

## GEOMETRIC MODELING OF PROPELLERS AND VALIDATION OF AERODYNAMIC COEFFICIENTS VIA BEMT

**Rafael Grande Pancini Delmonte**

**Lucas Machado Rocha**

**Flávia de Souza Bastos**

**Patricia Habib Hallak**

*rafael.delmonte@engenharia.ufjf.br*

*lucas.machado@engenharia.ufjf.br*

*flavia.bastos@ufjf.edu.br*

*patricia.hallak@ufjf.edu.br*

*Graduate Program in Computational Modeling, Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Juiz de Fora*

*Campus Universitário, 36036 330, Juiz de Fora, MG, Brazil*

**Abstract.** Advances on aeronautical sector demand research in all areas involved in the project. This includes the aerodynamic analysis of propellers, since these are used to generate the necessary thrust to move the airplane, absorbing to the best possible way the supplied power. Among the analytical theories, those of Theodorsen [1] and Adkins and Liebeck [2] are notable. These theories are denominated blade element momentum theory (BEMT). The interest in these study in the UFJF was encouraged by the Aero-design Team (Microraptor), which participates annually in the SAE BRASIL AeroDesign competitions. In these competitions, the team develop an aircraft, from initial design to construction and testing. In this context, the present work proposes the study of a propeller chosen by the team for the 2019 season. The study consists of the geometric modeling of this propeller and subsequent calculation of the aerodynamic parameters through BEMT model. The necessary data was provided by the manufacturer, and also via a 3D scanner. The aerodynamic coefficients of the profiles were obtained using the XFOIL program, developed by Drela [3]. Subsequently, for the calculations of thrust, power and efficiency coefficients, the QPROP Program, also developed by Drela [4], was used and applies the BEMT methodology. It is possible to obtain satisfactory values of the traction generated by the propeller, validating both the geometric and the analysis methodology with wind tunnel results. After validation, the power and propeller efficiency curves were generated, certifying their use for the flight envelope.

**Keywords:** propeller, BEMT, Qprop

## 1 Introdução

Os avanços tecnológicos do setor aeronáutico exigem pesquisas em todas as áreas envolvidas nos projetos de seus equipamentos. Um dos componentes essenciais responsáveis pelo desempenho de uma aeronave são as hélices, pois elas são usadas para gerar o impulso necessário para mover o avião, absorvendo da melhor forma possível a potência fornecida.

Entre as teorias racionais para a análise aerodinâmica de hélices, pode-se citar as contribuições de Theodorsen em 1948 [1] e de Charles N. Adkins e Robert H. Liebeck de 1994 [2]. Em geral, essas teorias com suas respectivas peculiaridades são denominadas teoria do elemento de pá combinada com a teoria do disco atuador (BEMT - *Blade element momentum theory*).

O interesse no estudo deste dispositivo na UFJF foi despertado pela Equipe Aerodesign (Microraptor), que participa anualmente das competições da SAE BRASIL AeroDesign. Nestas competições, as equipes desenvolvem o projeto de uma aeronave, desde o projeto inicial até a construção e os testes.

Neste contexto, o presente trabalho propõe uma metodologia para o estudo de uma hélice escolhida pela equipe para a temporada 2019. Trata-se de uma hélice APC 14× 7E que tem 14 polegadas de diâmetro e passo fixo de 7 polegadas. O estudo consiste na modelagem geométrica desta hélice e posterior cálculo dos parâmetros aerodinâmicos através de modelos analíticos (BEMT) implementados em programas disponíveis na rede mundial de computadores.

Alguns dos resultados aerodinâmicos são comparados com os obtidos em testes de túnel de vento para a mesma hélice. Para obter os perfis aerodinâmicos da hélice, utilizou-se dados fornecidos pelo fabricante (<https://www.apcprop.com/>) e também a imagem digitalizada em um scanner 3D. A partir das análises, foi possível obter valores satisfatórios da tração gerada pela hélice, validando tanto a metodologia geométrica quanto a metodologia de análise. Após a validação, foram geradas as curvas de eficiência da hélice, certificando seu uso para o envelope de vôo.

## 2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é o de apresentar uma metodologia para o levantamento dos perfis geométricos de uma hélice APC 14×7E. A comparação é feita entre uma geometria com informações fornecidas pelo fabricante e a geometria obtida com a imagem digitalizada em um scanner 3D e o método BEMT. Para a validação, foi utilizado os resultados coletados em túnel de vento, cujos experimentos foram realizados pelo autor.

Após a validação do melhor, modelo extrapolou-se o estudo analítico do modelo geométrico para o cálculo de eficiência, visando descobrir qual a melhor velocidade de operação com o motor em toga.

## 3 Aerodinâmica de hélices

A Figura 1 mostra uma hélice e sua respectiva seção transversal, com destaque para os seus elementos geométricos, que são: cubo, que é o elemento responsável pela fixação da hélice ao grupo motopropulsor; bordo de ataque, que é o elemento onde acontece a primeira interação com a linha de fluxo do fluido; bordo de fuga, que é o elemento que por último interage com a linha de fluxo do fluido; ângulo de torção  $\beta$ , que é o ângulo pelo qual cada estação da hélice é rotacionado em relação a linha de eixo. O diâmetro  $D$  é a distância de ponta a ponta da hélice.

Comumente, o desempenho de hélices é avaliado pelos seus coeficientes aerodinâmicos definidos nas Eqs. 1.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad K_P = \frac{Pot}{\rho n^3 D^5} \quad J = \frac{V}{nD} \quad \eta = J \frac{K_T}{K_P} \quad (1)$$

onde  $\rho$ ,  $J$ ,  $V$ ,  $n$  e  $D$  são, respectivamente, a densidade do ar, a adimensionalização da velocidade  $V$  e é

chamada de razão de avanço, velocidade de avanço, a rotação e o diâmetro da hélice. Ainda nas Eqs 1,  $T$  e  $P_{ot}$  são, respectivamente, a tração e a potência e  $K_T$  e  $K_P$  seus respectivos coeficientes.

Usualmente, a eficiência de uma hélice é traçada contra a razão de avanço. Essa informação é relevante para que se encontre a razão de avanço com maior valor de eficiência. Para que a hélice possa ser considerada adequada a uma aeronave, é importante que sua eficiência máxima aconteça numa razão de avanço que corresponda a uma velocidade notável da aeronave, como, por exemplo, a velocidade de cruzeiro.

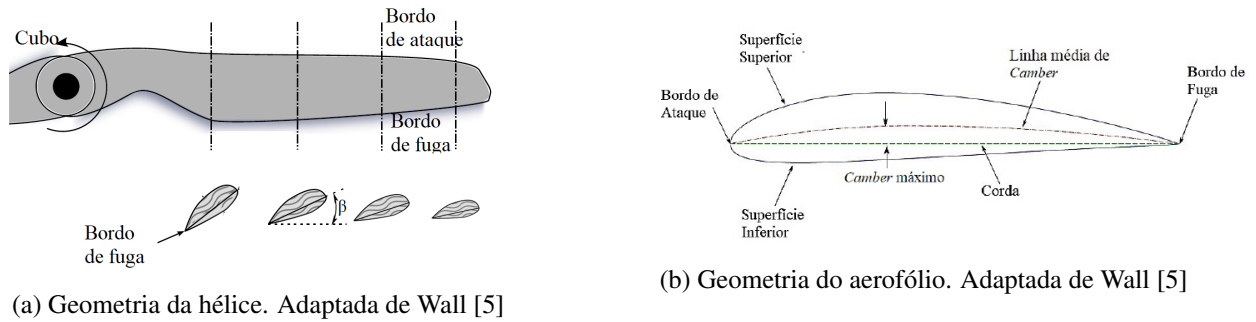


Figura 1. Geometria da hélice e do aerofólio.

Para se obter os coeficientes das Eq. 1, foi utilizada uma teoria híbrida entre o disco atuador e o elemento de pá, denominada teoria da quantidade de movimento combinada com a teoria do elemento de pá (BEMT - *Blade Element Momentum Theory*). O início de sua utilização remete aos estudos de Glauert [6], em 1926. Esta teoria considerava o perfil de escoamento obtido pela teoria do disco atuador, onde a hélice é considerada como um disco que cria uma diferença de pressão entre as zonas anterior e posterior do disco, mostrado na Figura 2a. Para considerar os efeitos aerodinâmicos de sustentação e arrasto atuantes nas pás das hélices, Glauert utiliza a teoria do elemento da pá (BET - *Blade Element Theory*), que consiste em dividir a pá da hélice em aerofólios bidimensionais, como indica a Figura 2b, e obter torque  $Q$  e empuxo  $T$  através da integração dos elementos infinitesimais que vão do cubo à ponta da hélice das forças de sustentação e arrasto, detalhados na Figura 2c. Entretanto, apenas com os avanços de Theodorsen e Adkins and Liebeck é que foram obtidos modelos de cálculo precisos para todos os tipos de carregamentos, considerando perdas provocadas pela circulação e na ponta das pás.

Baseando-se nestes desenvolvimentos, Drela [3][4] cria um conjunto de algoritmos capazes de resolver o problema de escoamento através da metodologia BEMT, extraindo as propriedades aerodinâmicas das seções das hélices com o programa de sua autoria denominado XFOIL, e calculando os esforços atuantes no escoamento com o QProp.

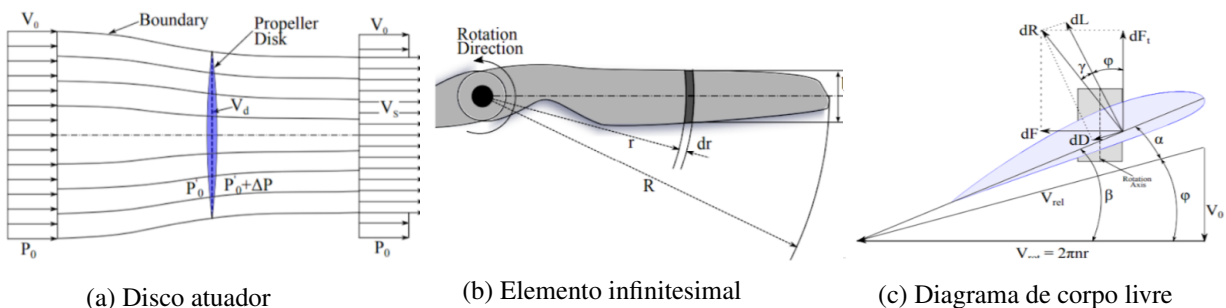


Figura 2. Figuras ilustrativas das teorias do disco atuador e do elemento de pá.

#### 4 Metodologia

Foram utilizados os programas computacionais listados a seguir, com as suas respectivas funções:

- MESHMIXER (<http://www.meshmixer.com>): desenvolvido pela Autodesk, é utilizado para capturar as imagens do scanner em forma de *splines*.
- SOLIDWORKS (<https://www.solidworks.com/pt-br>): programa de CAD3D (*Computer-Aided Design*), converte a geometria em coordenadas.
- XFOIL (*Subsonic Airfoil Development SYstem* - <https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>): programa para obtenção dos coeficientes aerodinâmicos dos perfis.
- Qprop (*Propeller/Winmill Analysis and Desing* - <http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/>): emprega a metodologia BEMT para a análise aerodinâmica de hélices.

Os procedimentos podem ser resumidos nas seguintes etapas:

1. Teste de túnel de vento

Consiste na realização de ensaios em túnel de vento, onde variou-se a velocidade de incidência de 0 a 25 m/s. A rotação da hélice, avaliada por meio de um tacômetro, foi de 7900 rpm. A tração foi medida com uma célula de carga conectada ao motor. Resultados referentes a esta análise são denominados TESTE TÚNEL DE VENTO na seção 5.

2. Obtenção da geometria das seções da hélice

- Dados do fabricante: inicialmente, utilizou-se dados fornecidos pelo fabricante. Salienta-se que o fabricante não se preocupa em fornecer os dados geométricos de forma detalhada que permita uma análise aerodinâmica completa desta hélice. Assim, com base nas poucas informações disponíveis, utilizou-se dois perfis de aerofólio, CLARK-Y e NACA 4412, dispostos da seguinte maneira: da raiz até a seção a 7,5 "de distância utilizou-se perfil NACA 4412, desta última seção a ponta, utilizou-se um perfil CLARK-Y. Resultados referentes a esta análise são denominados Curva APC na seção 5.
- Uso de scanner 3D: foi realizada sobre a hélice uma varredura a laser com scanner (*Next Engine*), obtendo-se uma nuvem de pontos que foi exportada na forma de malha de superfície do tipo stl. No programa MESHMIXER foi possível transformar a casca em sólido, para, em seguida, tomar cortes com planos de seção nas posições desejadas. Sobre o contorno de cada corte, foram interpoladas curvas do tipo *spline* que melhor se ajustavam ao perfil. Com isso, enviou-se o arquivo para SOLIDWORKS para se obter as coordenadas dos perfis que foram exportados para o programa XFOIL. Neste último, foram feitas as correções nos perfis e, posteriormente, extraiu-se os coeficientes aerodinâmicos (coeficientes de arrasto e de sustentação). Estas informações serviram de dados de entrada para o programa QPROP de onde foram obtidos os valores de  $K_T$ ,  $K_P$  e  $\eta$ . Foram feitas duas análises, a primeira com duas seções a segunda com sete seções. Resultados referentes a esta análise são denominados Curva Scanner 2P e Curva Scanner 7P, respectivamente, na seção 5.

Com o software MeshMixer

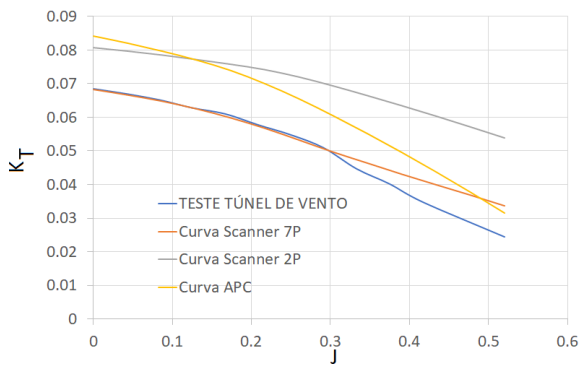
3. Análises aerodinâmicas

Nas análises aerodinâmicas, utilizou-se as mesmas condições de operação das empregadas nos testes em túnel de vento. Nas simulações, foram utilizadas as geometrias Curva APC e Curvas Scanner no programa QPROP.

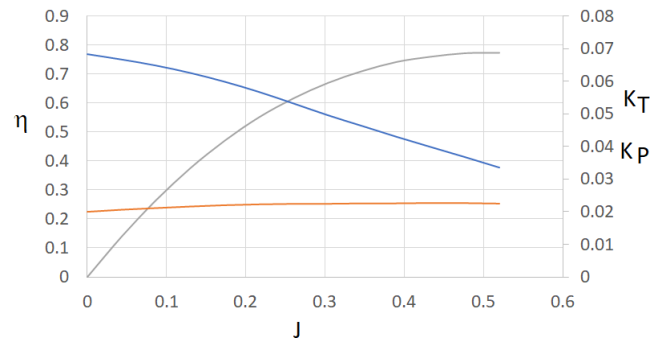
## 5 Resultados

As curvas do coeficiente de empuxo  $K_T$  pelo avanço  $J$  para as quatro situações descritas na seção 4 são apresentadas na Figura 3a. Percebe-se que a geometria disponibilizada pelo fabricante (Curva APC) distancia-se dos dados coletados por testes práticos. Com isso, viu-se que esse modelo tem limitações. Além disso, comparando a Curva Scanner 2P e com a Curva Scanner 7P vê-se que quanto maior a quantidade de seções analisadas mais refinada fica a análise.

Entretanto, percebe-se um declive abrupto no gráfico do teste em  $J = 0,3$ . Isto se deve pois, no teste em túnel de vento, foi utilizado o mesmo grupo motopropulsor durante todo o ensaio. Esta queda é, portanto, justificada pela perda de carga bateria a partir deste ponto de operação.



(a) Resultados para o coeficiente de empuxo.



(b) Curvas de eficiência do Modelo Curvas Scanner 7P

Figura 3. Resultados.

Visto que o terceiro modelo de análise (Curva Scanner 7P) foi o melhor entre todos, tirou-se dessa as curvas dos coeficientes de potência, tração e de eficiência da hélice, mostradas na Figura 3b. Nota-se que para  $J \approx 0,5$  esta hélice trabalha com a sua melhor eficiência. Com estes dados, o projetista consegue prever o empuxo e a potência do sistema na condição de eficiência máxima e definir se a hélice é a adequada para as condições de operação da aeronave.

## 6 Considerações finais

Apresentou-se neste trabalho uma metodologia para a modelagem geométrica de hélices. Foram utilizados dados obtidos dos ensaios em túnel de vento para a comparação.

Conclui-se que a definição coerente da geometria dos perfis das seções das pás das hélices é decisiva para a obtenção dos coeficientes aerodinâmicos, ainda que sejam utilizados programas analíticos para este fim.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Equipe Microraptor da UFJF, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFJF e a Faculdade de Engenharia da UFJF.

## References

- [1] Theodorsen, T., 1948. *Theory of Propellers*. McGraw-Hill, New York, 1<sup>a</sup> edition.
- [2] Adkins, C. N. & Liebeck, R. H., 1994. Design of optimum propellers. *Journal of Propulsion and Power*, vol. Vol. 10, n. N<sup>o</sup> 5, pp. 676–682.
- [3] Drela, M. & Youngren, H., 2001. Xfoil 6.94 user guide.
- [4] Drela, M., 2009. Qprop users guide. *Propeller Analysis and Design URL: <http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop>*.
- [5] Wall, D. L., 2012. *Optimum Propeller Design for Electric UAVs*. Degree of master of science, Graduate Faculty of Auburn University, Auburn.
- [6] Glauert, H., 1983. *The elements of aerofoil and airscrew theory*. Cambridge University Press, Cambridge, 2<sup>a</sup> edition.