

COMPARAÇÃO ENTRE *LIFTING LINE THEORY* E *BLADE ELEMENT MOMENTUM* PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DAS PÁS EM PEQUENOS AEROGERADORES

WILLIAN MINORU OKITA¹

¹ Doutor, UNIVASF, minoruokita@gmail.com

Apresentado no
LIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2024
6 a 8 de agosto de 2024 – Natal – RN, Brasil

RESUMO: Os pequenos aerogeradores são adequados para a geração de eletricidade em áreas isoladas para promover a expansão local das atividades comerciais e a inclusão social. O método *Blade Element Moment* (BEM) é geralmente usado para previsão de desempenho, mas geralmente produz previsões superestimadas, uma vez que os efeitos da esteira não são contabilizados com precisão. *Lifting Line Theory* (LLT) pode representar os efeitos da pá e da esteira com mais precisão. Na presente investigação, os dois métodos são analisados e suas previsões do desempenho aerodinâmico de pequenos aerogeradores são comparadas para diferentes configurações geométricas de pás. Os efeitos das variantes geométricas da pá, como a combinação de corda linear e torção linear e a combinação de corda constante e torção linear apresentaram diferença de 3,4 % a 1,6 % respectivamente. No geral, os resultados mostraram bom desempenho de ambos os métodos; no entanto, o LLT fornece resultados mais precisos e mais informações sobre o fluxo local sobre as pás do rotor.

PALAVRAS-CHAVE: fontes alternativas de energia, configurações geométricas das pás, energia renovável

COMPARISON BETWEEN *LIFTING LINE THEORY* AND *BLADE ELEMENT MOMENTUM* FOR DIFFERENT GEOMETRIC CONFIGURATIONS OF BLADES IN SMALL WIND TURBINES

ABSTRACT: Small wind turbines are suitable for electricity generation in isolated areas to promote local expansion of commercial activities and social inclusion. The *Blade Element Momentum* (BEM) method is generally used for performance prediction but often produces overestimated forecasts since the wake effects are not accurately accounted for. *Lifting Line Theory* (LLT) can represent the blade and wake effects more accurately. In the present investigation, the two methods are analyzed and their predictions of the aerodynamic performance of small wind turbines are compared for different blade geometric configurations. The effects of geometric blade variants, such as the combination of linear chord and linear twist and the combination of constant chord and linear twist, showed differences of 3.4 % and 1.6 %, respectively. Overall, the results showed good performance of both methods; however, LLT provides more accurate results and more information about the local flow over the rotor blades.

KEYWORDS: alternative energy sources, geometric configurations of blades, renewable energy

INTRODUÇÃO: O método BEM é uma técnica simples geralmente usada para estimar o

desempenho de aerogeradores e os aspectos aerodinâmicos gerais das pás com precisão aceitável, fácil de implementar, mas não leva em conta adequadamente a esteira atrás da turbina e precisa de correção para a ponta e o cubo para aproximar suas previsões para o caso real. Por outro lado, o método LLT é bem aceito como uma ferramenta aerodinâmica para prever o desempenho geral do rotor, bem como as características do fluxo local, como velocidade induzida, circulação, distribuição angular induzida e carga da pá, e pode prever adequadamente a rotação da esteira atrás do rotor. Devido a estas características, não é tão fácil de implementar como o método BEM. Essas diferenças entre os dois métodos em termos de precisão de previsões e facilidade de implementação induziram muitos estudos a comparar seu desempenho numérico relativo ao tratar pequenos aerogeradores em baixas velocidades de vento e com geometrias variadas de pás. Okulov et al. (2017) conduziram um estudo para determinar a potência gerada a partir de dois rotores projetados. Eles usaram o BEM e o LLT com uma relação de velocidade de ponta igual a 5 e o coeficiente de sustentação ao longo da pá igual a 0,8. Os resultados foram focados em alcançar alto desempenho aerodinâmico e otimizar parques eólicos. O presente estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa detalhada do desempenho numérico do BEM e do LLT para prever o desempenho de um pequeno aerogerador de eixo horizontal em diferentes aerofólios, através de dois códigos numéricos baseados em MATLAB.

MATERIAL E MÉTODOS: *Blade Element Momentum*: A teoria BEM permite calcular as forças locais que atuam na pá de um aerogerador combinando a teoria dos elementos da pá e a teoria do momento. É relativamente simples e amplamente utilizado para calcular o desempenho aerodinâmico de aerogeradores, bem como prever os parâmetros locais e globais como torque, potência, empuxo e seus respectivos coeficientes. O método BEM utilizado neste estudo inclui o fator de perda de ponta de Prandtl e a correção de Glauert (HANSEN, 2008). ***Lifting Line Theory*:** Esta teoria substitui a pá por um filamento de vórtices, conhecido como vórtice ligado, que está posicionado a um quarto da linha da corda a jusante da borda de ataque (RAMASAMY & LEISHMAN, 2007). No entanto, pelo teorema de Helmholtz, um filamento de vórtice não pode começar ou terminar abruptamente dentro do domínio (BURTON et al., 2001). Consequentemente, forma-se um vórtice em ferradura, compreendendo dois vórtices livres que se estendem a jusante das pontas das pás até o infinito, e um vórtice fixo. Este arranjo forma um anel de vórtice, fechado por um filamento de vórtice inicial que corre paralelo ao vórtice ligado. A explicação do conceito de anel de vórtice é esclarecida pelo teorema da circulação de Kelvin, que afirma que a circulação dentro de um domínio fechado permanece constante ao longo do tempo. **Metodologia:** Os códigos numéricos BEM e LLT são usados para prever e comparar o desempenho numérico da simulação de desempenho do aerogerador sujeito ao critério de convergência de 10^{-5} . Ambos os códigos são escritos no software MATLAB. As condições nominais do aerogerador simulado são apresentadas na Tabela 1. O aerofólio, Joukowski J 0021, e duas configurações geométricas: (a)- distribuições de corda linear e ângulo de torção linear e (b)- distribuições de corda constante e ângulo de torção linear, conforme apresentado nas Figuras 1 e 2. Em que serão utilizados nas simulações. As simulações foram feitas para as condições de vento em Campinas a uma altura de 30 m (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2012).

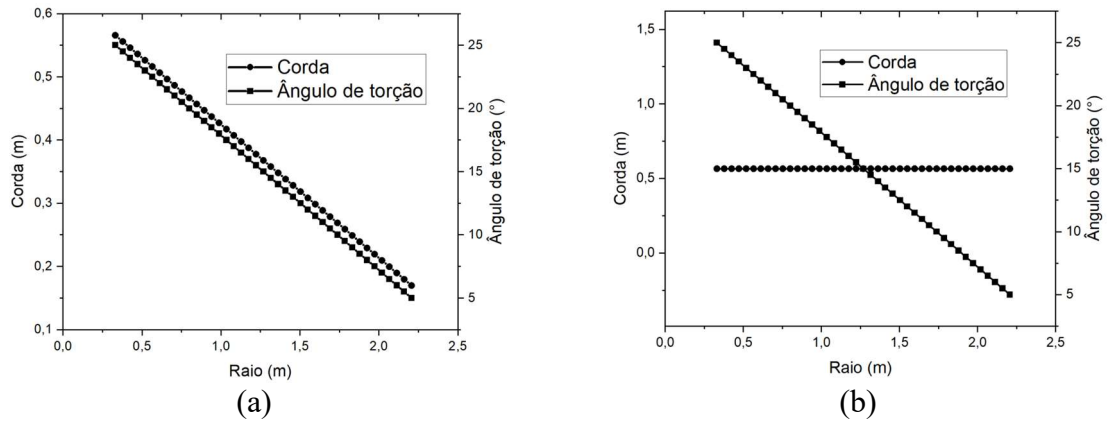


FIGURA 1. (a) Distribuições de corda linear e ângulo de torção linear e (b) Distribuições de corda constante e ângulo de torção linear

TABELA 1. Parâmetros nominais do aerogerador.

Parâmetros	Valores
Potência	5 kW
Velocidade do vento	10 m s ⁻¹
Raio	1.876 m
Velocidade de rotação	95.493 rpm
Número de pás	3
Razão de aspecto	6

RESULTADOS E DISCUSSÃO: No caso do aerofólio Joukowski J 0021, a simulação para a combinação de corda linear e torção linear na velocidade do vento de 10 m s⁻¹ mostrou uma diferença na potência e coeficiente de potência de cerca de 3,4 % como mostrado na Figura 2, enquanto para a combinação de corda constante e torção linear, esta diferença foi de cerca de 1,6 % como pode ser verificado na Figura 3. Tais diferenças ocorrem devido a influência dos efeitos da velocidade induzida considerados no código numérico LLT como apresentado por Dumitrescu & Cardos (1998).

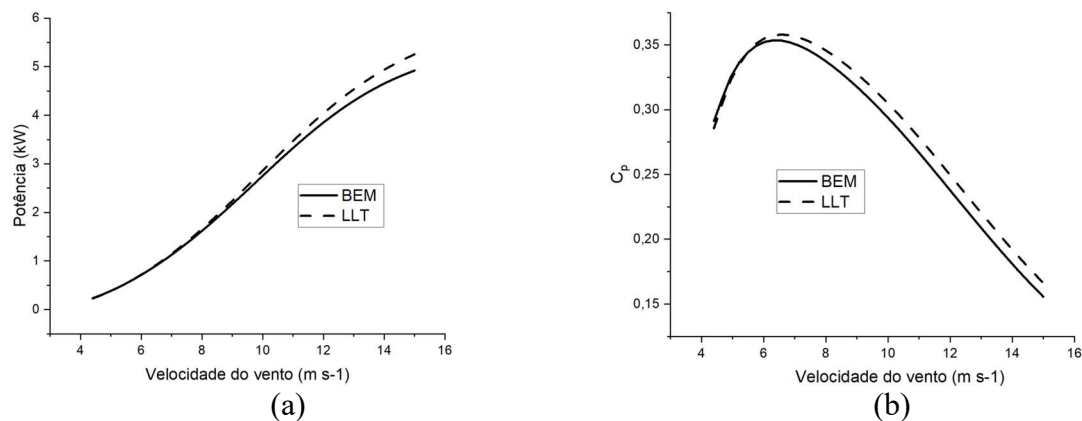


FIGURA 2. Efeitos da velocidade do vento na potência gerada e no coeficiente de potência para a combinação da distribuição de corda linear e de ângulo de torção linear para o aerofólio Joukowski J 0021

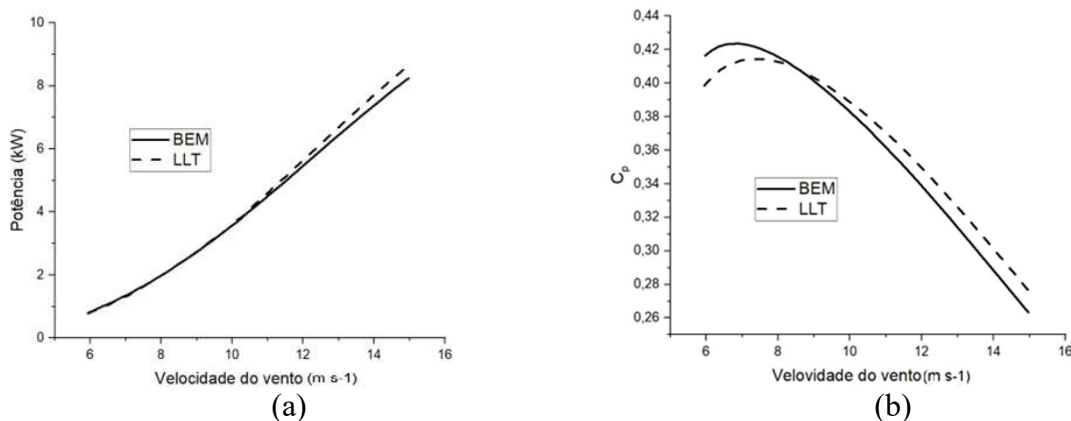


FIGURA 3. Efeitos da velocidade do vento na potência gerada e no coeficiente de potência para a combinação da distribuição de corda constante e de ângulo de torção linear para o aerofólio Joukowski J 0021

CONCLUSÕES: Os efeitos das variantes geométricas da pá, como a combinação de corda linear e torção linear e a combinação de corda constante e torção linear apresentaram diferença de 3,4 % a 1,6 % respectivamente. No geral, os resultados mostraram bom desempenho de ambos os métodos; entretanto, como mencionado anteriormente, o código LLT permite obter mais informações sobre as características do fluxo local sobre as pás do rotor. Como conclusão, o método BEM é simples de implementar e fornece estimativas bastante boas, mas geralmente prevê demasiado os parâmetros de desempenho em comparação com o LLT. Se houver necessidade de obter informações de fluxo local, como distribuição de circulação, ângulo induzido local, velocidade induzida local, a abordagem da LLT deverá ser usada.

REFERÊNCIAS:

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. Wind Energy Handbook, Wiley-Blackwell/John Wiley & Sons, London, 2001.

DUMITRESCU H.; CARDOS V. Wind Turbine Aerodynamic Performance by Lifting Line Method, *International Journal of Rotating Machinery*, v. 4, n. 3, 1988.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Atlas Eólico do Estado de São Paulo*, Secretaria De Energia, São Paulo, Brazil, 2012.

HANSEN, M. O. L. Aerodynamics of Wind Turbines, 2nd ed., Earthscan, London, 2008.

OKULOV, V. L.; MIKKELSEN, R.; SØRENSEN, J. N.; NAUMOV, I. V.; TSOY, M. A.; Power Properties of Two Interacting Wind Turbine Rotors. *J. Energy Resour. Technol.*, v. 139, n. 5, p. 051210, 2017.

RAMASAMY, M.; LEISHMAN, J. G. A Reynolds Number-Based Blade Tip Vortex Model. *J. Am. Helicopter Soc.*, v. 52, n. 7, p. 214–223, 2007.