

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO MOURÃO GOMES

ESTUDO SOBRE A TRAÇÃO FORNECIDA POR HÉLICES MONO-PÁS

VITÓRIA
2016

RODRIGO MOURÃO GOMES

ESTUDO SOBRE A TRAÇÃO FORNECIDA POR HÉLICES MONO-PÁS

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Juan Sergio Romero Saenz.

VITÓRIA

2016

RODRIGO MOURÃO GOMES

ESTUDO SOBRE A TRAÇÃO FORNECIDA POR HÉLICES MONO-PÁS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 22 de Junho de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Juan Sergio Romero Saenz
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Daniel Augusto do Carmo, mestrando.
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Marcos Almeida Cypriano, engenheiro.
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir chegar ao fim dessa jornada.

Aos meus familiares, pela compreensão e por fornecerem todo o suporte diante das dificuldades enfrentadas.

Aos professores, pelo conhecimento transmitido, permitindo que esse projeto fosse realizado e que em breve agregará na vida profissional.

Aos amigos, por compartilharem comigo os momentos felizes e tristes, tornando esse período muito mais agradável.

Agradeço também a equipe AVES de aerodesign, por confiar em mim, me proporcionar a experiência do trabalho em equipe e me ensinar o significado de perseverança, mostrando que as derrotas tornam as conquistas muito mais prazerosas.

RESUMO

Visando maximizar a pontuação de voo na competição SAE Brasil Aerodesign, o conjunto motopropulsor escolhido deve fornecer a maior tração possível para que, por consequência, a aeronave possa carregar a maior carga paga possível. Modificações no motor não são permitidas, assim como o uso de redutores, de modo que a única opção para aumentar a tração é alterar a hélice utilizada no motor.

Neste trabalho foi realizado o estudo da força de tração de hélices mono-pás, com o intuito de descobrir a viabilidade da utilização desse tipo de hélice pela Equipe AVES. O estudo foi dividido entre estudo teórico, onde foi desenvolvido um programa em Matlab utilizando a teoria do elemento de pá e estudo prático através de ensaios utilizando o dinamômetro da Equipe AVES, com o intuito de validar a formulação desenvolvida.

Com a validação do programa desenvolvido, a Equipe AVES pode utilizar o mesmo para selecionar a hélice mais adequada para a aeronave dentre as disponíveis no mercado ou desenvolver sua própria hélice, sem a necessidade de demasiados ensaios, que demandam tempo e gastos.

Palavras-Chave: 1. Hélice Mono-pá. 2. Teoria do Elemento de Pá. 3. Aerodesign. 4. VANT. 5. Tração.

ABSTRACT

In order to maximize the flight score in the SAE Brazil Aerodesign Competition, the chosen power drive unit should generate the highest thrust possible to enable the aircraft to lift the highest possible payload. Engine modifications are not allowed, as well as the use of gearboxes, therefore the only option for increasing the thrust is change the propeller.

In this work was accomplished the thrust study of single-blade propellers, in order to discover the feasibility of using this type of propeller by Team AVES. The study was divided between a theoretical study, developing a Matlab program using the blade element theory and a practical study by testing using the Team AVES's dynamometer, in order to validate the developed formulation.

The validation of the developed program allows the Team AVES select the best aircraft propeller from those available on the market or develop their own propeller without needing too many tests, which require time and money.

Keywords: 1. Single blade propeller. 2. Blade element theory. 3. Aerodesign. 4. Drone. 5. Thrust.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Características geométricas de uma hélice.	12
Figura 2 – Principais características geométricas de um perfil aerodinâmico.	12
Figura 3 – Forças em um perfil aerodinâmico.	13
Figura 4 - Faixa transversal de comprimento infinitesimal em uma pá.....	14
Figura 5 – Forças derivadas do movimento da hélice.	15
Figura 6 – Gráfico Corda x Raio referente a hélice APC 13x4.	17
Figura 7 – Gráfico Corda x Raio referente a hélice APC 12,25x3,75.	17
Figura 8 – Gráfico Ângulo de ataque x Raio referente a hélice APC 13x4.	18
Figura 9 – Gráfico Ângulo de ataque x Raio referente a hélice APC 12,25x3,75.	19
Figura 10 – Gráfico C_l x Alfa.	20
Figura 11 – Gráfico C_l/C_d	21
Figura 12 – Transição entre a pá e o cubo.....	22
Figura 13 – Fluxograma do Programa Hélice.....	25
Figura 14 – Confecção da hélice mono-pá 12,25x3,75.	26
Figura 15 – hélice mono-pá 12,25x3,75 antes do balanceamento.	27
Figura 16 – Balanceador de hélices.	28
Figura 17 – Bancada de testes da Equipe AVES.	29
Figura 18 – Croqui do Dinamômetro da Equipe AVES: a) Parafusos, b) Célula de Carga, c) Trilho, d) Conjunto Motor e Hélice.	29
Figura 19 – Balança calibrada.....	30
Figura 20 – Aferição da bancada de testes.....	31
Figura 21 – Tacômetro digital de contato Minipa MDT 2238a.	32
Figura 22 – Gráfico Tração x Rotação da hélice APC 12,25x3,75 Bi-pá.	34
Figura 23 – Gráfico Tração x Rotação da hélice APC 13x4 Bi-pá.....	35
Figura 24 – Gráfico Tração x Rotação da hélice APC 12,25x3,75 Mono-pá.	35
Figura 25 – Gráfico Tração x Rotação da hélice APC 13x4 Mono-pá.	36
Figura 26 – Fluxograma do programa otimizador.....	39
Figura 27 – Hélice APC 14x4.	40
Figura 28 – Gráfico Tração x Rotação da hélice APC 14x4 Mono-pá.	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. MOTIVAÇÃO.....	9
1.2. OBJETIVO	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	11
2.1. HÉLICE.....	11
2.2. PERFIL AERODINÂMICO	12
2.3. TEORIA DO ELEMENTO DE PÁ	14
3. METODOLOGIA.....	16
3.1. ESTUDO TEÓRICO DAS FORÇAS DAS HÉLICES.....	16
3.1.1. DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA.....	17
3.1.3. DADOS DE SAÍDA.....	24
3.1.4. FLUXOGRAMA DO PROGRAMA	25
3.2. ESTUDO PRÁTICO DAS FORÇAS DAS HÉLICES	26
4. RESULTADOS	32
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS	32
4.2 RESULTADOS DO PROGRAMA HÉLICE	33
4.3 ALTERAÇÃO DO PROGRAMA PARA OTIMIZAÇÃO	38
5. CONCLUSÃO.....	42
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	42
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
ANEXO 1.....	44

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho foi realizado o estudo da tração e rotação obtidas com a utilização de algumas hélices mono-pá em conjunto com o motor de combustão interna de pequeno porte utilizado nos protótipos da Equipe AVES de AeroDesign. Para obter esses dados, foram realizadas medições dos parâmetros geométricos das hélices e a partir destes, cálculos foram realizados. Os resultados obtidos nos cálculos foram posteriormente comparados com os resultados obtidos em ensaios com o dinamômetro e tacômetro da equipe, aparelhos que medem respectivamente tração e rotação.

1.1. MOTIVAÇÃO

Segundo Miranda(2014), um ponto de grande importância na escolha da hélice é a determinação da tração estática fornecida pela mesma com o avião parado, pois a partir desta condição é possível saber entre uma série de hélices estudadas qual delas proporciona melhores condições para a decolagem da aeronave. Em VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulado) destinados a transportar uma carga, a determinação da tração disponível em baixas velocidade é de extrema valia, uma vez que devido ao comprimento de pista limitado para a decolagem da aeronave, é muito importante que a hélice utilizada proporcione durante a corrida de decolagem uma rotação elevada e um alto torque do motor, resultando em um melhor aproveitamento da potência disponível no eixo do motor e consequentemente um maior valor de carga transportado pela aeronave.

A iniciativa para a realização desse estudo surgiu devido à curiosidade de se descobrir se a utilização de uma hélice mono-pá seria benéfica quando comparada a uma hélice bi-pá, que é o tipo de hélice comumente usado pelas equipes participantes da competição AeroDesign. Após uma pesquisa inicial, chegou-se às seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens	Desvantagens
Menos arrasto	Necessita de contrapeso (peso improdutivo)
Atingem maiores rotações	Linha de tração não coincide com o eixo do motor
Menor custo de fabricação	Vibração

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens da utilização de hélices mono-pás.

Ao analisar as vantagens da utilização de hélices mono-pás, pode-se observar que uma delas é o menor arrasto. A redução do mesmo se traduz em uma maior rotação máxima alcançada pelo motor, quando comparada à rotação alcançada quando o mesmo está equipado com uma hélice bi-pá de mesmas características geométricas.

Uma hélice é uma asa rotativa e a teoria que será utilizada nesse trabalho tem como base a equação da força de sustentação. Avaliando-se as variáveis presentes na equação da força de sustentação, mostrada abaixo, nota-se que a variável velocidade é elevada ao quadrado, de modo que, um aumento da mesma contribui de maneira significativa no aumento da sustentação.

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 C_L S \quad (1.1)$$

Isso permite concluir que, apesar de possuir apenas uma pá, existe a possibilidade de que uma hélice mono-pá forneça uma maior força de tração do que uma hélice bi-pá devido a maior rotação atingida pelo conjunto motor hélice.

1.2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é estudar as forças exercidas por hélices mono-pás e compará-las as forças exercidas por hélices bi-pá, além de mostrar as vantagens e desvantagens de cada um desses tipos de hélices. Esse estudo foi realizado desenvolvendo um programa em MatLab utilizando a teoria do elemento de pá e validando o mesmo através de ensaios das hélices utilizando uma célula de carga para medir as forças.

Após a validação do programa, pode-se projetar novas hélices, buscando uma maior tração.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.HÉLICE

Representando um elemento de grande importância num avião, a hélice tem a missão de absorver a força fornecida pelo motor e transformá-la na força de tração necessária ao voo. Em termos simples, uma hélice é um aerofólio torcido trabalhando em uma trajetória circular, com ângulo de ataque positivo em relação ao fluxo de ar, de forma a produzir tração em uma direção paralela ao plano de voo da aeronave. Pode ser constituída de uma pá (mono-pá), duas pás (bi-pá), três pás (tri-pá) ou mais pás. O desempenho de uma hélice depende de alguns fatores, entre eles podem se citar: o diâmetro em função da rotação, a área das pás em função da absorção de potência e o passo.

Cada hélice é definida por duas dimensões características, o diâmetro e o passo, normalmente indicados em polegadas. O diâmetro representa a distância entre as pontas das pás para o caso de uma hélice bipá, no caso de hélices mono-pá ou com múltiplas pás, o diâmetro é representado pela circunferência realizada durante o movimento. O passo representa o avanço (teórico) que a hélice daria em uma única volta, ou seja, uma hélice 13x4 tem um diâmetro de 13 polegadas e seu passo é de 4 polegadas, indicando que esta hélice se deslocaria 4 polegadas para frente a cada volta realizada.

A figura a seguir mostra as principais características geométricas de uma hélice.

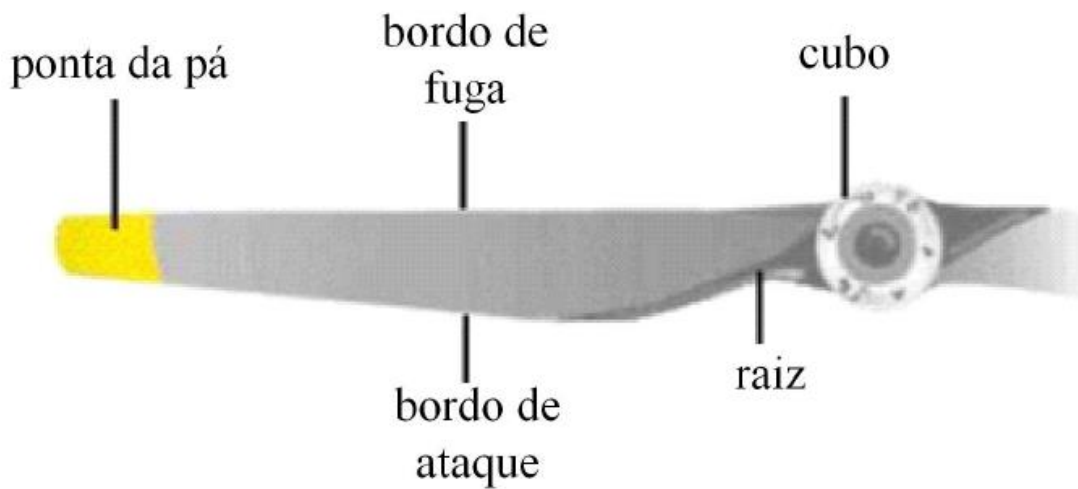


Figura 1- Características geométricas de uma hélice.

2.2. PERFIL AERODINÂMICO

Um perfil aerodinâmico é uma superfície projetada com a finalidade de se obter uma reação aerodinâmica a partir do escoamento do fluido ao seu redor. Os termos aerofólio ou perfil aerodinâmico são empregados como nomenclatura dessa superfície. A figura a seguir mostra um perfil aerodinâmico típico e suas principais características geométricas.

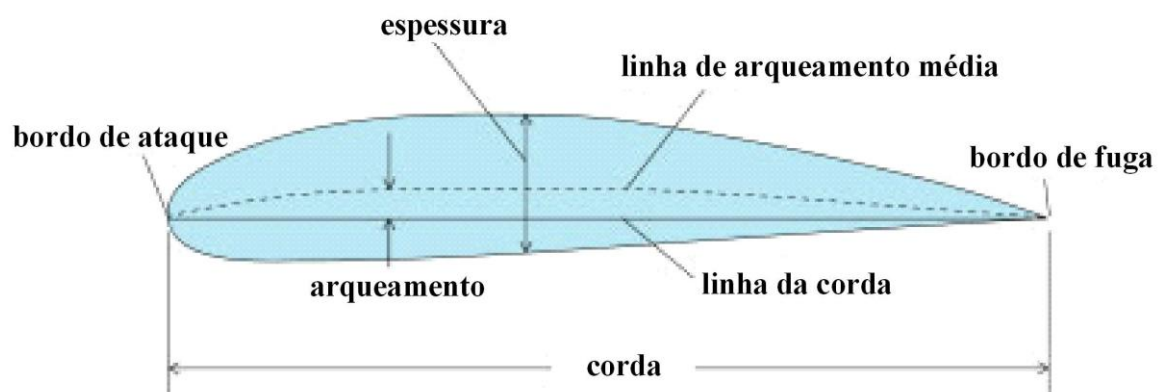


Figura 2 – Principais características geométricas de um perfil aerodinâmico.

A linha de arqueamento média representa a linha que define o ponto médio entre todos os pontos que formam as superfícies superior e inferior do perfil.

A linha da corda representa a linha reta que une os pontos inicial e final da linha de arqueamento média.

A espessura representa a altura do perfil medida perpendicularmente à linha da corda.

A razão entre a máxima espessura do perfil e o comprimento da corda é chamada de razão de espessura do perfil.

O arqueamento representa a máxima distância que existe entre a linha de arqueamento média e a linha da corda do perfil.

Ângulo de ataque: O ângulo de ataque é o termo utilizado pela aerodinâmica para definir o ângulo formado entre a linha de corda do perfil e a direção do vento relativo. Representa um parâmetro que influi decisivamente na capacidade de geração de sustentação do perfil. Normalmente, o aumento do ângulo de ataque proporciona um aumento da força de sustentação até um certo ponto no qual esta diminui bruscamente. Este ponto é conhecido como estol. O aumento do ângulo de ataque também proporciona o acréscimo da força de arrasto gerada. A Figura a seguir mostra um perfil aerodinâmico e seu respectivo ângulo de ataque, bem como as forças envolvidas.

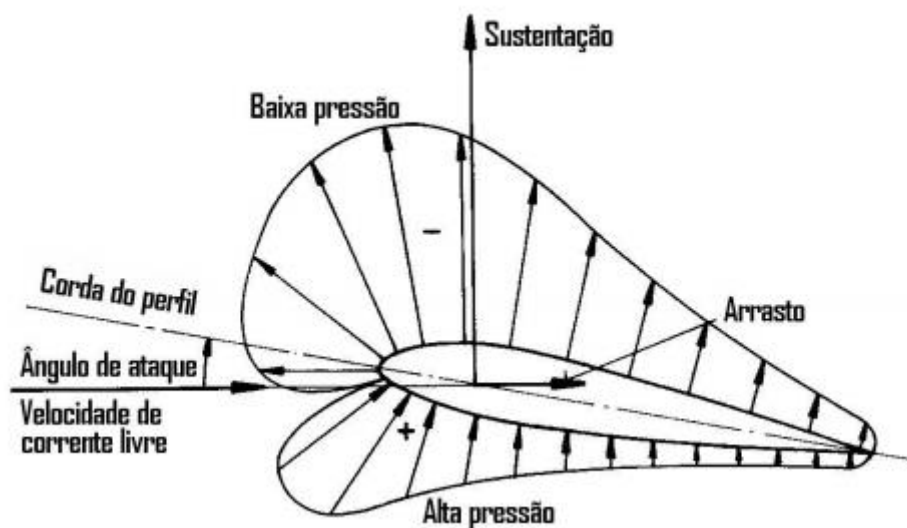


Figura 3 – Forças em um perfil aerodinâmico.

A dependência da sustentação e do arrasto com o ângulo de ataque podem ser medidas através de coeficientes adimensionais denominados coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto. Normalmente o ângulo de ataque crítico é em torno de 15° para a maioria dos perfis aerodinâmicos, porém com a utilização de uma série de dispositivos hipersustentadores adicionais, consegue-se aumentar esse valor para ângulos que podem variar de 20° até 45° .

2.3. TEORIA DO ELEMENTO DE PÁ

Antes de ser criada a Teoria do Elemento de Pá, foi criada a Teoria do Momento, que concentra suas hipóteses e cálculos no escoamento do fluido durante o funcionamento do sistema. Essa teoria é útil para analisarmos o caso ideal do escoamento em uma hélice, estimando um limite de operação, mas não leva em conta os efeitos de torque produzidos em uma hélice. Além disto, as forças que atuam em cada pá separadamente não são calculadas, impossibilitando um estudo mais detalhado das hélices. Com este objetivo, foi criada a teoria do elemento de pá, que analisa as forças atuantes em faixas transversais de comprimento infinitesimal em cada pá, como mostra a figura abaixo, para então somá-las, obtendo a força total em cada pá.

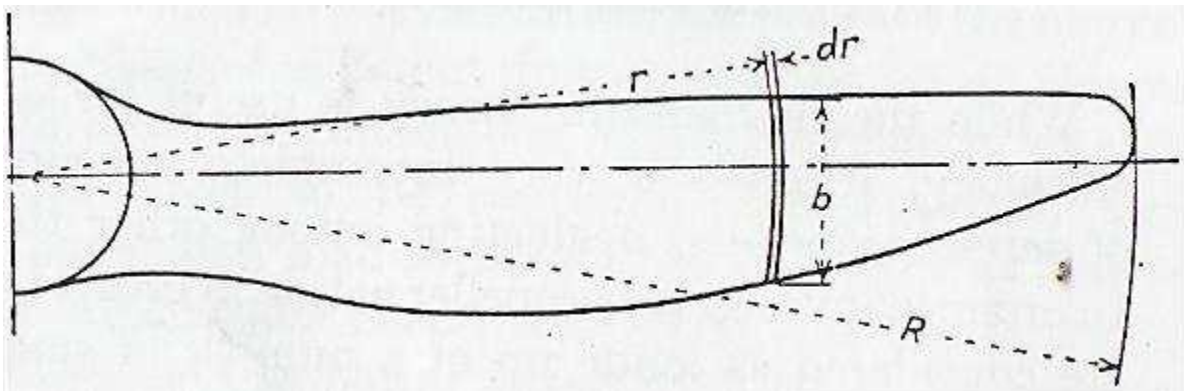


Figura 4 - Faixa transversal de comprimento infinitesimal em uma pá.

O caminho percorrido por um elemento de pá num hélice em operação é helicoidal, de tal forma que seu ângulo de ataque depende da velocidade da aeronave assim como a velocidade de rotação do hélice e do ângulo de incidência da mesma no

elemento em estudo. Devido ao fato deste trabalho ser um estudo estático, pode-se considerar uma velocidade axial nula, de modo que a velocidade é função apenas do movimento giratório do elemento.

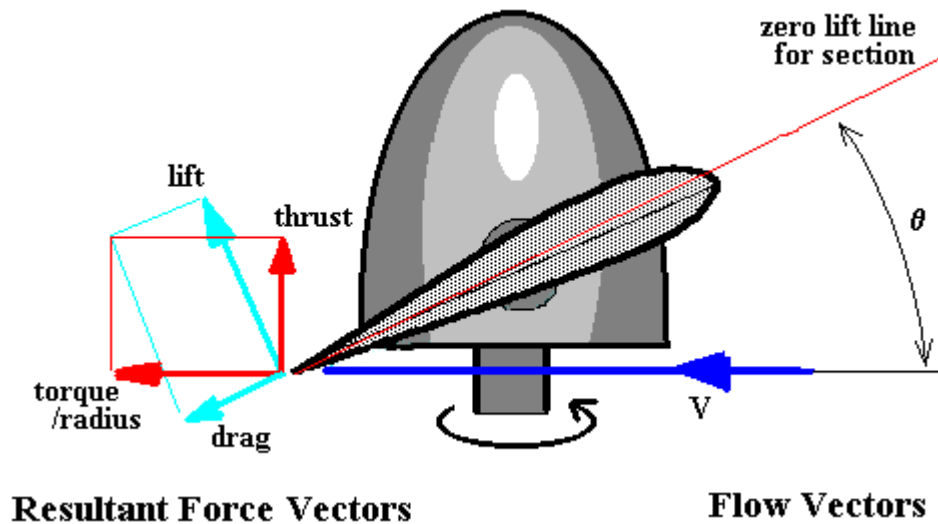


Figura 5 – Forças derivadas do movimento da hélice.

Segundo a Teoria do Elemento de Pá a sustentação é calculada pela equação:

$$dT = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot c \cdot (C_L \cos(\theta) - C_D \sin(\theta)) \cdot dr \quad (2.1)$$

Onde c é a corda do perfil, V a velocidade, θ o ângulo de ataque, ρ a densidade do ar, C_L o coeficiente de sustentação e C_D o coeficiente de arrasto.

Da mesma forma se consegue calcular o torque gerado pela hélice, com pequenas mudanças, tanto trigonométricas quanto na adição do raio (r) à equação:

$$dQ = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot c \cdot (C_L \sin(\theta) + C_D \cos(\theta)) \cdot r \cdot dr \quad (2.2)$$

As forças finais geradas pela hélice são obtidas pela integral das equações acima ao longo do raio, resultando na força gerada por apenas uma pá.

3. METODOLOGIA

3.1. ESTUDO TEÓRICO DAS FORÇAS DAS HÉLICES

O foco deste trabalho foi analisar as forças das hélices voltadas para o projeto AeroDesign. Para isto, um programa foi desenvolvido em MatLab com base nas características geométricas das hélices e utilizando a Teoria do Elemento de Pá para realizar os cálculos das forças envolvidas. Ele foi nomeado como Programa Hélice.

As duas principais equações utilizadas no Programa Hélice são:

$$dT = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot c \cdot (C_L \cos(\theta) - C_D \sin(\theta)) \cdot dr \quad (3.1)$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot c \cdot (C_L \sin(\theta) + C_D \cos(\theta)) \cdot r \cdot dr \quad (3.2)$$

Onde T e Q são respectivamente a tração e o torque gerados.

Essas equações calculam as forças em faixas transversais de comprimento infinitesimal em cada pá. O valor total de cada força gerada pela hélices é obtido através da integração das equações 3.1 e 3.2 ao longo do raio. Estes valores se referem apenas a uma pá e portanto foram multiplicados por 2 quando o Programa Hélice foi utilizado para realizar o estudo de hélices bi-pás.

O programa foi executado para quatro modelos de hélice, sendo dois modelos bi-pá comerciais (APC 13x4 e APC12,25x3,75) e dois modelos mono-pá com as mesmas características dos dois modelos bi-pá citados anteriormente, porém considerando-se apenas uma pá. Os dados de entrada do programa, bem como a forma como foram obtidos estão descritos na seção a seguir.

3.1.1. DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA

- Envergadura da pá:

Informada pelo fabricante, conforme modelo.

- Medida da corda ao longo da pá:

Obtida através de medição por paquímetro. As figuras abaixo mostram os gráficos da variação da corda ao longo da envergadura de cada modelo medido, obtidos através do software Microsoft Excel.

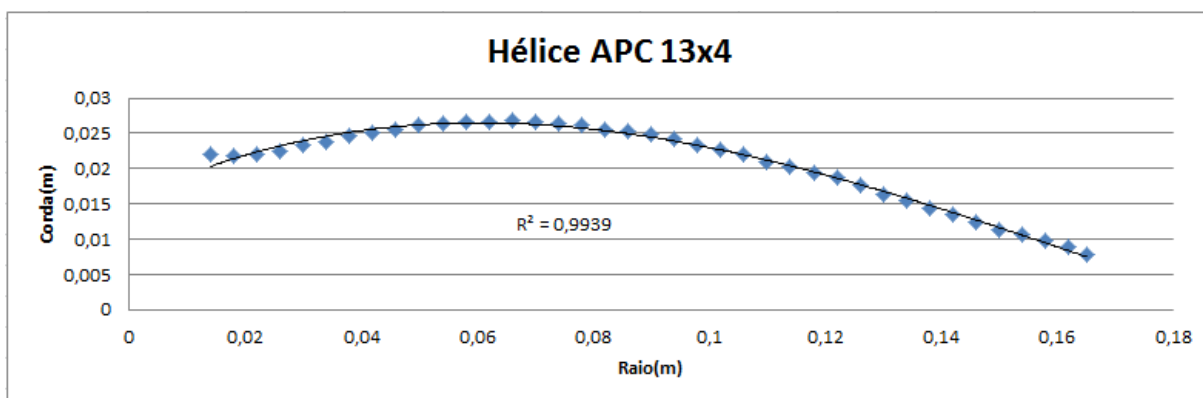


Figura 6 – Gráfico Corda x Raio referente a hélice APC 13x4.

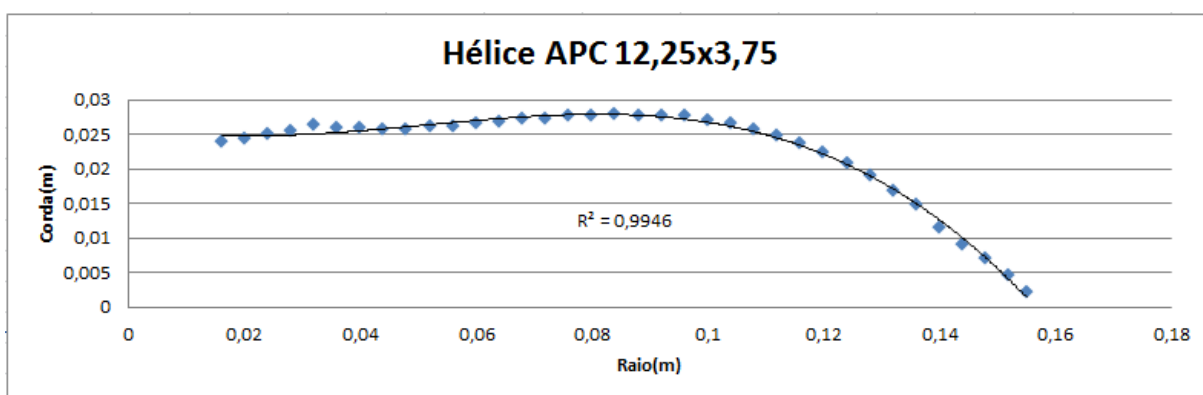


Figura 7 – Gráfico Corda x Raio referente a hélice APC 12,25x3,75.

Também com o auxílio do software *Microsoft Excel*, foram obtidas as equações polinomiais para os pontos plotados nos gráficos Corda x Raio:

Para a Hélice 12,25x3,75:

$$c = 255,1r^4 - 76,168r^3 + 5,3956r^2 - 0,0074r + 0,0207 \quad (3.3)$$

Para a Hélice 13x4:

$$c = 1,3828r^3 - 2,5534r^2 + 0,305r + 0,017 \quad (3.4)$$

A escolha do grau dos polinômios das equações se deu devido ao fato das curvas das equações polinomiais se aproximarem satisfatoriamente dos pontos coletados nas medições, não sendo necessário utilizar polinômios de maior grau, o que aumentaria o tempo de processamento do programa.

- Medida do ângulo de ataque ao longo da pá:

Obtida por trigonometria, utilizando as medidas da altura do Bordo de Ataque, Bordo de Fuga e Corda de cada seção transversal. As figuras abaixo mostram a variação do valor do ângulo de ataque ao longo da pá.

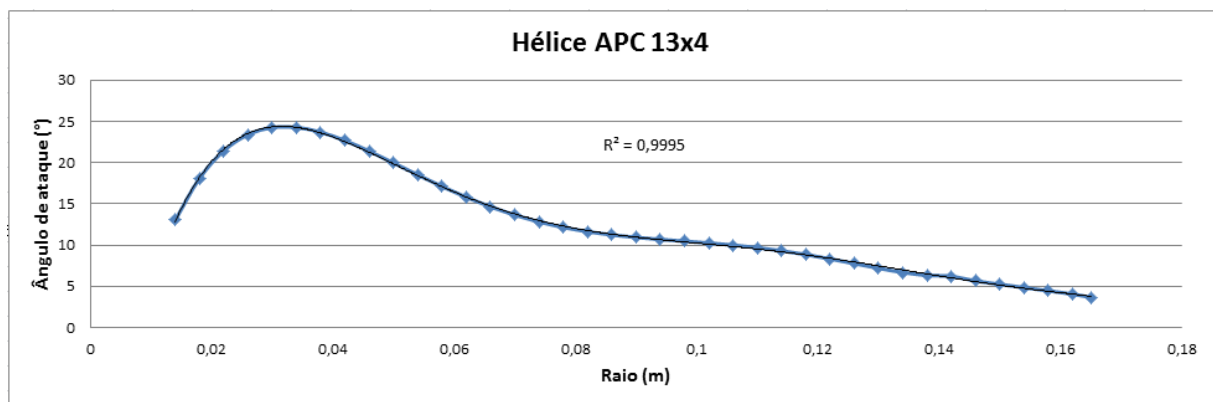


Figura 8 – Gráfico Ângulo de ataque x Raio referente a hélice APC 13x4.

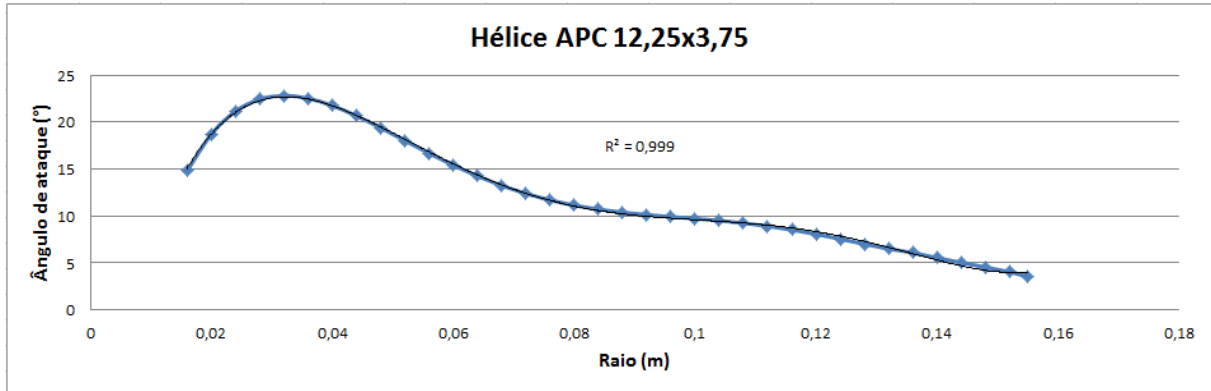


Figura 9 – Gráfico Ângulo de ataque x Raio referente a hélice APC 12,25x3,75.

Também com o auxílio do software Microsoft Excel, foram obtidas as equações polinomiais para os pontos plotados nos gráficos Ângulo de ataque x Raio:

Para a Hélice 12,25x3,75:

$$Alf = 1.10^7 r^5 - 7.10^6 r^4 + 1.10^6 r^3 - 97818 r^2 + 3428,2 r - 19,207 \quad (3.5)$$

Para a Hélice 13x4:

$$Alf = -9.10^7 r^6 + 6.10^7 r^5 - 2.10^7 r^4 + 2.10^6 r^3 - 147426 r^2 + 4651,2 r - 28,683 \quad (3.6)$$

O critério de escolha do grau dos polinômios das equações foi o mesmo utilizado para as curvas de Corda x Raio.

- Coeficiente de sustentação do perfil da pá (Cl):

Segundo o fabricante, o perfil aerodinâmico utilizada nas hélices é o Clark Y. Esse perfil foi considerado constante ao longo de toda a extensão da hélice, de modo que o coeficiente de sustentação varie com o ângulo de ataque. Foi calculado um número de Reynolds médio, utilizando a equação abaixo para um escoamento externo em um perfil:

$$Re = \frac{V \cdot c}{\nu} \quad (3.7)$$

Onde V é a velocidade, c a corda e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

O valor médio do Número de Reynolds obtido através da equação foi da ordem de 10^5 . Com este valor e o perfil determinado, pode-se obter através do software *Airfoil Tools* o gráfico que relaciona o coeficiente de sustentação ao ângulo de ataque, mostrado na figura a seguir.

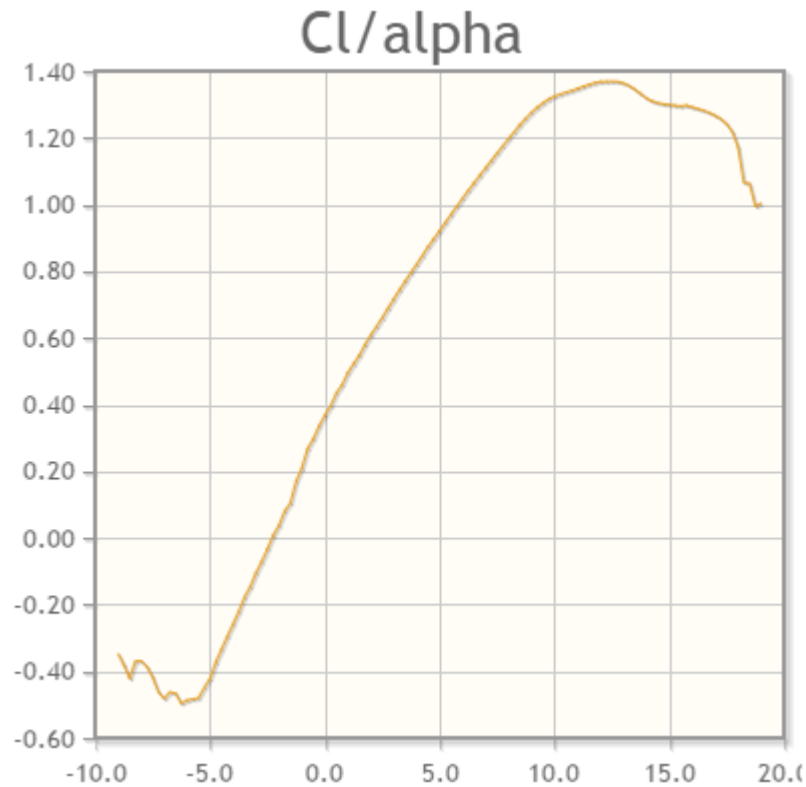


Figura 10 – Gráfico C_l x Alfa.

A partir dos pontos coletados no gráfico da figura 10, pôde-se obter a equação 3.8, que relaciona o coeficiente de sustentação do perfil Clark Y(C_l) ao ângulo de ataque (Alfa).

$$C_l = 0,091071\text{Alf} + 0,28071 \quad (3.8)$$

- Coeficiente de arrasto do perfil da pá (C_d):

Utilizando o software *Airfoil Tools*, foi obtido o gráfico que relaciona o coeficiente de arrasto ao coeficiente de sustentação, Também conhecido como C_l/C_d . Este gráfico pode ser observado na figura que segue:

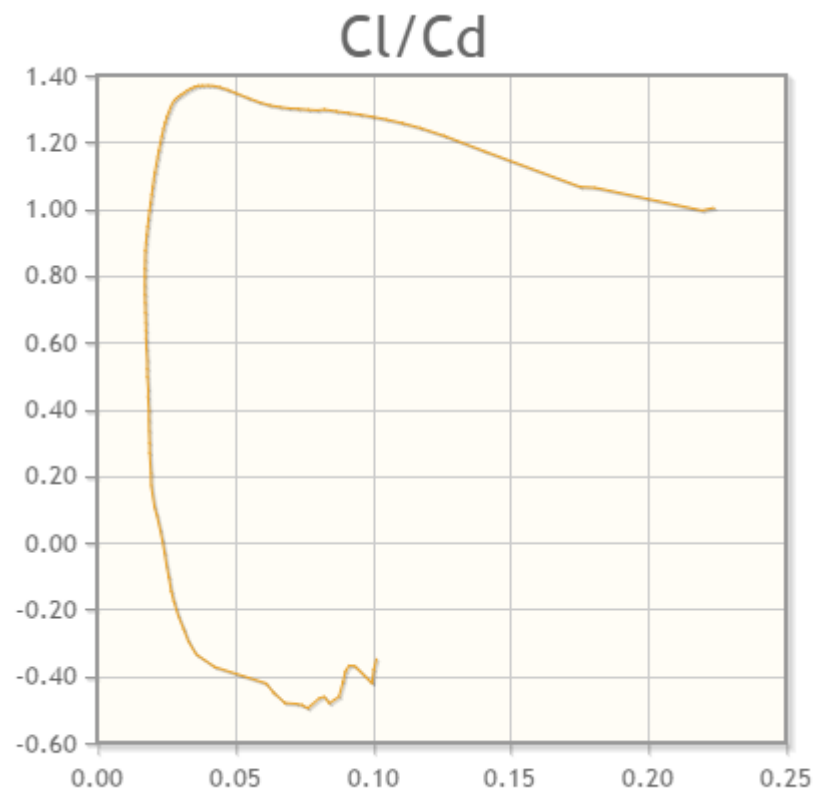


Figura 11 – Gráfico Cl/Cd.

A partir dos pontos coletados no gráfico da figura 11, pôde-se obter a equação 3.9, que relaciona o coeficiente de arrasto do perfil Clark Y(Cd) ao coeficiente de sustentação (Cl).

$$Cd = 0,06408Cl^3 - 0,12055Cl^2 + 0,062974Cl + 0,014138 \quad (3.9)$$

▪ Arrasto da região improdutiva:

As hélices estudadas nesse trabalho possuem regiões improdutivas, ou seja, regiões que não geram sustentação, mas oferecem resistência aerodinâmica (arrasto). No caso das hélices bi-pás, essa região corresponde a zona de transição entre o cubo da hélice (centro) e a pá. Essa zona pode ser observada em destaque na figura a seguir. Nas hélices mono-pás, existe também o contrapeso.



Figura 12 – Transição entre a pá e o cubo.

Para calcular o valor do arrasto, foi utilizada a equação do arrasto. Esta foi multiplicada pelo raio para se obter o valor de torque, que deve ser somado ao torque necessário para rotacionar a pá, cujo cálculo foi demonstrado anteriormente através da Teoria de Elemento de Pá.

$$Td = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Cd \cdot A \cdot V^2 \cdot r \quad (3.10)$$

Para a zona de transição entre a pá e o cubo da hélice, foi considerado o coeficiente de arrasto de 0,6, correspondente ao de uma elipse de comprimento duas vezes maior que a altura. Para o contrapeso, foi considerado o coeficiente de arrasto de 1,05, correspondente ao de um cubo. Ambos correspondem a um número de Reynolds maior que 10^3 .

Devido ao fato da velocidade linear variar com o raio, foi necessária a integração da equação anterior em relação ao mesmo para se obter a soma do torque de todas as infinitas seções transversais. Então, temos:

$$Td = \int \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Cd \cdot (w \cdot r)^2 \cdot h \cdot r \cdot dr \quad (3.11)$$

Nessa equação o intervalo de integração corresponde ao raio mínimo e máximo da região, o produto $w.r$ corresponde a velocidade linear e a área frontal foi decomposta no produto entre a altura (h) e a largura infinitesimal (dr).

- Rotação do Motor:

O valor de rotação utilizado no programa deve ser previamente medido em ensaio através de tacômetro, pois varia de acordo com a hélice utilizada. Esse valor pode variar entre 2000 e 17000 rpm, de acordo com o manual de instruções do motor.

- Densidade do ar:

Foi considerado o valor de $1,225\text{kg/m}^3$ referente ao nível do mar e temperatura de 25°C .

3.1.2 ALGORITMO

Após a definição dos dados de entrada do programa, o algoritmo segue a sequência dos subtópicos abaixo.

- Variação da rotação:

Foi adotada como rotação inicial a de marcha lenta do motor, que é em torno de 2000 rpm. Este valor foi acrescido 100 de 100 rpm até a rotação máxima atingida por cada hélice, que foi obtida posteriormente durante a fase de ensaios. Essa variação por enquanto não é necessária, visto que o objetivo é obter a tração máxima fornecida por cada modelo de hélice, de modo que apenas o valor máximo de rotação alcançado em cada ensaio seria necessário. Entretanto, além de facilitar a visualização do gráfico resultante desse algoritmo, a variação da rotação será necessária mais à frente nesse trabalho.

- Variação do raio:

A região produtiva de cada pá, região na qual existe um perfil aerodinâmico do tipo Clark Y e portanto gera sustentação, inicia-se 40mm após o eixo de rotação da hélice e termina na ponta da pá (165mm para as hélices APC 13x4 Mono-pá e Bi-pá e 155mm para as hélices APC 12,25x3,75 Mono-pá e Bi-pá).

Devido a problemas ao utilizar a função de integração do software MatLab, resolveu-se adotar uma alternativa à integração através da divisão do comprimento da pá em pequenas seções transversais de 0,001mm de comprimento, valor esse jugado suficiente para se obter uma boa precisão no resultado. Cada seção possui uma corda e ângulo de ataque específicos, que são calculados a partir do raio na qual se encontra, utilizando as equações 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6, de acordo com a hélice considerada no programa.

A partir do cálculo do ângulo de ataque, pôde-se obter o valor do coeficiente de sustentação a partir da equação 3.8 e o coeficiente de arrasto a partir da equação 3.9.

Finalmente, foi calculado o valor da tração e do torque referentes a seção da pá, utilizando as equações 3.1 e 3.2 respectivamente. Para se obter o valor da variável velocidade nessas duas equações, primeiramente foi obtido o valor da velocidade angular (w) e este foi multiplicado pelo raio da seção, resultando na velocidade em metros por segundo (V), conforme mostrado nas equações a seguir:

$$w = 2.\pi.rpm/60 \quad (3.12)$$

$$V = w.r \quad (3.13)$$

3.1.3. DADOS DE SAÍDA

Como saídas do programa, temos o somatório das forças de tração e o somatório dos torques de cada elemento de pá, que são relacionados, em um gráfico, as rotações para as quais foram calculados.

3.1.4. FLUXOGRAMA DO PROGRAMA

Segue o fluxograma básico de funcionamento do programa:

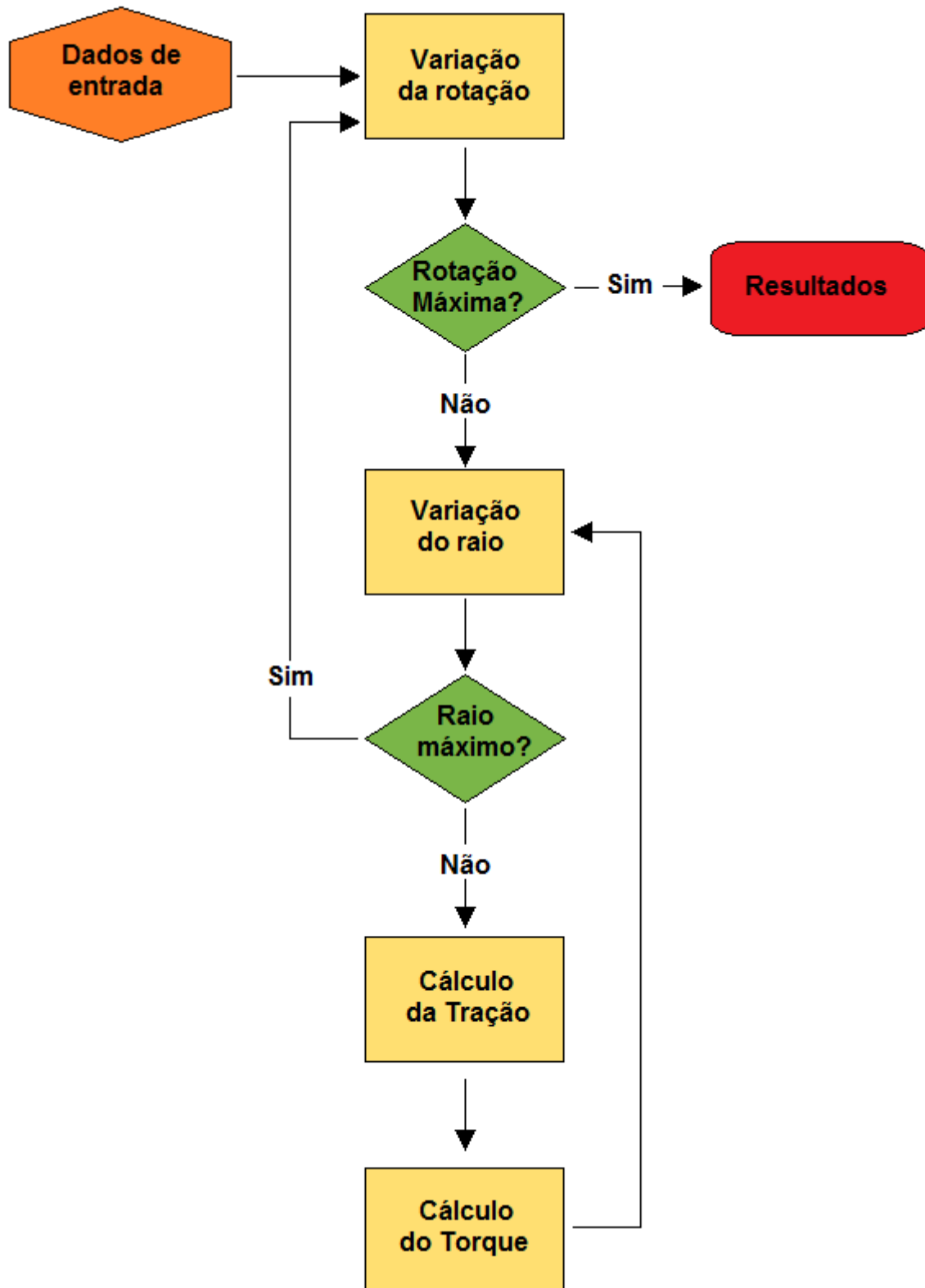


Figura 13 – Fluxograma do Programa Hélice.

3.2. ESTUDO PRÁTICO DAS FORÇAS DAS HÉLICES

Com o intuito de realizar a validação do Programa Hélice, ensaios de tração estática foram realizados com quatro modelos de hélice, sendo dois modelos bi-pá comerciais (APC 12,25x3,75 e APC 13x4) e dois modelos mono-pá confeccionados a partir dos modelos bi-pá anteriores, removendo-se, de cada hélice, uma das pás e acrescentado um contrapeso de aço. As figuras 14 e 15 mostram a confecção de um dos modelos.



Figura 14 – Confeção da hélice mono-pá 12,25x3,75.



Figura 15 – hélice mono-pá 12,25x3,75 antes do balanceamento.

Após a remoção de uma das pás e a adição do contrapeso, foi necessário realizar o balanceamento estático da hélice para que seu centro de massa se aproximasse ao máximo do eixo de rotação da mesma, reduzindo a vibração.

O balanceamento foi realizado removendo-se material aos poucos das extremidades do contrapeso e verificando-se o equilíbrio da hélice com o auxílio de um balanceador de hélice magnético, como pode ser visto na figura 16.



Figura 16 – Balanceador de hélices.

Para realizar a medição dos valores de tração reais fornecidas por cada uma das quatro hélices analisadas e com isso posteriormente realizar a validação do programa, foram feitos ensaios com a bancada de testes de tração da equipe AVES, que pode ser apreciada abaixo:



Figura 17 – Bancada de testes da Equipe AVES.

Um croqui foi feito para melhor compreensão do funcionamento da bancada de testes de tração e pode ser observado na figura 18.

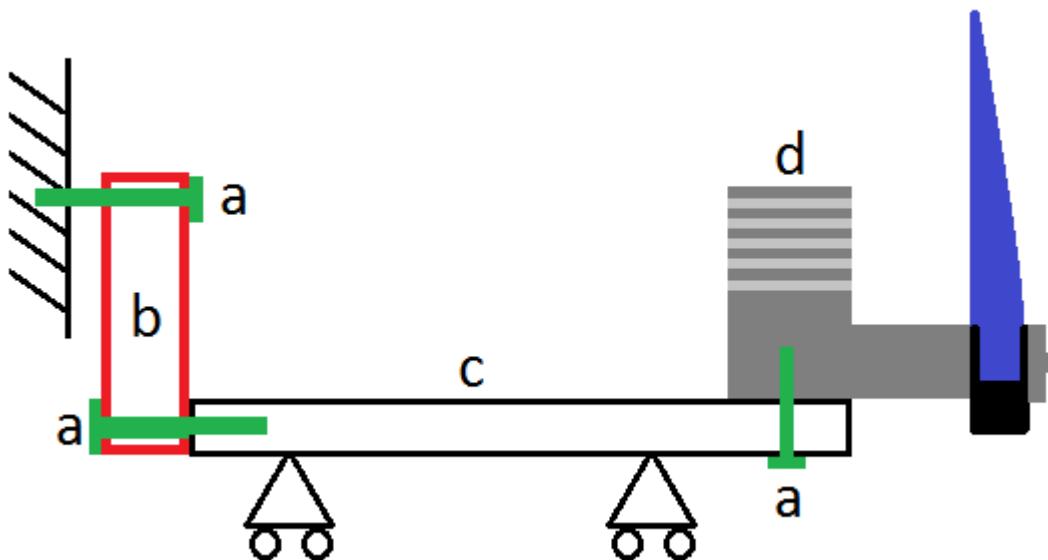


Figura 18 – Croqui do Dinamômetro da Equipe AVES: a) Parafusos, b) Célula de Carga, c) Trilho, d) Conjunto Motor e Hélice.

A bancada de testes funciona da seguinte forma: Um lado de uma célula de carga está engastada em uma base rígida de madeira. O outro lado está engastado em um dos lados de um trilho, que desliza livremente sobre a base de madeira. No outro lado do trilho está engastado o conjunto motor e hélice. Quando em funcionamento, a força de tração gerada pelo conjunto motor e hélice é transmitida à célula de carga através do trilho. A deformação gerada pela tração na célula de carga é medida através de Strain Gages (extensômetros), que são transdutores posicionados na superfície da célula de carga para obter deformações. Eles estão conectados em um circuito eletrônico. Quando deformados, variam suas resistências. Essas variações são percebidas pelo circuito eletrônico e convertidas para um valor de força.

A célula de carga utilizada na bancada de testes, bem como o circuito eletrônico e o display, foram retirados de uma balança comercial. Por esse motivo, além dos valores indicados no display possuírem como unidade de medida a massa (em gramas), jugou-se que seriam desnecessários cálculos para relacionar a deformação da célula de carga ao valor mostrado pelo display, desde que fosse verificada uma correta calibração do conjunto. Para isso, foram realizados ensaios com a bancada, pendurando-se variadas peças de aço de massa conhecida em uma corda, que através de uma polia, exercia tração no local onde o conjunto motor e hélice é fixado. Na figura 19 pode-se observar uma Balança calibrada pelo Inmetro, que foi utilizada para descobrir o valor de massa de cada peça de aço.



Figura 19 – Balança calibrada.

Na figura 20 pode-se observar a foto de um dos ensaios. Os valores indicados no display da bancada durante o ensaio corresponderam com os valores de massa das peças de aço obtidos com a balança calibrada pelo Inmetro, indicando que a bancada de testes está calibrada.



Figura 20 – Aferição da bancada de testes.

Para obter o valor da rotação atingida pelo motor em conjunto com cada um dos modelos de hélice, foi utilizado um tacômetro digital de contato modelo MDT 2238a fabricado pela Minipa, com precisão de 0,05%.



Figura 21 – Tacômetro digital de contato Minipa MDT 2238a.

4. RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Após a aferição da bancada de testes, o motor foi instalado e os ensaios para coletar a tração e rotação correspondentes a cada hélice foram realizados. Decidiu-se obter os valores desses parâmetros apenas para a potência máxima do motor, afim de simplificar os ensaios e devido ao fato de representar o modo como o motor é requisitado durante a corrida de decolagem na competição Aerodesign. Foi escolhido um dia em que as condições climáticas fossem próximas das adequadas para a realização do experimento. A temperatura era de 27°C, umidade relativa de 65%, pressão atmosférica de 1010hPa e intensidade do vento de 0km/h. Os resultados dos ensaios podem ser observados na tabela a seguir.

Hélice	Tração(N)	Rotação(rpm)
12,25x3,75 Mono-pá	33,35	16500
13x4 Mono-pá	29,45	15300
12,25x3,75 Bi-pá	43,65	14000
13x4 Bi-pá	38,29	12300

Tabela 2 – Resultados dos ensaios e do programa.

4.2 RESULTADOS DO PROGRAMA HÉLICE

Após a realização dos ensaios com a bancada de testes da Equipe AVES, e consequentemente obtidos os valores das rotações máximas atingidas por cada modelo de hélice, pôde-se executar o Programa hélice. O algoritmo foi então executado para cada um dos quatro modelos de hélice disponíveis, modificando-se os dados de entrada de acordo com as características geométricas de cada um dos modelos de hélice e a rotação atingida no ensaio.

Os primeiros resultados obtidos através do programa foram comparados com os resultados obtidos através dos ensaios. Ao se realizar essa comparação, notou-se que os valores de tração obtidos no programa eram significativamente maiores. Concluiu-se que a diferença entre os resultados teóricos e empíricos devem-se ao fato do programa considera uma hélice perfeitamente confeccionada e que opera sob condições ideais, o que na prática não ocorre devido aos pequenos valores de corda ao longo da hélice, o que dificulta a perfeita confecção do perfil Clark Y. Além disso, o motor e a bancada de testes não possuem formato aerodinâmico.

Devido aos motivos citados, foram realizados alguns testes e verificou-se que a adoção de um fator de correção de 0,69 sobre a tração resultante de cada modelo de hélice no programa resultou em um erro máximo de 5% para mais ou para menos para todos os modelos, valor esse considerado aceitável. Assim como a tração, o torque também é obtido a partir da decomposição das forças de sustentação e arrasto geradas pela hélice, sendo então necessário aplicar o mesmo fator de correção sobre ele.

O algoritmo foi então novamente executado para cada modelo de hélice e foram coletados novos resultados. Nas figuras 22, 23, 24 e 25 pode-se observar os gráficos resultantes do programa para os quatro modelos de hélice estudados.

Enquanto no ensaio o resultado é apenas a tração máxima atingida por cada hélice, no programa o resultado é a curva tração x rotação. O motivo é que, ao contrário dos ensaios, no programa consegue-se obter com relativa facilidade essa curva, além da mesma facilitar a visualização dos resultados.

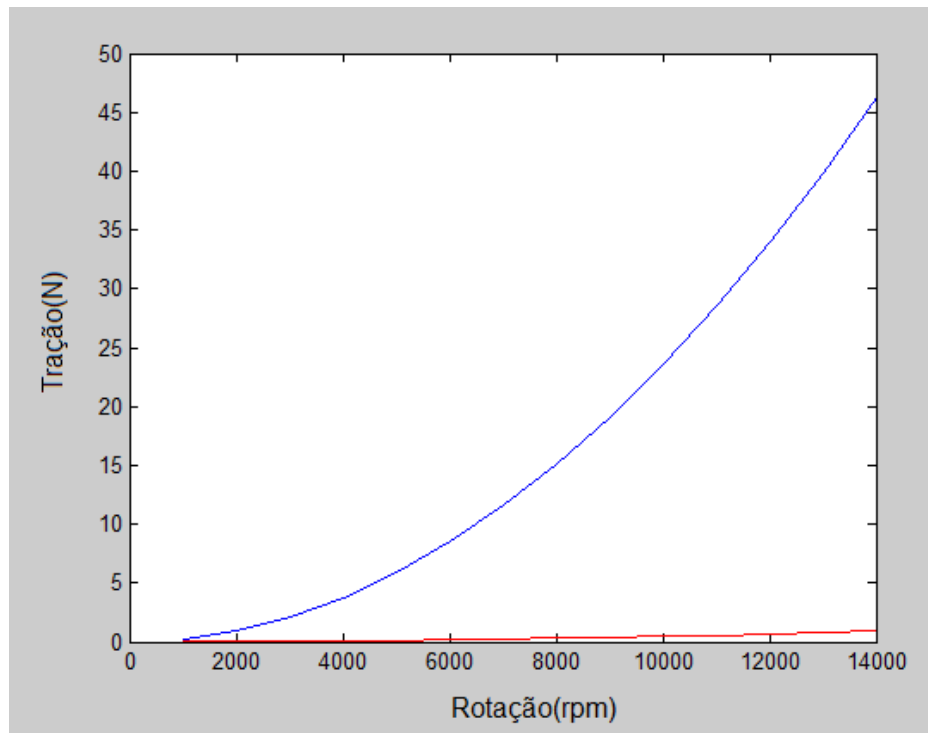


Figura 22 – Gráfico Tração x Rotação da hélice APC 12,25x3,75 Bi-pá.

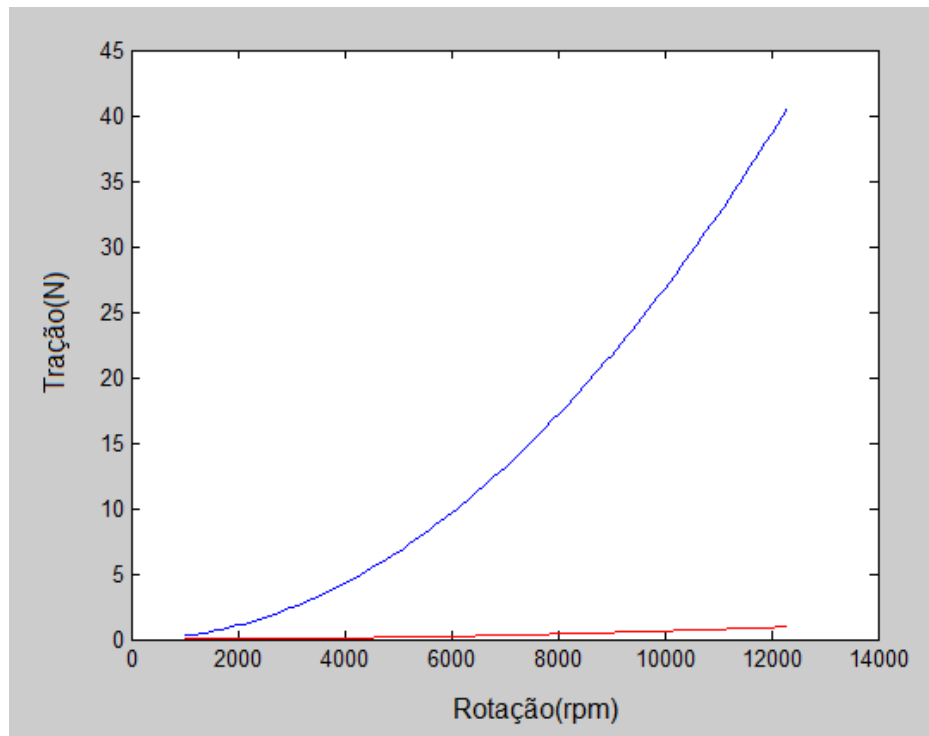


Figura 23 – Gráfico Tração x Rotação da hélice APC 13x4 Bi-pá.

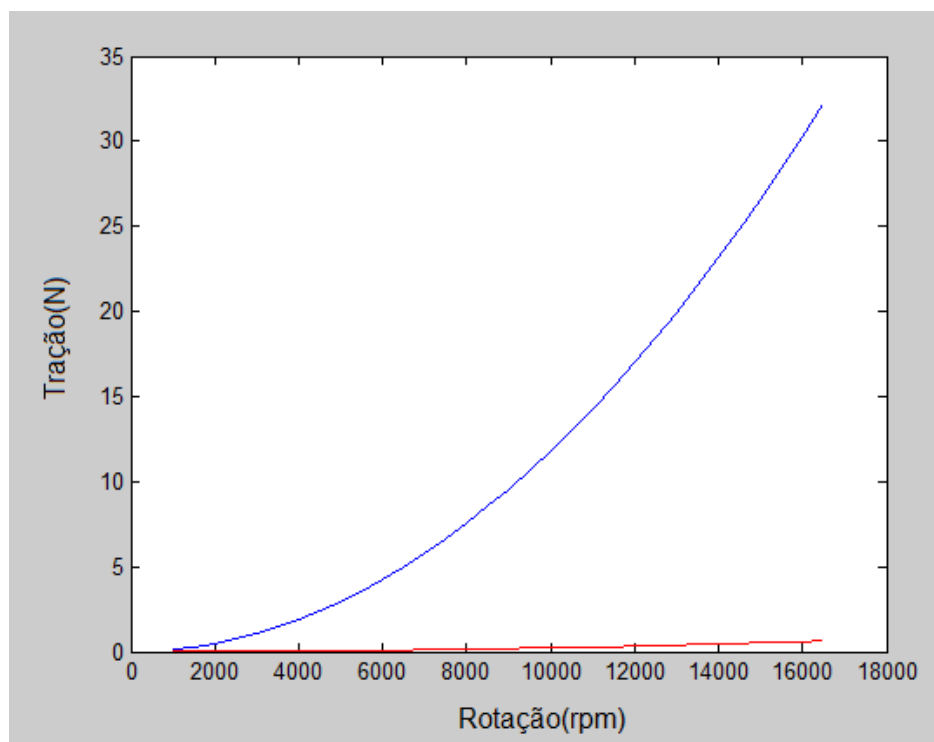


Figura 24 – Gráfico Tração x Rotação da hélice APC 12,25x3,75 Mono-pá.

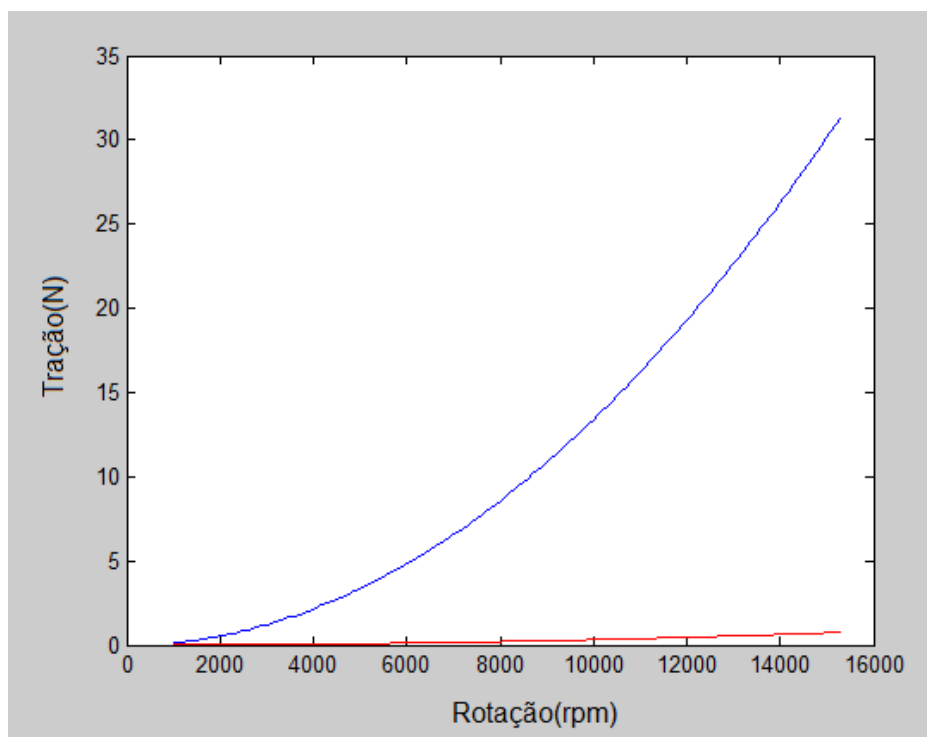


Figura 25 – Gráfico Tração x Rotação da hélice APC 13x4 Mono-pá.

Na tabela 3 a seguir, pode-se observar os valores de tração e torque obtidos no programa para cada modelo de hélice considerado. A potência foi calculada através do produto entre o torque e a rotação e foram realizadas as devidas correções de unidade.

Hélice	Tração(N)	Torque(Nm)	Rotação(rpm)	Potência(hp)
12,25x3,75 Mono-pá	32,13	0,623	16500	1,463838095
13x4 Mono-pá	31,35	0,75	15300	1,634081633
12,25x3,75 Bi-pá	46,25	0,895	14000	1,78431746
13x4 Bi-pá	40,5	0,965	12300	1,690259864

Tabela 3 – Resultados do programa.

Na tabela 4, pode-se observar os valores de erro para cada modelo de hélice avaliado.

Hélice	Rotação (rpm)	Ensaio	Programa	Erro (%)
		Tração (N)	Tração (N)	
12,25x3,75 Mono-pá	16500	33,35	31,671	-5,034482759
13x4 Mono-pá	15300	29,45	30,90234	4,931544992
12,25x3,75 Bi-pá	14000	43,65	45,5883	4,440549828
13x4 Bi-pá	12300	38,29	39,9234	4,265865761

Tabela 4 – Comparação entre os resultados.

Ao analisar os valores de torque e rotação de cada hélice, percebeu-se que os valores de torque correspondentes às hélices mono-pás são menores que os valores correspondentes às hélices bi-pás. Por esse motivo, as hélices mono-pás atingem maiores rotações.

A hélice cujo valor de potência mais se distancia da potência máxima do motor é a 12,25x3,75 mono-pá. Durante os ensaios este modelo atingiu uma rotação muito próxima à máxima que pode ser atingida pelo motor. Devido ao fato do motor da Equipe ser utilizado em competições nas quais opera no limite, concluiu-se que o mesmo apresenta certo desgaste e portanto não é mais capaz de atingir a rotação máxima de 17000 rpm informada no manual. Um cálculo foi realizado a partir do valor de torque correspondente à hélice 12,25x3,75 mono-pá e percebeu-se que para atingir a média de potência dos outros três modelos de hélice ensaiados, a mesma deveria alcançar uma rotação de 19200rpm, rotação essa que não pode ser alcançada pelo motor da Equipe AVES.

Analisando os valores de potência das outras hélices, percebeu-se que os mesmos são próximos entre si e que as rotações atingidas por essas hélices se encaixam no intervalo de rotação no qual o motor pode trabalhar. Resolveu-se então calcular a potência média das hélices, desprezando o valor encontrado para a hélice 12,25x3,75 mono-pá devido aos motivos citados no parágrafo anterior. O valor de potência média encontrado foi de 1,70hp.

4.3 ALTERAÇÃO DO PROGRAMA PARA OTIMIZAÇÃO

Afim de se obter uma hélice mono-pá que forneça uma tração maior do que a tração fornecida pela hélice atualmente utilizada pela Equipe AVES (APC 12,25x3,75), o Programa hélice foi então modificado de modo a considerar o valor de potência média calculado como restrição. No novo programa, após cada acréscimo no valor da rotação, uma nova potência é calculada. Se esse valor for menor que a potência média (1,70hp), é realizado um novo acréscimo na rotação. Caso contrário, o programa finaliza, fornecendo a tração e a rotação máximas atingidas pelo modelo de hélice que está sendo analisado. Essa modificação permite então que novas hélices possam ser avaliadas com base apenas nas suas características geométricas, sem a necessidade da realização de ensaios, evitando-se desperdício de tempo, bem como custos adicionais.

A seguir, o fluxograma referente ao programa modificado.

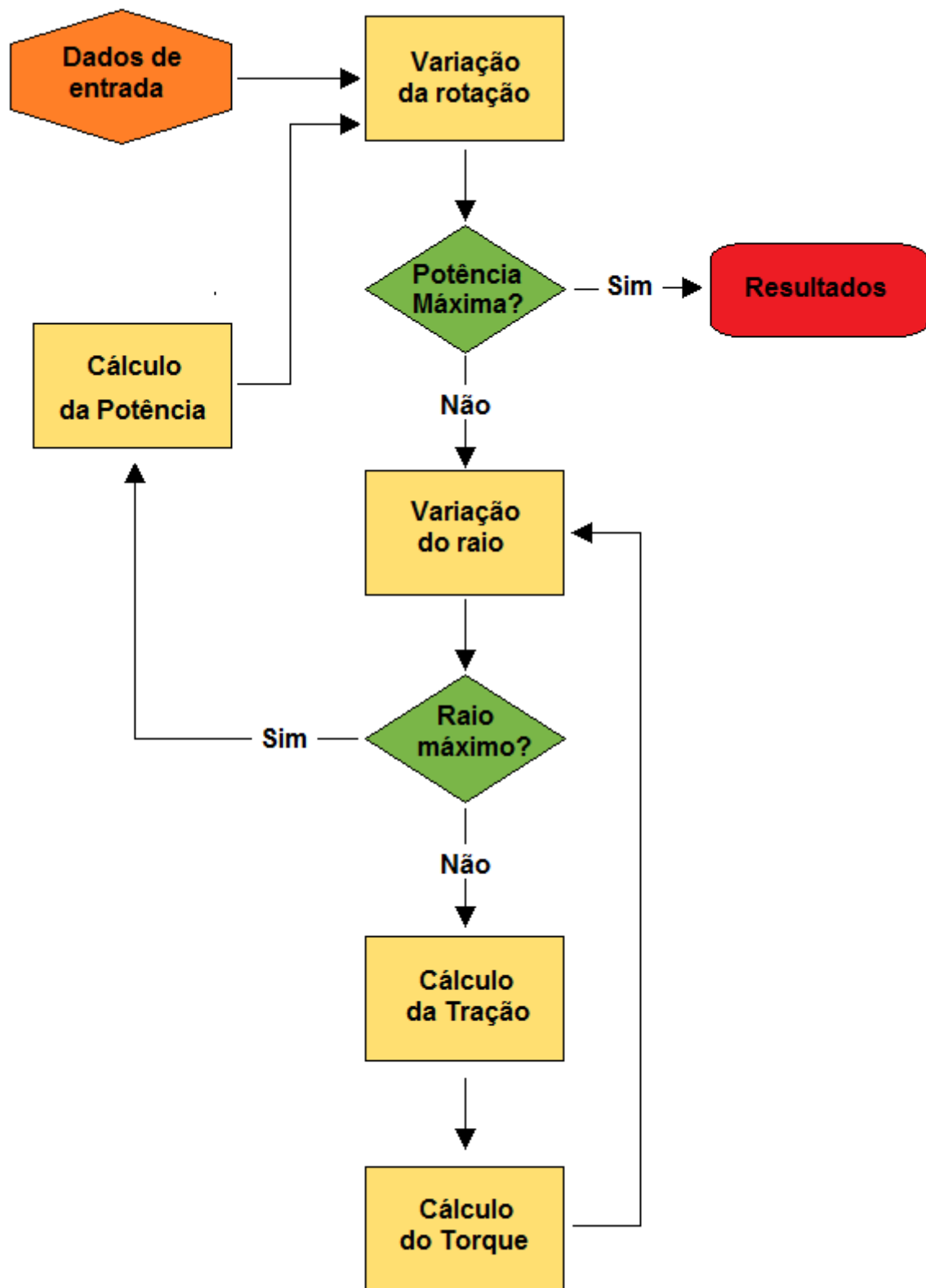


Figura 26 – Fluxograma do programa otimizador.

Realizadas as modificações, decidiu-se avaliar um novo modelo de hélice mono-pá, de maior diâmetro. Esse novo modelo baseia-se na hélice APC 14x4, modelo bi-pá comercial, no qual cada pá possui um acréscimo de meia polegada na envergadura em relação à hélice APC 13x4 e também possui diferentes características geométricas, como alterações nos valores da corda ao longo da pá. O estudo então foi realizado considerando-se apenas uma pá. Resolveu-se estudar esse modelo devido ao fato de possuir envergadura e cordas ligeiramente maiores que os modelos ensaiados anteriormente, podendo então fornecer como resultado uma maior tração.



Figura 27 – Hélice APC 14x4.

Os dados desse modelo de hélice foram então inseridos como dados de entrada do programa e o mesmo foi executado, obtendo-se o gráfico mostrado na figura a seguir.

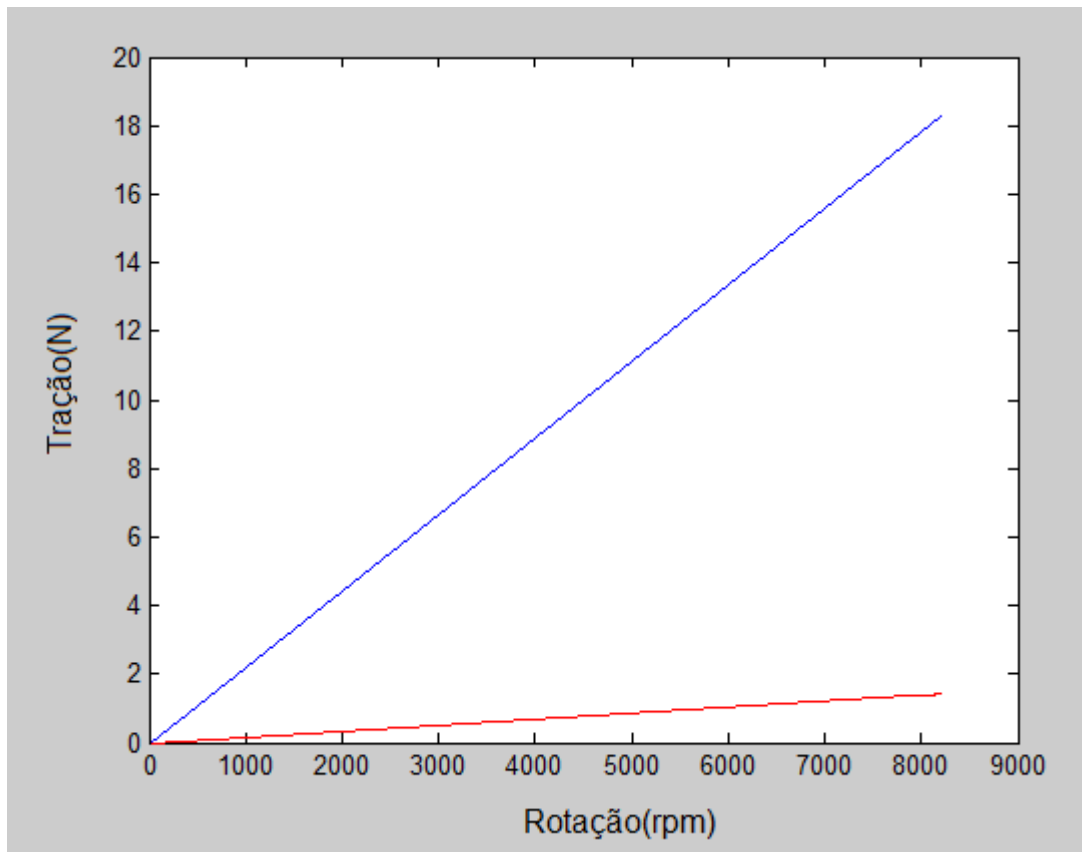


Figura 28 – Gráfico Tração x Rotação da hélice APC 14x4 Mono-pá.

A seguir, os resultados obtidos no programa para a hélice em questão.

Hélice	Tração(N)	Torque(Nm)	Rotação(rpm)	Potência(hp)
14x4 Mono-pá	18,26	1,435	8200	1,63

Tabela 5 – Resultados da hélice APC 14x4 Mono-pá

Como pode-se observar na tabela, o valor de tração fornecido por esse modelo de hélice foi aquém das expectativas.

5. CONCLUSÃO

Apesar das hélices mono-pás se mostrarem promissoras em relação aos outros tipos de hélices devido as suas características, durante o estudo realizado nesse trabalho comparando-as com as hélices bi-pás percebeu-se que a utilização das mono-pás não é vantajosa devido a alguns fatores como:

- A dificuldade de balanceamento, que torna trabalhosa a confecção da hélice;
- A vibração excessiva devido ao fato da força resultante não coincidir com o eixo do motor, característica que além de danificar os rolamentos do motor exigem uma estrutura reforçada na aeronave para suportar esses esforços e aumenta os riscos de acidentes.
- A elevada rotação atingida pelo motor, que promove o desgaste prematuro do mesmo e um consumo excessivo de combustível.

Outro fator que foi observado durante o desenvolvimento deste trabalho foi que ao estudar atentamente o regulamento da 18ª competição SAE Brasil Aerodesign 2016, percebeu-se que na seção que discute a respeito das hélices permitidas na competição, está escrito que é proibido a utilização de hélices cujo material seja metálico ou contenha partes de metal, o que torna inviável a utilização de hélices mono-pás na competição, visto que o contrapeso deve ser preferencialmente confeccionado com um material metálico que, por ser mais denso, torna seu tamanho menor e conseqüentemente gera menos arrasto.

Entretanto, o estudo realizado se demonstrou satisfatório e de extrema valia, visto que sanou a dúvida a respeito da utilização das hélices mono-pás e principalmente permitiu o desenvolvimento do Programa Hélice, que permite que a Equipe AVES possa estudar novos modelos de hélices para projetos futuros.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como melhoria para esse trabalho modificações no Programa Hélice para o estudo da tração voltado apenas para as hélices bi-pás, visto que as mesmas

demonstraram melhores resultados durante esse estudo. Dentre as modificações, deve-se inserir no programa um estudo dinâmico da força de tração das hélices, obtendo-se a curva Tração x Velocidade para cada modelo estudado. Recomenda-se também a implementação no programa de variações de parâmetros como a razão de aspecto, afilamento, passo e diâmetro das hélices, com o intuito de se projetar um novo modelo de hélice adequado à competição SAE Brasil Aerodesign.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rodrigues, L. E. M. J. . **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho.** Salto/SP,2014.
2. Violato, G. O. ; Lacava, P. T. **Estudo do Funcionamento e do Processo de Escolha de Hélices para um Veículo Aéreo Não-Tripulado.** São José dos Campos/SP,2006.
3. FOX, R. W. **Introdução a Mecânica dos Fluidos.** 6. Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2006.
4. Shukla, A.; Tanwar, S.; Sorout, M; Sinha, J. **Design of Experimental Set-Up for Propeller Test Rig and Thrust Calculation at Different RPM.**
5. AIRFOIL TOOLS. Disponível em <http://www.airfoiltools.com>
6. PERFORMANCE DATA FILES. Disponível em <http://www.apcprop.com>
7. EQUIPE AERO VITÓRIA ESPÍRITO SANTO. **Relatório técnico.** Vitória,2015.
8. Lissaman, P. B. S. “**Low-Reynolds-Number Airfoils,**” **Ann. Rev. Fluid Mech.**
9. Lyon, C. A.; Broeren, A. P.; Giguere, P.; Gopalarathnam, A and Selig, M. S. - **Summary of Low-Speed Airfoil Data – 3^o volume**

10. Cypriano, M. A.; Imanishi, R. M. M. **Estudo das Forças Geradas por um Hélice**. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória/ES, 2014.

ANEXO 1

Programa para cálculo das forças geradas por uma hélice.

```
%% Programa Hélice

% Constantes
dr = 0.00001 ; % Variacao do raio em metros
ro = 1.225 ; % kg/m^3
pi=3.14 ;
vr = zeros(15500,1); % Criando os vetores
vdq = zeros(15500,1); % Criando os vetores
vdt = zeros(15500,1); % Criando os vetores
vdqzt = zeros(15500,1); % Criando os vetores
vdqcp = zeros(15500,1); % Criando os vetores
vT = zeros(17,1); % Criando os vetores
vQ = zeros(17,1); % Criando os vetores
vrpm = zeros(17,1); % Criando os vetores
P = zeros(17,1); % Criando os vetores

% Calculos do programa
i=1 ;
j=1 ;
rot=8000 ;
P=0 ;
rp= 0.178 ;

for rpm = rot:100:17000;
    if P<1.6
        % Zerando parametros calculados
        Q=0 ;
        T=0 ;
        for r = 0.04:dr:rp ;
            % Equacoes necessarias
            w = (2*pi*rpm)/60 ; % Rad/s
            v = w*r ; % m/s
            alf = (1.8718e7*r^5)-(8.573e6*r^4)+(1.4831e6*r^3)-
(1.1824e5*r^2)+4040.67*r-24.129 ;
            c = -(18.978*r^3)+(3.5931*r^2)-(0.1323*r) + 0.0278 ;
            Cl = 0.091071*alf+0.28071 ; %Perfil clark y
            Cd = 0.06408*Cl^3-0.12055*Cl^2+0.062974*Cl+0.014138 ; %Perfil
clark y

            % Calculo do torque e tracao
            if 0.04>=r<rp ;
                dq = ro*v^2*c*(Cl*sind(alf)+Cd*cosd(alf))*r/2 ; % torque
                dt = ro*v^2*c*(Cl*cosd(alf)-Cd*sind(alf))/2 ; % tracao
            end
        end
    end
end
```

```

for r = 0:dr:0.04
    % Equacoes necessarias
    w = (2*pi*rpm)/60 ; % Rad/s
    v = w*r ; % m/s
    Cdzt=0.6 ;
    Cdcp=1.05 ;

    % Calculo do torque da região improdutiva
    dqzt = ro*v^2*Cdzt*0.012*r/2 ;
    dqcp = ro*v^2*Cdcp*0.019*r/2 ;
end

vr(i)= r ; % armazenando os valores
vdq(i)= dq/2 ; % armazenando os valores
vdt(i)= dt/2 ; % armazenando os valores
vdqzt(i)= dqzt/2 ; %armazenando os valores
vdqcp(i)= dqcp/2 ; %armazenando os valores
i = i+1 ;

Q = Q+(dq+dqzt+dqcp)*dr ;
T = T+dt*dr ;
end

vT(j)= T*0.7 ; % armazenando os valores
vQ(j)= Q*0.7 ; % armazenando os valores
vrpm(j)= rpm ; % armazenando os valores
j = j+1 ;
end

P=vQ*rot*2*pi/(60*735.5)
rotacao=rot ;
Torque=vQ ;
Potencia=P ;
end

Torque=vQ
Potencia=P
Tracao=vT
plot (vrpm,vT,'b-')
hold on
plot (vrpm,vQ,'r-')
hold off

```