

## CRIAÇÃO DE UMA METODOLOGIA UTILIZANDO O BLADE ELEMENT MOMENTUM (BEM) PARA O PROJETO PRELIMINAR DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

Felipe Eduardo de Farias<sup>1</sup> (IC), Prof.<sup>a</sup> Angie Lizeth Espinosa Sarmiento (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá.

**Palavras-chave:** Energia Eólica. Turbina Eólica de Eixo Horizontal - HAWT. *Blade Element Momentum* - BEM. Perdas na ponta da pá . Extrapolação do Montgomerie.

### Introdução

O aproveitamento da energia eólica para geração elétrica tem crescido exponencialmente no mundo nos últimos anos. Segundo o relatório *Global Wind Statistics (GWEC) de 2022*, verifica-se a forte evolução da capacidade instalada anual global, e a capacidade global acumulada de energia eólica entre 2001 e 2021, elevada em acima de 847 GW. Sendo que deste total, 57 parques eólicos, correspondentes a 132 GW, foram instalados em alto mar, e a maior parte dos parques eólicos está instalada em terra, correspondendo a um total de 715 GW.

Além disso, essa expansão da energia eólica no mundo está ligada diretamente às pesquisas científicas, que têm como o intuito prever o desempenho aerodinâmico das mesmas. Dessa maneira, é uma tendência que cada vez mais projetos de turbinas eólicas estão sendo desenvolvidos para retirar do vento a maior quantidade de energia possível. Nesse sentido, abre-se espaço para a criação de novas ferramentas, sendo o foco adquirir uma melhor previsão do desempenho. Nesse contexto, o presente trabalho aborda por intermédio da teoria do Momento do Elemento de Pá (*Blade Element Momentum ;BEM*), a criação de uma nova metodologia em linguagem *Python* para o projeto preliminar de uma turbina eólica de eixo horizontal - TEEH, sendo o foco análises de duas dimensões para obter o desempenho aerodinâmico, aplicando métodos de correção, assim como a extrapolação Montgomerie, a qual determina uma análise aerodinâmica de -180 até 180 de ângulo de ataque,  $\alpha$ , que representa um forte diferencial dessa metodologia de projeto. Por fim, a validação da nova metodologia foi realizada por meio de literatura, obtendo-se resultados condizentes com a literatura.

### Metodologia

A teoria clássica da aerodinâmica do rotor de aerogeradores, o método BEM, combina a teoria do momento e a teoria do elemento da pá, na qual a pá é dividida em várias seções e cada seção varre uma área anular quando o rotor gira. Esses anéis são separados e não interagem entre si. Em outras palavras, o tubo de corrente é decomposto ao longo de diferentes posições de

raio,  $r$ , e cada anel possui seu próprio equilíbrio da quantidade de movimento. Ao dividir as pás do aerogerador em elementos de pá anulares e aplicar a conservação de quantidade de movimento linear unidimensional aos elementos anulares, as forças e a potência são calculadas e integradas com base nos coeficientes de sustentação e arrasto da seção aerodinâmica. A pá é dividida em  $N$  seções, e em cada seção, existem forças e velocidades atuando de maneiras diferentes (TANG, HUANG, *et al.*, 2015). Para iniciar a explicação da teoria BEM, é crucial examinar a Figura 1, que delinea os ângulos-chave que governam o desempenho das pás do aerogerador. Portanto, os ângulos em consideração são:

- $\alpha$ , ângulo de ataque, ângulo entre a linha da corda e o escoamento relativo,  $W$ .
- $\beta$ , ângulo de montagem da pá, ângulo entre o plano de rotação e a linha da corda.
- $\phi$ , ângulo do escoamento,  $\phi = \alpha + \beta$

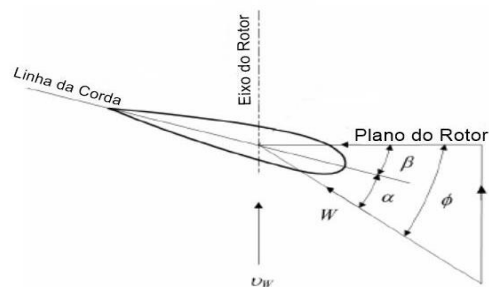


Figura 1 – Definição dos principais ângulos de uma pá de turbina eólica de eixo horizontal TEEH.

O fluido que passa sobre o perfil aerodinâmico experimentará diferentes condições do escoamento na superfície superior (extradorso) e na superfície inferior (intradorso), resultando em uma diferença de pressão e, subsequentemente, na geração de forças de sustentação e arrasto. Portanto, é possível decompor essas forças em relação aos eixos normal e tangencial, sendo que é possível verificar as equações pela Figura 2, como as Equações (1) e (2), que representam os coeficientes normal  $C_n$  e tangencial,  $C_t$ , respectivamente. (COUTINHO, 2017). Onde,  $\phi$ , representa o ângulo de

escoamento,  $C_l$ , o coeficiente de sustentação e  $C_d$ , o coeficiente de arrasto. Com os resultados da velocidade do escoamento,  $U$ , e da velocidade angular,  $\omega$ , obtém-se o triângulo de velocidades, onde a velocidade relativa, é definida na Equação (3).

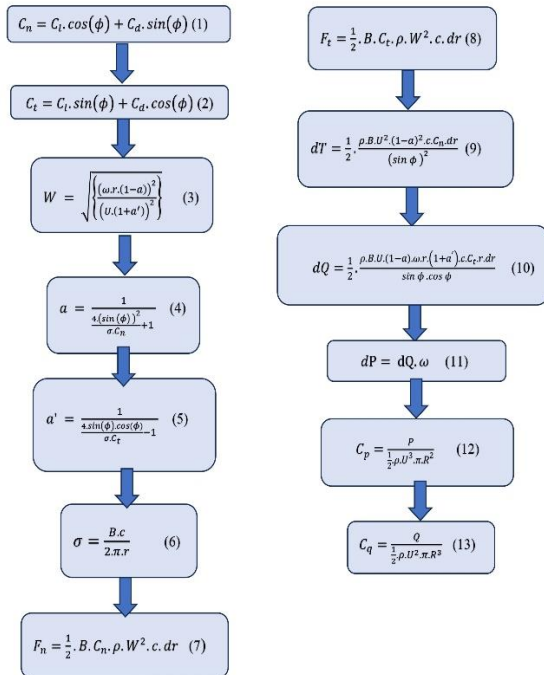


Figura 2 – Fluxograma representando as principais equações da metodologia. Adaptado de COUTINHO (2017)

Dessa maneira,  $W$ , é a velocidade relativa,  $\omega$ , é a velocidade angular,  $r$ , é o raio local,  $U$ , é a velocidade do escoamento,  $a$ , é o fator de indução axial, sendo este último uma medida da influência dos coeficientes de arrasto,  $C_d$ , e sustentação,  $C_l$ , no escoamento de ar ao redor de um aerofólio. Além disso,  $a'$ , representa o fator de indução tangencial, o qual é um fator importante para medir o torque,  $dQ$ . Esses fatores de indução são usados para modelar os efeitos do escoamento do ar sobre a superfície do perfil aerodinâmico, e são definidos pelas Equações (4) e (5), e  $\sigma$  é a solidez do rotor, representada pela equação (6). Sendo,  $B$ , é o número de pás,  $c$ , é o raio local, e  $r$ , é o raio da seção da pá. Dessa forma, a teoria BEM possibilita a análise do rotor por meio do triângulo de velocidades, uma vez que os fatores de indução axial e tangencial,  $a$  e  $a'$ , já são conhecidos. Isso permite a formulação de equações para determinar as forças atuantes na direção normal e tangencial, representadas pelas Equações (7) e (8), respectivamente.

Sendo necessário conhecer o valor da massa específica do fluido,  $\rho$ , e  $dr$ , que representa a divisão do raio em  $N$  partes a partir do centro do rotor. Para determinar as forças de empuxo  $dT$  e o torque  $dQ$ , principais objetivos da teoria, são usados os fatores de

indução axial,  $a$ , e tangencial,  $a'$ . Essas expressões são demonstradas na Equação (9) e (10), respectivamente. Portanto, a potência será definida como a multiplicação do torque,  $dQ$  e a velocidade angular,  $\omega$ , conforme a Equação (11). Além disso, ao integrar os valores de potência,  $dP$ , e torque,  $dQ$ , ao longo da pá, obtém-se a potência total,  $P$ , e o torque,  $Q$ , e assim, é possível obter os valores de coeficiente de potência e torque,  $C_p$ ,  $C_q$ , representados nas Equações (12) e (13), respectivamente.

O fator de perda na ponta é utilizado como correção para a suposição de um número infinito de pás no BEM, visto que assumir que o rotor consiste em um número infinito de pás leva a um número infinito de vórtices na ponta. Logo, resultando em uma estrutura de esteira cilíndrica. Por isso, para a correção o modelo mais utilizado é baseado no Método de Prandtl, que envolve a introdução do fator de correção na teoria BEM original. Ramdin (2017). Dessa forma, é necessário aplicar o fator de correção,  $F$ , aos fatores de indução axial,  $a$ , e tangencial,  $a'$ , da teoria BEM, o que é representado nas Equações (14) e (15).

$$a = \frac{1}{\frac{4 \cdot F \cdot (\sin \phi)^2}{\sigma \cdot C_n} + 1} \quad (14)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cdot F \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi}{\sigma \cdot C_t} - 1} \quad (15)$$

Inicialmente, para calcular o desempenho da pá da turbina usando o método BEM, é necessário conhecer os valores dos coeficientes de sustentação,  $C_l$  e arrasto,  $C_d$ , que geralmente são calculados com base em *softwares* como o XFOIL. É comum que esses dados sejam obtidos em uma faixa limitada, como de  $-20$  até  $20$  de ângulo de ataque,  $\alpha$ . Dessa forma, é necessário extrapolar os dados iniciais para obter os coeficientes de sustentação,  $C_l$  e arrasto,  $C_d$ , respectivamente, para todo o intervalo de ângulo de ataque,  $\alpha$ , em que uma turbina eólica de eixo horizontal pode operar. Desse modo, o estudo concluiu que o método de Montgomerie demonstrou ter uma grande eficiência. Assim, justificando a adoção deste método no presente trabalho.

O método de Montgomerie é formulado com base na suposição de que existe algum comportamento semelhante a um fluxo potencial em um perfil aerodinâmico real em torno de um ângulo de ataque  $\alpha$  de  $0^\circ$ . Em ângulos de ataque mais elevados, o desempenho do perfil aerodinâmico se comporta como uma placa fina básica. Para ângulos intermediários, uma função de transformação  $f$  é usada para simular o comportamento. O desempenho geral é uma interpolação entre o comportamento da placa fina e a curva de fluxo potencial. Mahmuddin, klara, *et al.*, (2017). Assim, o equacionamento do Montgomerie está representado na Figura 3. Onde  $f$  é determinado a partir do coeficiente de

sustentação original  $C_l$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , e  $f$  é definido pela Equação 17, sendo  $t$  a função de linha reta que é uma tangente quando o ângulo de ataque é igual a zero, resultando em um comportamento tangencial em torno de  $C_l(0)$  e  $C_d(0)$ , e  $s$  é uma interpolação entre o comportamento da placa fina. Por fim, as variáveis  $k$ ,  $\alpha_m$ , e  $G$  estão representadas respectivamente pelas equações (18), (19), e (20), sendo que todo o equacionamento e os valores de  $f_1$  e  $f_2$  são valores que precisam ser obtidos a partir da curva original de coeficiente de sustentação  $C_l$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , a maneira de extrair esses pontos é conectando os pontos já obtidos, que são os dados polares aerodinâmicos pré-stall.

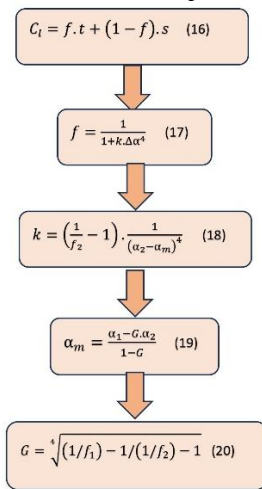


Figura 3 – Fluxograma representando as principais equações do Montgomerie. Adaptado de Mahmuddin, klara, *et al.*, (2017)

No algoritmo desenvolvido, o primeiro passo é definir um perfil aerodinâmico, o algoritmo lê e plota o perfil aerodinâmico e, com a implementação do XFOIL, realiza cálculos para coeficientes aerodinâmicos do pré-estol numa faixa entre  $-20^\circ$  a  $20^\circ$  de ângulo de ataque,  $\alpha$ , o que é mais do que suficiente para a realização da extrapolação usando o método do Montgomerie, resultando em uma faixa de ângulo de ataque de  $-180^\circ$  a  $180^\circ$ . Com o comportamento aerodinâmico completo do aerofólio, as propriedades do fluido e as propriedades geométricas do rotor, são então inseridas, calculando depois todas as grandezas definidas no equacionamento mostrado anteriormente. O algoritmo também inclui a implementação do Método de Prandtl,  $F$ , que envolve a introdução do fator de correção na teoria BEM, para melhorar a precisão. Portanto, utilizando a Equação (9), é possível determinar o empuxo  $dT$ , enquanto as Equações (12) e (13) definem os valores dos coeficientes de potência e torque,  $C_p$ ,  $C_t$ .

Para a validação do código, foi usado o estudo de Wenzel (2007) como referência. Os parâmetros de entrada iniciais foram as propriedades do fluido. A massa

específica do ar,  $\rho$ , foi definida como  $1,275 \text{ kg/m}^3$ , e a viscosidade dinâmica,  $\mu$ , foi definida como  $17,2m^2/s$ . Além disso, a rotação foi definida como  $635,56 \text{ rpm}$ , e o número de pás,  $B$ , foi definido como 3. O perfil aerodinâmico NACA23018 foi usado como parâmetro de entrada neste estudo. Ademais, vale ressaltar que no trabalho de Wenzel (2007), a pá foi dividida em 50 seções, cada seção com seu raio correspondente, corda e ângulo de montagem. As 50 estações foram usadas nos cálculos para efeitos comparativos. Por fim, com esses dados, foi possível validar a nova metodologia proposta e finalmente calcular as diferenças percentuais entre os resultados.

### Resultados e discussão

A obtenção de valores precisos e confiáveis para o torque  $dQ$ , e potência,  $dP$ , são de vital importância para garantir o desempenho eficiente e confiável do projeto aerodinâmico. Na Figura 4, observa-se os resultados obtidos com os dados apresentados por Wenzel (2007), estabelecendo assim uma compreensão mais completa da concordância entre as duas abordagens. Como esperado, os comportamentos dos parâmetros torque ( $dQ$ ) e potência ( $dP$ ) exibiram semelhanças notáveis com os dados de referência. As diferenças percentuais encontradas nos valores de torque,  $dQ$ , variaram de um mínimo de 0,26%, na seção 20, a um máximo de 32,58%, na seção 49. Da mesma forma, as diferenças percentuais nas estimativas da potência,  $dP$ , variaram de um mínimo de 0,127% na seção 40, a um máximo de 32,503%, na seção 49, contudo, é válido ressaltar que para ambas as situações Torque,  $dT$  e Potência,  $dP$ , as diferenças percentuais maiores que 12% só ocorrem em 7 seções, enquanto as outras 43 ficaram com valores a baixo de 12%. Isso ressalta, e resulta em a eficácia da metodologia, e resultando um comportamento dos valores muito próximo ao referencial, como ilustrado na Figura 4.

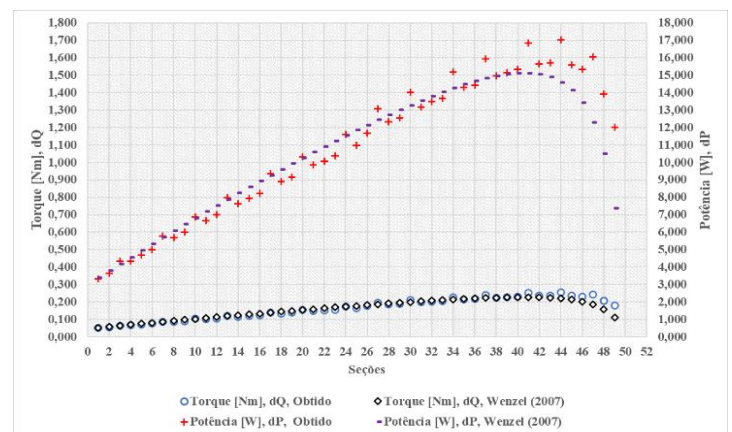


Figura 4 – Representação dos Parâmetros de Saída de Torque e Potência com o Método de Prandtl ( $F$ ).



A metodologia adotada para calcular as forças aerodinâmicas e parâmetros de desempenho em cada seção da pá da turbina eólica (sendo os valores totais obtidos a partir da integração, Tabela 1), demonstraram uma notável proximidade em relação aos valores de referência, indicando uma convergência significativa. Vale ressaltar que, dentre os parâmetros analisados, o torque total do rotor,  $Q$ , apresentou uma excelente concordância, com uma diferença de apenas 1,073%. Os valores de potência,  $P$ , obtidos também foram altamente satisfatórios, com uma diferença de 1,097%. Com relação ao coeficiente de torque,  $C_q$ , foi obtida uma diferença de 2,537%. Esses resultados reforçam a confiabilidade da metodologia desenvolvida, validando a abordagem adotada.

Tabela 1 –Parâmetros de saída de metodologia, com o Método de perdas de ponta de Prandtl ( $F$ ).

	Obtido	Wenzel (2007)	Diferença(%)
Empuxo Total, N ( $T$ )	100,489	88,654	13,350
Torque Total, N.m ( $Q$ )	9,131	9,230	1,073
Potência Total, W ( $P$ )	606,761	613,490	1,097
Coefficiente de Potência ( $C_p$ )	0,107	0,110	2,537
Coefficiente de Torque ( $C_t$ )	0,536	0,560	4,333

### Conclusões

O presente trabalho introduziu uma metodologia altamente inovadora para a análise bidimensional de turbinas eólicas de eixo horizontal - TEEH. Essa abordagem abrangente considera tanto as propriedades do fluido quanto às características geométricas específicas do rotor da turbina, visando a obtenção de parâmetros essenciais para a avaliação do desempenho da turbina. A singularidade dessa metodologia reside na integração direta do *software XFOIL* no algoritmo, juntamente com a aplicação da técnica de extrapolação das curvas polares do Montgomerie para analisar as características aerodinâmicas. Além disso, a incorporação do fator de perda de ponta de pá adiciona um importante grau de precisão aos valores de desempenho aerodinâmico.

Em síntese, esta pesquisa revelou uma metodologia altamente vantajosa ao combinar harmoniosamente todas essas abordagens, que resultou em uma metodologia abrangente e confiável para a análise de turbinas eólicas. A simplicidade e rapidez resultante no processo de obtenção de parâmetros de

interesse representa uma contribuição significativa para a pesquisa e o desenvolvimento nesse campo. Portanto, esta metodologia demonstra sua utilidade como uma ferramenta eficaz para avaliar o desempenho de turbinas eólicas de eixo horizontal, fornecendo informações valiosas para análises preliminares e projetos futuros, além de contribuir para o avanço contínuo da tecnologia de energia eólica no país.

### Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), PROCESSO APQ-00653-22, referente ao projeto: “Análise Numérica e Experimental de Microgeradores Eólicos para Aplicações em Regiões Remotas no Brasil” edital 001/2022, registro na DPI UNIFEI No: PVDI297-2022, pelo financiamento desta pesquisa. Ao PIBIC UNIFEI (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica financiado pela UNIFEI) pelo apoio financeiro e ao grupo de pesquisa FDT - UNIFEI (Fluid Dynamics and Turbomachinery) e à Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI por fazer possível a realização desta pesquisa.

### Referências

- COUTINHO, F. R. **Metodologia Híbrida Cfd/Bem Para A Estimativa Do Desempenho De Turbinas Eólicas De Eixo Horizontal**. Rio de Janeiro: Tese de Mestrado - Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.
- FARIAS, L. M.; SELLITTO,. *Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras.*, 07 Julho 2013. 07-16.
- MAHMUDDIN, et al. *Airfoil Lift and Drag Extrapolation with Viterna and Montgomerie Methods*, 105, 2017. 811-816.
- RAMDIN,. **Prandtl Tip Loss Factor Assessed**. [S.l.]: Master of Science in Aerospace Engineering, Delft University of Technology, 2017.
- TANG, X. et al. *A Direct Approach of Design Optimization for Small Horizontal Axis Wind Turbine Blades*. **Procedia CIRP**, 36, 2015. 12-16.
- WENZEL, G.. **Projeto Aerodinâmico das Pás de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal**. Rio Grande do Sul: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007.