MODELAGEM DA ESTEIRA TURBULENTA A JUSANTE DE UMA TURBINA EÓLICA SIMULADA A PARTIR DE UMA ZONA PERMEÁVEL

L. J. L. STIVAL¹, J. M. VEDOVOTO², F. O. ANDRADE³

¹ Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental

² Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Construção Civil
Email para contato: leandro.stival@ufpr.br

RESUMO – A energia eólica cresceu significativamente no Brasil na última década, porém a eficiência de geração eólica ainda é baixa. Por este motivo é importante estudos a fim de aumentar o poder de geração de maneira viável ao mercado. Este estudo visa modelar a esteira turbulenta gerada a jusante de um aerogerador, onde a turbina eólica foi modelada com base na teoria do disco atuador, aplicando RANS com modelo de turbulência $k-\epsilon$ de baixo custo computacional. Os resultados demonstraram uma grande perda de energia cinética inicial em baixas velocidades de entrada, porém com alto nível de recuperação de velocidade ao final da esteira turbulenta.

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica ganhou visibilidade na última década em termos de progresso e potencial, principalmente no Brasil. O mercado brasileiro de energia eólica já avançou significativamente, o país continha 1,5 GW de capacidade instalada no ano de 2011 para 13 GW no início de 2018, o qual representa um enorme crescimento cumulativo (ABEEólica, 2018; GWEC, 2014). A quantidade de energia gerada em um parque eólico não depende somente da disponibilidade de vento, mas também das características do padrão de vento que está sendo fornecida. Por isso, é essencial estudar a eficiência na geração de energia eólica, avaliando os efeitos de determinados parâmetros e coeficientes relacionados ao vento que incide na turbina eólica. Portanto, uma avaliação criteriosa dos recursos eólicos é desejável ao desenvolvimento de um projeto eólico efetivo.

Um dos grandes empecilhos de um projeto eólico eficiente está relacionado com a produção de esteiras turbulentas, que são áreas de escoamentos com quantidade de movimento reduzida e turbulência aumentada. O desenvolvimento da esteira turbulenta certamente afeta a potência de geração e, por isso, é essencial que os desenvolvedores de plantas eólicas sejam capazes de quantificar e qualificar a magnitude das incertezas e características do escoamento a jusante da turbina (Mo et al., 2013; Vermeer et al., 2003).

Neste contexto, nos projetos de grande parques eólicos a modelagem numérica ou experimental do escoamento ao redor das turbinas tornam-se extremamente relevantes para otimização do rendimento energético. Uma grande parte das simulações de interesse prático é realizada mediante a resolução numérica das equações médias de Navier-Stokes, conhecidas como equações RANS (Reynolds Average Navier-Stokes), derivadas dos pressupostos fundamentais da conservação de massa e quantidade do movimento.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho, as simulações numéricas do escoamento foram realizadas usando a metodologia RANS com o modelo de turbulência $k-\epsilon$, disponível na versão acadêmica do software comercial ANSYS Fluent (ANSYS Inc., 2017). A representação da turbina eólica foi obtida através de uma metodologia simplificada com base na teoria do disco atuador. A teoria base da aerodinâmica do rotor é estruturada a partir da conservação da quantidade do movimento pelo elemento de pá de Betz, o qual modela um escoamento unidimensional ideal através do disco rotor. O modelo da turbina eólica é baseado na configuração de um disco esponjoso que consiste num volume permeável, sendo que o escoamento através deste é calculado pelo gradiente de pressão logo a montante e a jusante do aerogerador modelado pelo disco permeável. A formulação utilizada é aquela proposta por Çengel e Cimbala (2013) e disponível no software ANSYS Fluent (ANSYS Inc., 2017).

As simulações foram realizadas com uma malha bi-dimensional contendo 380265 nós, possuindo 2000 m de comprimento longitudinal e 700 m de largura. O zona esponjosa que representa o rotor da turbina está localizado a 500 m a jusante da condição de contorno de entrada, tendo medidas de 2 x 100 m e uma área total de 400 m^2 como representado na Figura 1.

Figura 1 – Malha da simulação da esteira turbulenta

A zona esponjosa representando a turbina eólica é simulada pela opção de zona porosa do ANSYS Fluent, onde as condições de escoamento são baseadas em três parâmetros principais: (1) permeabilidade média (ψ), (2) coeficiente de gradiente de pressão (C_2) e (3) a espessura média da zona porosa (Δm). A zona porosa é aplicada a uma espessura finita, onde o gradiente de pressão é calculado de acordo com a Lei de Darcy com um termo adicional de perda de inércia, sendo definido pela Equação 1 (ANSYS Inc., 2017).

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu}{\Psi} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \Delta m \quad (1)$$

onde Δp é o gradiente de pressão, μ representa a viscosidade do fluido, ψ é a permeabilidade média, ρ , v é a velocidade normal e Δm é espessura da porosidade média.

O gradiente de pressão da Equação 1 expressa uma equação de segunda ordem dependente da velocidade de entrada, onde o gradiente aumenta com o desenvolvimento da velocidade. Com isso, os três parâmetros principais elencados acima foram calculados a partir de dados medidos de velocidade do vento e pressão. Os valores encontrados são: 0.00003 m^2 para permeabilidade média, 2 m para espessura da porosidade média e 0.203 m^{-1} para coeficiente de gradiente de pressão.

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos foram selecionados em relação a velocidade de entrada, variando de 5 m/s até 11 m/s , em intervalos de 2 m/s . As análises foram elaboradas a partir da subdivisão de dois grupamentos de esteira turbulenta: (1) a seção central com amplitude longitudinal e (2) três seções transversais detalhadas a 5, 7 e 10 diâmetros de rotor (D) a jusante do aerogerador, representados pela Figura 2.

Figura 2 – Recuperação de velocidade na esteira turbulenta: (a) longitudinal na linha central da esteira e nas seções transversais a jusante em (b) 5, (c) 7, (d) 10 D .

A Figura 2(a) apresenta a recuperação de velocidade longitudinal na linha de centro da esteira turbulenta. Os resultados mostraram que para o caso de 5 m/s houve uma maior perda de energia cinética na região de recirculação do campo próximo a turbina. No caso de 5 m/s a recuperação da velocidade nesta região (até $5 D$) foi de 20%, enquanto para as velocidades de 7, 9 e 11 m/s a recuperação ficou entre 40 a 50%. A partir da distância longitudinal $7 D$ o comportamento na recuperação da velocidade foi semelhante para os

casos de 7, 9 e 11 m/s , os quais atingiram cerca de 80% da velocidade de entrada ao final do trecho. Para o caso de 5 m/s , a recuperação final foi de aproximadamente 90%.

Figura 2(b), Figura 2(c) e Figura 2(d) ilustram a recuperação das velocidades para seções transversais localizadas em 5 D , 7 D e 10 D . Estas figuras reafirmam os resultados da Figura 2(a) em que existe um maior déficit de velocidade na região mais próxima da turbina no caso de 5 m/s . No entanto, ao final do trecho esse caso apresenta maior recuperação quando comparado as velocidades de 7, 9 e 11 m/s .

4. CONCLUSÃO

Neste estudo foi implementado uma modelagem simplificada da esteira turbulenta gerada a jusante de uma turbina eólica, utilizando o método RANS de fluidodinâmica computacional. Os resultados demonstraram maior déficit de energia cinética para o caso de menor velocidade (5 m/s). Ao final do trecho este caso apresentou maior recuperação de velocidade quando comparado aos casos de 7, 9 e 11 m/s .

5. REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. Associação brasileira de energia eólica, 2018.

ANSYS INC. *ANSYS Fluent-18.2 User Manual*, 2017.

GWEC. Global wind energy outlook 2014. Relatório técnico, Global Wind Energy Council, 2014.

MO, J. O.; CHOUDHRY, A.; ARJOMANDI, M.; KELSO, R.; LEE, Y. H. Effects of wind speed changes on wake instability of a wind turbine in a virtual wind tunnel using large eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 117, 38–56, 2013.

VERMEER, L.; SØRENSEN, J.; CRESPO, A. Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 39, 467–510, 2003.

ÇENGEL, Y.; CIMBALA, J. *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications: Third Edition*. McGraw-Hill Higher Education, 2013.