

Desenvolvimento de um Algoritmo para Avaliação Aerodinâmica de Aerofólios Visando o Dimensionamento de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal

Felipe Eduardo de Farias¹, Angie Lizeth Espinosa Sarmiento², Diego Mauricio Yepes Maya³

¹ *Fluid Dynamics and Turbomachinery – FDT*, Instituto de Engenharia Mecânica - IEM, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá – MG, Brasil. Email: d2021013069@unifei.edu.br

² *Fluid Dynamics and Turbomachinery – FDT*, Instituto de Engenharia Mecânica - IEM, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá – MG, Brasil. Email: angieespinosa@unifei.edu.br

³ Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída – NEST, Instituto de Engenharia Mecânica - IEM, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Av. B P S, 1303, Itajubá – MG, Brasil. Email: diegoyepes@unifei.edu.br

Resumo

Na aerodinâmica de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal – TEEH, o aerofólio desempenha um papel crucial no dimensionamento e no desempenho dessas turbinas. Desse modo, este trabalho aborda a criação de um algoritmo em *Python* para avaliação aerodinâmica de aerofólios, utilizando o *XFOIL* para calcular os coeficientes de sustentação e arrasto. Além disso, para superar as limitações do *XFOIL* em valores além do pré-estol, utilizamos a técnica de extrapolação *Montgomerie*, que estende as curvas polares aerodinâmicas para uma faixa mais ampla de ângulos de ataque. Essa abordagem permite uma análise mais precisa e completa do desempenho das TEEH em diversas condições operacionais. Por fim, o trabalho foi comparado com o *QBLADE* para validar sua eficácia, destacando a sua contribuição para o avanço de projetos de turbinas de energia eólica.

Palavras-chave: XFOIL; *Montgomerie*; Coeficiente de Sustentação; Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal – TEEH.

Abstract

In the aerodynamics of Horizontal Axis Wind Turbines (HAWT), the airfoil plays a crucial role in the sizing and performance of these turbines. Thus, this work addresses the creation of a Python algorithm for the aerodynamic evaluation of airfoils, using XFOIL to calculate lift and drag coefficients. Additionally, to overcome the limitations of XFOIL in values beyond the pre-stall, we used the *Montgomerie* extrapolation technique, which extends the aerodynamic polar curves to a wider range of angles of attack. This approach allows for a more accurate and comprehensive analysis of HAWT performance under various operational conditions. Finally, the work was compared with QBlade to validate its effectiveness, highlighting its contribution to the advancement of wind energy turbine designs.

Keywords: XFOIL; *Montgomerie*; Lift Coefficient; Horizontal Axis Wind Turbines – HAWT.

1. Introdução

O aerofólio desempenha um papel essencial no dimensionamento e no desempenho das TEEH, já que suas características aerodinâmicas influenciam diretamente na eficiência da conversão de energia eólica em energia elétrica. Compreender e controlar o comportamento aerodinâmico do aerofólio, possibilita projetos mais eficientes de pás de turbinas eólicas. Além disso, análises precisas do aerofólio permitem otimizar não apenas o formato da pá, mas também sua

inclinação, contribuindo para maximizar a eficiência da turbina eólica [1]. Os estudos realizados por [2], em 2010, sobre perfis aerodinâmicos, desempenharam um avanço da eficiência das turbinas eólicas. Anderson, um especialista em aerodinâmica, investigou detalhadamente as características dos perfis aerodinâmicos. Sua pesquisa focou na otimização dos perfis para melhorar a sustentação e reduzir o arrasto, fatores essenciais para o desempenho eficiente das turbinas. O aumento dos preços do petróleo devido à crise de 1973 impulsionou inúmeros investimentos e

programas de pesquisa, resultando em diversos projetos voltados para a maximização da potência gerada [3].

O trabalho realizado por [4], em 2013, estuda a sensibilidade do desempenho aerodinâmico de perfis utilizados em microgeração de turbinas eólicas. Para isso na metodologia, foram aplicados códigos computacionais para determinar as características aerodinâmicas dos perfis. Utilizando os códigos XFLR5 e EasyCFD, foram obtidos os coeficientes aerodinâmicos de sustentação e arrasto, CL , CD , para diferentes ângulos de ataque, α . Posteriormente, uma planilha AirfoilPre foi empregada para estender esses coeficientes para ângulos de ataque, α , mais elevados. O artigo também incluiu uma análise dos modelos de atraso de estol, proporcionando uma visão abrangente do comportamento dos perfis aerodinâmicos em condições variadas.

No trabalho de [5], de 2011, foi realizada uma investigação numérica de diferentes perfis aerodinâmicos de turbinas eólicas. Simulações numéricas diretas foram utilizadas para estudar a aerodinâmica em baixos números de Reynolds, com valores baseados entre 55.000 e 100.000. Os resultados numéricos foram comparados com previsões do XFOIL e dados de túnel de vento. A partir das visualizações instantâneas do fluxo, foram discutidos aspectos do fluxo transicional e a precisão dos cálculos bidimensionais.

No quarto capítulo do livro [6], é dado um foco especial aos perfis aerodinâmicos das pás de turbinas eólicas. O capítulo aborda a utilização de códigos como XFOIL e RFOIL, além da aplicação de *Computational Fluid Dynamics - CFD*, para a previsão das características dos perfis aerodinâmicos. Também são discutidos métodos para representar as características dos perfis em altos ângulos de ataque, α , e a correta aplicação de diversos métodos para corrigir essas características em relação ao efeito do fluxo tridimensional nas pás. Dessa forma, o capítulo estabelece um conjunto de dados para o design aerodinâmico das pás e conclui com uma perspectiva sobre futuras pesquisas no campo dos perfis aerodinâmicos para turbinas eólicas [6].

O presente trabalho aborda a criação de um algoritmo em *Python* para avaliação aerodinâmica de aerofólios, com foco no dimensionamento de uma TEEH. O procedimento adotado envolveu a implementação do XFOIL, no entanto, para superar limitações do XFOIL, foi aplicada a extrapolação *Montgomerie*, permitindo estimar os coeficientes de sustentação e arrasto para uma ampla gama de ângulos de ataque. Isso possibilita uma avaliação mais precisa e completa do desempenho das TEEH em diversas condições operacionais. Além disso, todo o trabalho foi comparado com o QBLADE, uma ferramenta consolidada na avaliação de turbinas eólicas.

2. Metodologia

A metodologia desenvolvida neste estudo foi implementada em *Python*, sendo que para a análise pre-stall do aerofólio, foi implementado o XFOIL. Desenvolvido por Mark Drela em 1986, é uma ferramenta composta por várias sub-rotinas que oferecem um ambiente interativo para diversas operações: (i) análise direta, (ii) projeto inverso e misto, e (iii) manipulação da geometria de aerofólios bidimensionais em escoamentos subsônicos, sejam eles viscosos ou não-viscosos com baixos números de Reynolds. O XFOIL emprega uma abordagem totalmente implícita para a interação entre os componentes viscoso e não-viscoso, utilizando um método de painéis com distribuições lineares de vórtices para modelar a parte não-viscosa e um método integral de camada limite para representar as camadas viscosas. [7].

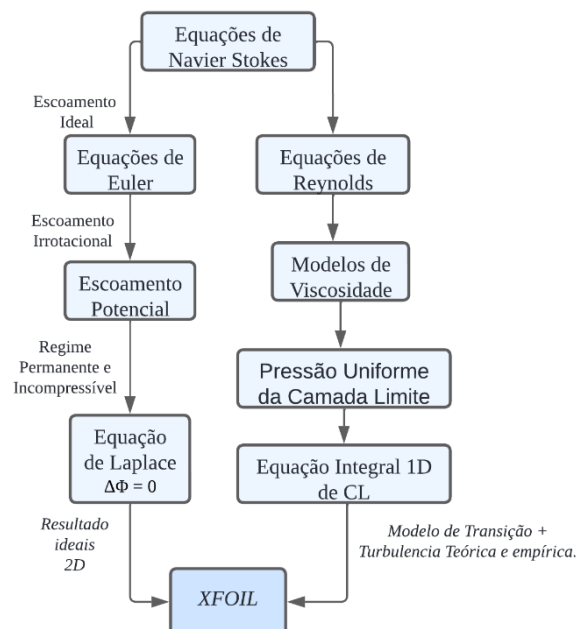


Figura 1 - Fluxograma de funcionamento do XFOIL adaptado de [8].

Com base na Figura 1, que ilustra um fluxograma do funcionamento do XFOIL, o código foi desenvolvido para combinar modelos ideais de escoamentos potenciais com abordagens básicas para turbulência e transição, garantindo a incorporação dos efeitos viscosos. Para integrar esses dois aspectos — escoamentos ideais e viscosos — diversos métodos são empregados. De modo geral, esses métodos seguem um ciclo iterativo, onde inicialmente se resolve numericamente o problema bidimensional de escoamento potencial não-viscoso para determinar o campo de velocidades. Em seguida, esse campo de velocidades é utilizado como entrada para o problema da camada limite. A camada limite, por sua vez,

perturba o escoamento potencial e adiciona uma espessura adicional ao aerofólio, necessitando a atualização do escoamento potencial. Esse procedimento iterativo é denominado *IBL* (*Interactive Boundary Layer*). Vários esquemas foram desenvolvidos para resolver o problema do *IBL* [8].

Ademais, conforme ilustrado na Figura 2, que apresenta o fluxograma original do programa *XFOIL* desenvolvido por Drela em 1989, o *XFOIL* resolve os solvers da *IBL* (*Interactive Boundary Layer*) e inclui o denominado Método Integral ID. As equações da camada limite são integradas dentro do domínio da sua espessura, fazendo com que as propriedades da camada limite sejam funções das posições ao longo da corrente [9].

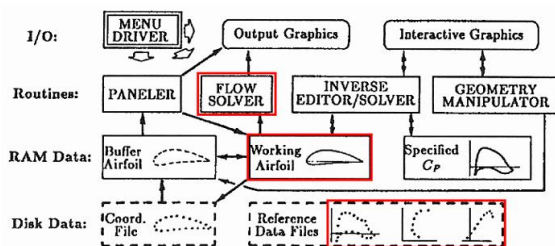


Figura 2 - Fluxograma original do programa *XFOIL*, retirada de [9].

De acordo com o referencial teórico do *XFOIL*, e a representação da Figura 3, o software foi implementado utilizando uma abordagem metodológica que envolve a chamada do *XFOIL* no dispositivo através de uma variável de entrada. Essa variável possibilita a inserção dos dados do perfil aerodinâmico por meio de dois métodos distintos:

- **Método Externo:** Neste caso, o usuário fornece o caminho completo onde o arquivo do aerofólio está armazenado no dispositivo de armazenamento. Essa abordagem permite que o software acesse diretamente o local especificado para obter as coordenadas do perfil aerodinâmico.
- **Método Interno:** Alternativamente, o usuário pode fornecer apenas o nome do perfil aerodinâmico. Neste método, o software consulta um banco de dados integrado ao código, que é gerenciado por uma biblioteca chamada *AerosandBox*. Tal biblioteca, armazena e recupera os dados dos perfis aerodinâmicos, facilitando a inserção e a gestão dos mesmos.

Uma vez que as coordenadas do perfil são inseridas e processadas, o código procede com a plotagem gráfica do perfil aerodinâmico. Em seguida, com base nos números de Reynolds fornecidos, e o intervalo de ângulo de ataque, α , o *XFOIL* realiza cálculos para determinar os coeficientes de sustentação

e arrasto, CL , CD , do perfil. Esses cálculos são essenciais para a análise do desempenho aerodinâmico. Portanto, a metodologia implementada no *XFOIL* possibilita uma integração eficiente dos dados do perfil aerodinâmico com o processo de análise, proporcionando resultados detalhados e precisos para estudos aerodinâmicos e aplicações práticas em turbinas eólicas de eixo horizontal.

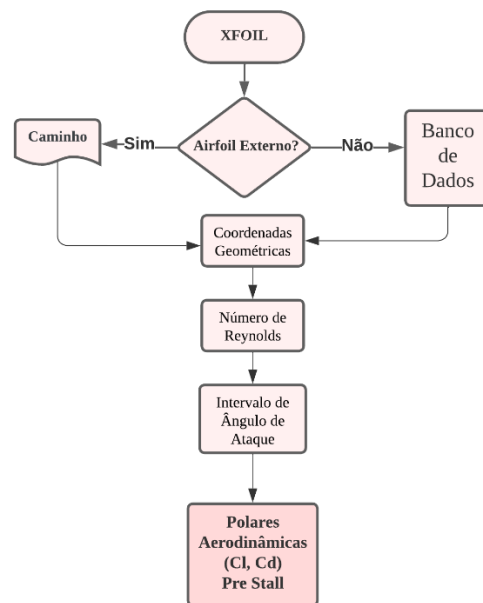


Figura 3 - Fluxograma representando a metodologia implementada do *XFOIL*

2.1. Polares Aerodinâmicas Pós-stall

As polares aerodinâmicas apresentam sustentação e arrasto, CL , CD , em função do ângulo de ataque, α . Contudo, essas informações são geralmente obtidas em intervalos pequenos, e de interesse para a áreas relacionadas a aviação, onde o stall profundo é raramente considerado por ser sempre evitado. Entretanto, na tecnologia de turbinas eólicas, por outro lado, o stall profundo pode ser desejável em condições de vento forte como meio de limitar a potência excessiva, por conseguinte inclinando as pás em rotores de turbinas eólicas.

A metodologia Montgomerie estende as tabelas aerodinâmicas para cobrir todo o intervalo de 360 graus do ângulo de ataque, α , essencial para a aplicação prática de código aerodinâmico em programas aeroelásticos. Estes programas são frequentemente utilizados para analisar o comportamento elástico das turbinas eólicas em resposta à carga gravitacional e às variações do vento. A turbina pode ser orientada para fora do vento, fazendo com que a pá girando lentamente seja perseguida pelo vento por trás, resultando em ângulos de ataque, α , próximos a 180 graus. Para evitar a extrapolação das tabelas aerodinâmicas, que

tipicamente cobrem apenas até 20 graus, é necessária uma representação aproximada para o intervalo completo de 360 graus. Em altos ângulos de ataque, α , as proximidades dos ângulos de ataque, α , de mais e menos 90 graus também são de interesse, pois são relevantes para o torque de auto-início, especialmente em turbinas de pás fixas, comuns em turbinas controladas por stall. [10].

Para superar essa limitação, a extrapolação *Montgomerie* recorre à teoria de placas finas considerando o escoamento potencial. A teoria de placas finas simplifica o aerofólio como uma placa de espessura infinitesimal, enquanto o escoamento potencial descreve o fluxo de ar assumindo que o fluido é incompressível e irrotacional. Integrando esses conceitos, a extrapolação *Montgomerie* estende as curvas polares aerodinâmicas para uma faixa mais ampla de ângulos de ataque, permitindo uma análise mais completa do desempenho do aerofólio, inclusive em condições de estol completo e pós-estol.

2.1.1. Teoria de Placas Finas

A teoria das placas finas é um conjunto de métodos analíticos e aproximações para entender o comportamento mecânico de placas delgadas sujeitas a diferentes tipos de carga e condições de contorno. Logo, Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), desenvolveu aproximações para as componentes de deslocamento em qualquer ponto de uma placa, visto que podem ser expressas em termos das componentes correspondentes no plano médio da placa. Isso simplifica a análise porque permite que se considere apenas os deslocamentos no plano médio, em vez de considerar a variação completa em todas as direções. Em 1820, Navier apresentou um método para resolver problemas de deslocamentos e tensões em placas retangulares simplesmente apoiadas. Este método transforma a equação diferencial governante em uma equação algébrica, facilitando as operações matemáticas, assim como o método de M. Lévy proporciona convergências mais rápidas e pode alcançar precisão aceitável frequentemente usando apenas o primeiro termo da série. A abordagem de Lévy é baseada na série de Fourier, que permite representar funções complexas como somas de funções senoidais e cossenóides, simplificando a resolução de equações diferenciais parciais [11].

2.2. Extrapolação Montgomerie

Dessa maneira, utilizando como parâmetro de entrada do *Montgomerie*, a curva das polares aerodinâmicas pré-stall, calculadas por meio do *XFOIL*. A curva de CL, pós-stall, é criada interpolando as funções de fluxo potencial t_α e a função de perda de sustentação em placa plana s_α . A função t_α corresponde a uma circulação de fluido onde se podem

ignorar os efeitos de vorticidade ao redor de um corpo determinado, que serve para quantificar a rotação do fluido, com as linhas de fluxo coincidindo com o perfil aerodinâmico. Esta função é linear e é obtida com a seguinte expressão:

A curva de coeficiente de sustentação, CL, é gerada pela interpolação das funções de fluxo potencial t_α e da função de perda de sustentação em placa plana s_α . A função t_α , Eq. (01), representa uma circulação de fluido onde os efeitos de vorticidade ao redor de um corpo podem ser desconsiderados, ou seja, escoamento potencial, o que permite quantificar a rotação do fluido de forma mais simples, com as linhas de fluxo coincidindo com o contorno do perfil aerodinâmico [12].

$$t_\alpha = CL_0 + C_{L\alpha} \cdot \alpha \quad (1)$$

Onde, α representa o ângulo de ataque, CL_0 , representa o coeficiente de sustentação quando $\alpha = 0$, e $C_{L\alpha}$ representa a derivada da curva da parte linear das polares Pré-Stall, definida pela equação (2).

$$C_{L\alpha} = \frac{CL_{\alpha10} - CL_{\alpha1}}{\alpha_{10} - \alpha_1} \quad (2)$$

Onde, $CL_{\alpha10}$ e $CL_{\alpha1}$ representa o ponto onde o coeficiente de sustentação é igual ao $\alpha = 10$ e $\alpha = 1$, respectivamente.

A função s_α , corresponde à separação total do fluxo no perfil, o que gera perda aerodinâmica e faz com que o perfil comece a se comportar como uma placa plana [10]. Para obter essa função, utiliza-se a equação (3).

$$S_\alpha = 1 + \frac{CL_0}{\sin(45)} \cdot \sin(\alpha) \cdot CD_{90} \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\beta) \quad (3)$$

Onde CL_0 representa o coeficiente de sustentação quando $\alpha = 0$, e o CD_{90} o coeficiente de arrasto quando $\alpha = 90$. E o ângulo β , representa a modificação por efeitos da borda arredondada e sua curvatura do do perfil aerodinâmico, sendo que o seu cálculo é realizado por meio da equação (4).

$$\beta = 57,6 \cdot CL_{90} \cdot \sin(\alpha) - \alpha_0 \cdot \cos(\alpha) \quad (4)$$

Onde CL_{90} , representa o coeficiente de sustentação quando $\alpha = 90$, e o valor assumido seguindo a referência Montgomerie, é 0.08. e o $\alpha = 0$, representa o valor de CL, quando $\alpha = 0$ [10].

Além disso, antes de iniciar os cálculos dos valores pós-stall do coeficiente de sustentação, é necessário definir uma função, \mathcal{F} , que representa a semelhança entre os valores obtidos do coeficiente de sustentação, CL de maneira pré-stall, e os valores da função t_α . Em razão que em na zona linear, da curva de CL x α , obtidos de maneira pré-stall, é muito

semelhante ao t_α , e ocorre simplificações para que $\mathcal{F}_\alpha = 1$, no entanto, ao entrar na zona de perda aerodinâmica, o fluxo na parte superior do perfil está completamente separado, e por consequência os valores de CL, começam a se afastar da curva, t_α , então o valor $\mathcal{F}_\alpha = 0$, e o perfil se comporta como uma placa plana. Por fim, entre as duas situações descritas anteriormente, ocorre uma transição entre as funções, s_α e t_α , respectivamente, que gera a curva de sustentação extrapolada [13]. Dessa maneira, calculamos o \mathcal{F}_α , por meio da equação (5) e (6).

$$\mathcal{F}_\alpha = \frac{CL_\alpha - s_\alpha}{t_\alpha - s_\alpha} \quad (5)$$

$$\mathcal{F}_\alpha = \frac{1}{1 + k \cdot \Delta\alpha^4} \quad (6)$$

Onde a constante k é definida pela equação (7).

$$k = \left(\frac{1}{\mathcal{F}_p} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{(\alpha_p - \alpha_L)^4} \right) \quad (7)$$

Onde, α_p , representa o valor máximo do coeficiente de sustentação, CL, e o α_L é o ponto onde CL deixa seu comportamento linear.

Por fim, a extrapolação dos valores de ângulo de ataque, α , e os valores de coeficiente de sustentação, CL, é definido pela equação (8) e (9), respectivamente.

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_L \quad (8)$$

Onde, $\Delta\alpha$ representa a diferença entre, o ângulo de ataque, α , e o α_L , onde o ponto de CL deixa seu comportamento linear, para assim obter o ângulo de ataque desejado.

$$CL_\alpha = \mathcal{F}_\alpha \cdot t_\alpha + (1 - \mathcal{F}_\alpha) \cdot s_\alpha \quad (9)$$

Assim como a curva de CL, é extrapolada com base na equação (9), que representa os valores finais das funções, \mathcal{F}_α , t_α , e s_α , respectivamente.

Ademais, a metodologia Montgomerie, fornece também a extrapolação dos valores de coeficiente de arrasto, o qual é obtida, a partir dos valores calculados das polares pré-stall, e dos valores calculados da extrapolação do coeficiente de sustentação do Montgomerie, o qual é calculada com base na equação (10), sendo que tal expressão é em função do fluxo potencial, t_α , e os valores obtidos de ΔCL_α , gerado para cada ângulo de ataque, isso é feito com a seguinte expressão:

$$\Delta CL_\alpha = t_\alpha - CL_\alpha \quad (10)$$

Sendo que representa, o déficit apresentado pelos dados gerados em relação ao fluxo ideal

representado pela função t_α , visto que um fenômeno semelhante ocorre com o arrasto. Existe um déficit entre o arrasto gerado que não produz perdas de sustentação significativas e o que é gerado quando o ângulo de ataque não resulta em perda de sustentação. Montgomerie, em sua pesquisa, mostrou que para a maioria dos perfis existe uma relação entre o déficit de arrasto ΔCD e ΔCL [13]. Representada pela equação (11).

$$\Delta CD = 0,13 \cdot \Delta CL \quad (11)$$

Dessa maneira, é possível extrapolar a curva de arrasto, que, assim como para a sustentação, é interpolada entre um comportamento ideal determinado pela função $CD_{i(\alpha)}$ e o arrasto gerado por uma placa plana determinado pela função $CD_p(\alpha)$. Portanto, $CD_{i(\alpha)}$, é representada pela equação (12). Assim como, calculamos o $CD_f(\alpha)$, em razão que é o coeficiente de arrasto devido ao atrito, dado que o arrasto também depende do atrito gerado pelo contato entre o fluxo e o perfil. E, assim é aproximado pela equação (13).

$$\Delta CD_{i(\alpha)} = \Delta CD + CD_f(\alpha) \quad (12)$$

$$CD_f(\alpha) = 1,25 \cdot (t_m c) \quad (13)$$

Onde, $\Delta CD_{i(\alpha)}$ é os valores calculados de arrasto gerado para um comportamento ideal, ΔCD é o intervalo calculado de arrasto pré-stall, e $CD_f(\alpha)$ é o arrasto de fricção. Ademais, o t_m , é a espessura máxima do perfil e, a variável c , representa a corda do perfil aerodinâmico.

Para os cálculos de $CD_p(\alpha)$, utilizamos a equação (14).

$$CD_p(\alpha) = CD_{90} \cdot \sin^2(\alpha) \quad (14)$$

Onde o CD_{90} , representa o coeficiente de arrasto quando o ângulo de ataque, α , é igual a 90.

Portanto, assim podemos definir a nova curva de arrasto extrapolada, CD, representada pela equação (15), onde representa o coeficiente de arrasto definitivo, CD, é a média ponderada entre os valores do coeficiente de arrasto ideal e o gerado por uma placa plana. A função de peso ou ponderação é, \mathcal{F}_α , calculada anteriormente.

$$CD = \mathcal{F}_\alpha \cdot CD_{i(\alpha)} + (1 - \mathcal{F}_\alpha) \cdot CD_p(\alpha) \quad (15)$$

Onde CD representa os novos valores extrapolados, \mathcal{F}_α é a função de peso, $CD_{i(\alpha)}$ é o comportamento ideal de arrasto, $CD_p(\alpha)$ é o arrasto gerado por uma placa plana.

3. Resultados

A metodologia proposta neste trabalho foi rigorosamente comparada com o software *QBLADE*, reconhecido como uma referência padrão na análise aerodinâmica. Inicialmente, foram avaliadas as polares aerodinâmicas na região pré-stall, onde os resultados obtidos através da implementação do *XFOIL* na metodologia foram confrontados com os dados fornecidos pelo *QBLADE*. Este comparativo permitiu validar a precisão e a consistência dos resultados em condições de escoamento potencial e de baixa incidência de ângulo de ataque.

A análise se estendeu à região pós-stall, onde a metodologia adotada utilizou o modelo de Montgomerie para representar os efeitos de separação e turbulência que ocorrem após o ângulo de stall. Onde a comparação foi o software *QBLADE*, utilizando os resultados das polares aerodinâmicas pré-stall obtidas pelo *XFOIL* como entrada, a metodologia Montgomerie foi aplicada para a análise pós-stall. A curva de coeficiente de sustentação e de arrasto pós-stall foi criada interpolando as funções de fluxo potencial, t_α , e de perda de sustentação em placa plana, S_α .

A validação da metodologia foi iniciada com o perfil aerodinâmico NACA23112, onde as propriedades geométricas do perfil foram inseridas no sistema. Foram utilizadas 121 coordenadas para representar com precisão o contorno do aerofólio. Essas coordenadas foram lidas e plotadas, como mostrado na Figura 4, garantindo que a geometria do perfil estivesse corretamente representada antes de prosseguir com a análise aerodinâmica. Esta etapa inicial é crucial para assegurar a precisão dos cálculos subsequentes e a fidelidade dos resultados obtidos em relação às características reais do aerofólio.

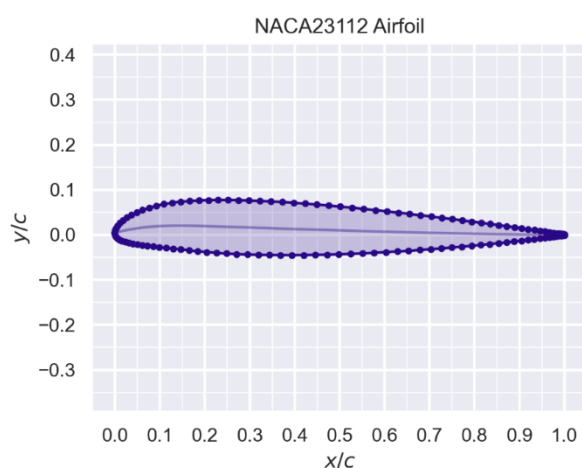


Figura 4 - Representação do Perfil NACA23112 em Python

A validação dos coeficientes de sustentação, CL, e de arrasto, CD, pré-stall, comparando os resultados obtidos pela implementação do *XFOIL* com os gerados pelo *QBLADE*, demonstrou uma alta

concordância, conforme ilustrado na Figura 5. Utilizando o perfil NACA23112 com um número de Reynolds de 1.200.000 como critério de validação, os resultados são extremamente semelhantes em 38 pontos de valores de ângulo de ataque.

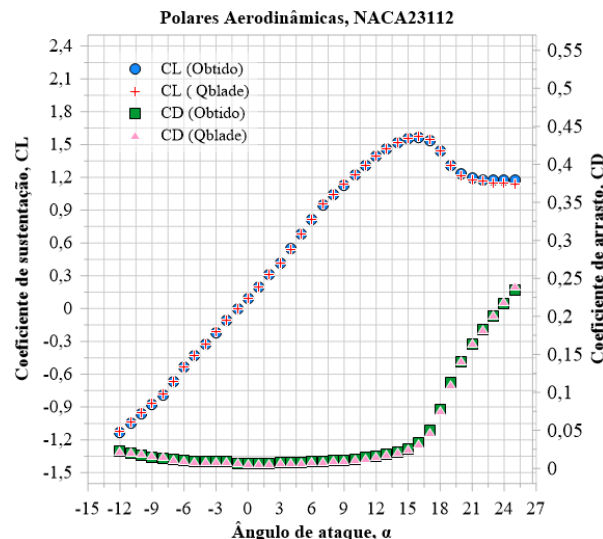


Figura 5 - Comparação entre metodologia e o software *QBLADE*

A semelhança, em relação ao coeficiente de sustentação, CL, a diferença percentual ficou acima de 2% em apenas valores de ângulo de ataque, α , que seriam as regiões finais, entre os ângulos 22 até o 25, enquanto nos outros 36 pontos a diferença foi inferior a 2%.

No que diz respeito ao coeficiente de arrasto, CD, 5 pontos de ângulo de ataque apresentaram erro acima de 4%, com todos os demais pontos mantendo uma diferença menor. Essa discrepância ligeiramente maior no coeficiente de arrasto, CD pode ser atribuída à sensibilidade dos dados, já que os valores são extremamente baixos e, portanto, mais suscetíveis a variações na casa decimal.

Além disso, a análise detalhada das discrepâncias revelou que a maior parte das diferenças se encontra dentro de uma margem aceitável para estudos aerodinâmicos. A precisão na determinação do coeficiente de sustentação, CL é particularmente notável, visto que a maioria dos pontos de dados apresenta uma variação mínima, reforçando a capacidade do *XFOIL* de reproduzir com alta fidelidade os resultados do *QBLADE*. A maior variação observada no coeficiente de arrasto, CD, embora um pouco maior, ainda é considerada dentro dos limites toleráveis devido à alta sensibilidade dos valores de arrasto, especialmente em regimes de baixo número de Reynolds.

Essas pequenas diferenças podem ser atribuídas a fatores como a resolução numérica e as condições de contorno específicas adotadas por cada software. No geral, os resultados demonstram que a

metodologia pré-stall empregada é robusta e capaz de proporcionar resultados confiáveis, corroborando a validade dos modelos utilizados para prever o comportamento aerodinâmico. Esta alta precisão valida a robustez e a confiabilidade da metodologia aplicada, confirmando a eficácia da implementação do *XFOIL* em relação ao software *QBLADE* na determinação das polares aerodinâmicas.

Os resultados obtidos, no gráfico 6, indicam uma forte semelhança entre a metodologia aplicada em *Python* da metodologia Montgomerie, o software *QBLADE*. As linhas de comparação, do gráfico de ambos os métodos tiveram o mesmo comportamento característico, demonstrando uma concordância significativa. No entanto, é possível observar algumas discrepâncias em regiões específicas: entre os ângulos de ataque, α , de -30° e 0° , onde os resultados do *QBLADE* se mostraram menores em relação à metodologia aplicada de Montgomerie, e entre 30° e 60° , onde os valores obtidos pela metodologia foram menores e os valores do *QBLADE*, apresentaram-se subestimados.

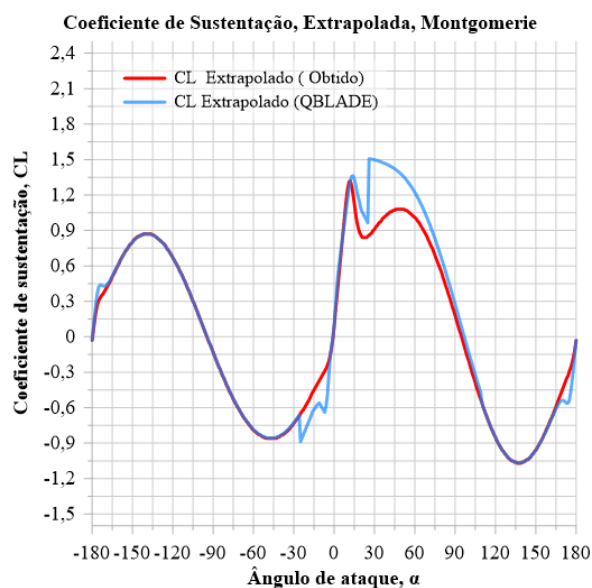


Figura 6 - Comparação entre a extrapolação, do coeficiente de sustentação, aplicada na metodologia, e *QBLADE*

As discrepâncias observadas entre os resultados da metodologia de Montgomerie implementada em *Python* e os resultados do *QBLADE*, apesar de ambos utilizarem a mesma técnica de extrapolação, podem ser atribuídas a várias diferenças de implementação e processamento de dados. A implementação numérica específica em *Python* pode variar em detalhes de interpolação e resolução de equações em comparação com o *QBLADE*. Diferenças no condicionamento dos dados de entrada, métodos de interpolação, resolução dos ângulos de ataque, α , e parâmetros de extrapolação podem contribuir para as variações observadas. Além disso, pequenas

discrepâncias podem surgir devido à precisão computacional e ao arredondamento de valores durante os cálculos. No entanto, a forte semelhança geral entre as curvas indica que ambos os métodos capturam o comportamento característico do coeficiente de sustentação, CL , de maneira consistente, validando a metodologia de Montgomerie para uma análise pós-stall.

Os resultados apresentados no gráfico do coeficiente de arrasto, CD , indicam uma precisão muito alta na extrapolação implementada pela metodologia de Montgomerie. As diferenças entre os valores obtidos pela metodologia em *Python* e os valores gerados pelo software *QBLADE* foram menores que 5% em todas as regiões do gráfico. Observando o comportamento das curvas, a extrapolação do coeficiente de arrasto, CD , foi muito bem implementada. As linhas de dados das duas metodologias mostram uma semelhança notável, permanecendo sobrepostas ao longo de todo o intervalo de ângulos de ataque, α . Essa sobreposição demonstra que ambas as metodologias apresentam o mesmo comportamento característico, validando a precisão e a eficácia da implementação da extrapolação de Montgomerie para a análise do coeficiente de arrasto, CD .

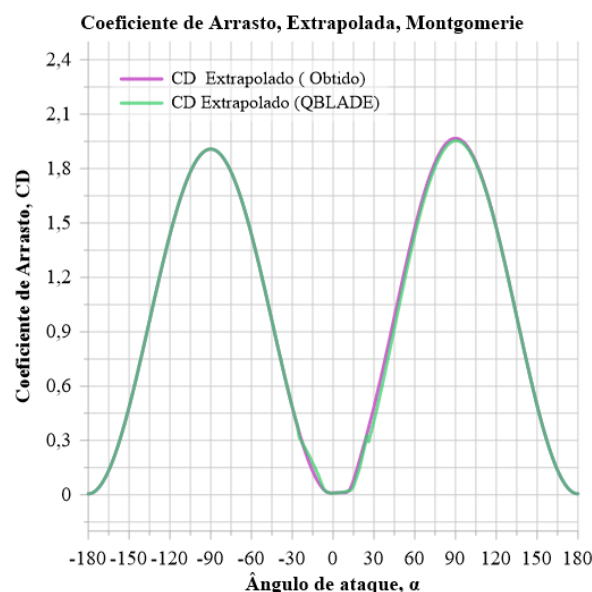


Figura 7 - Comparação entre a extrapolação, do coeficiente de arrasto, aplicada na metodologia, e *QBLADE*

4. Conclusão

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um algoritmo em *Python* para a avaliação aerodinâmica de aerofólios, com foco no dimensionamento de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal – TEEH. A metodologia adotada envolveu a implementação do *XFOIL* para calcular as polares

aerodinâmicas pré-stall e a extrapolação Montgomerie para calcular os coeficientes de sustentação e arrasto em uma ampla gama de ângulos de ataque, α , superando as limitações do XFOIL em condições pós-stall. Os resultados obtidos foram comparados com o software QBlade, uma ferramenta amplamente reconhecida na avaliação de turbinas eólicas, mostrando uma alta concordância nas polares aerodinâmicas. Esta validação confirma a robustez e a confiabilidade do algoritmo desenvolvido, evidenciando sua eficácia para uma análise aerodinâmica precisa e completa em diferentes condições operacionais.

A validação detalhada utilizando o perfil NACA 23112, com um número de Reynolds de 1.200.000, demonstrou que a metodologia implementada reproduz com alta fidelidade os resultados do QBLADE. Em particular, a precisão na determinação dos coeficientes pré-stall de sustentação e arrasto, CL, CD. Dessa forma, foi notável que com a maioria dos pontos de dados apresentados com variações mínimas. Embora algumas discrepâncias tenham sido observadas, estas se mantiveram dentro de limites aceitáveis devido à alta sensibilidade. As discrepâncias observadas entre os resultados da metodologia implementada em Python e os resultados do QBLADE podem ser atribuídas a diferenças de implementação e processamento de dados. No entanto, a forte semelhança geral entre as curvas valida a metodologia para uma análise pré e pós-stall. Assim, este trabalho proporciona uma base sólida para futuras investigações no campo da avaliação aerodinâmica de turbinas eólicas, contribuindo para o avanço das técnicas de dimensionamento e análise de desempenho das TEEH.

5. Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processo APQ-00653-22, edital 001/2022, referente ao projeto: “Análise Numérica e Experimental de Microgeradores Eólicos para Aplicações em Regiões Remotas no Brasil”, com registro na DPI UNIFEI número PVDI297-2022, e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) pelo financiamento de nossa pesquisa. Agradecemos também à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pela oportunidade de desenvolvimento pessoal e intelectual. Agradecemos também ao grupo TIES e ao grupo FDT - UNIFEI, pelo incentivo à pesquisa.

6. Referências

- [1] F. Grasso, “Usage of Numerical Optimization in Wind Turbine Airfoil Design,” vol. 48, pp. 248-255, 01 2011.
- [2] J. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, 5th Edition ed., McGraw Hill, 2010.
- [3] E. Hau, *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 3rd edition ed., Springer, 2013.
- [4] J. A. Weigel, A. Lopes e S. Enevoldsen, “Sensitivity Analysis of Aerodynamic Performance of Airfoils Used in Small Wind Turbines,” 02 2013.
- [5] A. Gross e H. Fasel, “Numerical Investigation of Different Wind Turbine Airfoils,” 01 2012.
- [6] W. Timmer e C. Bak, *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*, Woodhead Publishing, 2013.
- [7] B. S. de Souza, *Projeto de perfis aerodinâmicos utilizando técnicas de otimização mono e multiobjetivos.*, Itajubá: Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Itajubá, 2008.
- [8] I. B. de Paula, *Estudo da melhoria de performance aerodinâmica de um perfil aplicado a veículos aéreos não tripulados*, Rio de Janeiro: Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, 2019.
- [9] M. Drela, “XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils,” *Low Reynolds Number Aerodynamics: Proceedings of the Conference Notre Dame, Indiana, USA*, pp. 1-12, 1989.
- [10] B. Montgomerie, “Methods for root effects, tip effects and extending the angle of attack range to $\{+-\}$ 180 deg., with application to aerodynamics for blades on wind turbines and propellers,” pp. 1-53, 2004.
- [11] J. M. L. Henriques, *Análise de deformação transversal em placas finas: estudo de caso para a placa de um aileron*, Brasília: Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, 2019.
- [12] A. Rolón, Y. V. González e C. H. A. Peñaloza, “Metodología para el cálculo de coeficientes de sustentación y arrastre en perfiles aerodinámicos simétricos aplicado a turbinas Darrieus,” *Revista Redes de Ingeniería*, pp. 92-100, 2017.
- [13] M. F. M. de Alba, L. E. G. Fernández e M. A. G. Almonacid, “Metodología de obtención de los coeficientes de sustentación y arrastre para un rango amplio de números de Reynolds y ángulos de ataque para aplicaciones en turbinas eólicas,” *Avances Investigación en Ingeniería*, vol. 01, nº 13, p. 53–60, 2010.