

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

DESENVOLVIMENTO DE UMA PARAMETRIZAÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL MEDIANTE USO DE ANÁLISE FLUIDO COMPUTACIONAL E LINGUAGEM PYTHON

Cauã da Silva Ferrari¹ (IC), Prof. ^a Angie Lizeth Espinosa Sarmiento (PQ)¹

¹UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Turbina eólica de eixo horizontal – TEEH. Python. Otimização. Análise fluido computacional.

Introdução

Atualmente, o futuro da matriz energética sustentável é motivo de grande preocupação. A energia eólica é uma das fontes viáveis mais importantes no cenário atual, tanto em termos de custo como de eficiência na geração anual de energia, e já é a principal fonte de energia em muitos países (Mckenna *et al.* 2024).

Assim, as turbinas eólicas de eixo horizontal vêm ganhando cada vez mais espaço no mercado de energia internacional, por isso, são desenvolvidas metodologias cada vez mais sofisticadas para projetar turbinas mais eficientes, e nesse cenário uma ferramenta muito poderosa que é amplamente utilizada são as simulações fluido computacionais (CFD), que permitem prever com precisão o comportamento das TEEH analisadas. Nota-se de acordo com Fertahi *et al.* (2025) o grande crescimento do uso dessas ferramentas nos projetos de diferentes tipos de turbinas eólicas, e a capacidade de realizar otimizações dessas máquinas com muita eficácia. Nesse contexto, o presente trabalho, pertencente ao grupo de pesquisa FDT (Fluid Dynamics and Turbomachinery) – UNIFEI, apresenta uma metodologia de parametrização de TEEH mediante uso de ferramentas para futuras análises CFD, feita em linguagem de programação Python, com objetivo de aplicar em futuras pesquisas de otimização com turbinas de quaisquer tamanhos.

Metodologia

Neste estudo, a metodologia conta com uma parametrização do rotor das turbinas feita em Python aplicado no Ansys®, sendo a geometria criada no SpaceClaim®, a malha no Ansys Meshing®, e o setup e solução dos problemas no Ansys Fluent®, e todos os parâmetros criados através do *parameter set* no Ansys Workbench®. A parametrização foi feita visando gerar rotores de diferentes escalas, de microturbinas a grandes turbinas, e para evitar um custo computacional exagerado na otimização CFD, optou-se por poucas variáveis de maior impacto no coeficiente de potência (C_p), como diâmetro do rotor, distribuição de cordas, torção geométrica, perfil e número de pás (Lee & Shin, 2020).

Seguindo Toquini *et al.* (2024), utilizou-se MRF com domínio dividido em zona rotativa (ZR) e estacionária (ZE). Considerando a influência do cubo nas pás (Bontempo & Manna, 2019; Druault *et al.*, 2024), suas dimensões também foram parametrizadas como função do diâmetro do rotor.

A geometria do rotor foi parametrizada a partir da utilização de aerofólios da *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) de quatro dígitos, escolhidas pela facilidade de ajuste em relação à espessura e à curvatura, adicionado de um leve arredondamento no bordo de fuga. A pá do rotor foi definida por quatro seções equidistantes, complementadas por uma seção adicional com 75% do comprimento das demais. Cada seção está associada a um parâmetro de escala que determina sua corda real (Parâmetros Sec_0 a Sec_5), de modo que inicialmente todas são geradas com 100 mm de comprimento e, em seguida, redimensionadas conforme o fator de escala definido. A superfície da pá foi construída a partir dos perfis em cada seção, com a opção de topologia mínima ativa a fim de evitar descontinuidades e geometrias inviáveis, como interferências entre as superfícies superior e inferior. Após a geração, essas superfícies foram divididas em duas partes, permitindo maior refinamento da malha na região do bordo de fuga, considerada como equivalente a 5% da corda, assim como realizado por Toquini *et al.* (2024). A base da pá foi modelada a partir de duas seções circulares, complementadas por uma seção elíptica intermediária, o que garante uma transição mais suave entre a raiz e a pá propriamente dita. O comprimento da base foi definido como 17% do comprimento total da pá. Essa configuração final resulta em uma geometria parametrizada contínua, flexível e adequada ao refinamento de malha, conforme apresentado na figura 1 e na tabela 1.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

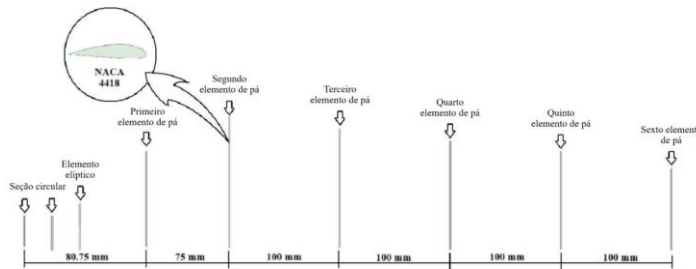


Figura 1 – Exemplo de pá gerada pela parametrização

Ainda, o raio da seção circular equivale a 1,75% do comprimento do primeiro elemento de pá, a meia dimensão horizontal da elipse vale 135% do raio da seção circular, enquanto a vertical é equivalente à espessura do perfil do primeiro elemento de pá vezes metade do comprimento do mesmo, além disso, o elemento elíptico tem sempre metade do ângulo de ataque do primeiro elemento de pá. Também é possível alterar a posição da base com relação ao bordo de ataque, que por padrão estão sempre alinhados. Na parametrização há 6 parâmetros para definir as cordas e 6 para as torções ($twist_0$ a $twist_5$), que podem ser relacionados da forma que for desejada dependendo da otimização a ser feita.

Depois de criada a pá, são geradas as zonas estacionária e rotativa, que serão utilizadas na análise com *Moving Reference Frame* (MRF). Seguindo um formato semelhante ao apresentado por Toquini *et. al* (2024), foram determinadas as dimensões do domínio demonstradas na figura 2.

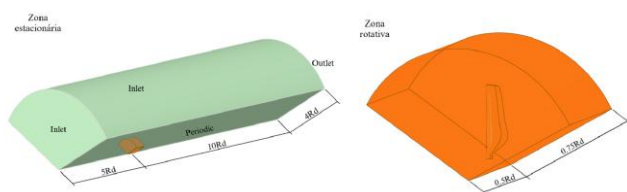


Figura 2. Domínio computacional e as condições de contorno aplicadas

A parametrização do rotor leva em consideração ainda a presença do cubo, dada a grande influência dele no desempenho das TEEH, como verificado por Bontempo & Manna (2019) e Druault *et al.* (2024). O cubo é representado por um elipsoide revolucionado, e sua menor dimensão é calculada a partir da equação 1, a qual foi determinada por análise estatística no estudo de Bontempo & Manna (2019) para rotores de pequeno a grande porte.

$$H_{ratio} = 16.353 \cdot R_d^{-0,31} \tag{1}$$

Onde, H_{ratio} é a relação entre o diâmetro do cubo e o do rotor, e R_d é a $\frac{1}{2}$ do diâmetro do rotor. E, portanto, o raio do cubo (H_r), que pode ser visualizado na figura 3, é igual a R_d vezes H_{ratio} .

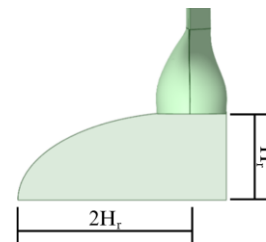


Figura 3. Dimensões do cubo

A parametrização de malha foi feita no Ansys Meshing® por meio dos métodos automáticos *PrimeMesh* e *MultiZone*, definindo uma malha estruturada com elementos hexaédricos na ZE e uma não estruturada com elementos tetraédricos na ZR. Ainda, *Match control* foi utilizado, selecionando as superfícies de condição de contorno periódicas do domínio, e utilizando um sistema de coordenadas cilíndrico posicionado no eixo central do domínio. *Inflation* é utilizado na ZR, aplicado à superfície do rotor com *smooth transition*, 12 camadas e *growth rate* de 1.2. O método *MultiZone* foi aplicado na ZE com mapeamento Hexa/Prism sem permissão para malha livre. Ainda, três funções *sizing* foram utilizadas, o tamanho do elemento dessas funções foi definido em função do diâmetro do rotor. A primeira função é aplicada às superfícies que formam a ZR e não são parte do rotor, o segundo é aplicado ao bordo de fuga da pá, e o terceiro ao resto da pá incluindo o cubo. Por fim, um volume de influência é aplicado à pá, sendo seu tamanho função do diâmetro do rotor. As relações de tamanho parametrizadas pelo diâmetro do rotor são demonstradas na tabela 1.

Tabela 1. Tamanho dos elementos de malha para cada função de malha

Função de malha	Tamanho do elemento
Tamanho de elemento de pá	$R_d \cdot M_f \cdot 0.00119$
Tamanho de elemento no bordo de fuga	$R_d \cdot M_f \cdot 0.00079$
Tamanho do elemento nas faces da ZR	$R_d \cdot M_f \cdot 0.0127$
Tamanho global dos elementos da malha	$R_d \cdot 0.825^{-1}$
Volume de influência	$R_d \cdot 0.0158$

Onde M_f é o parâmetro do fator de malha, que pode ser

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

escolhido com base na necessidade de refinamento da malha para uma determinada análise de independência da malha, e R_d é o diâmetro do rotor em milímetros.

Finalmente a parametrização do *setup* foi realizada no Ansys Fluent®, aplicando uma das configurações de problema mais comumente utilizadas apontada por Khedr & Castellani (2024), com solução estacionária, modelo de turbulência $k-\omega$ GEKO, solucionador com base em pressão, algoritmo de solução acoplado, formulação de fluxo baseada em distância, discretização de pressão de segunda ordem, esquema *upwind* de segunda ordem para as equações de momento e método global de pseudo-passos de tempo. Nas condições de contorno foram definidos parâmetros para definir a velocidade na entrada, velocidade angular do rotor, utilização de metodologia MRF, e pressão manométrica na saída igual a zero Pascals, e ainda, intensidade de turbulência de 5% e razão de viscosidade turbulenta de 10%.

Resultados e discussão

Para validar a funcionalidade da parametrização, dois exemplos de rotor gerados por ela serão demonstrados, sendo um deles (Pá A) bastante similar ao utilizado por Toquini *et al.* (2024), que obteve ótimos resultados em sua análise, a fim de verificar se a qualidade das malhas é semelhante.

As dimensões do rotor de Toquini *et al.* (2024) estão na tabela 2, enquanto a figura 4 demonstra uma comparação entre as 2 pás.

Tabela 2. Dimensões e aerofólio de Toquini *et al.* (2024)

Parâmetros	Pá de referência
Aerofólio	NACA-4412
Diâmetro do rotor	630 (mm)
Corda na ponta	50 (mm)
Corda na raiz	68 (mm)
Comprimento da pá	250 (mm)
Torção	Não há
Número de pás	3

Tabela 3. Dimensões e aerofólio da pá A feita a partir da parametrização

Parâmetros	Pá A
Aerofólio	NACA-4412
Diâmetro do rotor	630 (mm)
Sec ₀ to Sec ₅	680, 644, 608, 572, 536, 500
Torção	Não há
Número de pás	3

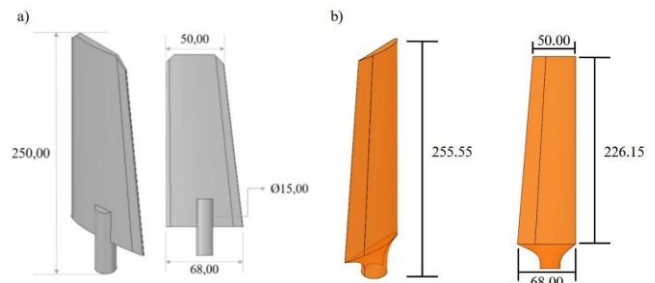


Figura 4. Pá utilizada por Toquini *et al.* (2024) (a) e pá A (b)

Por fim, a malha foi gerada utilizando os valores da tabela 4, que vieram das relações apresentadas na tabela 1. A figura 5 mostra uma comparação entre os dois formatos de malha e a tabela 5 compara as malhas em termos de métricas de qualidade e outros parâmetros gerais.

Tabela 5. Valores utilizados na malha da pá A.

Função de malha	Tamanho do elemento (mm)
Elementos da superfície da pá	0,75
Elementos do bordo de fuga	0,5
Elementos das faces da ZR	8
Tamanho máximo global dos elementos	763
Tamanho do volume de influência	10

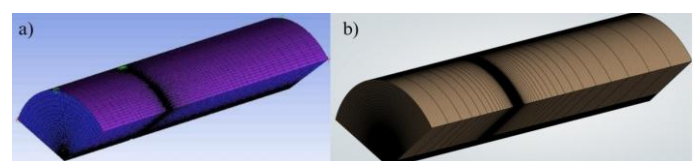


Figura 5. Domínio da malha feito por Toquini *et al.* (2024) (a) e domínio do autor (b).

Então, compara-se numericamente as malhas de Toquini *et al.* (2024) e a da parametrização na tabela 6.

Tabela 6. Comparativo de qualidade das malhas.

Métrica de malha	Pá do Toquini <i>et al.</i> (2024)	Pá A
Nº de elementos	17,3 (mi)	16,5 (mi)
Nº de camadas	12	12
Orthogonal Quality (mín)	0,08	0,0543
Skewness (máx)	0,83	0,75
Determinante (mín)	0,45	0,67

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Embora algumas metodologias de malha tenham sido alteradas devido à proposta diferente deste trabalho de generalizar a malha para casos muito diferentes, observa-se que a parametrização gera uma malha que consegue seguir um certo nível de qualidade satisfatória próximo ao demonstrado por Toquini *et al.* (2024)

Conclusões

Este estudo conseguiu desenvolver uma parametrização para análise CFD de turbinas eólicas de eixo horizontal. Os procedimentos utilizados garantiram uma ampla gama de possibilidades de análise, desde micro rotores para aplicações urbanas até rotores de grande escala para áreas rurais, incorporando ferramentas que são amplamente utilizadas atualmente tanto no setor acadêmico quanto no comercial. Os resultados da parametrização geométrica foram extremamente satisfatórios e muito responsivos, abrangendo qualquer tipo de pá que se pretenda analisar. No entanto, o elevado número de variáveis pode ser um problema ao aplicar métodos de otimização direta, por isso é recomendável limitar esta metodologia de parametrização apenas a otimizações indiretas, tais como o método da superfície de resposta, a fim de aliviar o custo computacional, reduzindo o número de análises necessárias. Além disso, pela mesma razão, é altamente recomendável que valores apropriados para a razão e variação máxima dos parâmetros sec_0 a sec_5 e $twist_0$ a $twist_5$ sejam estudados e implementados para o caso de otimização desejado, aplicando restrições e reduzindo o número de análises necessárias. No que diz respeito à malha, a implementação do Ansys Meshing® foi super simples e prática, e os resultados foram bons, mas pode-se observar que, em alguns casos, geometrias muito complexas com aerofólios mais finos podem resultar em elementos de baixa qualidade na malha, exigindo uma análise mais cuidadosa dos parâmetros de qualidade. Além disso, é altamente recomendável verificar o parâmetro y^+ para cada caso de otimização, decidindo sobre um M_f apropriado. Por fim, todos os modelos de solução, turbulência e discretização escolhidos no Ansys Fluent® foram considerados suficientes para bons resultados, conforme apresentado por Khedr & Castellani (2024), garantindo um equilíbrio entre velocidade de solução e precisão adequada. Portanto, pode-se concluir que os métodos e processos utilizados tornaram esta parametrização eficiente e muito útil para várias áreas de pesquisa e desenvolvimento de turbinas eólicas de eixo horizontal.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Itajubá, pelo apoio financeiro no financiamento do processo APQ-00653-22, 001/2022: “Análise numérica e experimental de microgeradores eólicos para aplicações em regiões remotas do Brasil”, registrado no DPI UNIFEI sob o número PVDI297-2022, e ao Programa PIBIC UNIFEI - União pela bolsa de IC e ao Grupo de Pesquisa TIES-FDT - Dinâmica de Fluidos e Turbomáquinas.

Referências

- BONTEMPO, R.; MANNA, M. A ring-vortex actuator disk method for wind turbines including hub effects. *Energy Conversion and Management*, v. 195, p. 672–681, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.05.028>
- DRUAULT, P.; KRAWCZYNSKI, J. F.; ÇAN, E.; GERMAIN, G. On the necessity of considering the hub when examining the induction of a horizontal axis tidal turbine. *Renewable Energy*, v. 224, p. 120107, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2024.120107>
- FERTAHI, S. ed D.; REHMAN, S.; BENINI, E.; LAHRECH, K.; SAMAOUALI, A.; ARBAOUI, A.; KADIRI, I.; AGOUNOUN, R. Insights from the last decade in computational fluid dynamics (CFD) design and performance enhancement of Darrieus wind turbines. *Processes*, v. 13, n. 2, p. 370, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/PR13020370>
- KHEDR, A.; CASTELLANI, F. Critical issues in the moving reference frame CFD simulation of small horizontal axis wind turbines. *Energy Conversion and Management: X*, v. 22, p. 100551, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2024.100551>
- LEE, S. L.; SHIN, S. J. Wind turbine blade optimal design considering multi-parameters and response surface method. *Energies*, v. 13, n. 7, p. 1639, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/EN13071639>
- MCKENNA, R.; LILLIESTAM, J.; HEINRICHS, H. U.; WEINAND, J.; SCHMIDT, J.; STAFFELL, I.; HAHMANN, A. N.; BURGHERR, P.; BURDACK, A.; BUCHA, M.; CHEN, R.; KLINGLER, M.; LEHMANN, P.; LOWITZSCH, J.; NOVO, R.; PRICE, J.; SACCHI, R.; SCHERHAUFER, P.; SCHÖ, E. M.; CAMARGO, L. R. System impacts of wind energy developments: key research challenges and opportunities. *Joule*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.11.016>
- TOQUINI, G.; BITTENCOURT SALES JUNIOR, C. A.; DE FARIAS, F. E.; ESPINOSA SARMIENTO, A. L.; YEPES MAYA, D. M. Fluid dynamics analysis of a micro horizontal axis wind turbine. In: *Proceedings of the COBEM 2023*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2023.COB2023-0572>