

# DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS HORIZONTAIS COM VALIDAÇÃO PELO MÉTODO DE ÍNDICE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

André Ribeiro de Oliveira (1); Álvaro Barbosa da Rocha (2); Brenner Dorneles Medeiros de Moraes (3); Raimundo Nonato Calazans Duarte (4)

(1) *Universidade Federal de Campina Grande*, andre.ribeiro1301@gmail.com

(2) *Universidade Federal de Campina Grande*, alvarobarbosa2@hotmail.com

(3) *Universidade Federal de Campina Grande*, brenner.dorneles@gmail.com

(4) *Universidade Federal de Campina Grande*, raimundo.duarte@ufcg.edu.br

## Introdução

Desde as primeiras civilizações o homem utilizou a energia do vento de alguma forma no auxílio à sua sobrevivência e no seu dia-a-dia, na forma de pequenos fluxos de ar para oxigenar fogueiras, embarcações à vela para o transporte e moinhos de cereais. Mas somente na atualidade teve suas bases fundamentadas em teorias científicas através dos estudos de Betz (1929), Glauert na aeronáutica (1935) e posteriormente por Schmitz (1955/56) com o objetivo de uso na geração de energia elétrica.

Diferindo principalmente nas considerações de perdas de eficiência, tais teorias possibilitam o desenvolvimento de distintas geometrias de pá de turbina eólica horizontal (nome dado a turbinas na qual o eixo de giração está paralelo ao solo), contudo a maior coerência de Schmitz com a realidade o coloca como a teoria em uso nas mais modernas turbinas eólicas como Gash e Twele (2006) apontam.

Para tal, usa-se do conceito de elementos de pá na qual toma elementos de espessura diferencial posicionado a uma distância que varia de 0 (ponto coincidente ao eixo do rotor) até o valor do raio do rotor (comprimento da uma pá), o que possibilita a análise à luz da teoria do perfil aerodinâmico em ambiente em duas dimensões (2D), trazendo resultados bem próximos da realidade em três dimensões (3D).

As teorias de dimensionamento de Betz, Glauert e Schmitz possibilitam o desenvolvimento da pá e não faz referência ao estudo da avaliação de seu desempenho o que torna não menos relevantes, mas incompleta se vistas sob um aspecto mais completo de um projeto de engenharia que por sua vez incorpora tais estudos na com o uso de ferramentas experimentais ou computacionais como as citadas por Gash e Twele.

No processo de desenvolvimento de tais componentes, a fase de avaliação é indispensável devido às aproximações feita nas teorias de dimensionamento e por efeitos aerodinâmicos passíveis de estudo somente por uma visão 3D do produto, como os vórtices de ponta que diminuem consideravelmente o seu desempenho. O uso dessas ferramentas demanda tempo, dinheiro e alta tecnologia na forma de maquinário no caso método experimental, o que o torna muito mais oneroso se comparado ao uso de softwares comerciais de simulação no método computacional (numérico) que demanda na maioria das vezes apenas um computador pessoal com configurações de processamento e memória razoáveis, licença de uso do software e um método de validação de suas simulações.

Nesse cenário, o presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de desempenho aerodinâmico de pás de turbina eólicas com o uso de softwares de simulação computacional baseado no método de volumes finitos com validação pelo método de Índice de Convergência de Malha (GCI) descrito por Roache (1998).

(83) 3322.3222

contato@conapesc.com.br

[www.conapesc.com.br](http://www.conapesc.com.br)

## Metodologia

A metodologia empregada se baseou na revisão da literatura a fim de obter uma gama de ferramentas numéricas e teorias de validação a fim de pô-las em uso conjuntamente com as devidas adequações na avaliação e validação de estudos em pás de turbinas eólicas. Ao final, chegou-se à ferramenta de simulação numérica baseada no modelo de volumes finitos Ansys Fluent com validação pelo método de Índice de Convergência de Malha.

Para a avaliação de desempenho, é necessário a geração do volume fluido que circunda o ambiente da pá eólica e a geração de sua malha tridimensional. Posteriormente, é necessário a inserção dos parâmetros de funcionamento ideal da pá, ou seja, densidade e velocidade do vento, assim como a velocidade de rotação da turbina determinada nas condições ideais (de projeto) para início dos cálculos que se baseiam na resolução das equações de Navier-Stokes sob a forma simplificada da conservação da continuidade, do momento e de energia. Após a convergência da simulação, temos por resultado o torque aplicado pelo vento sobre a pá em regime permanente o que possibilita o cálculo da potência gerada no eixo pela mesma.

A validação tem por base a simulação do mesmo problema sob malhas distintas com graus de refinamento crescente, o que possibilita a estimativa dos resultados assintóticos (reais) pela malha mais refinada na forma de um erro relativo, garantindo a coerência dos resultados obtidos na simulação com os resultados que seriam obtidos com a turbina em funcionamento na realidade.

## Resultados e Discussão

Após o aprofundamento dos métodos selecionados, com base em Oberkampff (2002) e com posteriores otimizações previstas por Lachance-Bearrett (2016) no âmbito da simulação computacional e por Salas (2006) no âmbito da validação, com base em chegou-se nos seguintes passos partindo do desenvolvimento até a avaliação e validação de qualquer geometria de pá de turbina eólica em ambiente computacional:

- Estabelecimento dos aspectos que determinam a geometria pá de turbina eólica baseado nos seus respectivos dados de velocidade de vento e rotação ideal, bem como a densidade do vento e sua potência de projeto.
- Criação do modelo tridimensional em ambiente computacional da pá com compatibilidade ao software de simulação previamente verificado
- Criação do volume fluido representante a 1/3 (um terço) do rotor da turbina, representando uma seção de 120° do rotor (a fim de se economizar poder de processamento e reduzir os tempos de simulação dada a simetria) contendo uma única pá no seu centro com um ângulo de ataque predeterminado de projeto e distâncias de entrada de volume fluido de 5 diâmetros do rotor à montante da pá com 5 diâmetros do rotor de raio e 25 diâmetros à jusante do rotor com também 25 diâmetros do rotor de raio a fim captar todos os resultados decorrentes da esteira gerada (Horn (2010)).
- Geração de três malhas distintas com nível de refinamento crescente (uma grosseira, uma média a uma refinada) a fim de se obter os resultados que serão posteriormente inseridos no método de GCI que estima que à medida que se refina a malha, os resultados convergem para o que seriam os valores reais.
- Inserção dos valores de projeto de velocidade de vento e rotação, densidade de vento e declaração do método de turbulência K- $\omega$  SST e resíduo de 10E-4 (Horn (2010) e Ludwig (2011)).
- Realização de simulação para as malhas grosseira, média e fina e armazenamento dos resultados de torque produzido pelo vento sob a pá sabendo-se que os mesmos representam

(83) 3322.3222

contato@conapesc.com.br

[www.conapesc.com.br](http://www.conapesc.com.br)

uma única pá, ou seja, é necessário a multiplicação desses resultados pelo número de pás presente no rotor.

- Aplicação do método de Índice de Convergência de Malha e análise das razões de refinamento das malhas e erro relativo presente na malha fina com base nos previstos por Roache.

Ao final de tais passos, se obterá não só uma análise puramente do desempenho de geração da turbina, mas sim também uma malha fina que poderá ser posteriormente usada em outras simulações, obtendo uma variedade de resultados que possuem confiabilidade garantida pelo método GCI que foi avaliado previamente com base nas malhas média e grosseira.

### Conclusões

Ao final do trabalho, foi obtido uma metodologia que se utilizando de ferramentas computacionais respaldadas pela teoria que valida tais resultados desenvolvida por Roache que possibilita a avaliação não só do desempenho de pás de turbina eólica na forma de torque, mas também de aspectos das mais variadas naturezas, como distribuição de pressão sob a sua superfície até mesmo efeitos transientes como vórtices de ponta e efeitos vibracionais em simulações transientes com interação entre esforços dinâmicos e respostas estruturais. Tudo isso utilizando-se o mínimo de demanda computacional, tempo e dinheiro, aspectos cruciais em qualquer projeto sobretudo em tais componentes responsáveis pelo custo de até 34% do valor total de uma turbina eólica.

### Referências

- SCHMITZ, G.: Theorie und Entwurf von Windrädern Optimaler Leistung (Teoria e Projeto de Moinhos com Ótima Performance). **Zeitschrift der Universität**. Rostock 1955/56.
- BETZ, A.: Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen (A Energia Eólica e a sua Utilização por Moinhos de Vento). **Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen** 1929. Reimpressão: Öko-Buchverlag Kassel 1982.
- GASCH, Robert; TWELE, Jochen (Ed.): Wind Power Plants: Fundamental, design, Construction and Operation. 2. ed. Berlin: **Springer**, 2006. 567 p.
- GLAUERT, H.: Section "Airplane Propellers" in: Durand W.F.: Aerodynamic Theory, **Springer Verlag**, Berlin 1935.
- ROACHE, P.: Verification and Validation in Computational Science and Engineering. 1ª Ed., **Hermosa Publishers**, United States 1998.
- SALAS, M.: Some Observations on Grid Convergence. **Computers and Fluids**, Vol. 37, No. 7, 688-692, NASA Langley Research Center; Hampton, VA, United States 2006.
- LACHANCE-BARRETT, S.: FLUENT - Wind Turbine Blade FSI (Part 1). **Confluence, Cornell University**. Disponível em: <<https://confluence.cornell.edu/pages/viewpage.action?pageId=262012971>>. Acessado em 15 de janeiro de 2018.
- HORN, D. A.: Análise Numérica da Esteira Aerodinâmica Formada Por Uma Turbina Eólica Com Dimensionamento Ótimo de Betz. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica), **DEMEC, UFRGS**, Porto Alegre 2010.
- LUDWIG, D. E.: Análise Numérica da Influência de fatores Atmosféricos na Esteira Aerodinâmica de Turbinas Eólicas. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia), **PROMEC, UFRGS**, Porto Alegre 2011.
- OBBERKAMPF, W., TRUCANO, T.: Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics (Verificação e Validação em Dinâmica dos Fluidos Computacional). **Progress in Aerospace Sciences**, Vol. 38, N° 3, 209-272, 2002.