

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA MEDIANTE A EXTRAPOLAÇÃO MONTGOMERIE PARA A DETERMINAÇÃO DE CURVAS POLARES AERODINÂMICAS COM A FINALIDADE DE CALCULAR O DESEMPENHO DE PEQUENAS TURBINAS PARA MICROGERAÇÃO

Felipe Eduardo de Farias¹ (IC), Prof.^a Angie Lizeth Espinosa Sarmiento (PQ)¹

¹UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: *Blade element momentum – BEM*. Coeficiente de potência. Extrapolação *Montgomerie*. Pequenas turbinas para microgeração.

Introdução

O aerofólio desempenha um papel fundamental no dimensionamento de pequenas turbinas eólicas de eixo horizontal - TEEH, uma vez que suas características aerodinâmicas influenciam diretamente a eficiência do processo de conversão de energia eólica em energia elétrica. A avaliação do desempenho de uma TEEH é realizada por meio da análise do gráfico do coeficiente de potência (C_p) em função da razão de velocidade de ponta (TSR). Essa abordagem permite uma avaliação precisa do comportamento da turbina sob diferentes condições operacionais, fornecendo uma visão detalhada de seu desempenho aerodinâmico (GRASSO, 2011).

Nesse contexto, o presente trabalho, pertencente ao grupo de pesquisa *FDT (Fluid Dynamics and Turbomachinery)* – UNIFEI, propõe o desenvolvimento de uma metodologia mediante a extrapolação *Montgomerie*, para a determinação de curvas polares aerodinâmicas com a finalidade de calcular o coeficiente de potência, C_p , em função da razão de velocidade de ponta, TSR , para assim analisar o desempenho de pequenas turbinas eólicas para microgeração.

Metodologia

Neste estudo, a metodologia foi implementada em *Python*®, sendo a primeira etapa caracterizada pela utilização da ferramenta *XFOIL*® para a análise aerodinâmica *pré-stall* do aerofólio. Esta fase preliminar do processo aerodinâmico envolveu o cálculo dos coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D), abrangendo uma variação de ângulos de ataque, α , entre -20° e 20° , com o objetivo de obter parâmetros aerodinâmicos essenciais para as etapas subsequentes da metodologia.

A implementação do *XFOIL*® foi realizada por meio da definição de uma variável, denominada *path_xfoil*, que automatiza a localização do executável no diretório apropriado do dispositivo. Após essa etapa, o código desenvolvido, permite a inserção dos dados do aerofólio por dois métodos distintos: no Método Externo, o usuário especifica o caminho do arquivo correspondente ao aerofólio; já no Método Interno, o

usuário informa apenas o nome do perfil, e o código realiza uma consulta a um banco de dados integrado, gerenciado pela biblioteca *AeroSandbox*. Essa estrutura possibilita a geração automática da plotagem gráfica do aerofólio. O *XFOIL*®, então, realiza os cálculos dos coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D). A Figura 1 mostra a primeira etapa, caracterizada pela utilização da ferramenta *XFOIL*® na metodologia.

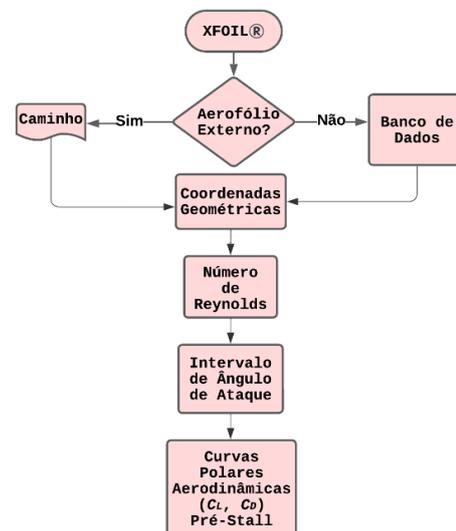


Figura 1 – representação da metodologia a do *XFOIL*®

Na segunda etapa desta metodologia foi implementada a extrapolação do *Montgomerie*, visto que as curvas polares aerodinâmicas são limitadas para evitar o *stall*, no entanto, nas turbinas eólicas, o *stall* é desejável para controlar a potência em ventos fortes. Dessa maneira, para superar a limitação do *XFOIL*®, que realiza somente os cálculos de maneira *pré-stall*. A extrapolação do *Montgomerie* foi aplicada para ampliar essas faixas, permitindo a análise completa aerodinâmica de pequenas turbinas para microgeração (MONTGOMERIE, 2004).

A extrapolação *Montgomerie* integra funções fundamentais, como a função $t(\alpha)$, que descreve o escoamento potencial ao redor do perfil aerodinâmico, desconsiderando os efeitos de vorticidade, e resultando em um fluxo idealizado. A função $S(\alpha)$, por sua vez,

considera os efeitos viscosos e de fricção, sendo essencial para caracterizar a perda de sustentação *pós-stall*. A equação 1, representa a combinação dessas funções que gera a curva de sustentação *pós-stall*, $C_{L\alpha}$.

$$CL_{\alpha} = \mathcal{F}_{\alpha} \cdot t_{\alpha} + (1 - \mathcal{F}_{\alpha}) \cdot S_{\alpha} \tag{1}$$

Onde, $t(\alpha)$, é o regime de escoamento potencial, $S(\alpha)$, é o regime de perda de sustentação em uma placa plana, e a função \mathcal{F}_{α} , atua como um fator de ponderação entre $t(\alpha)$, e $S(\alpha)$, sendo $\mathcal{F}_{\alpha} = 1$, no regime linear, ou quando o *stall* ocorre e o fluxo se separa, $\mathcal{F}_{\alpha} = 0$. Na zona de transição, \mathcal{F}_{α} , é interpolado entre 0 e 1, resultando em uma descrição contínua do comportamento aerodinâmico durante o *pós-stall*.

A Figura 2 demonstra a construção da curva de coeficiente de sustentação, C_L , extrapolado. A curva pode ser dividida em três regiões principais. Na primeira, para baixos ângulos de ataque, α , de 0° a 50° , o escoamento é potencial, representado pela função $t(\alpha)$, que descreve o comportamento idealizado do fluido. A segunda região, entre 50° e 100° de ângulos de ataque, α , corresponde à transição entre o regime entre escoamento potencial, e a região de perda de sustentação em uma placa plana. A terceira região, que vai de 100° a 180° , representa a perda total de sustentação, onde o aerofólio se comporta como uma placa plana, $S(\alpha)$. Por fim, observa-se ainda que, para ângulos de ataque negativos, α , o comportamento é simétrico em relação aos positivos, mas com menor eficiência devido à curvatura típica dos aerofólios.

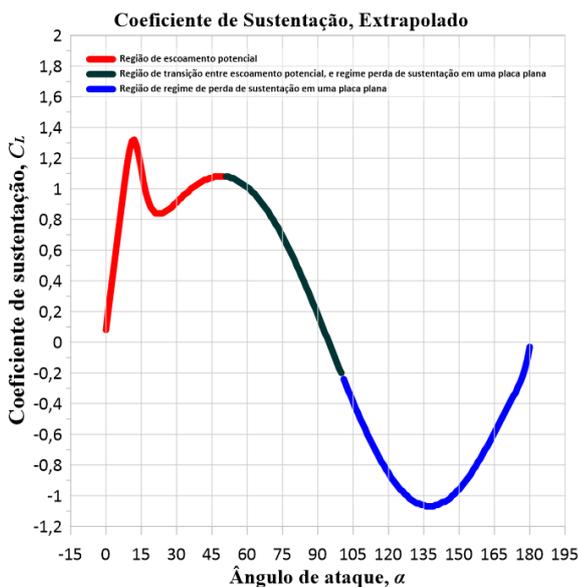


Figura 2 – Representação da Construção do Curva de Coeficiente de Sustentação, C_L

A Extrapolação de coeficiente de arrasto C_D ,

utiliza o mesmo conceito entre um comportamento ideal, representado pela função $C_{Di(\alpha)}$, e o arrasto gerado por uma placa plana, descrito pela função $C_{Dp(\alpha)}$. Assim como, a função \mathcal{F}_{α} , atua como um fator de ponderação entre, as funções $C_{Di(\alpha)}$, e $C_{Dp(\alpha)}$. Neste contexto, foram utilizados como parâmetros de entrada os valores *pré-stall* obtidos pelo *XFOIL®*, e, de maneira semelhante ao processo para $C_{L\alpha}$, a extrapolação foi aplicada para calcular os valores de $C_{D\alpha}$, equação (2). A extrapolação do *Montgomerie*, estende para o coeficiente de arrasto, $C_{D\alpha}$, o comportamento aerodinâmico durante o estol completo e pós-estol.

$$C_{D\alpha} = \mathcal{F}_{\alpha} \cdot C_{di(\alpha)} + (1 - \mathcal{F}_{\alpha}) \cdot C_{dp(\alpha)} \tag{2}$$

Na construção da curva de arrasto, $C_{D\alpha}$, Figura 3, que apresenta a extrapolação da curva do coeficiente de arrasto C_D , o arrasto é diretamente influenciado pela sustentação. Desse modo, a construção do gráfico é muito semelhante, visto que é segmentado em diferentes regimes de escoamento. Em baixos ângulos de ataque, α , entre 0° e 50° , o escoamento é predominantemente potencial, descrito pela função $C_{Di(\alpha)}$. Na faixa intermediária, de 50° a 100° , de ângulo de ataque, α , observa-se a transição para o regime de perda de sustentação em uma placa plana. Para ângulos de ataque elevados, α , entre 100° e 180° , ocorre a separação completa do fluxo, caracterizando o regime de *stall*, modelado pela função $C_{Dp(\alpha)}$.

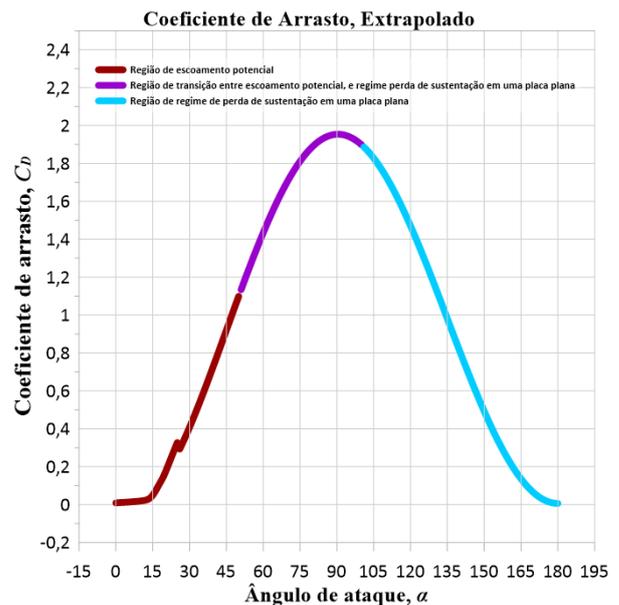


Figura 3 – Representação da Construção da Curva do Coeficiente de Arrasto, C_D

Na terceira etapa desta metodologia, foi implementada a teoria do Momento do Elemento de

Pá (*Blade Element Momentum; BEM*). O método *BEM* pressupõe que a pá é subdividida em uma quantidade, N , de elementos independentes, onde se assume que o escoamento do fluido entre esses elementos não interage. As forças e os momentos são calculados individualmente para cada elemento, e os valores totais de força e momento são obtidos por meio da integração dos resultados de cada elemento, proporcionando uma análise detalhada e precisa do desempenho da pá.

Para o cálculo do coeficiente de potência, C_p , Figura 4, é utilizado como parâmetro de entrada na metodologia *BEM*, as curvas polares aerodinâmicas extrapoladas do *Montgomerie*. Inicialmente, os coeficientes de sustentação, C_L , e arrasto, C_D , são utilizados para calcular os coeficientes normal, C_n , e tangencial, C_t . Esses coeficientes são utilizados para calcular os fatores de indução axial, a , e tangencial, a' , que, por sua vez, determinam as forças normal, F_n , e tangencial, F_t , atuantes em cada elemento da pá. A partir dessas forças, o torque, dQ , e a potência, dP gerados são calculados e, finalmente, o coeficiente de potência, C_p , é obtido, permitindo avaliar o desempenho da turbina eólica em diferentes condições operacionais.

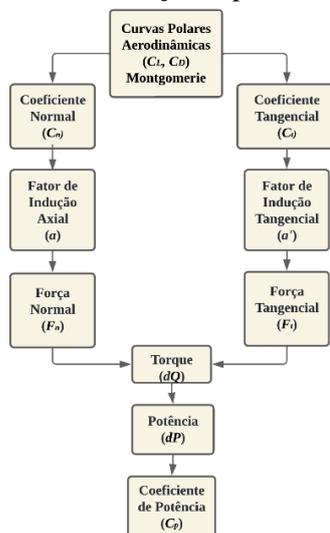


Figura 4 – representação metodologia parcial do método *BEM*

Para a validação das curvas polares aerodinâmicas C_L e C_D , realizou-se uma comparação dos resultados obtidos com o software *QBLADE*®, considerando o perfil aerodinâmico NACA23112 em um número de *Reynolds* de 1.200.000. Essa etapa foi fundamental para garantir a confiabilidade dos dados extrapolados, e continuar o processo de validação da metodologia *BEM*.

Para a validação da metodologia, foi realizado uma primeira comparação com o trabalho de (KOÇ,

GÜNEL e YAVUZ, 2016). Os parâmetros de entrada iniciais foram a massa específica do ar, ρ , que foi definida como $1,275 \text{ kg/m}^3$, e a viscosidade dinâmica, μ , foi definida como $17,2 \text{ m}^2/\text{s}$. Ademais, vale ressaltar que no trabalho de (KOÇ, GÜNEL e YAVUZ, 2016), a pá foi dividida em 9 seções, cada seção com seu raio correspondente, corda e ângulo de montagem. As 9 estações foram usadas para efeitos de validação

Além disso, foi realizada uma segunda validação, na qual foram comparadas diferentes metodologias desenvolvidas pelo grupo de pesquisa *FDT*. Nesta etapa, utilizou-se uma pá com as mesmas propriedades geométricas especificadas no estudo de (TOQUINI, 2023) assegurando que essas características fossem rigorosamente mantidas tanto na aplicação da metodologia *BEM* quanto no software *QBLADE*®, conforme o trabalho original. Essa abordagem permitiu uma análise comparativa mais abrangente e robusta, reforçando a confiabilidade dos resultados obtidos.

Resultados e discussão

Na Figura 5 mostra-se uma forte semelhança entre a metodologia aplicada do *Montgomerie*, e o *QBLADE*®, com ambos os métodos apresentando comportamentos característicos. No entanto, foram observadas discrepâncias entre 30° e 60° de ângulo de ataque, α , onde a metodologia mostrou valores inferiores, sendo a maior diferença no ângulo de ataque, α , 32° , o coeficiente de sustentação, C_L , obtido pela metodologia foi de 0,9, enquanto o calculado pelo *QBLADE*® alcançou 1,5.

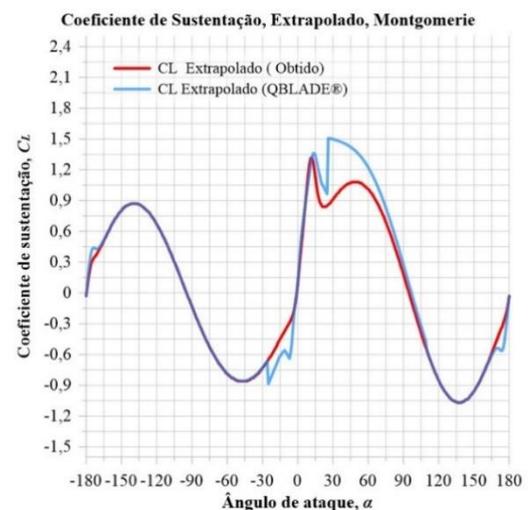


Figura 5 – Comparação entre a extrapolação, do coeficiente de sustentação, aplicada na metodologia, e o *QBLADE*®

A Figura 6 demonstra a precisão do C_D pela metodologia implementada. As diferenças entre os valores da metodologia em *Python*® e os do software *QBLADE*®, foram inferiores a 5% em todas as regiões analisadas.

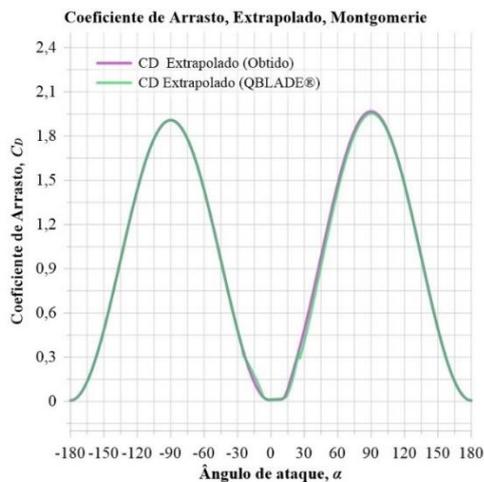


Figura 6 – Comparação entre a extrapolação, do coeficiente de arrasto, aplicada na metodologia, e o *QBLADE®*

A Figura 7 apresenta a comparação entre os resultados de *CFD* e *QBLADE®*, de acordo com (KOÇ, GÜNEL e YAVUZ, 2016), e a metodologia *BEM* desenvolvida neste estudo. Observa-se que a metodologia *BEM* mostra uma boa concordância com os resultados do *QBLADE®*. Contudo, diferenças foram encontradas nos resultados de *CFD*. A maior discrepância foi registrada na *TSR* 6, onde a metodologia *BEM* alcançou um valor de 0,48, enquanto o *CFD* apresentou 0,42.

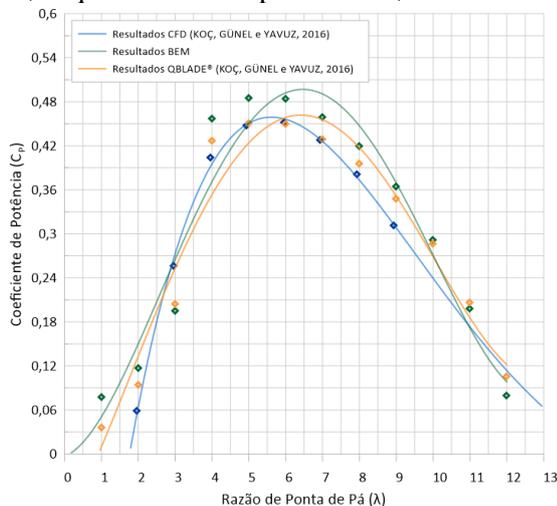


Figura 7 - Comparação entre a metodologia *BEM* desenvolvida e a literatura

A figura 8, apresenta a comparação entre as metodologias desenvolvidas pelo grupo *FDT*. Os testes experimentais foram realizados na bancada eólica - *Edibon*, e a conclusão foi que ao comparar quatro metodologias distintas, os resultados apresentaram comportamentos característicos muito semelhantes, demonstrando a confiabilidade e a validação da metodologia proposta para a análise de desempenho de pequenas turbinas eólicas.

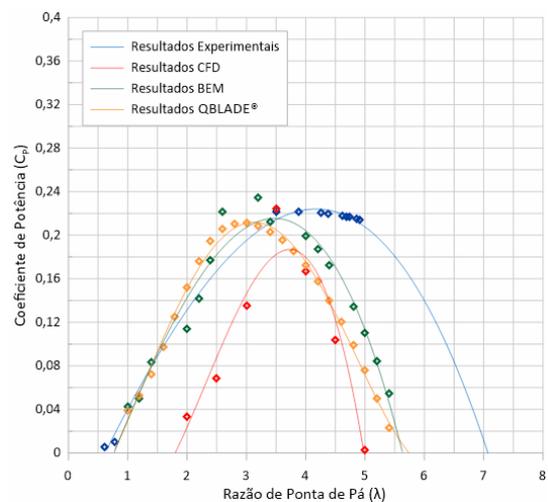


Figura 8 - Comparação entre as Metodologias do grupo *FDT*

Conclusões

Com base nos resultados apresentados na Figura 7, conclui-se que a metodologia desenvolvida, utilizando a extrapolação do *Montgomerie* e a aplicação da metodologia *BEM*, apresentou uma excelente concordância com os resultados obtidos na literatura do software *QBLADE®* e *CFD*. Ademais, a segunda comparação, Figura 8, que incluiu testes experimentais, realizados na bancada eólica *Edibon*, além dos resultados de *CFD* e *QBLADE®*, reforçou a confiabilidade da metodologia proposta. Esses resultados demonstram a eficácia da abordagem desenvolvida para a análise de desempenho de turbinas eólicas de pequeno porte, contribuindo para as aplicações de microgeração.

Agradecimentos

Agradecemos à (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 (PIBIC) pelo financiamento de nossa pesquisa. Agradecemos também à UNIFEI pela oportunidade de desenvolvimento pessoal e intelectual. Agradecemos também ao grupo *TIES* pelo incentivo à pesquisa.

Referências

- GRASSO, Francesco. Usage of Numerical Optimization in Wind Turbine Airfoil Design, 48, jan. 2011. 248-255.
- KOÇ, Emre ; GÜNEL, Onur; YAVUZ, Tahir. Comparison of Qblade and CFD results for small-scaled horizontal axis wind turbine analysis. 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 2016.
- MONTGOMERIE, B. Methods for root effects, tip effects and extending the angle of attack range to
- TOQUINI, Guilherme V.; , ESPINOSA, A. L.S. Análise fluidodinâmica de gerador eólico de eixo horizontal de pequeno porte. VI Simpósio de Iniciação Científica - Ciência como ferramenta de transformação Social, Itajubá, 2023.