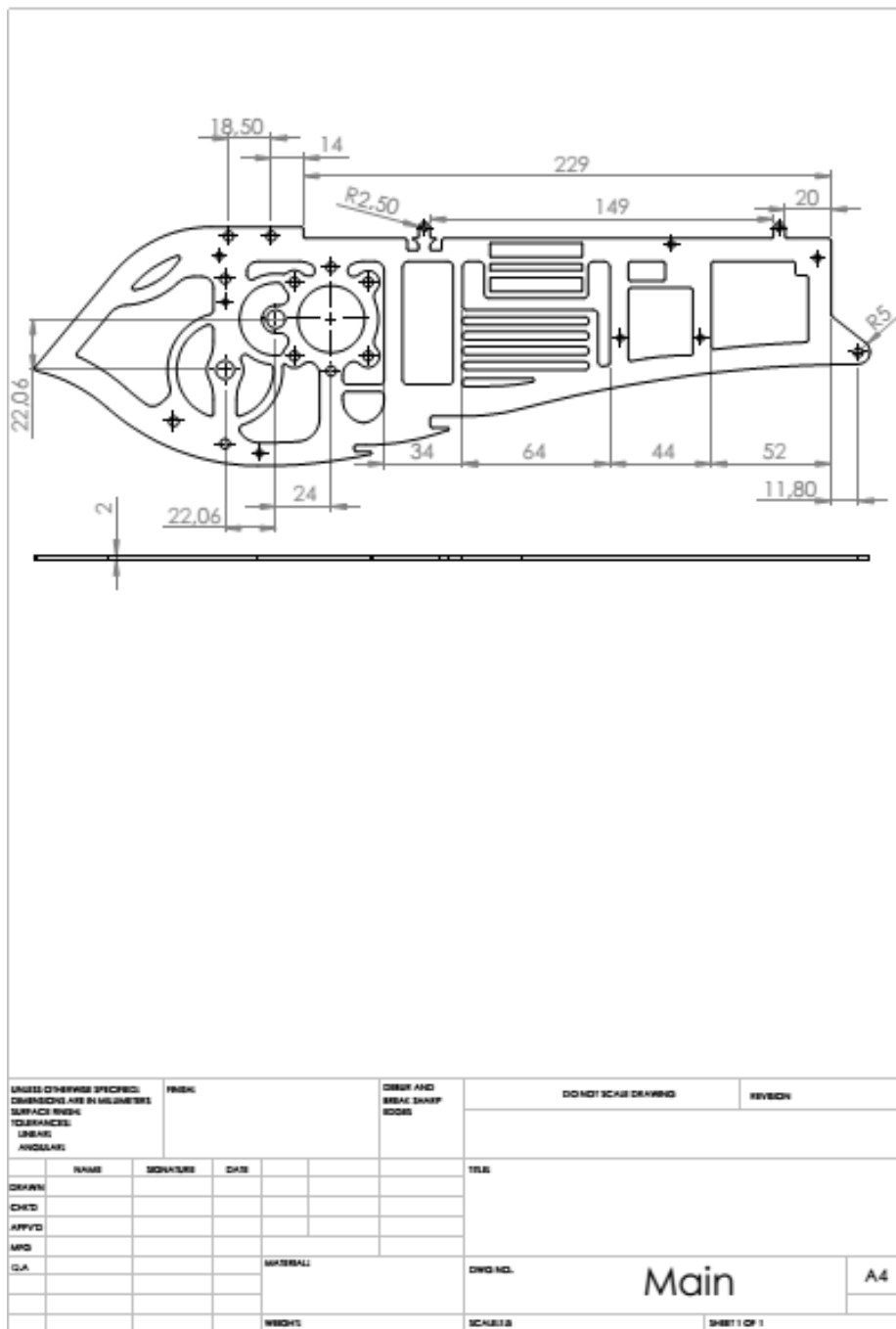
Table 18-9. Clock Select Bit Description

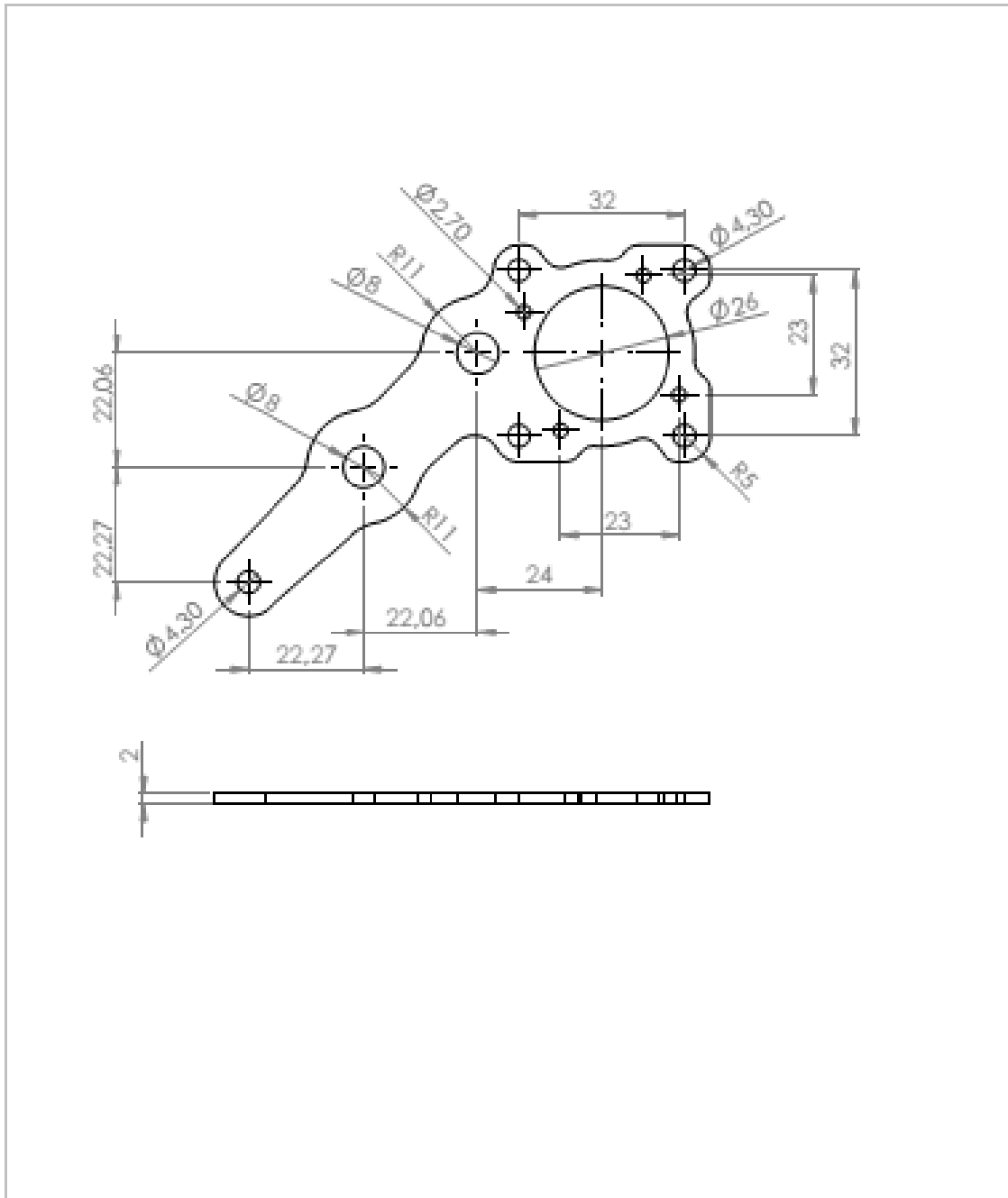
CS22	CS21	CS20	Description
1	0	1	$\text{clk}_{T2S}/128$ (From prescaler)
1	1	0	$\text{clk}_{T2S}/256$ (From prescaler)
1	1	1	$\text{clk}_{T2S}/1024$ (From prescaler)

If external pin modes are used for the Timer/Counter0, transitions on the T0 pin will clock the counter even if the pin is configured as an output. This feature allows software control of the counting.

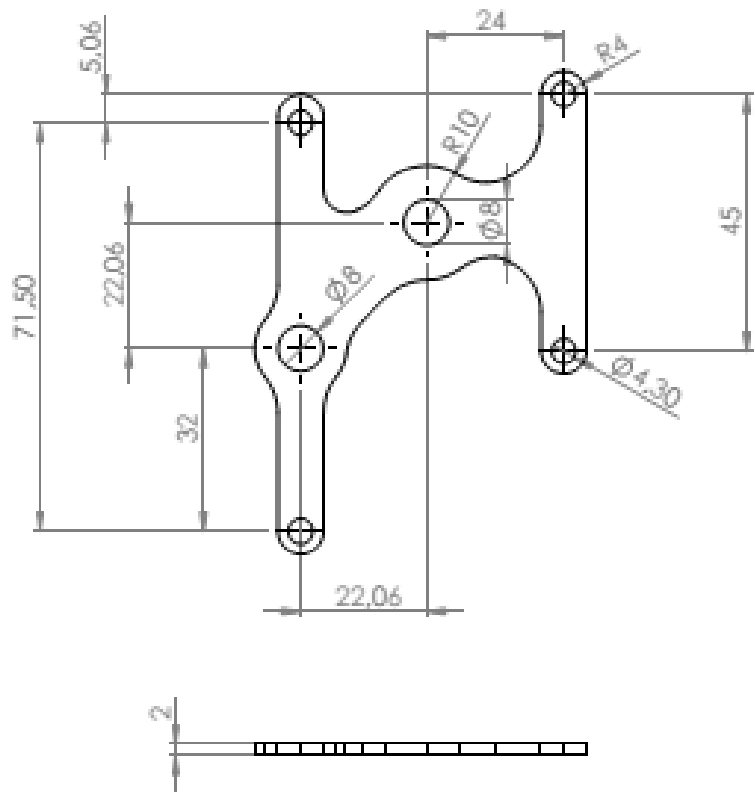
Anexo G. Desenhos técnicos

Neste anexo encontram-se os desenhos técnicos referentes às peças utilizadas no projeto. A título de nota, algumas peças encontram-se incompletas na sua cotagem devido à complexidade da sua geometria.

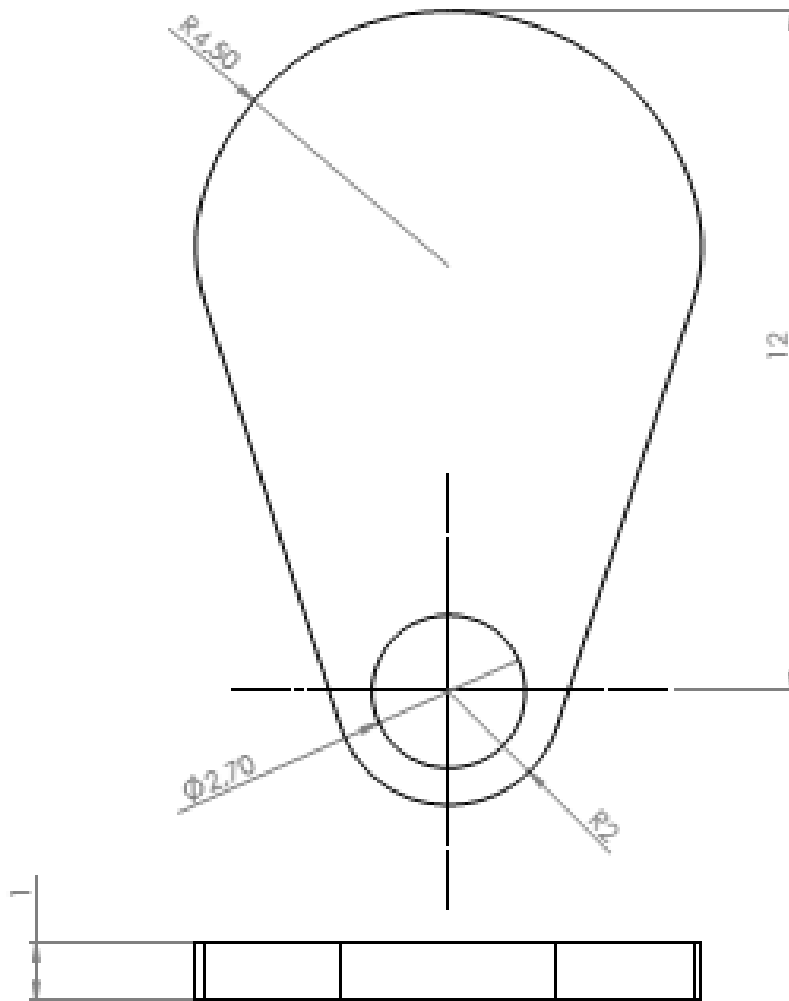




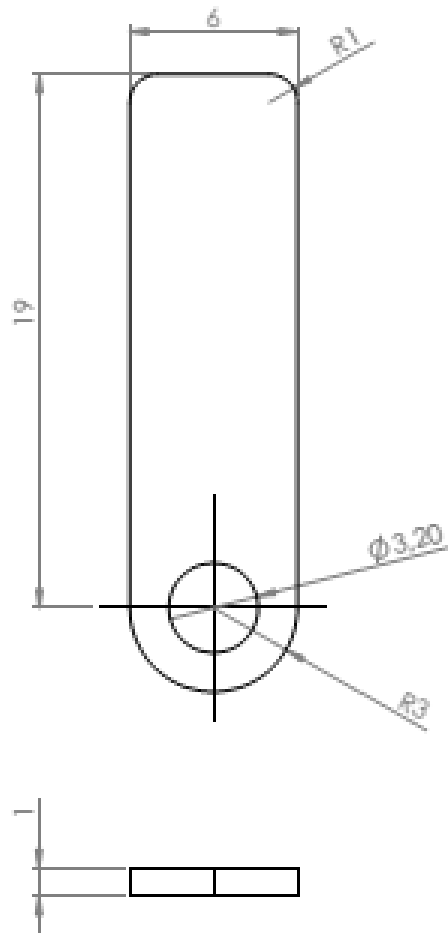
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: UNLESS OTHERWISE		FINISH		DRESS AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME	DESIGNER	DATE				TITLE			
DRAWN						DWG NO. Acessorio motor2 A4			
CHECK									
APPROV									
DATE									
		MATERIAL		WEIGHT		SCALE		SHEET 1 OF 1	



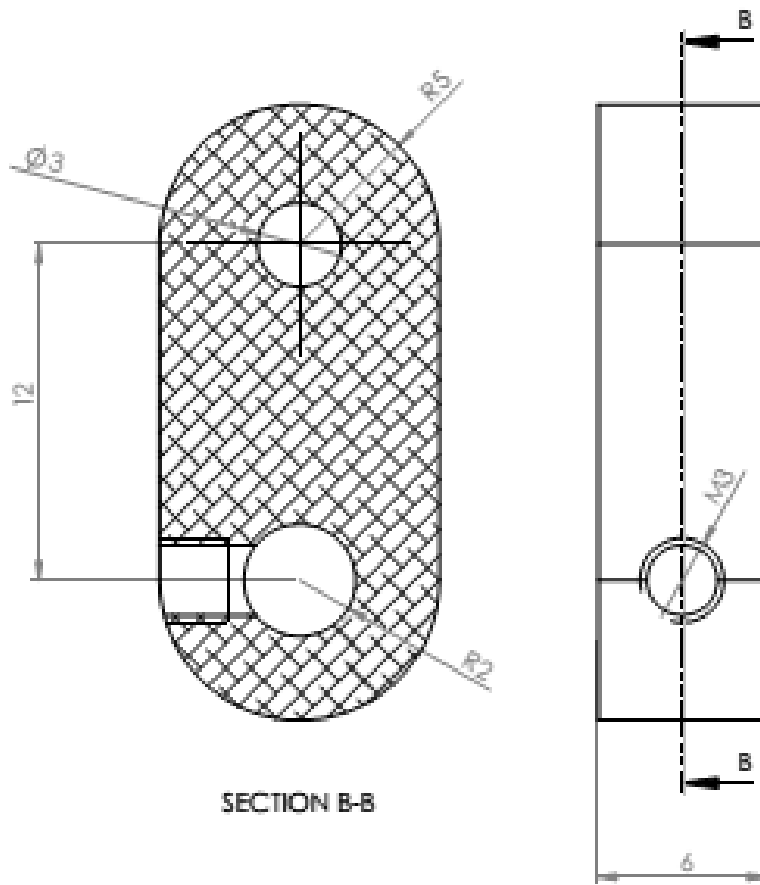
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES UNLESS INDICATED				FINISH		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME				SIGNATURE		DATE		TITLE			
DESIGN											
CHKD.											
APPVD.											
WFO											
CLA						MATERIAL		DWG NO.		A4	
								Main22			
						WEIGHT		SCALE		SHEET 1 OF 1	



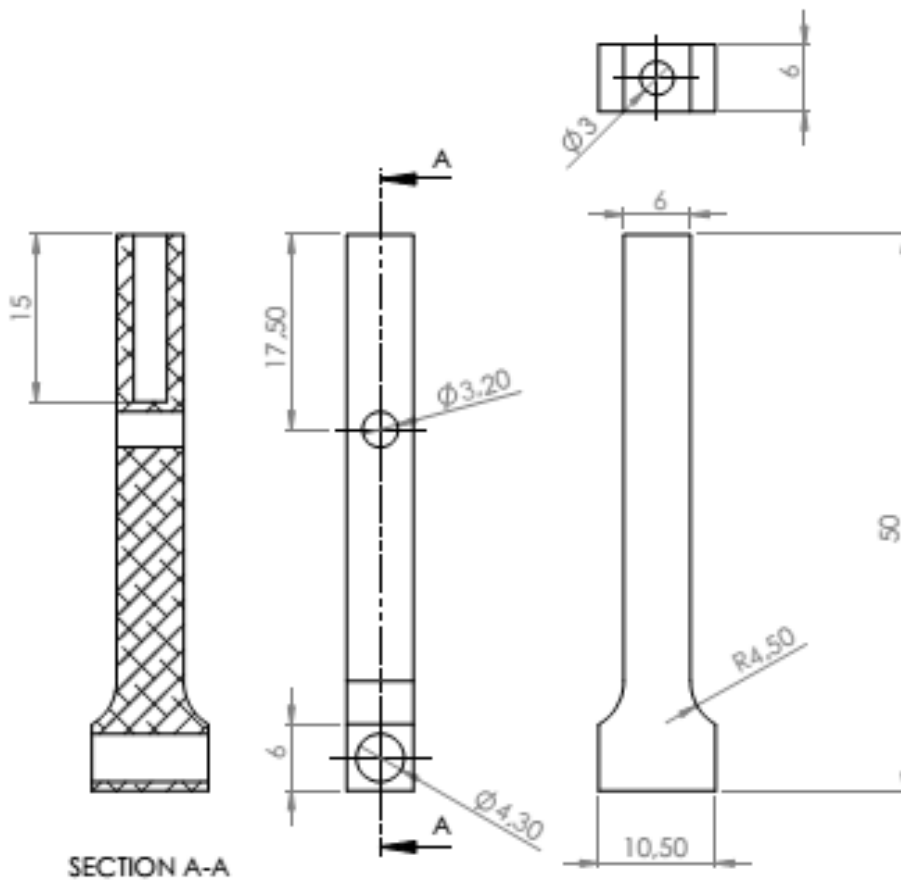
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACES UNLESS INDICATED FINISH ANGULAR				TITLE AND SHEET NUMBER TITLE		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
				TITLE					
DATE	NAME	DESIGNED BY	DATE						
DATE									
DATE									
DATE									
DATE									
				DRAWING NO.		Acoplamiento imant ^{A4}			
				SCALE				SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		TOLERANCES FRACTIONS DECIMALS		DIMENSIONS HOLE DIA. TAP DIA.		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME	DESIGNED BY	DATE				TITLE			
DRAWN									
CHECKED									
APPROVED									
DATE									
			MATERIAL			DRAWING		Acoplamento sensor	
			WEIGHT			SCALE		SHEET 1 OF 1	

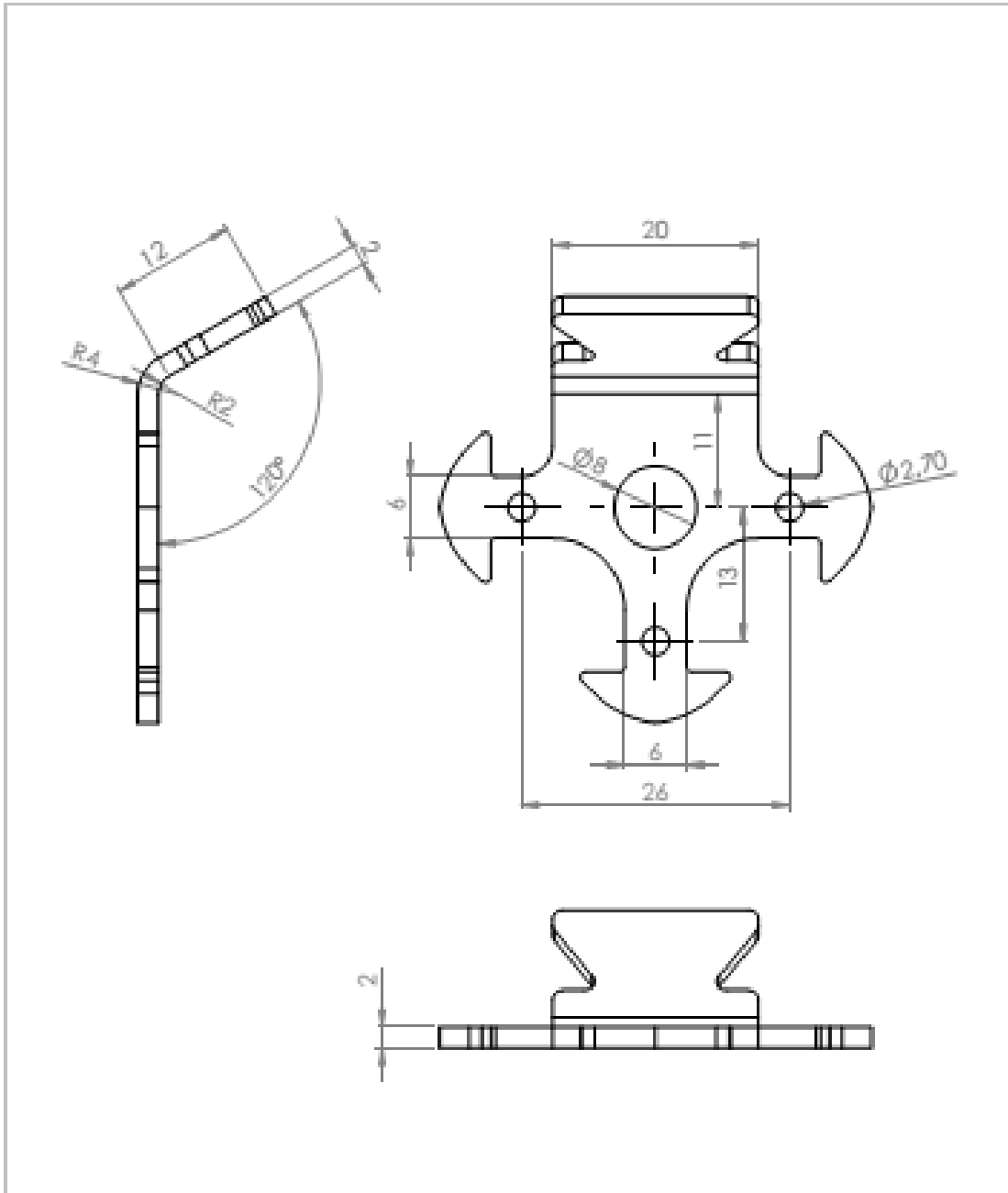


ALL DIMENSIONS UNLESS SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACES UNLESS SPECIFIED FINISH AS SHOWN		FINISH		DRILL AND REAM BORE EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE		SCALE	
DESIGNER		CHECKED		APPROVED		DATE		SHEET NO.	
DRAFTER		DATE		PROJECT NO.		PROJECT NAME		SHEET TOTAL	
TITLE		PROJECT NO.		PROJECT NAME		SHEET NO.		SHEET TOTAL	
PROJECT NO.		PROJECT NAME		SHEET NO.		SHEET TOTAL		PROJECT TITLE	
PROJECT TITLE		SHEET NO.		SHEET TOTAL		PROJECT NO.		PROJECT NAME	
SHEET NO.		SHEET TOTAL		PROJECT NO.		PROJECT NAME		SHEET TITLE	
SHEET TITLE		PROJECT NO.		PROJECT NAME		SHEET NO.		SHEET TOTAL	

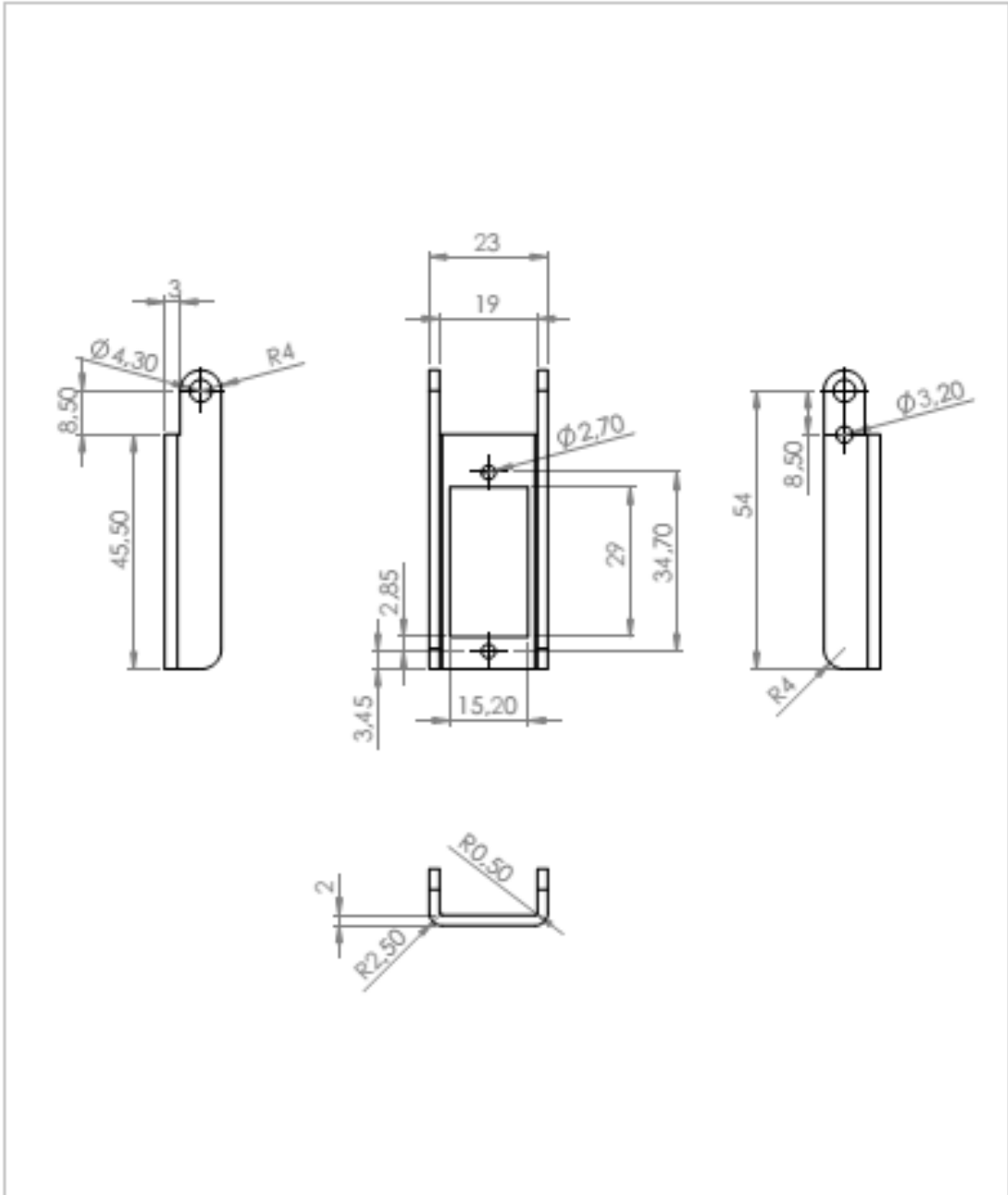


SECTION A-A

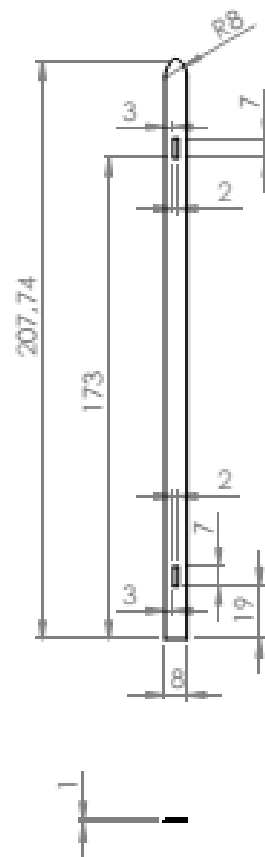
UNITS DIMENSIONS SPECIFIC DIMENSIONS ARE IN MILLIMETRES SURFACE FINISH TOLERANCES LINEAR ANGULAR				FINISH	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE	
DESIGN						Articulação da asa²⁴	
CHECK							
APPROV							
MFG							
QA				MATERIAL		SCALE	SHEET 1 OF 1
				WEIGHT			



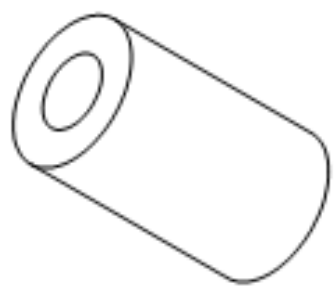
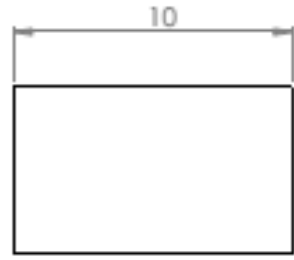
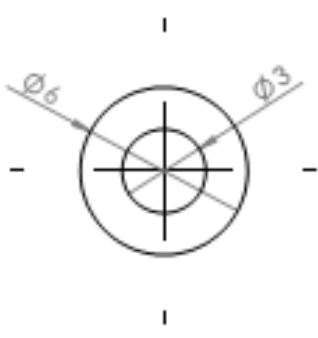
UNES DIBUJOS UNICOS DIMENSIONES EN MILIMETROS TOLERANCIAS: ANGULO: ANGULAR				REVISOR		DISEÑO Y/O REALIZADO POR:		NO HAY QUE DIBUJAR		REVISOR	
DIBUJANTE DISEÑO APROBADO V.P. C.A.	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	C.A.B.	MATERIAL	MEDIDA	DIBUJO NO.	Cauda aplique		A4		HOJA 1 OF 1



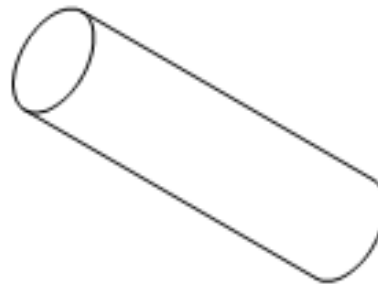
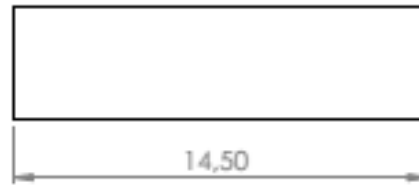
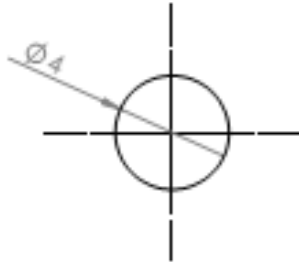
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH		DRAW AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE			
DESIGN						DWG NO. Chapa servo leme ^{A4}			
CHKD									
APP'D									
MFG									
CLA									
				MATERIAL		SCALE/1		SHEET 1 OF 1	
				WEIGHT					



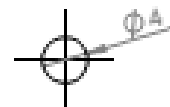
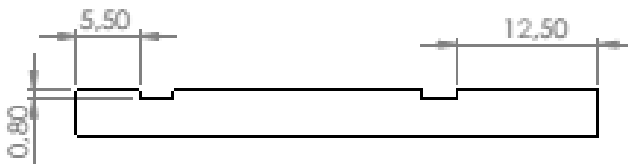
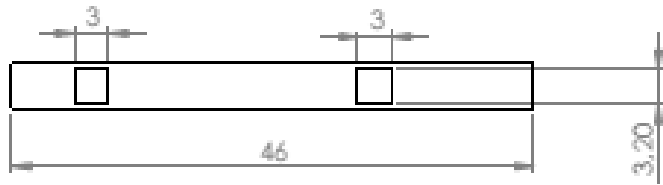
ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS: DIMENSÕES EM MILÍMETROS SUPERFÍCIE FINIDA TOLERÂNCIAS: UNHAS ANOTAÇÕES		TITULO:		DESENHO E REVISÃO:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISÃO:	
	NOME	SIGNATURA	DATA			NOTA:			
DESENH									
CHIEF									
APPV									
REP									
CLA					MATERIAL:	DWG. NO.	Espinha da asa		A4
					WEIGHT:	SCHUB:	SHEET 1 OF 1		



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETRES SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME			SIGNATURE		DATE		TITLE			
DESIGN										
CHECK										
APPROV										
MFG										
QA					MATERIAL		DWG NO.		A4	
							Tubo sensor			
					WEIGHT		SCALE		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES LINEAR ANGULAR		FINISH		DRAFT AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME	NUMBER	DATE				TITLE			
DRAWN						<p style="font-size: 2em; font-weight: bold;">Veio 2 articulação frontal</p>			
CHECKED									
APPROVED									
MPO									
CLA									
				MATERIAL		SCALE	SHEET 1 OF 1		



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: H/RAZ R/REGULAR				FINISH		CHAMF AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				SIGNATURE		DATE		TUB			
CHKD											
APPVD											
MFD											
QA						MATERIAL		DWG NO.		A4	
								Veio 5			
						WEIGHT		SCHEDULE		SHEET 1 OF 1	

