



O VOO DO ORNITÓPTERO COMO PROPOSTA PARA ENSINO DE FÍSICA ASSOCIADO À AERODINÂMICA

THE FLIGHT OF THE ORNITHOPTER AS A PROPOSAL TO TEACH THE PHYSICS ASSOCIATED WITH AERODYNAMICS

Victor Ciro Solano Reynoso¹

Mario Pinto Carneiro Junior²

RESUMO: O objetivo do presente trabalho é apresentar os resultados de um estudo teórico conceitual sobre a aerodinâmica do voo e da cinemática do batimento das asas de um ornitóptero, além de descrever a construção de um modelo educacional de baixo custo para uso em atividades de ensino e divulgação da física. O entendimento da teoria do voo dos objetos voadores e a sua aplicação prática contribuem para o conhecimento de conceitos físicos e fornecem motivação suficiente para o aprendizado do aluno devido à conexão da teoria com a prática presente na atividade proposta. O trabalho foi desenvolvido a partir de uma pesquisa bibliográfica, unindo análise e discussão teórica/qualitativa dos conceitos físicos envolvidos na descrição do voo e do trabalho experimental. Introduzimos conceitos físicos sobre o movimento do ar e das forças aerodinâmicas produzidas no objeto voador, temas que são pouco abordados no ensino médio, mas que têm relevância atual. Procuramos fazer a explicação da física do batimento de asas para obter uma visão sobre como as aves e insetos voam e discutimos as semelhanças e diferenças entre o voo de um avião, dos pássaros e insetos. Os principais resultados deste trabalho são a elaboração de uma descrição qualitativa sistemática dos conceitos físicos de voo de um ornitóptero e a técnica de construção artesanal de um modelo educacional simples utilizando materiais de fácil acesso e baixo custo.

PALAVRAS-CHAVE: Aerodinâmica. Teoria do voo. Ornítóptero. Ensino de Física.

ABSTRACT: The purpose of this work is to present the results of a theoretical and conceptual study on the aerodynamics of flight and the kinematics of the wingbeat of an ornithopter, in addition to describing the construction of a low-cost educational model for use in teaching and dissemination activities in physics. Understanding the theory of the flight of flying objects and its practical applications contribute to the knowledge of physical concepts and provide sufficient motivation to students to learn due to the connection between theory and practice involved in the proposed activity. The work was developed based on bibliographic research, combining theoretical/qualitative analysis and discussion of the physical concepts involved in the description of flight and experimental work. We introduce physical concepts about the movement of air and the aerodynamic forces produced in the flying object, topics that are rarely covered in high school, but are relevant today. We try to explain the physics of wingbeat to gain insight into how birds and insects fly and discuss the similarities and differences in the description of the flight of an airplane, birds and insects. The main results of this work are the elaboration of a systematic qualitative description of the physical concepts of the flight of an ornithopter and the technique of artisanal construction of a simple educational model using easily accessible and low-cost materials.

KEYWORDS: Aerodynamics. Flight theory. Ornithopter. Physics teaching.

¹ Universidade Estadual Paulista. E-mail: solano.reynoso@unesp.br

<https://orcid.org/0000-0003-2563-4088>

² Universidade Estadual Paulista. E-mail: mario.carneiro@unesp.br

<https://orcid.org/0009-0008-8401-1837>

● Informações completas no final do texto

Introdução

É muito grande a quantidade de seres biológicos voadores, começando dos diminutos insetos até as aves de diversos tamanhos e tipos. A curiosidade do ser humano por imitar o voo vem desde a antiguidade e a motivação do homem para tentar reproduzir o voo de pássaros e insetos foi grande. Um exemplo disso são os primeiros desenhos de Leonardo da Vinci de objetos voadores.

As primeiras tentativas de construir objetos voadores para uso humano, os globos aerostáticos, começaram desde finais do século XIX. Posteriormente, no início do século XX, ficou demonstrada a possibilidade de voar com Santos Dumont, Otto Lilienthal, irmãos Wright, entre outros, sendo construídos aviões de diversos modelos e configurações. Nesse caminho, o estudo e entendimento da física sobre a aerodinâmica do voo foram se desenvolvendo rapidamente e, por sua vez, alcançando avanços tecnológicos que permitiram a construção de tipos de aeronaves para diversos usos. Esse processo de avanço da ciência e da tecnologia do voo de aeronaves foi grande no século XX e no presente, de modo que muitas tecnologias relacionadas evoluíram e as pesquisas continuam nessa direção, na construção de aeronaves mais modernas.

Imitar o voo de pássaros e insetos é um tema atual de interesse e há propostas de pesquisa acadêmica em diversas áreas da ciência e da tecnologia. Sabe-se que a característica fundamental das aves e insetos voadores é que, graças a sua complexa morfologia, são criaturas que podem se impulsionar, manter, pousar, realizar manobras árduas e, além disso, possuem um sistema de controle e estabilidade inigualável. É sabido que o voo dos pássaros e insetos ocorre pelo batimento das asas, mas cada um deles revela características e capacidades de voo particulares e, devido a isso, podem ser observadas diferenças. Para desenvolver o estudo do tema, foi feita a separação em dois grupos: o sistema mecânico que imita o voo dos pássaros é chamado de ornitóptero, e o que imita o voo dos insetos é chamado de entomóptero. Neste trabalho utilizaremos o termo ornitóptero de forma geral.

Todos sabem que o pássaro voa porque bate as asas, o que não todos sabem é: porque ao bater as asas, ele voa? Neste ponto, para tentar responder a esta questão temos a teoria da aerodinâmica (trata do movimento dos fluidos) que está relacionado ao estudo das várias forças que surgem pelo movimento do ar interagindo com o objeto imerso no

fluido em questão; assim, esta interação permite que ocorra o voo dos objetos, de um avião, dos pássaros e dos insetos.

Existem diversos trabalhos de pesquisa sobre modelar e reproduzir o voo de aves e insetos que podem ser mencionados e, na revisão bibliográfica, para desenvolver o tema proposto sobre a aerodinâmica do ornitóptero, foram encontrados estudos que chamaram nossa atenção. O livro escrito por Homa (2010) aborda muitos aspectos qualitativos sobre o voo de uma aeronave e sua relação com a aerodinâmica. O artigo de Studart e Dahmen (2006) relaciona a Física do Voo com a sala de aula, e aborda principalmente a descrição das forças aerodinâmicas que atuam no avião, representando um trabalho importante sobre este tema.

Percebeu-se uma escassez na literatura sobre o uso do estudo da aerodinâmica de um ornitóptero como método de ensino. Entretanto, em relação a estudos acadêmicos de diversas áreas de ciência e engenharia, foram encontrados muitos trabalhos de tese e artigos que abordam o tema nos seus diferentes aspectos. Dentre eles, podemos destacar: Malik e Ahmad (2010) que estudaram o efeito de diferentes parâmetros de projeto na sustentação, empuxo e arrasto de um ornitóptero. No trabalho, os autores usaram um tipo de modelo de lâmina elementar para desenvolver o modelo aerodinâmico para a forma de asa semi-elíptica; fizeram o estudo paramétrico para mostrar o efeito dos diferentes parâmetros nas forças de sustentação, empuxo e arrasto para melhor compreensão do voo do ornitóptero.

Trevino-Sánchez et al (2017), cujo trabalho apresenta um modelo matemático de um ornitóptero e as forças que atuam nele para favorecer o voo, procuraram estudar mais a fundo o movimento da cauda com dois graus de liberdade para permitir o controle da postura e velocidade do ornitóptero. O trabalho tem o intuito de desenvolver um sistema robótico deste denominado UAV (Veículos Aéreos Autônomos).

Djojodihardjoa et al (2012), por sua vez, fazem uma abordagem genérica para modelar a cinemática e a aerodinâmica do ornitóptero imitando o batimento da asa para produzir sustentação e empuxo para pairar e voar para frente, considerando o movimento de uma asa fina, rígida e tridimensional. Eles utilizaram um enfoque de conceitos denominado Abordagem Aerodinâmica Instável Básica, introduzindo características salientes de efeito viscoso e sucção de ponta. Um estudo paramétrico é realizado para revelar as características aerodinâmicas de voo do ornitóptero e para favorecer a análise

de vários modelos simples, em um esforço para desenvolver um modelo de ornitóptero voador.

González-Rangel (2022) pesquisou o comportamento do fluxo de ar na interação das asas de um protótipo de ornitóptero utilizando simulações numéricas, velocimetria de partículas por imagens (PIV) e decomposição ortogonal apropriada (POD). Além disso, desenvolveu um protótipo que simula a frequência de batimento das asas de uma borboleta; obtendo resultados que mostram a formação de vórtices na parte superior e inferior da asa; esses vórtices são muito importantes, pois o voo deste tipo de inseto utiliza estes efeitos. O estudo também determinou características relevantes que descrevem o comportamento da interação do fluido com a asa.

DeLaurier (1994) analisou o voo mediante o batimento das asas dos animais e aplica os princípios na construção de um aeroplano que bate asas como o ornitóptero, procurando desenvolver ideias e conceitos para este fim. O foco principal foi realizar o teste de voo para provar o conceito de um ornitóptero pilotado remotamente e movido a motor. Observa-se que o artigo é antigo e que, 30 anos atrás, já se procurava automatizar o voo do ornitóptero.

Em relação ao ensino, sabemos que atualmente há propostas para utilização de métodos didáticos que sejam diferentes daqueles propostos pelo ensino tradicional. Assim, a partir dessa linha de pensamento, busca-se para as aulas de Física, propor temas que permitam o entendimento da teoria com o experimento. Com esse intuito, almeja-se que os alunos busquem novos conceitos e instrumentos que valorizem e estimulem a construção do conhecimento de forma independente, tornando o aprendizado mais significativo.

Dentro da vastidão de temas de física a serem abordados, podemos nos questionar: quais ações e que tipo de experimentação podem levar a um melhor desenvolvimento da compreensão dos conceitos físicos? É claro que temos muitos temas da física que podem ser trabalhados. No caso, propomos utilizar o tema da aerodinâmica, que trata do movimento dos fluidos (gases e líquidos) e que tem conexão com o voo de objetos e de seres biológicos como pássaros e insetos presentes no nosso cotidiano. Assim, o objetivo do presente trabalho é apresentar os resultados de um estudo teórico conceitual sobre a aerodinâmica do voo e da cinemática do batimento das asas de um ornitóptero, além de descrever a construção de um modelo educacional de baixo custo para uso em atividades de ensino e divulgação da física.

O tema escolhido para este trabalho pode ser difícil de ser abordado, pois introduz o aprendizado de muitos conceitos físicos relacionados ao voo, sendo um ponto de partida importante e, de fato, interessante, pois procura entender o voo dos seres biológicos e reproduzi-lo através do desenho e da construção de um protótipo mecânico. Nesse processo de ensino e aprendizagem, a conexão com outras áreas, como a biologia, a engenharia mecânica, a engenharia aeroespacial, entre outras, pode chamar a atenção, já que estão correlacionadas com a vida cotidiana.

A curiosidade do aluno para entender o porquê das coisas de forma geral, agora poderá ser relacionado ao caso particular do voo dos aviões e de seres biológicos voadores, será uma grande aliada para o aprendizado, pois pode promover discussão de temas relevantes e troca de ideias e conceitos relacionados à sua realização prática. Assim, a justificativa para este trabalho que se propõe a desenvolver uma abordagem qualitativa, é o fato de oferecer uma maneira de entender os fenômenos relacionados com a aerodinâmica em geral e a sua relação com o entendimento do voo de modelos para poder utilizá-lo como fonte de estudos e experimentação para as aulas de física e projetos de divulgação para a comunidade.

Nesse contexto, compreendemos que discutir a teoria relacionada ao voo do avião e do orníptero e fazer uma atividade prática por meio da qual seja possível experimentar a construção de um modelo voador simples, mas significativo, podem motivar o aluno. Nesse processo, os conteúdos sobre a aerodinâmica passam a ter um viés mais interativo de modo que a teoria, além de auxiliar no entendimento, pode provocar a criatividade dos alunos que terão a oportunidade de propor, desenhar e construir, dentro das possibilidades, os mecanismos mais eficientes de movimentação das asas e partes do próprio orníptero, como o desenho do corpo, da asa e da cauda, por exemplo. relacionados a atividade de construção do modelo para logo após experimentar as situações reais de voo. Essas propostas estão relacionadas à atividade de construção do modelo e permitirão que, logo após, seja possível experimentar situações reais de voo. Dessa forma, acreditamos que poderão aumentar o seu conhecimento tanto teórico como experimental desses temas.

Aspectos Metodológicos

O trabalho foi desenvolvido partindo de um levantamento bibliográfico, a partir do qual foi feito um desenvolvimento teórico de forma sucinta e qualitativa sobre a

aerodinâmica, sem abordar modelos matemáticos sobre o tema. É então apresentada uma descrição sobre as forças aerodinâmicas relacionadas ao voo de um avião introduzindo conceitos importantes para a descrição do voo. Baseados no entendimento do voo do avião, descreve-se o voo do pássaro realizado pela complexa movimentação do batimento da sua asa. A seguir, com base no levantamento bibliográfico sobre o tema, procurou-se descrever o movimento oscilante das asas do ornitóptero fazendo o uso de uma função harmônica semelhante ao de um oscilador harmônico simples para o entendimento conceitual do fenômeno. Ao final, foi desenvolvida uma parte experimental que consistiu no planejamento, desenho e construção de um ornitóptero simples de forma articulada para exemplificar o movimento.

Nessa construção, foram utilizados materiais de baixo custo, principalmente madeira balsa e plásticos leves para as asas. Foi construído um mecanismo de acionamento das batidas das asas por um sistema mecânico simples, utilizando a propriedade do elástico enrolado, que armazena energia potencial elástica. O desenho simples possibilita a sua reprodução por professores interessados em utilizar o objeto educacional para a introdução e o estudo do tema.

Para dinamizar a exposição dos resultados, foi feita uma separação entre os resultados teóricos, que apresentam a elaboração de uma descrição qualitativa sistemática dos conceitos físicos de voo de um ornitóptero e os resultados experimentais, que mostram a técnica de construção artesanal de um modelo educacional com materiais acessíveis.

Resultados e discussões: aspectos teóricos e construção de um modelo educacional de ornitóptero

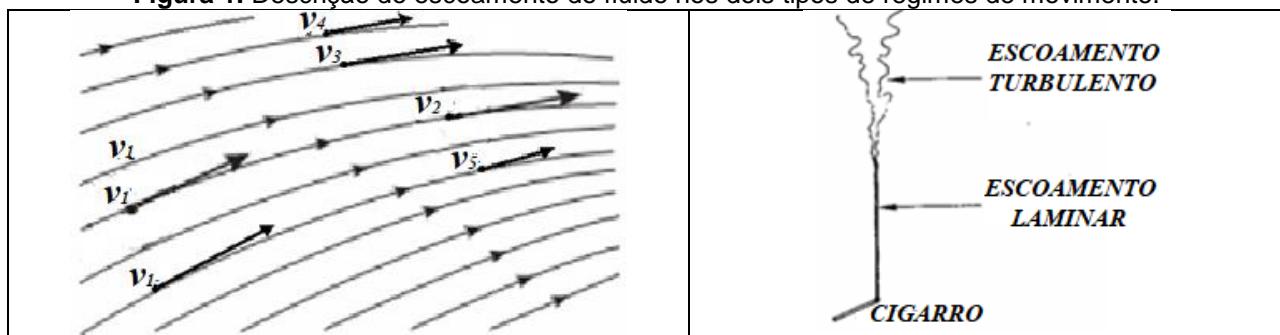
I. Fundamentos Conceituais da Aerodinâmica do Voo

Para começar, vamos abordar as ideias fundamentais sobre a aerodinâmica, um tema importante da física e que também é de interesse tecnológico. Esta área estuda os efeitos do movimento do ar (fluído) na sua interação com os corpos. Primeiramente é introduzida a descrição do escoamento do fluido, conceito que ajudará a entender a descrição das forças aerodinâmicas que aparecem devido ao movimento do ar quando interage com um objeto qualquer, neste caso, o avião. Também é ampliada a descrição da força de arrasto como uma parte importante. Na sequência, é feita a descrição sucinta do voo de um pássaro conectando ao voo do ornitóptero, fazendo uma descrição desse voo.

I.1. O movimento do fluido, escoamento do ar e linhas de corrente

Temos um conceito importante chamado escoamento, que descreve o movimento do fluido seja ele líquido ou gasoso. Este conceito utilizado na física introduz a ideia do movimento que, no caso do ar, é composto de muitas partículas, principalmente moléculas de nitrogênio e oxigênio (N_2 e O_2 , respectivamente), as quais estão sempre em movimento na atmosfera. Sabemos que o movimento do ar é muito complexo e pode ser aleatório: as correntes de ar na atmosfera podem seguir uma trajetória onde as velocidades das moléculas podem ser constantes, variáveis ou aleatórias. A descrição deste movimento na física dos fluidos é modelada resumidamente de duas formas: (a) a primeira, chamada de laminar ou lamelar, descreve que as partículas do fluido seguem trajetórias retas ou curvas bem definidas com velocidades iguais ou variáveis ponto a ponto durante a trajetória, inferindo que a velocidade do fluido é dependente da posição em relação a um sistema referencial. As trajetórias que as partículas do fluido seguem são chamadas de linhas de corrente e estas podem ser descritas a ocorrer numa certa região do espaço, ocupando uma região plana ou ocupando um certo volume. (b) A segunda, chamada de turbulento, ocorre quando as moléculas do ar numa certa região do espaço estão com movimento desordenado, fugindo da trajetória de uma linha de corrente. As velocidades das moléculas podem ser extremamente altas e variáveis também na sua direção de movimento, e devido a isso, não consigam mais seguir uma linha de corrente: as moléculas do fluido adquirem trajetórias indefinidas e as linhas de corrente são quebradas, indicando que o movimento das partículas fica ao acaso. Um desses processos leva ao aparecimento ou à formação de vórtices (como redemoinhos), conforme representado na Figura 1.

Figura 1. Descrição do escoamento do fluido nos dois tipos de regimes de movimento.



(a) Linhas de corrente tipo laminar num fluido.

Fonte: (a) Os autores; (b) Homa, 2010.

(b) Movimento tipo laminar e turbulento.

I.2. A aerodinâmica de voo de um avião.

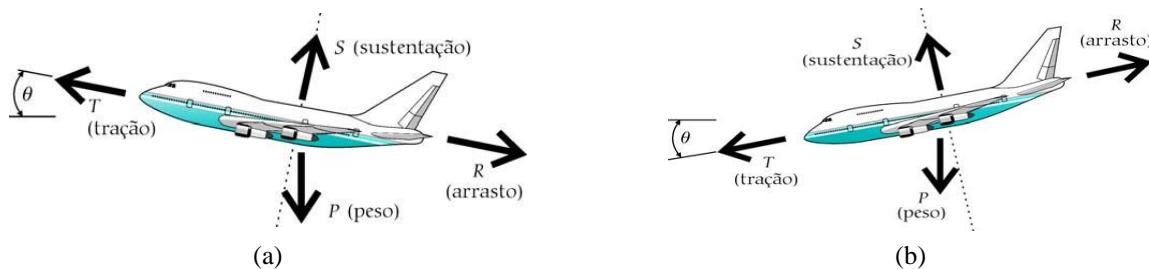
Baseado na ideia do escoamento do fluido (Alonso, 1970), quando consideramos o movimento do avião a qualquer velocidade, no chão ou no ar, verificamos que é produzido um deslocamento do ar (escoamento, chamado de vento relativo) em direção contrária ao movimento do avião. Supomos que esse vento escoa de forma laminar, com as linhas de corrente atingindo a superfície da aeronave, ou seja contornando-a na fuselagem e nas asas do avião. Nesse processo, o movimento do ar produz uma força aerodinâmica total na aeronave que depende da sua velocidade. A interação com o vento relativo, a certas velocidades, permite à aeronave decolar, voar e pousar, e o controle do avião ocorre fundamentalmente porque depende da velocidade do escoamento do ar (ou seja, da força aerodinâmica total) passando ao redor da aeronave.

Reforçando a ideia qualitativa, o vento relativo (fluido em movimento) indo na direção contrária à direção da aeronave, a certa velocidade desta, produz uma força aerodinâmica total para o que for necessário realizar, por exemplo, decolar, voo de cruzeiro ou pousar. Ou seja, a força aerodinâmica total atuando no avião depende da sua velocidade, pois define a velocidade do vento relativo.

A força aerodinâmica é composta de duas forças componentes chamadas de força de sustentação e força de arrasto. Como forças externas que atuam na aeronave temos a força peso e a força de tração, a qual é fornecida pelo motor para a propulsão no movimento das hélices ou turbinas, que produzem o movimento do ar na direção contrária ao movimento do avião. Nesse processo é produzida a reação, que é impulsionar a aeronave para frente. Assim, é possível definir especificamente como atuam essas quatro forças, que tem caráter vetorial, de modo que cada uma delas pode ter componentes XYZ em relação a um sistema de referência, no caso, pode ser o centro de massa do avião.

As direções de atuação destas quatro forças são ilustradas na Figura 2, que representa as forças atuando num avião na condição de decolagem (a) e no pouso (b):

Figura 2. Composição de forças atuando num avião (a) na decolagem, (b) no pouso



Fonte: Studart e Dahmen (2006).

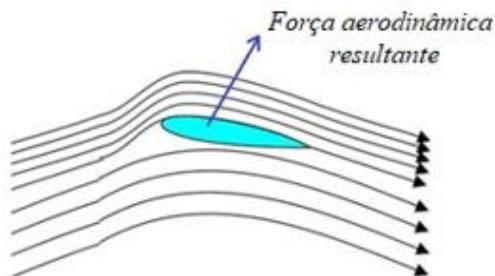
- Sustentação (**S**) é a componente da força aerodinâmica gerada sob o corpo que se desloca pelo fluido e tem a direção perpendicular à direção do movimento da velocidade de corrente do fluido incidente.
- Arrasto (**R**), que essencialmente é uma força de atrito, é a componente da força aerodinâmica paralela à direção de voo, mas em sentido contrário.
- Força peso do avião (**P = mg**), que é a força da gravidade atuando sobre o avião e dirigida para o centro da Terra.
- Tração (**T**) é a força produzida pelo motor da aeronave para o seu movimento e é dirigida ao longo do eixo longitudinal do avião.

A composição vetorial destas quatro forças ao ocorrer o voo do avião dará uma força aerodinâmica total o suficiente para levantar a aeronave do chão.

Para que as forças aerodinâmicas atuem de forma adequada para o voo, temos uma outra grandeza intimamente ligada e muito importante na descrição do voo, que é o chamado ângulo de ataque. Este conceito é definido como o ângulo formado pela direção do vento relativo e a direção do voo do avião. O ângulo de ataque permite descrever como ocorre o movimento das linhas de corrente na superfície da aeronave, acompanhado da orientação do avião em relação ao vento relativo (ângulo de ataque).

Uma forma de explicação qualitativa do aparecimento da força de sustentação pode ser feita utilizando um esquema de como ocorre o escoamento do ar sobre a asa. O escoamento do ar descrito pelas linhas de corrente pode ser imaginado como linhas de corrente paralelas antes de atingir a asa, e seu encontro com a borda da asa, formando um ângulo chamado de ângulo de ataque divide o fluxo das linhas de corrente acima e abaixo da asa, conforme a Figura 3.

Figura 3. Linhas de corrente contornando a asa de um avião.

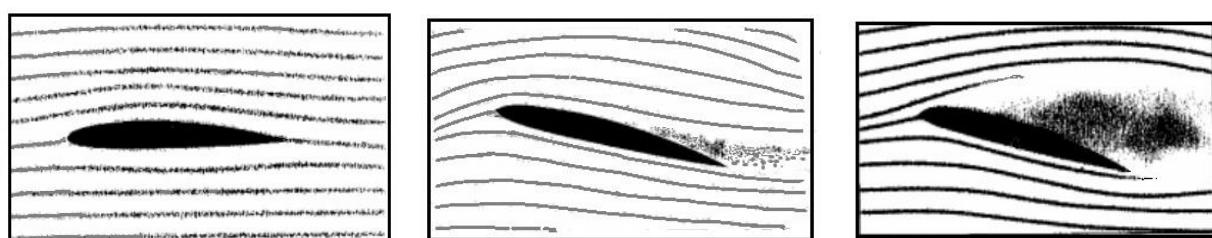


Fonte: Studart e Dahmen (2006).

A diferença de pressões atuando na asa produz, como resultado, uma força resultante de sustentação que empurra a asa para cima e para trás, criando com o restante das forças uma força resultante aerodinâmica. As linhas de corrente acima da asa (extradorso) estão mais comprimidas, indicando que o ar se movimenta mais rápido, o que leva a redução da pressão acima da asa; por sua vez, as linhas de corrente abaixo da asa (infradorso), são menos densas, indicando que a velocidade do ar é menor, como consequência disso, temos um aumento da pressão.

É importante entender, mesmo que seja de forma sucinta e qualitativa, um pouco mais da força de atrito, chamada de **arrasto**, atuando no avião. Lembrando que o arrasto é a componente da resultante aerodinâmica paralela ao vento relativo. Os estudos mostraram que essa força cresce lentamente no início e rapidamente aumenta, formando grandes ou maiores ângulos de ataque. Então, o arrasto aumenta na medida em que o ângulo de ataque aumenta. Em ângulos pequenos de ataque há pouco arrasto, e infere-se que um pequeno ângulo produz uma insignificante variação no arrasto. Nesse regime o escoamento ou as linhas de corrente se aderem na parte de cima da asa, fazendo um percurso suave em cima dela, de modo que, nesse caso, não haverá turbulência.

Figura 4. Aumento do arrasto em função do ângulo de ataque.



(a) Em ângulos de ataque pequenos há pouco arrasto. O escoamento do ar é suave e não temos turbulência.

(b) Em ângulos de ataque moderados o arrasto se torna significativo. No extradorso surge uma pequena turbulência.

(c) Quando o ângulo de ataque é grande, o arrasto e a turbulência também são grandes.

Fonte: Homa, 2010.

Em ângulos de ataque moderadamente maiores, o arrasto é significativo e vai aumentando rapidamente a cada incremento do ângulo. Os três casos foram ilustrados na figura 4. Em geral, o arrasto é produzido pela distribuição desfavorável das pressões que se formam devido às linhas de corrente que não se aderem à superfície da asa. Em termos práticos, pode ser considerado como o descolamento ou a separação das linhas de corrente do fluido da superfície aerodinâmica do avião como causa, e o arrasto e a turbulência como efeitos. Assim, o desenho da superfície aerodinâmica (aeronave) deve assumir formatos suaves, afiados e polidos para evitar o descolamento das linhas de corrente do fluxo do ar.

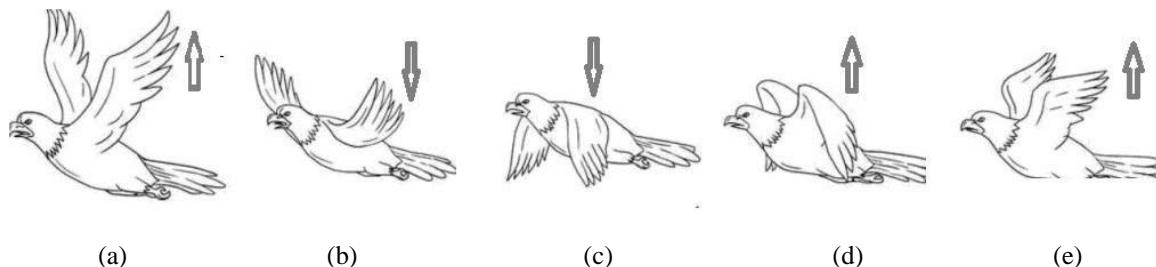
I.3. Sobre o voo das aves e insetos e a cinemática das asas

As aves voadoras desenvolveram todas as condições necessárias para o voo destacando as seguintes: (a) o controle do voo, realizado pelas penas compridas da cauda, cuja função é ajudar a controlar, sobretudo no arremesso, na condução e no breque; (b) a potência do voo, visto que as penas primárias convertem a potência muscular em empuxo ou de potência para frente; (c) o motor do voo, em que dois grupos de músculos peitorais atuam impulsionando as asas para cima e para baixo, e proporcionando a força necessária para que a ave voe; e (d) a forma da asa: o comprimento e largura das asas das aves influenciam na velocidade que estas podem desenvolver, e também as distâncias que são capazes de percorrer. A partir da forma das asas, podemos extrair muitas conclusões sobre o estilo de vida das aves.

Também é bom destacar que a aerodinâmica associada ao voo das aves e de insetos é muito diferente entre si e daquelas encontradas no voo convencional de um objeto de asa fixa (como é o caso dos aviões).

O ponto principal a ser destacado é que o voo de pássaros e insetos é realizado mediante o batimento das asas na direção vertical. A Figura 5 ilustra uma sequência de batimento das asas, sendo que, em (a), a asa está levantada até o máximo; em (b), a asa desce até perto da metade do percurso; em (c), a asa está abaixada até o mínimo do percurso; em (d), a asa é levantada até o ponto onde faz uma inflexão e em (e), a asa novamente é levantada até o máximo. Observe a forma como atua este mecanismo de movimento da asa para o voo de um pássaro real.

Figura 5. Sequência de batimento das asas de uma ave onde em.

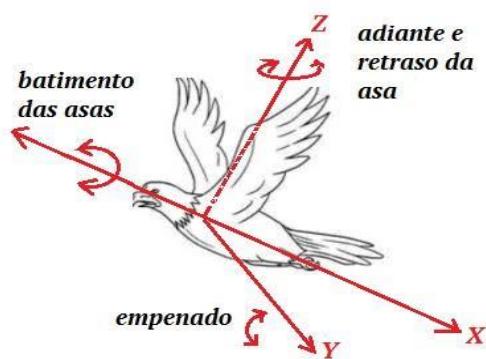


Fonte da figura: Gusmán-García (2019).

Durante o batimento das asas para cima e para baixo, há movimentos adicionais sutis de vários tipos que modificam o movimento de batimento vertical. Os movimentos das pontas das asas das aves maiores seguem padrões simples, como movimentos ovais e na forma de oitos; para animais menores, o padrão da ponta das asas é muito mais complexo. Em geral, do ponto de vista da aerodinâmica em relação ao batimento das asas, estudos revelam que pode ser considerado do tipo instável. Nas pesquisas em aves grandes é observado que o ciclo de batimento das asas é lento, resultando menos instável, mas, nas aves pequenas e nos insetos, a aerodinâmica é muito instável.

Uma explicação sobre estas diferenças é que as aves pequenas e insetos têm a capacidade de aproveitar a produção de vórtices ligados e do arrasto, os quais são efeitos instáveis primários. Na medida que o tamanho das aves e insetos diminui, eles devem fazer mais esforço para produzir vórtices devido ao regime de fluxo que, cada vez, sentem ser mais viscoso. Existem outros mecanismos instáveis utilizados pelos insetos e as aves pequenas para melhorar a sua sustentação, mas não entraremos em detalhes, para mais informações, veja a referência (Shyy W et al, 2008).

Figura 6. Movimentos de rotação possíveis da ave em relação a um referencial XYZ. A figura ilustra a ideia que a ave pode realizar movimentos de giro no entorno de cada eixo XYZ durante o voo.



Fonte: Os autores.

A Figura 6 ilustra a ideia de que a ave pode realizar movimentos de giro no entorno de cada eixo XYZ durante o voo. De natureza complexa, o voo da ave é acompanhado de vários movimentos de rotação das partes além do simples batimento das asas. Baseados na cinemática do movimento das asas e do mecanismo de geração de forças, pode ser modelado até três movimentos distintos em relação a três eixos, XYZ, exemplificados na Figura 6 e que podemos descrever da seguinte forma: (a) O batimento das asas, que são movimentos para cima e para baixo, ocorrem no entorno do eixo X que é o eixo ao longo do comprimento da ave. Esse movimento produz a maior força para criar a sustentação e possui um grande grau de liberdade. (b) O empenado, que é o movimento do corpo, para cima ou para baixo, ocorre no entorno do eixo Y (genericamente chamado de movimento de cabeceio). É considerado um movimento de arremesso da asa e pode variar ao longo da envergadura. (c) Movimento de adiantar e atrasar da asa no plano XY tendo como eixo de rotação o eixo Z que é chamado genericamente de guinada, faz girar a ave no plano XY a esquerda ou direita.

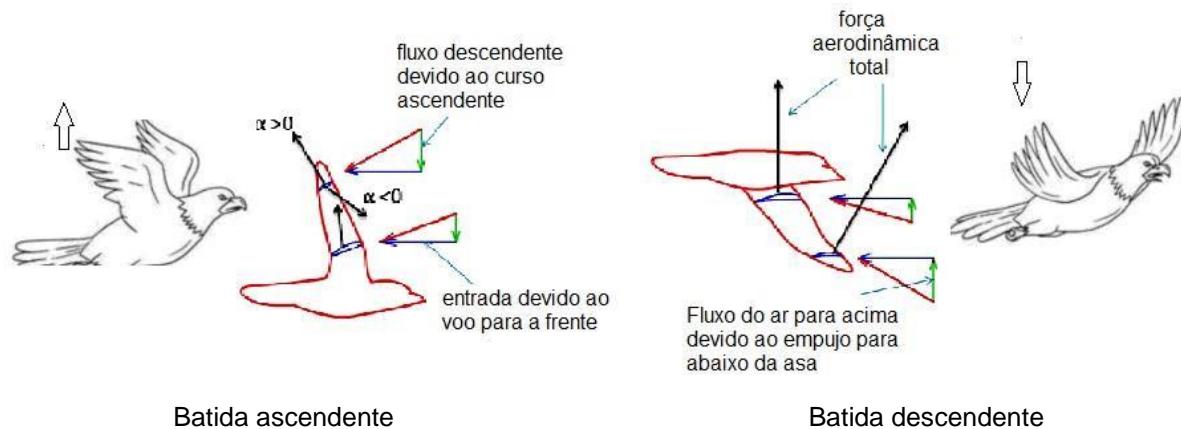
Os insetos diferem fundamentalmente das aves na cinemática da asa. Ao serem de menor escala, se diferenciam por sua natureza a ter uma característica especial do voo visto que todas as variações são realizadas na raiz da asa e, nesse sentido, a sua descrição é mais complexa.

I.4. Forças geradas no movimento das asas

Agora se sabe que as asas das aves são superfícies sustentadoras. Quando o ar escoa sobre as asas de uma ave, por cima e baixo destas se produz uma diferença de pressões do ar. A diferença de pressões cria a chamada força de sustentação ou elevação, a qual é capaz de superar o peso do pássaro. Na dinâmica de movimento, durante o batimento das asas, o ar que passa acima da superfície superior curva da asa é mais rápido que o fluxo de ar que percorre a superfície inferior. Esse fenômeno leva a uma diferença de pressões, e o resultado faz elevar ou arremessar o corpo da ave para acima.

A explicação feita aqui é semelhante ao caso do avião, mas o fenômeno é diferente porque as forças criadas durante o batimento das asas são variáveis no tempo em função da posição da asa durante o ciclo de batimento. Na descrição se considera que o movimento do batimento das asas tem dois traços: (a) batimento para cima, ou “Upstroke” e (b) o batimento para baixo, ou “Downstroke”. O fluxo do ar vertical induzido é máximo perto das pontas das asas e sua magnitude diminui em direção à raiz.

Figura 7. Forças geradas durante o batimento das asas: quando a batida da asa é ascendente, o ângulo de ataque é variável, e quando a asa é descendente temos uma resultante da força aerodinâmica.

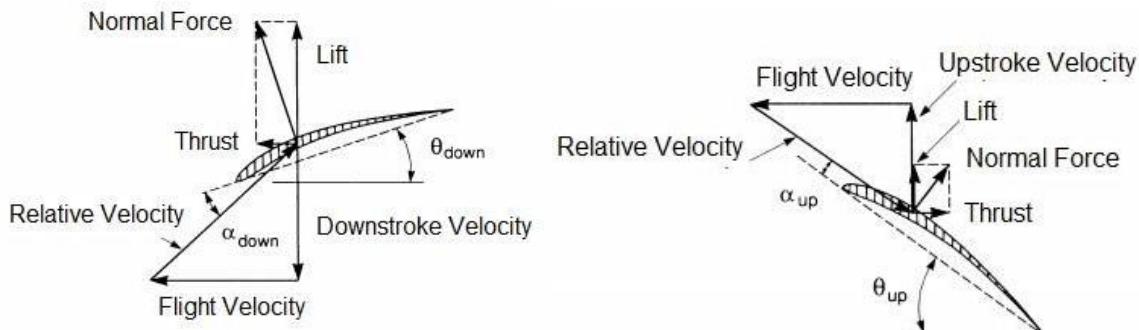


Fonte: Malik. M.A., Hadmad, F., 2010.

Assim, para velocidade de avanço constante, o ângulo de ataque relativo também diminui da ponta para a raiz. A Figura 7 ilustra como ocorre a movimentação do ar e a geração da força aerodinâmica total que permite o voo do pássaro.

A explicação do movimento das asas por DeLaurier (1994), indica que durante o curso descendente, a força aerodinâmica total é inclinada para a frente e tem dois componentes, sustentação e empuxo. Durante o curso ascendente, o ângulo de ataque relativo é sempre positivo perto da raiz, mas na ponta pode ser positivo ou negativo, dependendo da quantidade de inclinação da asa. Portanto, durante o curso ascendente, a parte interna da asa produz força aerodinâmica, que é para cima, mas inclinada para trás, produzindo sustentação e empuxo negativo. A região externa das asas produziria sustentação e arrasto positivos se o ângulo de ataque fosse positivo. Mas se este for negativo, então produziria sustentação negativa, mas empuxo positivo. Ambos os casos são descritos na Figura 8. Para um melhor entendimento dos termos utilizados na descrição das grandezas físicas é feita uma tradução própria ao português, onde *Normal Force* → Força normal; *Thrust* → Empuxo; *Lift* → Sustentação; *Relative Velocity* → Velocidade Relativa; *Downstroke Velocity* → Velocidade de Descida; *Upstroke Velocity* → Velocidade de subida; *Fly velocity* → Velocidade do Voo; respectivamente.

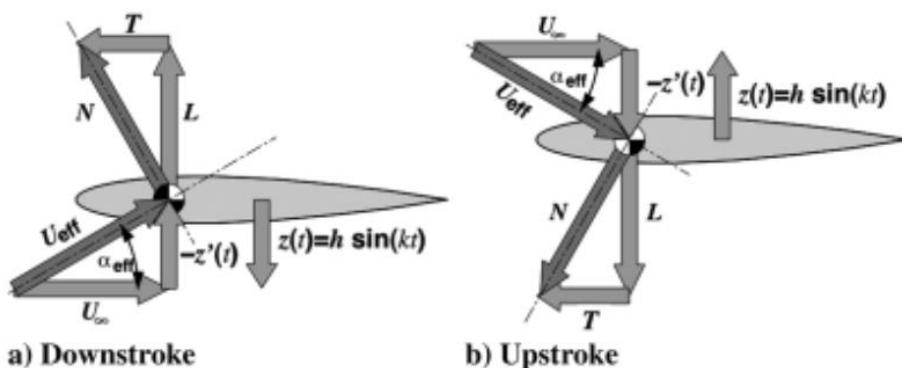
Figura 8. Diagrama completo da disposição de forças para o voo da ave segundo DeLaurier.



Fonte: DeLaurier, 1994.

Uma descrição de forças para o batimento para cima e para baixo proposto por Guzmán-Garcia (2019) aponta a uma disposição na qual as forças se compõem para um instante de tempo. Na descrição da aerodinâmica e cinemática no movimento de batimento das asas da ave pode ser dito que a força de sustentação instantânea muda de sinal. Ou seja, será positiva e contribuirá ao voo da ave quando a asa se desloque para baixo, batida para baixo (*Downstroke*) e será negativa quando a asa fizer a batida para cima (*Upstroke*). O fluxo de ar que tem certa velocidade incidente, em cada caso, é a que indica a direção da força de sustentação. Durante o *Downstroke* o escoamento incidente chega à asa por baixo, pelo intradorso, gerando uma sustentação positiva com direção perpendicular às linhas de corrente. Por sua vez, durante o *Upstroke*, a corrente incide na asa pela parte superior, extradorso, gerando uma força aerodinâmica que aponta na direção para baixo, e pode ser dito negativa.

Figura 9. Disposição das forças instantâneas devido ao movimento das asas no ornitóptero.



Fonte: Guzmán-Garcia, 2019.

Na figura 9, \mathbf{U}_∞ é a velocidade da corrente de ar incidente, \mathbf{L} é a força de sustentação gerada, \mathbf{T} o empuxo e \mathbf{N} a composição vetorial de ambas, ou seja, a força aerodinâmica total gerada. Por outra parte, $\mathbf{z}(t)$ é a função harmônica que descreve o movimento oscilatório da asa da ave. Infere-se disto que podemos falar de uma sustentação instantânea, gerada a cada instante de tempo pela asa da ave e uma sustentação média gerada num ciclo completo de batimento da asa durante o ‘Downstroke’ e o ‘Upstroke’. É possível modelar o ciclo de subida e descida da asa, calculando uma força de sustentação pontual na subida e na descida da asa para termos uma ideia da sustentação total para saber se é gerada uma sustentação ou não e se esta terá sinal positivo ou negativo.

I.5. O voo do ornitóptero

A principal característica do ornitóptero é ser uma máquina desenhada de forma simples ou complexa para voar batendo as asas. Muitos dos desenhos e desenvolvimentos consideram mecanismos da forma como serão acionadas as asas. Foram propostos modelos teóricos para relacioná-los com as forças aerodinâmicas. Assim, sabendo que uma das conclusões importantes observadas no voo das aves e insetos é que as forças aerodinâmicas observadas variam em função do batimento das asas, essa característica fundamental é levada para o estudo do voo do ornitóptero.

Para fins de estudo, o movimento das asas é considerado sempre variável no tempo, de onde se infere que todos os componentes verticais e horizontais das forças de sustentação e do empuxo do ornitóptero variam para cada instante de tempo. É possível inferir também que o cálculo das forças aerodinâmicas é determinado construindo um modelo teórico matemático que deve considerar que as forças variam em função do tempo. Também é preciso considerar que o movimento das asas é cíclico partindo das asas abaixadas, de modo que um ciclo da batida das asas poderá ser um desce-sobe-desce, e o tempo transcorrido será o tempo do ciclo da batida.

Assim, levando em conta o explicado acima, a aerodinâmica para o voo do ornitóptero resume-se em movimentos de batimento das asas para cima e para baixo. O movimento cíclico das asas no ornitóptero pode ser modelado (Harmon, 2008) fazendo uma configuração semelhante ao da Figura 10, onde se destaca, em relação ao eixo de rotação X, o batimento das asas fazendo um ângulo $+\beta$ de abertura da asa na posição máxima para cima, e mínima $-\beta$ para baixo, dando uma abertura máxima de batimento β_{max} da asa, num

total de $2\beta_{max}$, medido em relação ao eixo Y, como ilustrado na Figura 10. O ângulo de batimento das asas como é cíclico pode ser modelado por uma função harmônica oscilante variando no tempo do tipo:

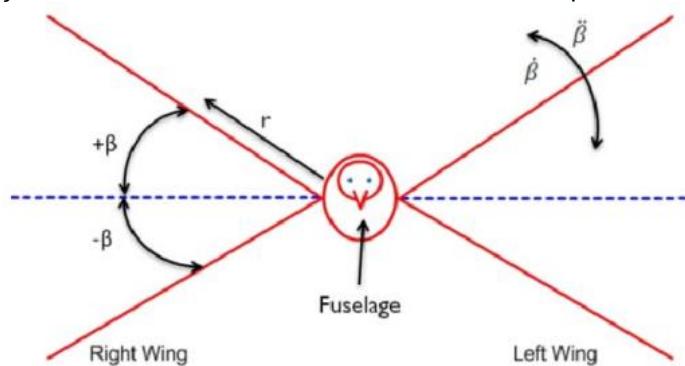
$$\beta(t) = \beta_{max} \cos(2\pi f t) \quad (1)$$

com velocidade angular variável (rad/s):

$$\omega_\beta(t) = -2\pi f \beta_{max} \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

onde: f é a frequência de batimento e t o tempo.

Figura 10. Descrição do movimento oscilatório das asas do ornitóptero com ângulo de abertura.



Fonte: Harmon, 2008.

I.6. Observações experimentais para o voo do ornitóptero

O trabalho de Pennycuick (1990) estuda uma forma de correlacionar a frequência do batimento das asas e do deslocamento a cada batida de asas de pássaros de até 32 espécies, além de fazer estimativas da sua velocidade no ar para todas elas. Baseado nessas observações experimentais, o estudo estabelece que a frequência de batimento das asas é proporcional ao produto de vários parâmetros físicos como a massa corporal, envergadura, a área da asa e o momento de inércia da asa, além da densidade do ar; propondo a seguinte relação: $f \propto (mg)^\alpha b^\beta S^\gamma I^\delta \rho^\epsilon$ onde m é a massa corporal da ave em kg, \mathbf{g} é a aceleração gravitacional em m/s², \mathbf{b} é a envergadura em metros, \mathbf{S} é a área da asa (m²); I é o momento de inércia (kg.m²) e ρ é a densidade do ar (kg/m³); os expoentes das grandezas físicas na fórmula são números reais a serem determinados. Após estudos, estabeleceu-se uma predição prática da frequência pela expressão:

$$f = 1.08 m^{\frac{1}{3}} g^{\frac{1}{2}} b^{-1} S^{-\frac{1}{4}} \rho^{-\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Também, a velocidade do pássaro pode ser estimada com base na definição da fórmula: $\lambda = V/f$, onde V é a velocidade do ar (m/s), f a frequência (1/s) de batimento das asas e λ é a distância (m) percorrida em um ciclo de batida de asa; ficando estabelecido que:

$$\lambda \propto m^{1/6} S^{1/4} \rho^{-1/6}. \quad (4)$$

Então, para estimar a velocidade do voo do pássaro, propõe-se a relação:

$$U \propto (m^{1/6} S^{1/4} \rho^{-1/6})f \quad (5)$$

Djojodihardjoa *et al.* (2012), baseado nos estudos de Pennycuick,(1990) utilizam as relações acima para descrever o batimento das asas, que pode ser correlacionado com as características geométricas dos pássaros voadores e insetos. Para aves com massa corporal variando de 20g a quase 5kg, a frequência de batimentos das asas é correlacionada pela mesma fórmula (3) anterior, mas, escrita na forma:

$$f = \frac{1.08}{b} \sqrt[3]{\frac{m}{\rho}} \sqrt{\frac{g}{S}} \quad (6)$$

Além disso, a velocidade U (m/s) de vôo do pássaro, relação proposta por Pennycuick (1990) é simplificada e correlacionada com a massa do pássaro ou inseto voador para dar um bom ajuste quando aplicada a pequenos pássaros, morcegos e insetos pela relação simplificada na forma:

$$U = 1.508(m)^{1/6} \quad (7)$$

onde a constante 1.508 tem unidades de (m/s)/kg^{1/6}.

Levando em conta as relações acima, podem ser escolhidas várias formas genéricas de asas planas para a construção. Entre outras, a asa semielíptica é utilizada comumente como o pano de fundo de várias geometrias de asas em muitos ornitópteros.

Neste trabalho, como se trata de introduzir a física do voo do ornitóptero para fins educativos, podemos realizar o desenho de modelos simples separando-os em modelos quase-estáveis. Assume-se que as frequências de batimento das asas são lentas o suficiente para que os efeitos de esteira sejam insignificantes, e isso permite utilizar, para

a força de tração do movimento das asas, mecanismos de movimento simples como elásticos enrolados. Em alguns casos, ao serem feitos modelos simulando pássaros de médio a grande porte, pode ser necessário utilizar meios de tração mais potentes, tipo pequenos motores dc alimentados por bateria. Deixaremos de lado os modelos instáveis que demandam maior volume de trabalho e materiais.

II. Descrição da construção do modelo simples de ornitóptero

Para definir a construção do ornitóptero é preciso fazer considerações sobre pontos importantes para o desenho e a execução. Um ponto importante é responder à questão: com que frequência os pássaros batem as asas? Sabe-se que a taxa de batidas das asas das aves é determinada pela área da asa e varia em cada tipo de ave. Por exemplo, para um flamingo basta bater as asas com uma frequência de 2 golpes por segundo, enquanto um pardal tem que fazer 14 golpes por segundo e um beija-flor pode fazer até mais de 80 golpes por segundo.

Assim, é possível entender porque é importante a forma da asa: o comprimento e a largura das asas das aves influenciam a velocidade que a ave atinge e a distância que são capazes de percorrer. A partir da forma das asas, podemos extrair muitas conclusões sobre o estilo de vida das aves. Exemplos: o albatroz possui asas compridas e estilizadas que lhe permitem voar dentro de ventos fortes e em alto mar na velocidade de 80 km/h. O condor voa entre 50-65 km/h, e usa suas asas compridas e largas para planar utilizando as correntes térmicas de ar das zonas montanhosas. Aves pequenas, na sua maioria, como pardais, bem-te-vis, entre outras, apresentam asas de tamanho médio para o voos com velocidade no entorno de 27-30 km/h; já o beija-flor possui asas pequenas, rígidas e finas que, no batimento, se assemelha aos rotores de um helicóptero, permitindo-lhe voar na velocidade de 80-90 km/h. O intenso ciclo de batidas da asa proporciona-lhe um controle único do voo.

Dessa forma, podemos entender que os requisitos aerodinâmicos básicos para um voo sustentado para frente é gerar uma força de sustentação o suficiente para equilibrar o peso corporal e ter empuxo o suficiente para equilibrar o arrasto corporal. Assim, o desenho do ornitóptero deverá ser com peso o mais leve possível. Para a definição do tamanho do ornitóptero, é preciso considerar alguns elementos.

II.1. Definindo o tamanho do orníptero

Asas: uma das primeiras decisões na construção do orníptero é definir o tamanho da envergadura, que define o restante das dimensões. Ao querer fazer um orníptero grande, a área da asa também deverá ser grande. O cálculo da área da asa envolve saber primeiro a sua envergadura. Então, fica claro que este é o primeiro parâmetro a ser escolhido. Neste ponto, pode-se escolher tamanhos de envergadura desde os pequenos, abaixo de 30 cm, tamanhos intermediários, entre 45 cm até uns 70 cm, e grandes, acima de 100 cm. A escolha do tamanho define o outro parâmetro que é o peso de voo.

Levando em conta a cinemática do movimento das asas, para o desenho, deve ser definido também o tamanho do corpo do orníptero. Para começar, propor um desenho simples da asa: a escolha mais básica é utilizar uma asa de forma semielíptica onde o eixo maior da elipse define a envergadura da asa. A envergadura é definida como o comprimento total quando as asas estão estendidas.

Corpo: o design deve ser baseado no uso de madeira leve ou outro material leve e forte, e a estrutura do corpo pode ter um comprimento um pouco maior que a metade do eixo menor da forma elíptica da asa. Deverá ser definida alguma forma geométrica, mas, tendo em conta que deve ser forte o suficiente, pois nessa estrutura serão conectados suportes e eixos para fixar as asas e, ao mesmo tempo, permitir o seu movimento oscilatório.

Cauda: importante para o voo do orníptero, é utilizada como superfície de controle semelhante ao profundor de um avião, e serve para que o orníptero possa realizar a subida ou descida durante o voo. Quando a cauda é levantada, gera no orníptero o movimento de subida e, no caso contrário, a descida. Se a cauda tiver liberdade de girar para esquerda ou direita, pode se comportar como o leme do avião, fazendo o controle de giro do orníptero no plano XY, à esquerda ou direita da direção do voo.

II.2. Definindo o mecanismo de acionamento das asas

Para viabilizar o orníptero precisamos de um mecanismo de oscilação que acione o batimento das asas de forma simétrica. Dentre muitas possibilidades, a escolha foi de utilizar o mecanismo de manivela de duas hastes em forma de V.

II.3. Construção do orníptero

- Foi definida a envergadura de 620 mm. Procuramos uma taxa de oscilação baixa, de 5 Hz, devido ao seu acionamento por elásticos, com peso do voo abaixo de 100 g.

- O chassi ou corpo da estrutura foi construído utilizando madeira balsa de forma retangular de lados 8 mm x 10 mm e com comprimento de 220 mm, que resultou ser muito leve. Para fazer as juntas e aderir às guias metálicas utilizamos cola de cianoacrilato, que seca rápido. As juntas foram reforçadas com várias voltas de linhas de fio de costura em cada união e repassando a cola nestas costuras. Essa técnica de construção garante uma boa união das partes e o conjunto fica forte. Na Figura 11, podemos observar tubinhos cortados de rebite metálico, que utilizamos como guia para as asas. Como eixo de açãoamento, utilizamos um arame de aço de $\frac{1}{2}$ mm de diâmetro, fazendo as dobras correspondentes. Um outro tubinho de rebite foi incrustado na madeira para servir como guia de rolagem do arame, que serve de eixo de açãoamento.

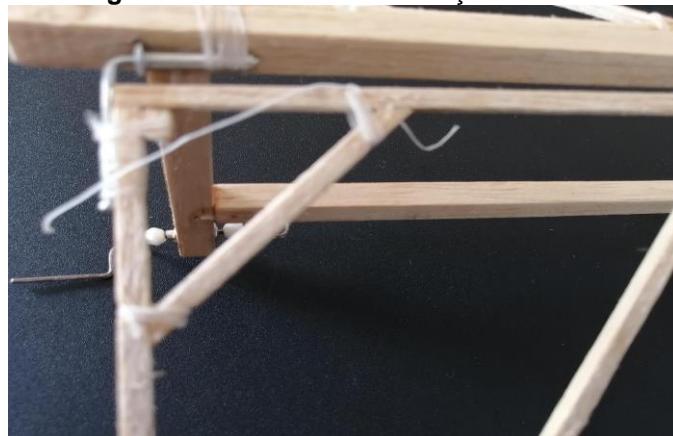
Figura 11. Chassi ou estrutura de madeira que é o corpo do ornitóptero.



Fonte: Os autores.

- Construção da asa: foram construídas duas asas simétricas, utilizando madeira balsa de espessura com dimensões de 5 mm x 3 mm, e comprimento de 300 mm. Os detalhes de construção estão na Figura 12. Utilizamos a técnica de unir com cola de cianoacrilato e reforçar com linhas de costura as uniões. É importante observar o detalhe da guia metálica da asa que servirá de eixo de rolagem, já introduzida no tubinho aderido ao chassi. O arame do rebite que já passa exatamente dentro do tubinho, foi dobrado em L. Um lado é colado na parte da frente da asa e reforçado com a linha de costura, e, em seguida, passamos cola no conjunto. No teste, funcionou muito bem e ficou forte.

Figura 12. Detalhes de construção da asa.



Fonte: Os autores.

A Figura 13 ilustra o conjunto da estrutura do corpo com as asas do ornitóptero já montadas. O peso total até esta etapa ficou entorno de 22 g. Os próximos passos são colocar a cauda e entelar a asa usando uma folha plástica muito fina.

Figura 13. Estrutura completa já montada das asas e do corpo do ornitóptero.



Fonte: Os autores.

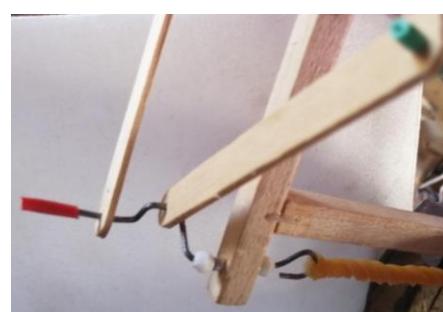
Para garantir um batimento suave das asas, foi colocado outro conjunto de guia e arame de rebite na parte posterior. Assim cada asa, esquerda e direita, tem duas guias sob as quais realizam o movimento de oscilação.

- Manivela de dois eixos escalonada para o acionamento das asas

Figura 14. Mecanismo de madeira (palitos de picolé) em forma de V para o acionamento das asas



(a) Hastes em V ligadas ao eixo e às asas.



(b) Eixo metálico com as dobras certas.

Fonte: Os autores.

O acionamento das asas foi determinado pelo uso de duas hastas. O design e detalhes da manivela escalonada estão destacados na Figura 14. Esse mecanismo de acionamento é o mais simples e básico. As duas hastas estão dispostas em uma distância simétrica a um certo ângulo, formando uma espécie de letra V. Ver o detalhe na Figura 14 (a). Cada haste, nos extremos, tem os eixos de rotação deslocados, para garantir que as asas esquerda e direita estejam batendo simetricamente. Ver o detalhe na figura 14 (b).

O ponto chave deste mecanismo é conseguir que o eixo de arame ligado aos elásticos possa acionar corretamente as hastas ligadas às asas, o que é possível fazendo as dobras certas do arame que serve de eixo de rotação. A sequência certa da dobra é a seguinte: no eixo que vem do elástico se faz uma primeira dobra em 90°, deixando uns 15 mm para fazer uma outra dobra desse comprimento. Isso serve para a rotação da primeira haste na base do U. Logo, fazer outra dobra de 90°, mas na direção perpendicular à primeira dobra, deixando 15 mm; e fazer outra dobra de 90° deixando a ponta do eixo deslocado, mas paralelo a do primeiro que é acionado pelo elástico. Esse design, por ser de construção simples, pode ser o preferido para iniciar na experiência de construção do próprio orníoptero usando utensílios domésticos.

- A cauda do orníoptero simula a cauda de um pássaro, e foi construída na forma de um triângulo equilátero de 120 mm de lado. Um vértice é colado com uma haste curvada para que a cauda fique levantada.

- Modelo terminado

Na Figura 15, temos orníoptero construído e pronto para voar, já com as asas na forma semielíptica e a cauda.

Figura 15. Modelo de ornitóptero construído pronto para os testes de voo.



Fonte: Os autores.

A cauda foi disposta com a face levantada, isto serve para ajudar na sustentação do ornitóptero e equilibrar o centro de gravidade. Utilizamos a cola de silicone líquida para colar as lâminas plásticas da cauda e das asas à estrutura de madeira do modelo. Foi testado também a cola de isopor e deu resultado semelhante.

- Teste de Voo

Colocamos o jogo de elásticos para, enfim, realizar o teste de voo. O peso total do modelo foi de 35 g. Observamos que após enrolar o elástico umas 120 voltas o batimento das asas ocorre sem muito atrito, mas com certa força. O modelo voa cerca de 30 segundos, mas vai perdendo força rapidamente conforme se desenrolam os elásticos. Neste ponto, é recomendado testar vários jogos e tipos de elásticos até obter um que seja satisfatório. Após diversas quedas do modelo durante os testes, observamos que ele se mantém intacto e sem danos, o que indica que a técnica de construção foi satisfatória. Contribui para isso também o peso total do modelo que é satisfatório para a envergadura planejada.

Considerações Finais

Apresentamos de forma conceitual e resumida os principais conceitos sobre a aerodinâmica do voo e da cinemática do batimento das asas de um ornitóptero, conforme proposto nos objetivos. Na primeira parte, sobre a aerodinâmica, foi preciso explicar que o movimento do fluido (escoamento) seguindo linhas de corrente ao interagir com objetos pode criar forças de sustentação para o voo. Explicamos como a composição vetorial das forças atuando no objeto voador (avião), dá uma resultante chamada de força aerodinâmica total que é responsável para que o objeto voador possa decolar, voar e fazer o pouso.

Estabelecemos diferenças de voo entre um avião, que tem asas fixas, e as aves e os insetos voadores, que alcançam o mesmo propósito mediante o batimento das suas asas.

Evidenciamos que as aves e insetos, durante o processo do batimento cíclico das asas, podem produzir movimentos complexos para o controle do seu voo, e ficou estabelecido que um parâmetro importante em função do tamanho da ave é a frequência de batida das asas, sendo baixo em aves maiores ou de asas cumpridas, e maior em aves e insetos voadores de pequeno porte.

Devido a isso, tentamos descrever a disposição das forças aerodinâmicas criadas no batimento das asas, com a diferença fundamental que estas forças atuam em função do tempo durante o ciclo de batimento, explicando que há diferenças na criação das forças aerodinâmicas durante a batida para cima e batida para baixo. Entretanto, num ciclo do movimento periódico, há uma força aerodinâmica total resultante que permite a sustentação do voo da ave.

Realizamos uma pequena descrição sobre alguns princípios que devem ser aplicados na construção de um modelo de orníptero, que envolvem a definição do seu tamanho, da forma de acionamento para o batimento das asas, os materiais a serem utilizados e algumas técnicas de construção artesanal simples e eficientes. Mostramos que a construção do orníptero é relativamente fácil, o que possibilita que a atividade seja realizada pelos alunos, com a supervisão do professor, para uso em atividades escolares e de divulgação.

Para finalizar, percebemos possibilidades de continuidade para o trabalho, explorando a construção experimental desenvolvida como recurso educacional para diversos níveis de ensino e divulgação da física. Por exemplo, a experiência pode ser utilizada como elemento motivador e demonstrativo para entender conceitos relacionados à movimento laminar e turbulento de fluídos; para aprender a identificar o centro de massa de um objeto e, a partir disso, procurar entender as forças aerodinâmicas atuando nele; entender o processo de medição da velocidade do fluido; realizar um experimento para observar o efeito do batimento das asas em ambiente com fumaça; experimentar diversas possibilidades, simples ou complexas, de mecanismos para recriar o movimento oscilatório das asas e aprender conceitos relacionados ao movimento harmônico simples.

Referências

ALONSO M., FINN E. J., Física, Volumen I: Mecánica, Fondo Educativo Interamericano S.A. 1970.

DELAURIER J. D. An Ornithopter Wing Design, **Canadian Aeronautic and Space Journal**, Vol. 40, No. 1, March 1994.

DJOJODIHARDJOA, H. et al, "Kinematic and Aerodynamic Modelling of Flapping Wing Ornithopter"; **International conference on Advances Science and Contemporary Engineering 2012**, (ICASCE 2012). Procedia Engineering 2012]. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.10.093

GONZALEZ-RANGEL, J. M., "Análisis del aleteo de alas flexibles utilizando PIV E POD", **Tesis para obtener el grado de Maestro en Optomecatrónica**; León · Guanajuato · México, Junio de 2022.

GUSMÁN GARCIA M. M. "Diseño de mecanismo de batimiento y semiplegado de las alas de un ornitóptero". **Trabajo de fin de Grado de Ingeniería Aeroespacial**, Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, España, 2019.

HARMON, R. L. "Aerodynamic Modeling of a Flapping Membrane Wing Using Motion Tracking Experiments" **Master's Thesis 2008**, University of Maryland, USA.

HOMA J. M.; "Aerodinâmica e Teoria de Voo, noções básicas", 28º Edição, São Paulo Brasil, ASA Edições e Artes Gráficas Ltda. 2010.

MALIK M. A., AHMAD, F., Effect of Different Design Parameters On Lift, Thrust and Drag of an Ornithopter, **Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol II** WCE 2010, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.

PENNYCUICK, C. J., Predicting wingbeat frequency and wavelenght of birds, **J. exp. Biol.**, 150, 171-185 (1990).

SHYY, W., LIAN, Y. TENG, J. VIIERU, D. , Hao LIU, H.. Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers. 2008. Cambridge University Press, New York.

STUDART, N.; DAHMEN, S. R. A Física do voo na sala de aula, Física na Escola, v. 7, n. 2, 2006.

TREVINO-SÁNCHEZ D., GUERRERO-CASTELLANOS J.F., GONZÁLEZ-DIAS, Modelo matemático para el vuelo de un ornitóptero, Conference Paper, October 2017. See discussions, stats, and author profiles for this publication at:

https://www.researchgate.net/publication/323027913_Modelo_matemático_para_el_vuelo_de_un_ornitoptero

Acesso em: 20 out. 2024



NOTAS

IDENTIFICAÇÃO DE AUTORIA

Victor Ciro Solano Reynoso. Doutor em Ciências (UNICAMP). Docente da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Departamento de Física Química (DFQ), Ilha Solteira, SP, Brasil.

E-mail: solano.reynoso@unesp.br

ID <https://orcid.org/0000-0003-2563-4088>

Mario Pinto Carneiro Junior. Mestre em Ensino de Matemática. Assistente de Suporte Acadêmico II, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Departamento de Física Química (DFQ), Ilha Solteira, SP, Brasil.

E-mail: mario.carneiro@unesp.br

ID <https://orcid.org/0009-0008-8401-1837>

AGRADECIMENTOS

Não se aplica.

FINANCIAMENTO

Não se aplica.

CONSENTIMENTO DE USO DE IMAGEM

Não se aplica.

APROVAÇÃO DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

Não se aplica.

HISTÓRICO

Recebido em: 27/11/2024 - Aprovado em: 23/12/2024 – Publicado em: 31/12/2024.

COMO CITAR

REYNOSO, V. C. S.; Carneiro Jr, M. P. O Voo do Ornitóptero como Proposta para Ensino de Física associado à Aerodinâmica. **Revista ENSIN@ UFMS**, Três Lagoas, v. 5, n. 9, p. 724-750. 2024.