

UMA INVESTIGAÇÃO COMPARATIVA ABRANGENTE DA *LIFTING LINE THEORY* E *BLADE ELEMENT MOMENTUM* 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. A análise do coeficiente de potência mostrou uma diferença máxima entre as previsões dos dois métodos de cerca de 4,4% no caso do rotor baseado em aerofólio Gottingen GO 398 e de 6,3% para simulações do aerofólio Joukowski J 0021. No caso da produção anual de energia, verifica-se uma diferença de 2,35% entre as previsões dos dois métodos. No geral, os resultados mostraram bom desempenho de ambos os métodos; entretanto, o LLT fornece resultados mais precisos e mais informações do fluxo local sobre as pás do rotor.

PALAVRAS-CHAVE: fontes alternativas de energia, conversão/sistemas de energia, energia renovável

A COMPREHENSIVE COMPARATIVE INVESTIGATION OF THE *LIFTING LINE THEORY* AND *BLADE ELEMENT MOMENTUM THEORY* APPLIED TO SMALL WIND TURBINES

ABSTRACT: Small wind turbines are adequate for electricity generation in isolated areas to promote local expansion of commercial activities and social inclusion. Blade element momentum (BEM) method is usually used for performance prediction, but it generally produces overestimated predictions since the wake effects are not precisely accounted for. Lifting line theory (LLT) can represent the blade and wake effects more precisely. In the present investigation, the two methods are analyzed and their predictions of the aerodynamic performance of small WTs are compared. The analysis of the power coefficient showed a maximum difference between the predictions of the two methods of about 4.4% in the case of Gottingen GO 398 airfoil-based rotor and 6.3% for simulations of the Joukowski J 0021 airfoil. In the case of the annual energy production, a difference of 2.35% is found between the predictions of the two methods. As a whole, the results showed good performance of both methods; however, the LLT provides more precise results and more information on the local flow over the rotor blades.

KEYWORDS: alternative energy sources, energy conversion/systems, renewable energy

INTRODUÇÃO: O método *Blade Element Momentum* (BEM) é amplamente utilizado para avaliar o desempenho aerodinâmico das pás do rotor devido à sua simplicidade e facilidade de implementação. O método BEM e suas variantes sofrem com a falta de modelagem correta da esteira. O método *Lifting Line Theory* (LLT) com esteira de vórtice livre é fisicamente mais adequado para representar a aerodinâmica do rotor. Phillips e Snyder (2000) compararam o método LLT com o método do painel e destacaram seu baixo custo computacional. Vermeer et al. (2003) apresentaram um estudo da aerodinâmica da esteira em um aerogerador de eixo horizontal com foco na previsão dos efeitos gerados a jusante da turbina. Hansen et al. (2006) revisaram métodos de modelagem de um aerogerador, incluindo o método BEM, métodos de vórtice, métodos de painel e métodos CFD. Jackson e Amano (2017) mostraram a possibilidade de aplicar o modelo de tensão de Reynolds a aerogeradores para compreender onde existem regiões de alta energia cinética de turbulência na esteira. Hasan et al. (2019) conduziram um estudo para investigar o componente médio da velocidade axial do vento, o déficit de velocidade e a intensidade total da turbulência em um aerogerador de eixo horizontal. O método Blade Element Momentum (BEM) é uma técnica simples e prática para estimar o desempenho de aerogeradores e os aspectos aerodinâmicos das pás, embora necessite de ajustes para precisão nas análises da esteira. Em contraste, o método Lifting Line Theory (LLT) é mais complexo e preciso, permitindo previsões detalhadas sobre o desempenho do rotor e o comportamento do fluxo, incluindo a rotação da esteira. A maior complexidade do LLT em comparação com a simplicidade do BEM motivou estudos comparativos, focando em aerogeradores de pequena escala em condições de baixa velocidade do vento e diferentes configurações de pás. Estes estudos buscam otimizar modelos aerodinâmicos, equilibrando entre facilidade de uso e precisão na previsão, para melhorar a eficiência e a viabilidade dos projetos de aerogeradores. 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. Gupta e Leishman (2005) compararam o método BEM com o *Free-Vortex Method* (FVM) e descobriram que o método BEM não era bom para avaliar com precisão o fator de indução de esteira para taxas de velocidade de ponta mais altas. Grasso et al. (2011) combinaram o método LLT com o FVM e compararam os resultados com experimentos mostrando boa concordância. Esta revisão de literatura mostra a falta de informações e resultados de estudos comparativos detalhados sobre o BEM e o LLT, precisão de previsão dos coeficientes de potência e resposta dos dois métodos ao uso de diferentes aerofólios. No presente estudo, existem dois códigos numéricos validados baseados em MATLAB: um para o BEM (modificação do código existente) e outro baseado no LLT desenvolvido durante este estudo. As previsões dos dois códigos são comparadas durante simulações de pequenas turbinas, a sensibilidade dos métodos a variação do aerofólio foi analisada.

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 (2008). O processo de cálculo é iniciado assumindo valores iniciais para os fatores de indução axial e tangencial geralmente considerados zero (a serem corrigidos no final do processo de iteração), procedendo ao cálculo do ângulo de fluxo na posição radial específica do segmento da pá, e então calcule o ângulo de ataque do segmento do aerofólio no raio específico. A partir do ângulo de ataque conhecido e do número de Reynolds local, os coeficientes de sustentação e arrasto podem ser

determinados a partir das características aerodinâmicas do aerofólio ou, alternativamente, podem ser determinados usando o software XFOIL. A partir do conhecimento dos coeficientes de sustentação e arrasto, pode-se calcular os coeficientes das forças normais e tangenciais do segmento, calcular os coeficientes de indução a e a' levando em consideração as correções de Prandtl e Glauert, e calcular e comparar seus valores numéricos. Se a diferença entre os valores assumidos e os previstos for maior que o valor pré-estabelecido de 10–5, então use os novos valores e repita o procedimento de iteração até que a convergência seja alcançada. Se as diferenças estiverem dentro do limite pré-estabelecido, continue o cálculo para determinar o empuxo, o torque e a potência do segmento. Repita este procedimento para cada segmento e depois integre para determinar o torque total, a força normal total e a potência total e os coeficientes correspondentes. A produção anual de energia (PAE) é a energia produzida pelo aerogerador funcionando em condições reais de vento durante um ano inteiro. O PAE é a combinação da curva de produção com uma função de densidade de probabilidade para o vento. Detalhes dos cálculos estão nas referências de Glauert (2008) e Burton et al. (2001).

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 E 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. O teorema de Kutta-Joukowski relaciona a força de sustentação experimentada por um aerofólio com a circulação (Γ) do fluxo ao seu redor. Este teorema leva em consideração a modificação dos campos de velocidade e pressão influenciados pela circulação, determinando em última análise a força de sustentação.

$$L' = \frac{1}{2} \rho V C_l c dy = \rho V \Gamma \quad (1)$$

Nesta abordagem, uma folha de vórtice helicoidal contínua com um diâmetro consistente é gerada na sequência de cada pá do rotor. Esses “vórtices de escape” são formados por filamentos de vórtices originados dos vórtices presos à pá e emergem de vários pontos ao longo da pá (RAMASAMY E LEISHMAN, 2007). Aplicando a Lei de Biot-Savart, a velocidade induzida (V_{ind}) pode ser calculada em um local específico, considerando a influência do elemento de vórtice, conforme ilustrado na Figura 1.

$$V_{ind} = K_v \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{(r_1 + r_2)(r_1 \times r_2)}{r_1 r_2 + r_1 \cdot r_2} \quad (2)$$

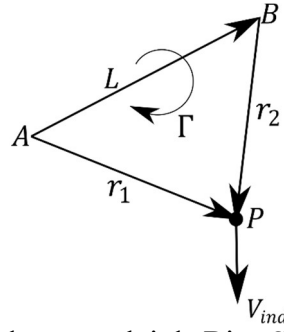


FIGURA 1. Diagrama vetorial empregado para a lei de Biot-Savart

Onde está a circulação Γ , o vetor AP é r_1 , o vetor BP é r_2 . Além disso, o parâmetro viscoso é K_v definido pela Eq. (3), onde L é o comprimento do filamento do vórtice, r_{eff} é o raio do núcleo do vórtice e n são os valores associados ao perfil de velocidade, onde, $n = 1$, $n = 2$ e $n \rightarrow \infty$ referem-se ao vórtice de Kaufmann, ao modelo de Lamb-Oseen e ao vórtice de Rankine modelo, respectivamente.

$$K_v = \left[\frac{(|L||r_1|)^2 - (L \cdot r_1)^2}{|L|^2} \right] \left[r_{eff}^{2n} + \left(\frac{(|L||r_1|)^2 - (L \cdot r_1)^2}{|L|^2} \right)^n \right]^{-1/n} \quad (3)$$

O ângulo de ataque observado pode ser reduzido em cada seção da pá. Portanto, o ângulo de ataque efetivo (α_{eff}) é definido como

$$\alpha_{eff} = \alpha_{geom} - \alpha_{ind} \quad (4)$$

Considerando α_{eff} os valores de cada seção da pá e consultando a tabela aerodinâmica que inclui os coeficientes de sustentação (C_l) e de arrasto (C_d) em função do ângulo de ataque (α), o valor de circulação é revisto determinando o correspondente C_l .

$$\Gamma = \frac{1}{2} c V_{tot} C_l (\alpha_{eff}) \quad (5)$$

Onde V_{tot}

$$V_{tot} = V_{und} + V_{ind} \quad (6)$$

Posteriormente, o valor de entrada da circulação em cada estação é atualizado, incorporando um fator de amortecimento (β) para evitar divergências.

$$\Gamma = \Gamma_{old} + \beta(\Gamma_{eff} - \Gamma_{old}) \quad (7)$$

As etapas anteriores são reiteradas iterativamente até que uma convergência predefinida especificada pelo usuário seja alcançada. Neste caso, o método é encerrado se a diferença máxima com a etapa anterior for inferior a um por cento.

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. Dois aerofólios, Gottingen GO 398 e Joukowski J 0021, são utilizados nas simulações. Os dois aerofólios foram escolhidos porque normalmente não são utilizados em pequenos rotores eólicos. O Gottingen GO 398 possui boas características aerodinâmicas em uma ampla faixa de números de Reynolds, enquanto o Joukowski J 0021 é um perfil analítico interessante cujas características gerais podem ser previstas analiticamente, exceto o coeficiente de arrasto que é avaliado pelo software XFOIL. As simulações foram feitas para as condições de vento em Campinas a uma altura de 30 m (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2012).

TABELA 1. Parâmetros nominais do aerogerador.

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Validação: Liu et al. (2013) investigaram possível melhoria das pás de um aerogerador pela linearização da corda e do ângulo de torção. Os resultados da Ref. (LIU et al., 2013) são usados para validar os códigos atuais. Os parâmetros preliminares de projeto da pá na Ref. (LIU et al., 2013) são usados para a presente comparação. Esses parâmetros incluem o raio de 7,5 m, design da ponta da pá λ_0 de 6, número de pá de 3 e rotação constante de aerogerador de 53,5 rpm. O aerofólio utilizado na pá é o DU93W210. Os coeficientes aerodinâmicos do aerofólio, bem como as distribuições da corda e do ângulo de torção podem ser encontrados na Ref. (LIU et al., 2013). A Figura 2 mostra os resultados da Ref. (LIU et al., 2013) em comparação com a potência gerada prevista pelos métodos BEM e LLT. Como pode ser visto, o LLT apresenta melhor concordância com a Ref. (LIU et al., 2013) do que o BEM em quase toda a faixa de velocidade do vento.

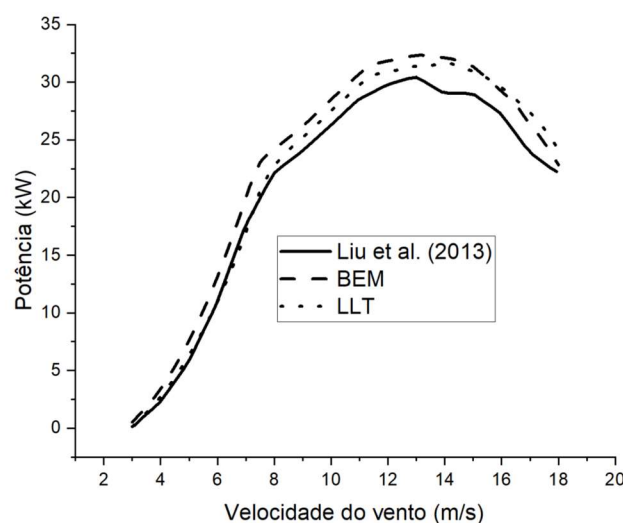


FIGURA 2. Potência ao longo da velocidade do vento para o resultado de Liu, BEM e LLT

Análise do Coeficiente de Potência: A variação do coeficiente de potência com a velocidade do vento das duas pás do rotor é mostrada na Figura 3. A Figura 3(a) mostra a variação do coeficiente de potência com a velocidade do vento para o aerofólio GO 398 indicando coeficientes de potência máximos de 0,523 e 0,528 para os códigos LLT e BEM, respectivamente. A variação do coeficiente de potência para o aerofólio J 0021, Fig. 3(b), apresenta coeficientes de potência máximos de 0,354 e 0,355 para os códigos LLT e BEM, respectivamente. Como pode ser visto, a diferença máxima entre os resultados do método BEM e LLT é de 4,4% no caso do Gottingen GO 398 e de 6,3% no caso do rotor baseado em aerofólio Joukowski.

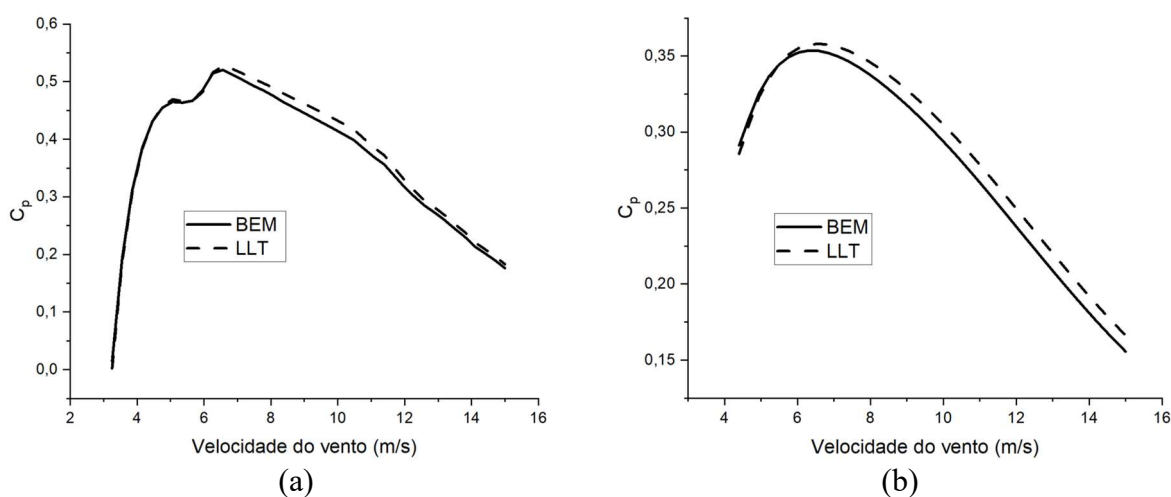


FIGURA 3. Variação do coeficiente de potência com a velocidade do vento para (a) aerofólios Gottingen GO 398 e (b) Joukowski J 0021 para a combinação de distribuições de corda linear e ângulo de torção linear.

Análise de potência: A Figura 4 mostra a variação da potência gerada com a velocidade do vento para os dois métodos de combinação de distribuições de corda linear e ângulo de torção linear. Pode-se observar que para velocidades de vento de até 10 m/s, os resultados dos dois métodos são muito próximos. Para velocidades de vento mais elevadas, as diferenças entre os valores previstos aumentam devido ao fato de o código da linha de sustentação prever ângulos de ataque efetivos mais elevados (não mostrados aqui por questões de brevidade) que produzem maior sustentação e, portanto, maior potência gerada. Por outro lado, no caso do código BEM, os fatores de indução axial e tangencial afetam menos o ângulo de ataque do que no método da linha de sustentação. A 10 m/s, a diferença entre os dois métodos para o caso do aerofólio Gottingen GO 398 é de 4,1% enquanto para o Joukowski J 0021 a diferença entre as previsões dos dois códigos é de 3,4%.

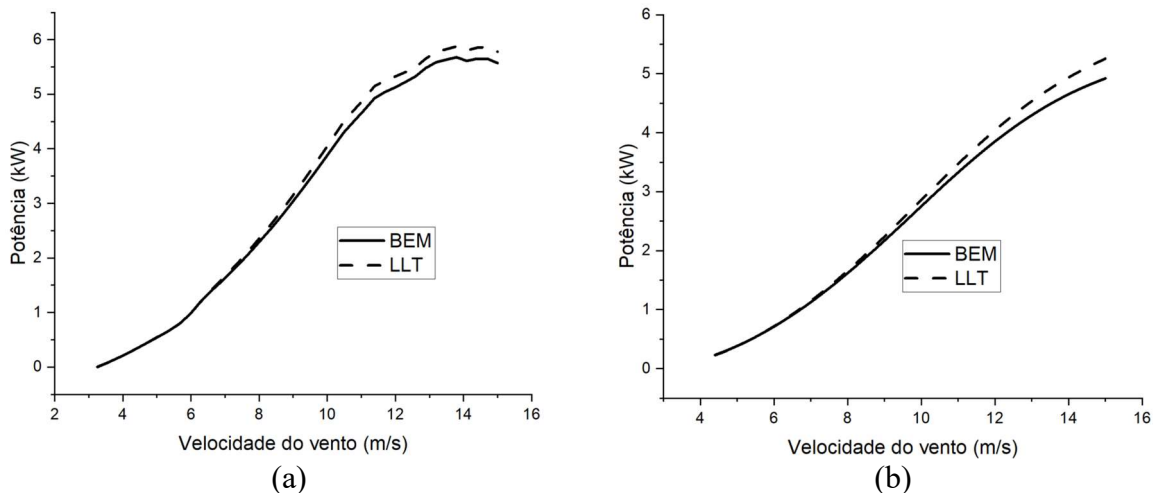


FIGURA 4. Efeito da velocidade do vento na potência prevista para (a) aerofólios Gottingen GO 398 e (b) Joukowsky J 0021 para a combinação de distribuições de corda linear e ângulo de torção linear.

Análise Anual da Produção Energética: A Figura 5 mostra o PAE dos rotores baseados em aerofólios GO 398 e J 0021 para a combinação de corda linear e distribuições de ângulo de torção linear. Os resultados dos dois métodos são quase idênticos até velocidades do vento de cerca de 10 m/s, após o que as diferenças tornam-se maiores atingindo uma diferença de 2,33% para o caso do aerofólio GO 398 e 2,35% no caso do aerofólio Joukowsky J 0021, portanto, estes resultados indicam PAE quase igual.

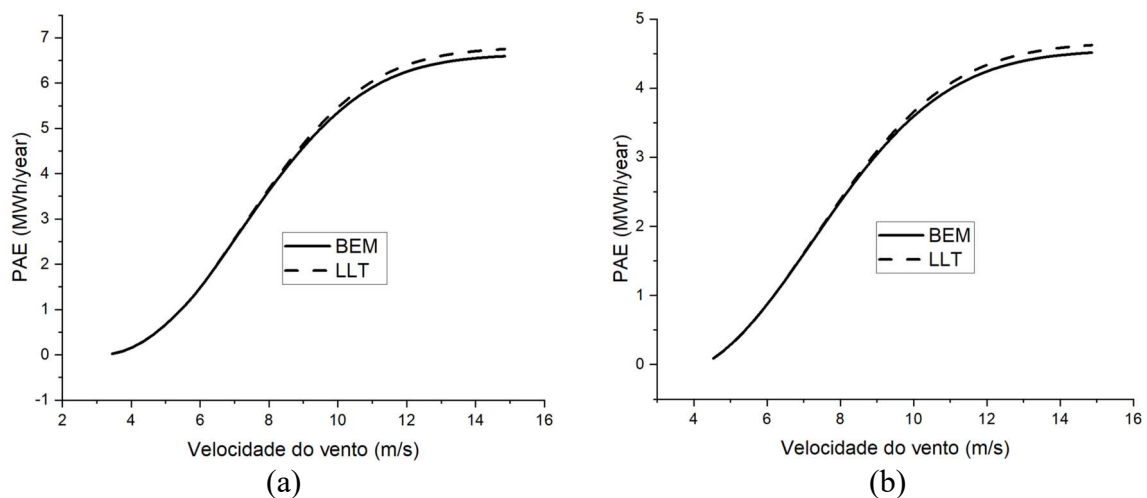


FIGURA 5. Variação do PAE com a velocidade do vento para (a) aerofólios GottingenGO 398 e (b) Joukowsky J 0021 para a combinação de distribuições de corda linear e ângulo de torção linear.

CONCLUSÕES: Neste artigo, o BEM e os códigos baseados em LLT foram desenvolvidos em MATLAB e extensivamente validados em relação aos dados disponíveis. O código LLT permitiu obter informações mais precisas e detalhes de fluxo, como velocidade induzida e ângulo de ataque induzido, circulação total e local (omitida aqui por questões de brevidade). A análise dos resultados do coeficiente de potência mostrou uma diferença máxima entre os resultados do BEM e do LLT de cerca de 4,4% no caso do aerofólio Gottingen GO 398 e de 6,3% no caso do aerofólio Joukowsky J 0021. A 10 m/s, a diferença entre a potência prevista

para o caso do aerofólio GO 398 é de 4,1% enquanto para o J 0021 a diferença é de 3,4%. Os resultados comparativos da PAE mostraram uma diferença de 2,33% para o caso do aerofólio Gottingen e de 2,35% para o caso do aerofólio Joukowski J 0021. 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, etc., a abordagem da LLT deverá ser usada. Para trabalhos futuros, as previsões dos dois códigos atuais podem ser comparadas com outros códigos disponíveis como CFD e FVM para se ter mais informações sobre a precisão dos resultados. Também será útil ter algumas informações detalhadas sobre a distribuição de circulação e cargas nas pás, incluindo distribuições de torque e empuxo em comparação com outros métodos mais elaborados, como CFD. É importante estender os códigos numéricos para investigar as capacidades de partida dos dois aerofólios propostos e a geometria das pás para aumentar o torque de partida e reduzir o tempo de partida.

AGRADECIMENTOS: O segundo autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Bolsa de Pesquisa PQ 304372/2016-1 e o segundo autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS:

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

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

GRASSO, F.; VAN GARREL, A.; SCHEPERS, G. Development and Validation of Generalized Lifting Line Based Code for Wind Turbine Aerodynamics. **49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition**, Orlando, FL, Jan. 4–7, p. 146–152, 2011.

GUPTA, S.; LEISHMAN, J. G. Comparison of Momentum and Vortex Methods for the Aerodynamic Analysis of Wind Turbines. **AIAA Aerospace Sciences Meeting Exhibit**, Reno, NV, v. 43, n. 6, 2005.

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

HANSEN, M. O. L.; SØRENSEN, J. N.; VOUTSINAS, S.; SØRENSEN, N.; MADSEN, H. A. State of the Art in Wind Turbine Aerodynamics and Aeroelasticity. **Prog. Aerosp. Sci.**, v. 42, n. 4, p. 285–330, 2006.

HASAN, A. S.; JACKSON, R. S.; AMANO, R. S. Experimental Study of the Wake Regions in Wind Farms. **J. Energy Resour. Technol.**, v. 141, n. 5, p. 051209, 2019.

JACKSON, R. S.; AMANO, R. Experimental Study and Simulation of a Small-Scale Horizontal-Axis Wind Turbine. **J. Energy Resour. Technol.**, v. 139, n. 5, p. 051207, 2017.

LIU, X.; WANG, L.; TANG, X. Optimized Linearization of Chord and Twist Angle Profiles for Fixed-Pitch Fixed-Speed Wind Turbine Blades. **Renew. Energy**, v. 57, n. 9, p. 111–119, 2013.

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, v. 5, p. 051210, 2017.

PHILLIPS, W. F.; SNYDER, D. O. Modern Adaptation of Prandtl's Classic Lifting-Line Theory. **J. Aircr**, v. 37, n. 4, p. 662–670, 2000.

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.

VERMEER, L. J.; SORENSEN, J. N.; CRESPO, A. Wind Turbine Wake Aerodynamics. **Prog. Aerosp. Sci.**, v.39, n. (6–7), p. 467–510, 2003.