



SIMULAÇÃO 3D DO ROTOR DE UMA TURBINA EÓLICA UTILIZANDO O MÉTODO BEM E CFD

Brenno Teixeira Martins¹, Joseph Y. Saab Jr², Gabriela Joly¹, Lucas Maia¹, Adriano Gouveia Lira¹

1 Recurso Eólico e Solar
Neoenergia

2 Coordenador do curso de Eng. Mecânica
INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

Rua Praia do Flamengo Nº78, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

bteixeira@iberdrola.com, saab@maua.br, gjoly@iberdrola.com, lmaia@iberdrola.com, agouveia@iberdrola.com

RESUMO

O presente estudo visa comparar dois métodos distintos para calcular o desempenho de um aerogerador, o método BEM e uma abordagem via CFD-RANS, utilizando o software Ansys CFX. Os parâmetros selecionados para a comparação entre os dois métodos, foram os fatores de indução axial e tangencial, o torque, a tração e a potência nominal gerada.

Foi observado que o método BEM superestima os resultados potência, torque e tração, isso ocorre devido as simplificações e limitações inerentes ao modelo.

Palavras-chave: *Aerogerador, CFD, Ansys CFX, BEM, QBlade.*

ABSTRACT

The aim of this work is to compare two distinct methodologies to evaluate performance of wind turbine equipment, the Blade Element Momentum (BEM) method and a CFD-RANS using Ansys CFX software. The final results are compared and the deviations are discussed. The parameters selected for comparison among the methods are the axial and tangential induction factor, plus power, thrust and torque estimates.

It was observed that the BEM method overestimated the power, thrust and torque results, due to the simplifications and limitations of the model.

Key words: *Wind Turbine, CFD, Ansys CFX, BEM method, QBlade.*



INTRODUÇÃO

A tecnologia desenvolve-se cada dia mais, tendo como consequência a melhoria de processos em diversos setores da sociedade. É inegável a necessidade de crescimento e desenvolvimento na área de energia. Além disso, é importante para a sociedade mundial a constante busca pela evolução, tendo em vista o cenário de variabilidade climática. Dentro desse escopo, a energia eólica tem evoluído com rapidez devido aos estudos em busca de uma geração energética eficiente e com menos impacto ambiental.

A eficiência dos aerogeradores modernos chegam cada vez mais próximo do limite teórico determinado pelo limite de Betz (Hansen, 2008) e uma das melhores maneira de reduzir os custos das turbinas e assim se tornar mais competitivo nesse mercado é melhorar a eficiência da turbina. Segundo (S J Schreck, 2007) a carga aerodinâmica que afeta as pás do aerogerador é determinante para o custo da energia eólica. A modelagem aerodinâmica do escoamento através do aerogerador é uma tarefa complexa e que necessita um amplo estudo da dinâmica dos fluídos, sendo que os efeitos transientes e tridimensionais fazem a modelagem computacional um grande desafio.

Existem muitos métodos para se calcular a eficiência de uma turbina eólica, segundo (Karlsen, 2009) o método *Blade Element Method* (BEM) é um método bastante popular para o desenvolvimento inicial do projeto de uma turbina eólica, devido a sua simplicidade e baixo custo computacional. O método divide as pás do aerogerador em elementos anulares, que podem ser calculados por uma aproximação unidimensional. Apesar de do método segundo (Karlsen, 2009) ser amplamente utilizado, esse método simplifica os efeitos intrinsecamente tridimensionais.

Uma abordagem que utiliza uma modelagem tridimensional com *Computational Fluid Dynamics* (CFD) desenvolvem as soluções das equações de movimento e conservação de massa, possibilitando simular o escoamento através da geometria da turbina, revelando informações detalhadas do comportamento do escoamento, segundo (Karlsen, 2009). O custo computacional elevado para resolver o modelo CFD, além das simplificações adotadas como por exemplo, na modelagem da turbulência, erros de truncamento, simplificações adotadas na geometria do modelo, fazem com que o método perca a acurácia.



METODOLOGIA

O escopo do presente trabalho é comparar dois métodos distintos para calcular o desempenho de um aerogerador conceitualmente projetado para pesquisa (Saab Jr., 2016), onde será dada uma ênfase especial na análise qualitativa dos dois modelos.

O trabalho foi dividido em duas partes, a primeira foi a obtenção de parâmetros do escoamento através dos perfis aerodinâmicos S818, S830 e S832 com auxílio de um software XFOIL, no caso a ferramenta XFRL5 (Drela, Youngren, & Deperrois, 2009) foi utilizada. Essa ferramenta apresenta bons resultados para o escoamento bidimensional através do aerofólio em uma ampla faixa de Reynolds. A base de dados geradas através do XFRL5 foi utilizada como input para os cálculos do método BEM para calcular os parâmetros operativos, para essa etapa será utilizado o programa de livre acesso QBlade (Pechlivanoglou, Marten, G., N., & Wendler, 2009) que já possui o código BEM acoplado com o XFOIL.

O segundo passo foi modelar o caso com o software CFD Ansys-CFX (Ansys User's Guide), utilizando uma modelagem RANS, incompressível e estacionário.

Os dados obtidos por ambos os métodos foram compilados e apresentadas as discrepâncias de ambos os métodos com ênfase nos desvios. Uma atenção especial foi dada para a comparação dos parâmetros de indução axial e tangencial, cálculo da potência, torque e tração.

MÉTODO BEM

O escoamento através do rotor de um aerogerador é bem mais complexo do que o escoamento 2-D e suas presunções. O modelo bidimensional não capta fenômenos como a rotação do rotor e a envergadura finita da pá, ambos fenômenos intrinsecamente tridimensionais.

O modelo BEM foi proposto por Glaubert (Hansen, 2008) e com ele é possível calcular os parâmetros operativos em regime estacionário de um aerogerador. Como as seções transversais da pá no método BEM não possuem interações com as parcelas adjacentes, essa premissa simplifica bastante os cálculos, porém introduz bastantes erros, já que as pás do aerogerador possuem envergadura finita. Para corrigir esta e outras limitações do modelo BEM, são feitas algumas correções conhecidas como *Prandtl Tip Loss* e *Glauert Correction* (Hansen, 2008) para que o modelo bidimensional consiga prever (ou tentar) os fenômenos tridimensionais durante o regime operativo do rotor.

O fator de indução axial é um adimensional que expressa a quantidade de energia cinética que está sendo aproveitada pelo rotor e perdida pelo escoamento livre. O fator de indução axial pode ser expresso através da relação (Hansen, 2008):

$$a = 1 - \frac{V_{ax}}{V}$$

Onde: a é o fator de indução axial e V_{ax} é a velocidade axial no plano de rotação.

Da relação acima, podemos perceber que quanto maior for o fator de indução axial, maior a quantidade de energia cinética absorvida do escoamento e assim maior eficiência do aerogerador.

Os vórtices criados devidos à rotação das pás e ao arrasto induzido, geram uma componente de rotação no fluxo contrária à rotação do rotor na parte a jusante do aerogerador. Este fenômeno é conhecido como efeito esteira (Hansen, 2008).

O fator de indução tangencial representa a fração da velocidade de rotação dada no plano do rotor. Esta componente contribui para a modificação do ângulo de incidência e o fator de incidência tangencial é expresso por (Hansen, 2008):

$$a' = 1 - \frac{V_t}{\omega r}$$

Onde: a' é o fator de indução tangencial, V_t é a velocidade axial no plano de rotação, ω é a velocidade angular do rotor.

A velocidade relativa V_{rel} e o ângulo de incidência α podem ser calculados através dos fatores de indução axial e tangencial. O ângulo de incidência e a velocidade relativa podem ser expressas por:

$$V_{rel} = \sqrt{(V \cdot (1 - a))^2 + (\omega r \cdot (1 + a'))^2} \quad \tan \alpha = \frac{(1 - a) \cdot V}{(1 + a') \cdot \omega r}$$

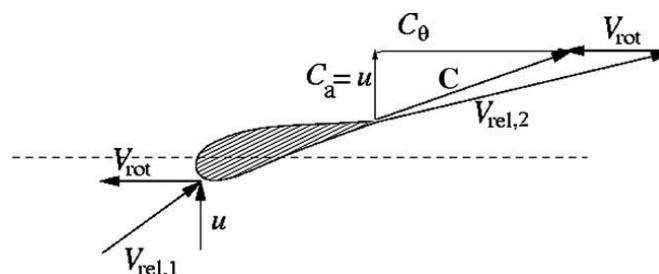


Figura 1 Diagrama representativo do triângulo de velocidade da seção transversal do rotor.



METODO NÚMÉRICO

A descrição matemática do comportamento do escoamento de um fluido pode ser expressa através da derivação das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e de energia. Assumindo um escoamento contínuo e incompressível, as equações de Navier-Stokes podem ser utilizadas para descrever o movimento das partículas fluidas.

As equações de Navier-Stokes somente possuem soluções analíticas para um determinado e limitado conjunto de problemas. O CFD vem sendo largamente empregado na indústria devido ao seu relativo baixo custo, sua capacidade de simular diversas condições operativas e realizar otimizações em um espaço de tempo reduzido.

As maiorias dos escoamentos reais estão submetidos a condições que podem se alterar rapidamente, causando assim uma transformação do regime do escoamento de laminar para turbulento. Os fenômenos de um escoamento turbulento possuem características intrinsecamente transientes, porém para a análise de alguns casos de engenharia é interessante o estudo do comportamento médio desse fenômeno para se obter as condições em regime permanente de uma situação específica do escoamento.

O método Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) propõe resolver o escoamento médio para os campos de propriedades (velocidade, temperatura, pressão, ...), sendo um dos métodos mais comuns de solução para casos em regime estacionário. O método substitui todos os termos que possuem dependência temporal por um termo de média mais uma flutuação, desta forma um campo médio do escoamento pode ser resolvido.

CONSTRUÇÃO DO MODELO

A geometria utilizada para criar o modelo tridimensional foi a mesma utilizada para na simulação do software QBlade, as características e singularidade da geometria da pá serão apresentadas a seguir.

Ao longo das seções transversais os perfis aerodinâmicos não se mantem constante, assim como o ângulo de torção ou twist. Como cada região da pá está submetida a um regime de escoamento distinto, essas alterações na geometria ao longo da envergadura da pá aumentam o seu desempenho aerodinâmico.

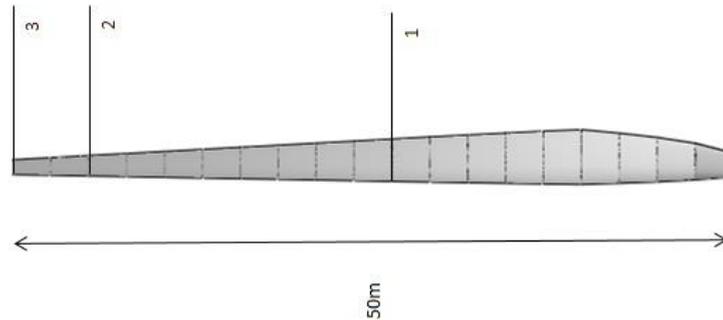


Figura 2 Geometria da pá estudada e suas secções.

São apresentados os perfis aerodinâmicos utilizados em cada secção das pás do modelo matemático de turbina eólica empregado nas simulações.

Na Tabela 1 são apresentados os segmentos da secção transversal e seus respectivos ângulos de torção.

Tabela 1. Tabela com as secções transversais e seus respectivos ângulos de torção. Fonte: (Saab Jr., 2016)

Posição Radial [m]	Comprimento da Corda [m]	Ângulo de Torção [graus]	Aerofólio
3,0	2,75	53,80	NREL's S818 Airfoil
5,5	3,00	34,60	NREL's S818 Airfoil
8,0	3,25	23,41	NREL's S818 Airfoil
10,5	3,50	16,46	NREL's S818 Airfoil
13,0	3,75	11,85	NREL's S818 Airfoil
15,5	3,57	8,61	NREL's S818 Airfoil
18,0	3,38	6,22	NREL's S818 Airfoil
20,5	3,20	4,39	NREL's S818 Airfoil
23,0	3,02	2,95	NREL's S818 Airfoil
25,5	2,83	1,78	NREL's S818 Airfoil
28,0	2,65	3,82	NREL's S830 Airfoil
30,5	2,47	3,02	NREL's S830 Airfoil
33,0	2,28	2,34	NREL's S830 Airfoil
35,5	2,10	1,75	NREL's S830 Airfoil
38,0	1,92	1,24	NREL's S830 Airfoil
40,5	1,73	0,79	NREL's S830 Airfoil
43,0	1,55	0,39	NREL's S830 Airfoil
45,5	1,37	0,54	NREL's S830 Airfoil
48,0	1,18	1,22	NREL's S832 Airfoil
50,0	1,00	0,94	NREL's S832 Airfoil

Na simulação não foi considerado a influência que a torre exerce sobre o escoamento. Um túnel no formato cilíndrico de secção circular foi criado. Assumindo a característica intrínseca de periodicidade rotatório do domínio foi possível simular apenas um terço do domínio, otimizando o custo computacional para rodar o caso. Também foi introduzido para modelar a influência da nacele um cilindro passante no domínio com as mesmas dimensões.

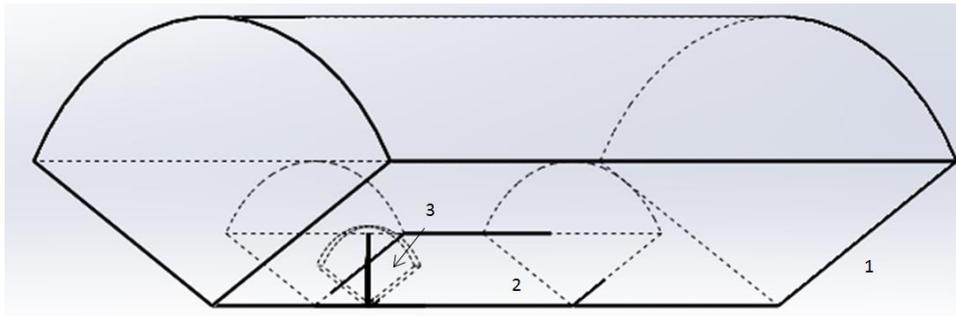
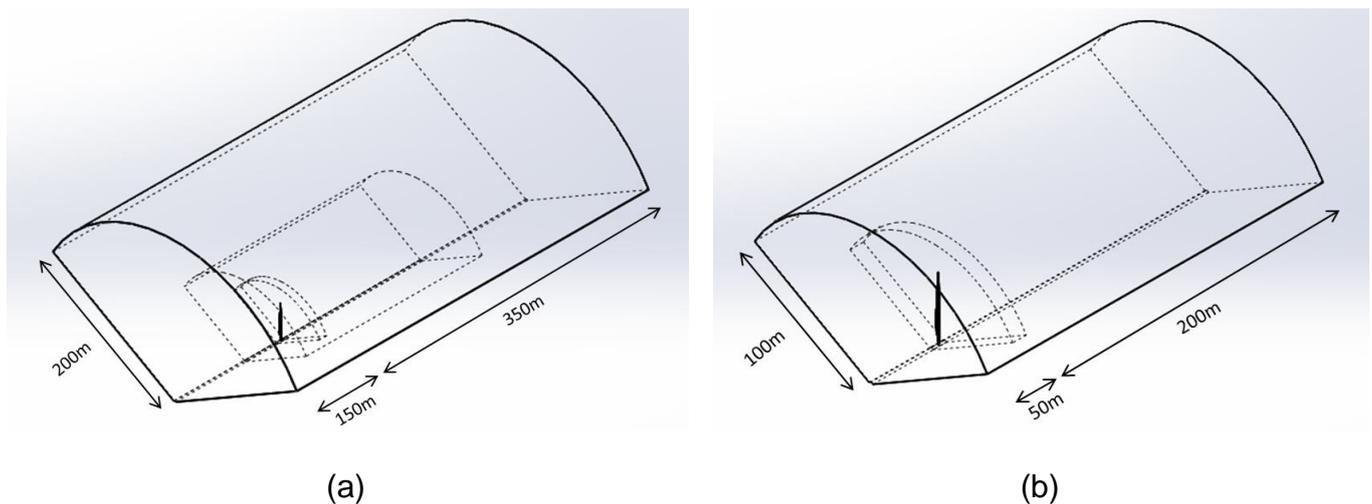


Figura 3 Ilustração do domínio e seus sub-domínios.

O domínio foi dividido em 3 partes para melhorar o refino da malha na região da esteira e na região do rotor onde irá ocorrer a rotação da pá. Os subdomínios e suas dimensões são apresentados na Figura 4.



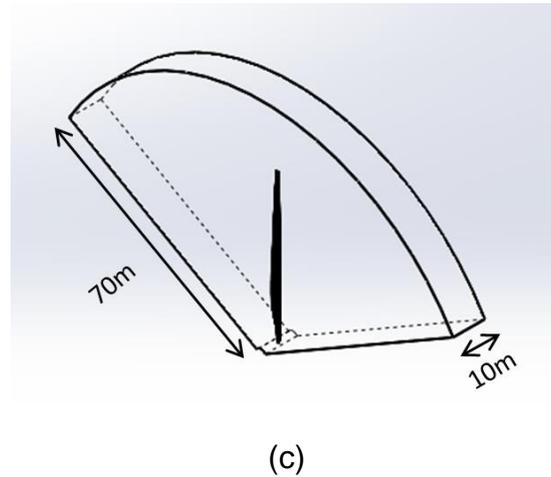


Figura 4 (a) dimensões do subdomínio *farfield*, (b) dimensões do subdomínio *wake* e (c) dimensões do subdomínio rotor.

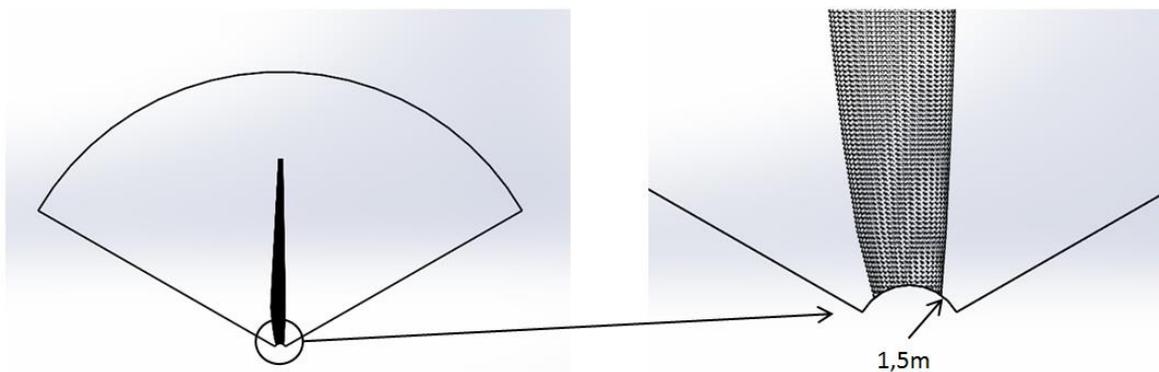


Figura 5 Detalhe do corte do domínio para modelar a nacelle.

MALHA

Foi utilizado o *Ansys Mesh* (Ansys User's Guide) para gerar a malha ao redor da geometria. As configurações utilizadas para gerar a malha estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 Tabela com as informações da malha.

	Farfield	Wake	Rotor
Nº de nós	75960	464391	436370
Nº de elementos	401214	2628254	1656583
Parâmetro de malha	Orthogonal Quality		
Mínimo	0.2791	0.2251	1008508789.5300
Máximo	0.9962	0.9983	0.9998
Média	0.8585	0.8603	0.8380
Desvio Padrão	8.51E+12	0.090359515	0.10863439

Parâmetro de malha	Skewness		
	Mínimo	3.27E+05	1.33E+07
Máximo	0.7949	0.8486	0.9961
Média	0.2287	0.2257	0.2774
Desvio Padrão	0.1216	0.1307	0.1539

As Figura 6, Figura 7 e Figura 8 apresenta a malha que foi gerada através do Ansys Mesh.

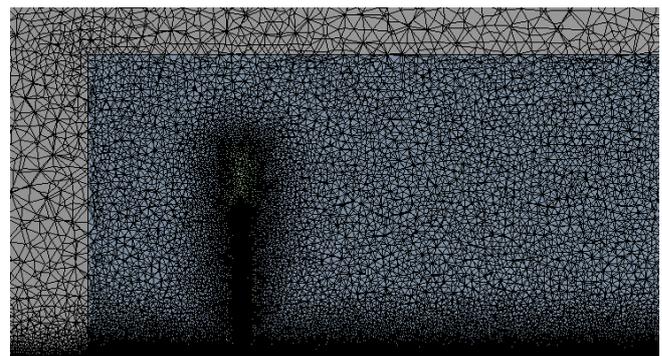
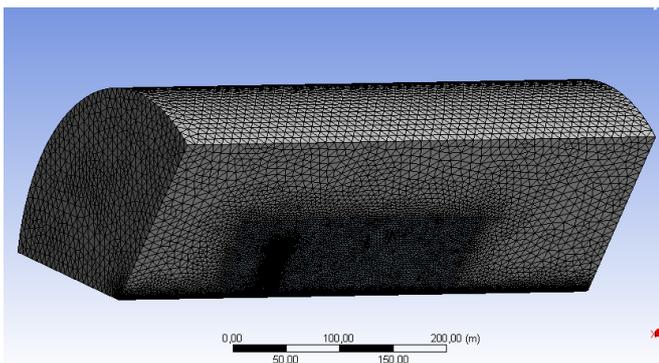


Figura 6 Detalhe da malha gerada no domínio.

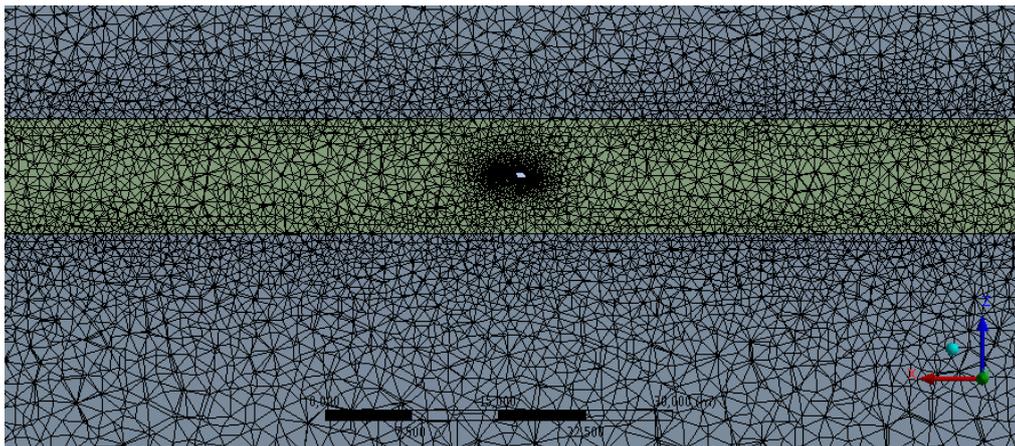
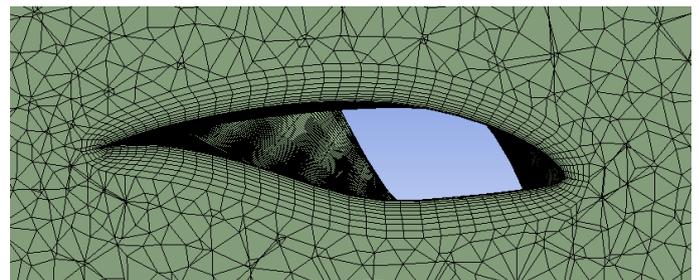
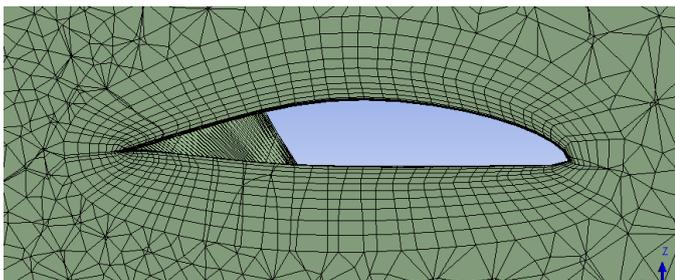


Figura 7 Vista de topo coma secção cortada em $r/R = 0,9$.



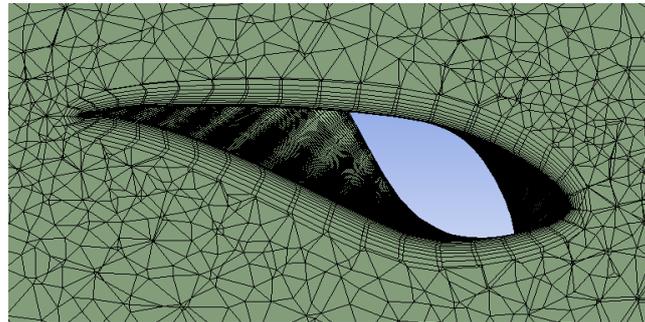


Figura 8 Malha ao redor dos perfis aerodinâmico ao longo da seção da pá.

A qualidade da malha obtida foi satisfatória haja vista que a grande maioria dos elementos ficaram acima do critério “bom” nos critérios de qualidade de malha *Orthogonal quality* e *skewness*.

Skewness mesh metrics spectrum					
Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Inacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Orthogonal quality mesh metrics spectrum					
Inacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Figura 9 Critério de qualidade de malha. Fonte (Ansys User's Guide)

MODEL SET UP

Para reduzir o custo computacional e comparar os resultados com o método BEM simulado pelo QBlade, o regime de simulação é estacionário, ângulo de *pitch* (α) igual à 0 e um *tip speed ratio* (TSR) igual à 7, uma velocidade de corrente livre igual à 12 m/s.

DOMÍNIOS

Foram criados dois domínios para modelar o efeito de rotação da pá do aerogerador, um estacionário e o outro rotatório.

1. Domínio Estacionário (S1 - Farfield+Wake)

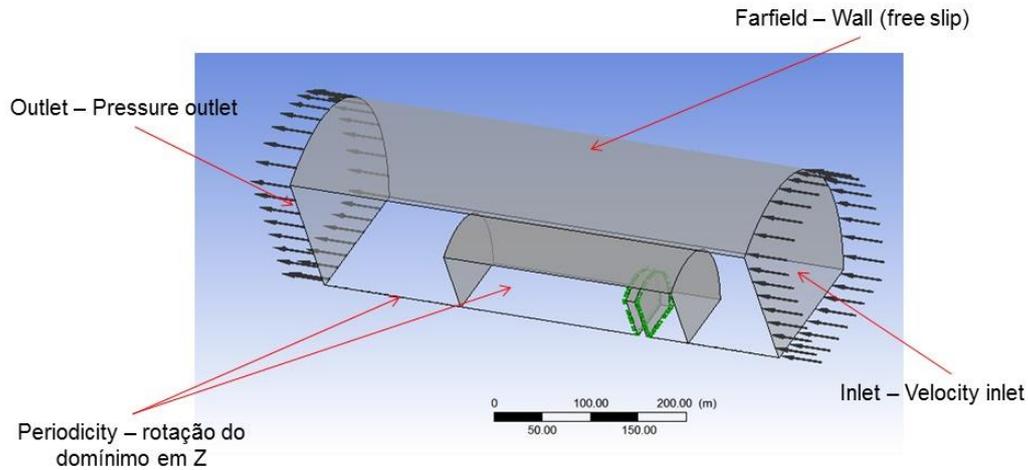


Figura 10 Detalhe das localizações das condições de contorno do domínio estacionário S1.

2. Domínio Rotatório (R1 - Rotor)

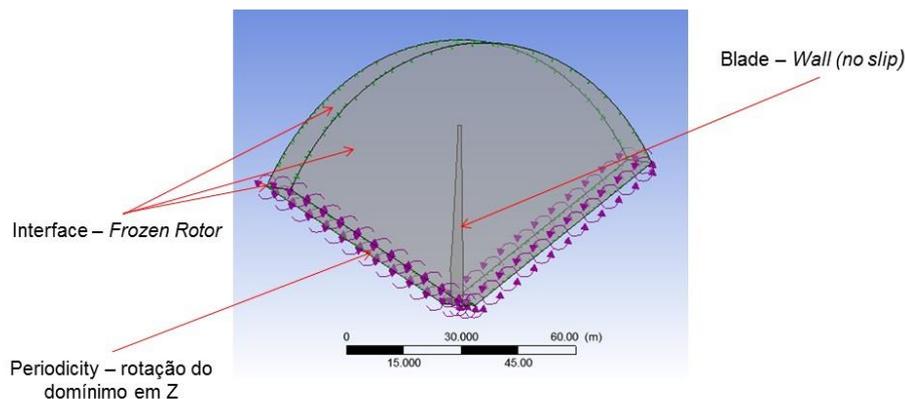


Figura 11 Detalhe das localizações das condições de contorno do domínio rotatório R1

Criou-se três interfaces entre os domínios, devido às mudanças na referência do frame.

A modelagem adotada assume o escoamento com uma periodicidade rotacional de 120° no eixo de rotação Z. Essa hipótese foi adotada com objetivo de reduzir o tamanho do modelo e consequentemente o custo computacional.

A condição de saída do modelo foi considerada como *Pressure outlet* ou aberta. Esta condição permite que o fluido saia ou entre livremente na fronteira. O valor da pressão relativa é zero, considerando que o escoamento na região de saída do domínio não esteja perturbado com a presença do aerogerador.

Para o campo do escoamento longe o suficiente do aerogerador, optou-se por utilizar a condição de parede sem deslizamento (*farfield*).

Como se trata de uma região em que as linhas de corrente livre estão a uma distância suficientemente grande do aerogerador para que seus efeitos sobre o escoamento sejam irrelevantes, a condição de parede sem deslizamento pode ser utilizada.

Como não há componentes de velocidade normal à parede da pá do aerogerador, a opção de parede sem deslizamento foi considerada.

CONVERGÊNCIA

O caso foi simulado no solver *Ansys CFX* utilizando o método de volumes finitos utilizando o modelo RANS para simulação do caso estacionário em regime incompressível. O critério de convergência de resíduos RMS de $1E-05$ que foi atingido após 229 iterações, totalizando o tempo de 8 horas de simulação, como ilustra a Figura 12.

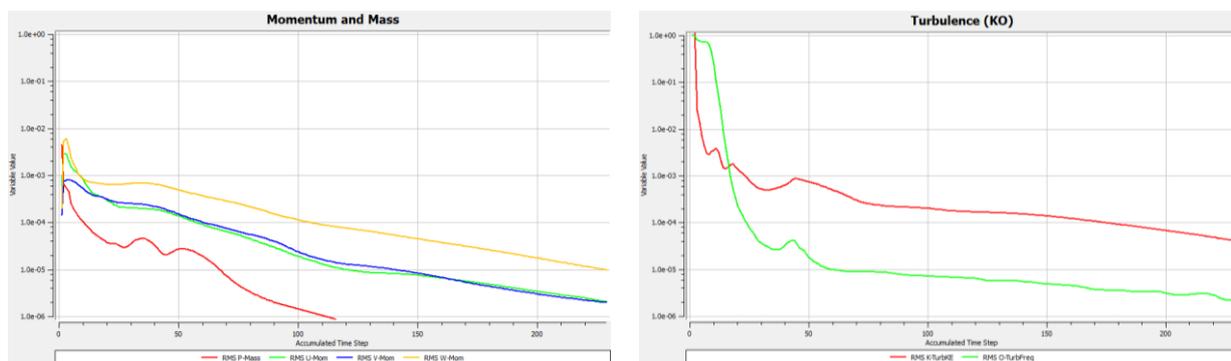


Figura 12 Critérios de resíduos de momentum e massa e dos parâmetros do modelo de turbulência respectivamente.

RESULTADOS

Os perfis de distribuição de velocidade e pressão das seções transversais. Os cortes foram feitos em $r/R = 0,9$ (Figura 13); $r/R = 0,6$ (Figura 14) e $r/R = 0,3$ (Figura 15).

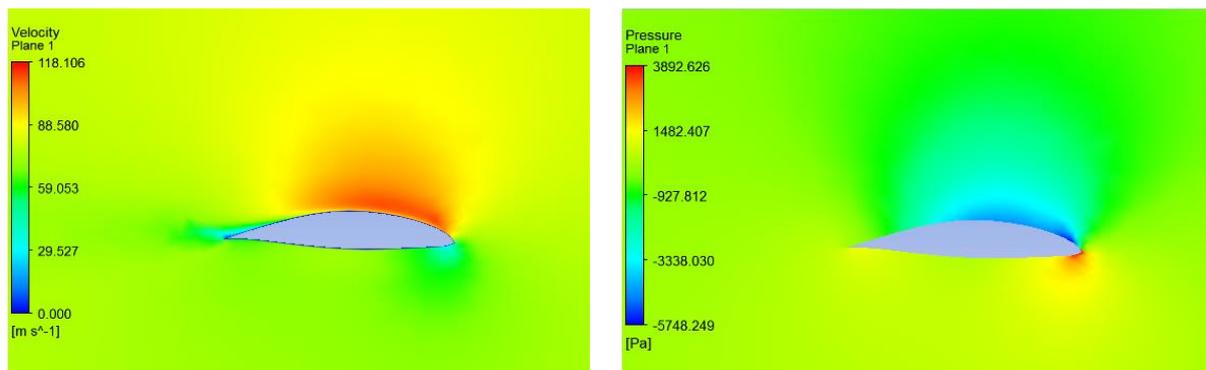


Figura 13 Distribuição dos perfis de velocidade e pressão em $r/R = 0,9$.

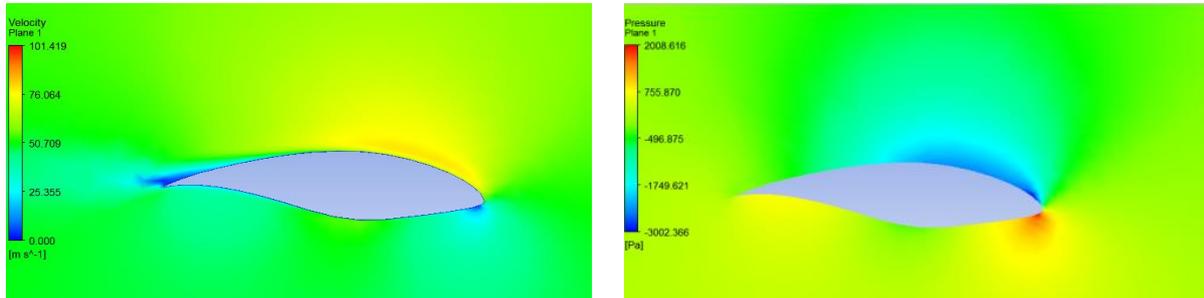


Figura 14 Distribuição dos perfis de velocidade e pressão em $r/R = 0,6$.

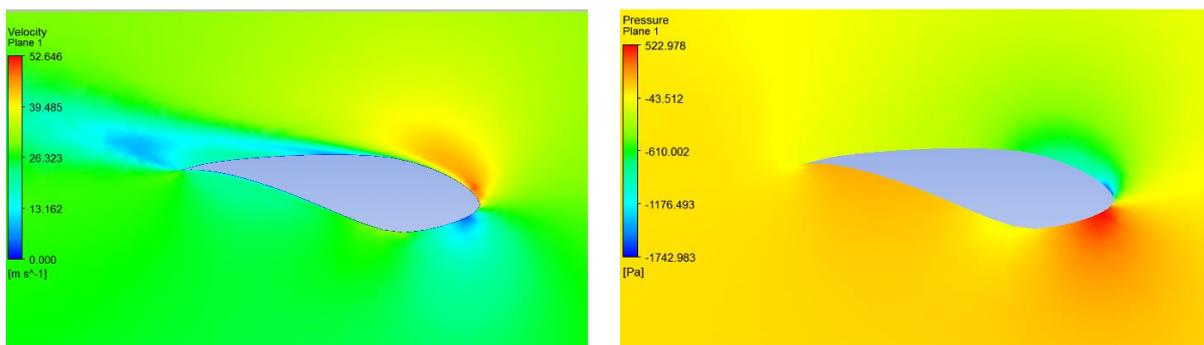


Figura 15 Distribuição dos perfis de velocidade e pressão em $r/R = 0,3$.

Foi verificado que para um $TSR=7$ os valores para a distribuição de velocidade e pressão estão coerentes. A seguir foi verificado o comportamento da distribuição de pressão ao longo da envergadura da pá. Segundo (Karlsen, 2009) o movimento de rotação do rotor causa um efeito no sentido de retardar o *stall*. Um estudo realizado por (S J Schreck, 2007) mostra que este fenômeno está associado com o gradiente de pressão na direção radial e está relacionado com a aceleração centrípeta e de coriolis. Apesar do fenômeno de atraso de stall descrito em (Karlsen, 2009) não está comprovada, na imagem abaixo é possível observar na Figura 16 o gradiente de pressão na direção radial da pá na superfície superior.

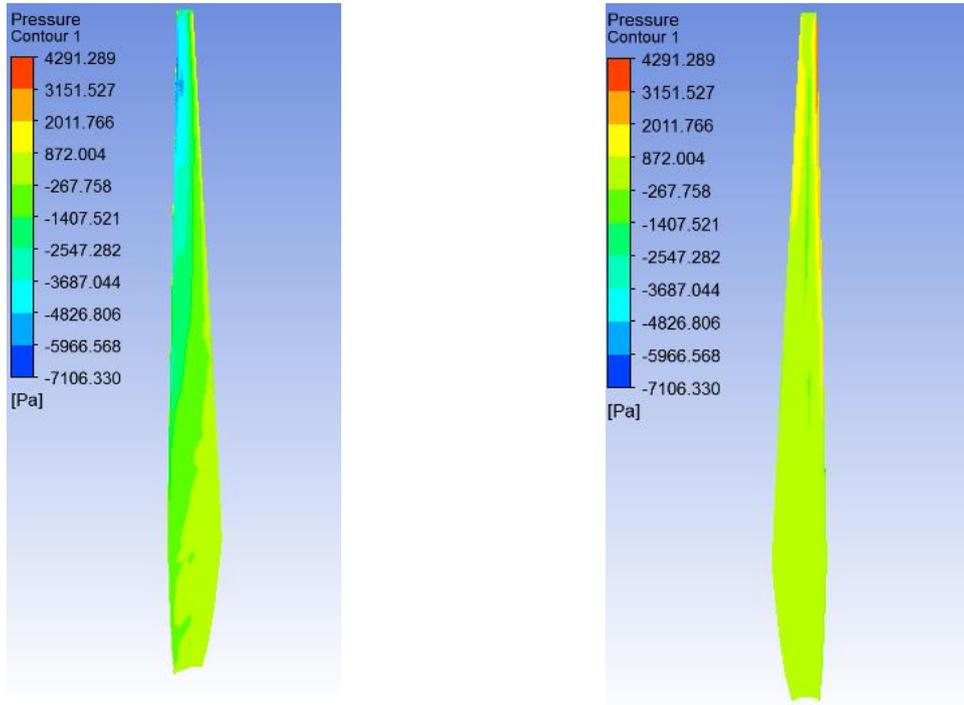


Figura 16 Distribuição de pressão ao longo da envergadura da pá. Respectivamente na parte superior e inferior.

Após a passagem do escoamento através do aerogerador, a velocidade do escoamento diminui devido à perda de energia cinética e se torna mais turbulento. Esse fenômeno é denominado de esteira e uma turbina que opera sob esse regime de escoamento além de perder eficiência, está sujeita a maiores cargas aerodinâmicas. A Figura 17, Figura 18 e Figura 19 abaixo demonstra a perturbação gerada pelo rotor e o efeito esteira gerado.

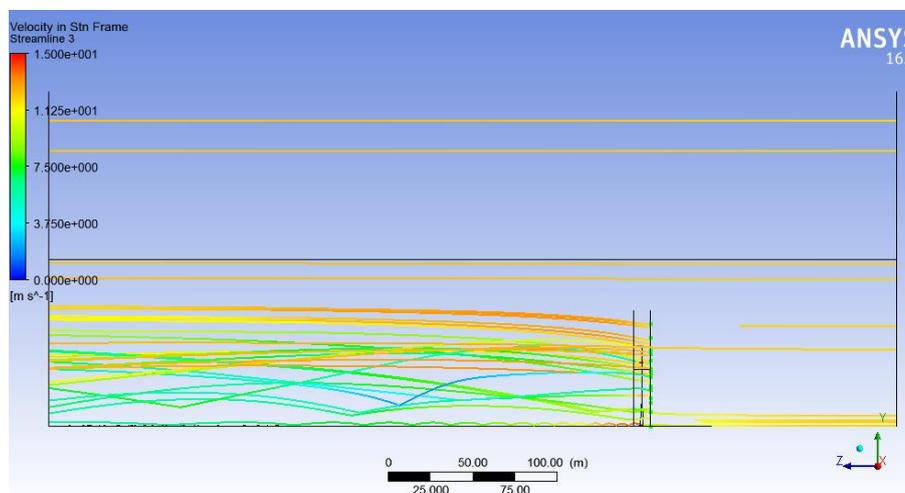


Figura 17 Isolinhas do escoamento através do rotor.

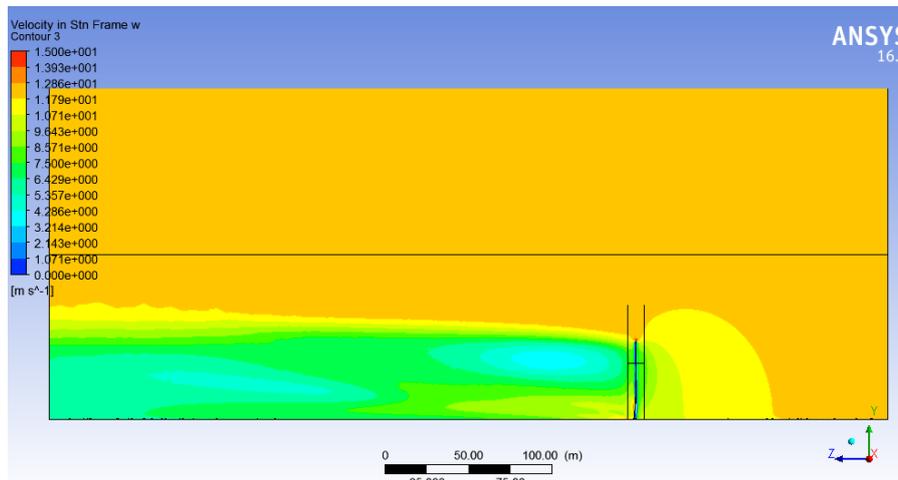


Figura 18 Contorno de velocidade. Vista lateral do domínio.

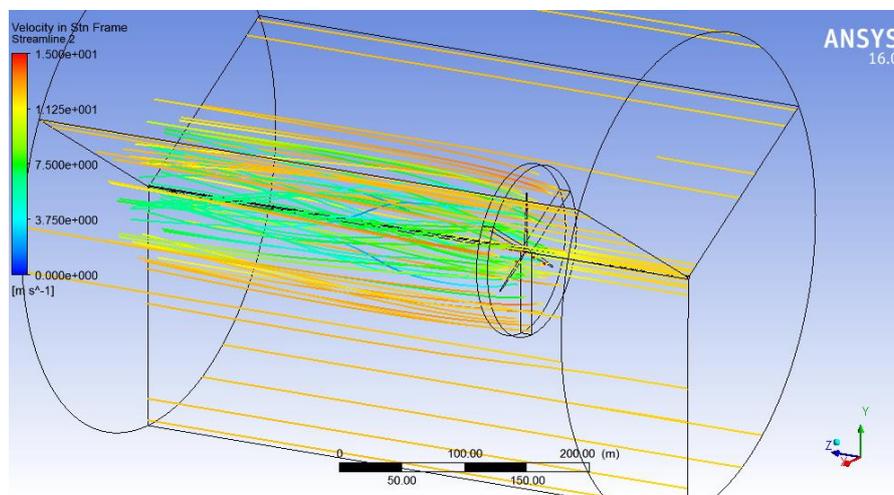


Figura 19 Isolinhas da perturbação causada pela rotação do rotor causando o efeito esteira.

Para o cálculo do fator de indução axial foi utilizado o método proposto por (Sørensen, 2004), que consiste em dividir o domínio em partes anulares na posição r/R da pá e realizar uma média da velocidade axial do escoamento, antes e depois da passagem pelo rotor (Figura 20). O método análogo foi empregado para se obter o fator de indução tangencial (Figura 21).

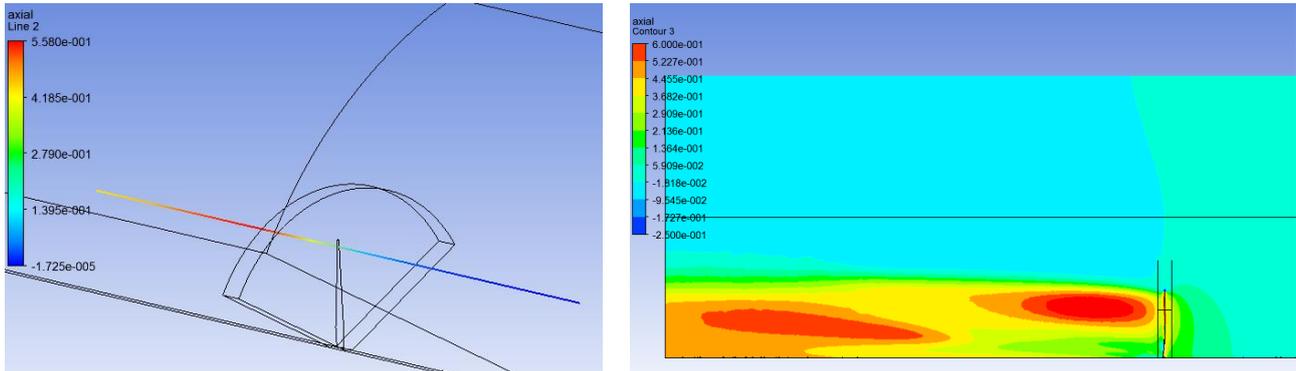


Figura 20 Cálculo do fator de indução axial em $r/R = 0,9$ e o contorno com a distribuição da componente axial da velocidade, respectivamente.

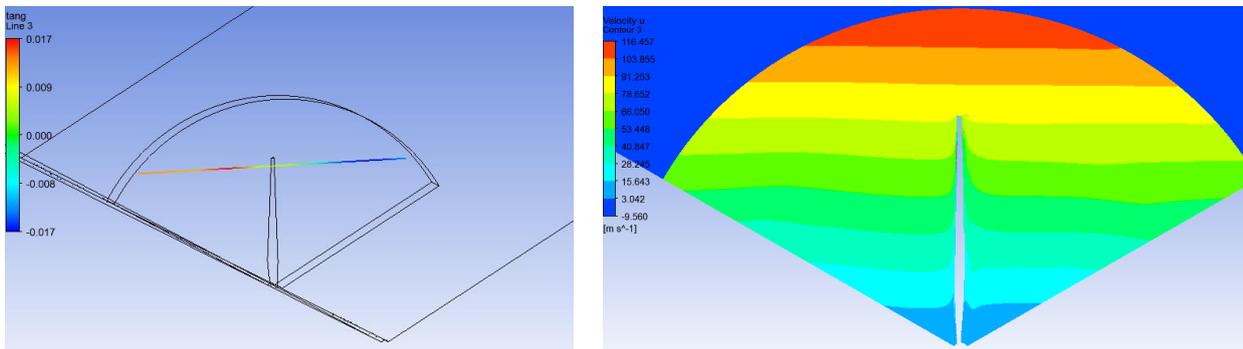


Figura 21 Cálculo do fator de indução tangencial em $r/R = 0,9$ e o contorno com a distribuição da componente tangencial da velocidade, respectivamente.

A Figura 22 e Figura 23 mostram as médias dos valores obtidos do cálculo do fator de indução axial e tangencial para as diferentes secções anulares do domínio. Em seguida é apresentado uma tabela com a diferença obtida entre o método apresentado e o obtido através do método BEM utilizando o software QBlade.

Fator de Indução Axial

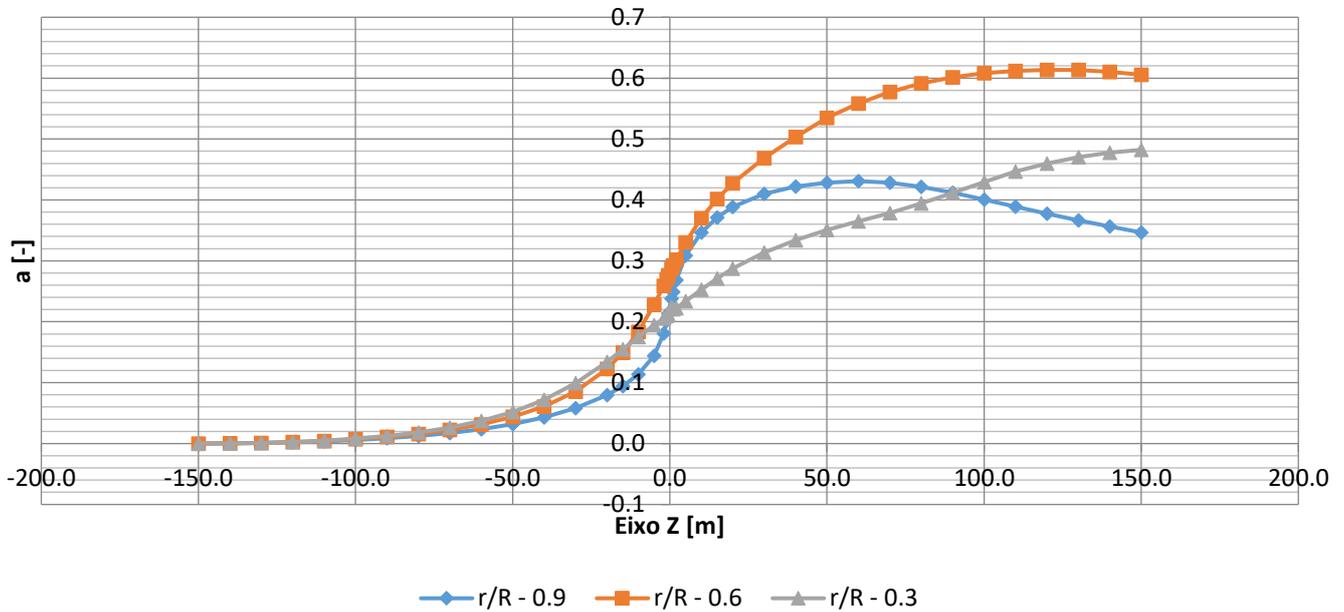


Figura 22 Representação gráfica dos fatores de indução axial para as secções $r/R=0,9$, $r/R=0,6$ e $r/R=0,3$.

Fator de Indução Tangencial

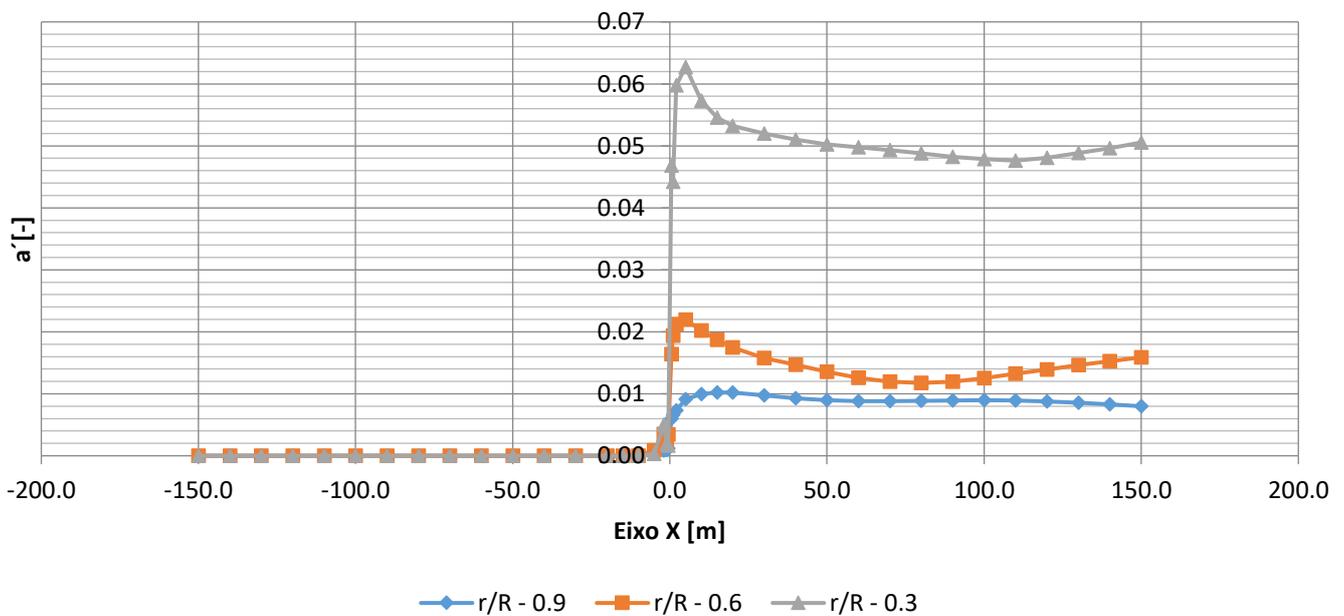


Figura 23 Representação gráfica dos fatores de indução axial para as secções $r/R=0,9$, $r/R=0,6$ e $r/R=0,3$.

Na Tabela 3 e Tabela 4 os resultados da análise comparativa do fator de indução axial e tangencial nos diferentes modelos.

Tabela 3 Diferença percentual dos valores obtidos do fator de indução axial entre os dois métodos.

	r/R - 0.9	r/R - 0.6	r/R - 0.3
Ansys CFX	0,23	0,28	0,22
QBlade	0,22	0,32	0,33
Diff (%)	5%	-13%	-33%

Tabela 4 Diferença percentual dos valores obtidos do fator de indução tangencial entre os dois métodos.

	r/R - 0.9	r/R - 0.6	r/R - 0.3
Ansys CFX	0,004	0,010	0,024
QBlade	0,004	0,012	0,045
Diff (%)	0%	-17%	-47%

No modelo CFD a simplificação da geometria do domínio para simular o efeito da nacele no escoamento contribuiu para a diferença de resultados na região $r/R=0,3$. Para a região da ponta da pá, o método BEM impõe algumas simplificações para simular o fluxo na ponta da pá e com isso erros inerentes ao modelo são aplicados, contribuindo para a diferença de resultados na região $r/R=0,9$.

Para o pós-processamento dos parâmetros de potência, torque e tração, foram comparados com o *output* do método BEM utilizando o software QBlade e as expressões abaixo foram criadas para fazer o cálculo no Ansys CFX:

$$\text{Torque}(N.m) = \text{torque}_z()@Blade * 3$$

$$\text{Potência}(W) = \text{torque}_z()@Blade * \text{RotationSpeed}/1[\text{rad}] * 3$$

$$\text{Tração}(N) = \text{force}_z()@Blade * 3$$

A Tabela 5 representa as diferenças entre o método BEM e o modelo rodado no Ansys CFX.

Tabela 5 Diferença percentual dos valores obtidos de Potência, Torque e Tração entre os dois métodos.

	Ansys CFX	Qblade	Diff (%)
Thrust [N]	4,79E+05	4,88E+05	-2%
Pout [W]	3,07E+06	3,63E+06	-15%
Tout [N.m]	1,83E+06	2,07E+06	-11%

A partir dos valores obtidos de potência e tração, foram calculados respectivamente os coeficientes de potência e tração representados na Tabela 6.

Tabela 6 Diferença percentual dos valores obtidos do Cp e Ct entre os dois métodos.

	Ansys CFX	Qblade	Diff (%)
Cp	0,382	0,495	-23%
Ct	0,715	0,803	-11%

As considerações de discretização e limitações do modelo já foram anteriormente abordadas, em (Karlsen, 2009) o autor aponta que o método BEM tende a sobrestimar os valores de produção para elevados valores de TSR, o que condiz com os resultados obtidos.

CONCLUSÃO

O propósito desse estudo de caso foi estudar a diferença entre o método BEM utilizando o software aberto QBlade e comparando com uma simulação CFD usando o Ansys CFX, através da verificação dos valores calculados para os fatores de indução axial e tangencial por ambos os métodos.

Foi observado que o método BEM superestima os resultados potência, torque e tração, isso ocorre devido as simplificações e limitações inerentes ao modelo, segundo (Karlsen, 2009) esse comportamento é esperado no método BEM.

Devemos levar em consideração as simplificações na geometria do modelo de aerogerador considerada na simulação CFD, como a simplificação na nacele, região onde os resultados foram mais discrepantes. O método CFD é muito sensível na sua modelagem, a malha utilizada, além de problemas com truncamento e convergência.

Os dois métodos ainda são amplamente utilizados no desenvolvimento de projetos de turbinas eólicas, em diferentes fases de maturidade. É importante conhecer os pontos positivos e as limitações de cada método e aplicar de maneira correta.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (s.d.). Fonte: <https://www.cfd-online.com/>.
Ansys User's Guide. (s.d.).
David Hartwanger, D. A. (2008). 3D Modelling of a Wind Turbine Using CFD.
Drela, M., Youngren, H., & Deperrois, A. (2009). *XFOIL/XFLR5*. MIT, Cambridge, Ma.
Hansen, M. O. (2008). *Aerodynamics of Wind Turbines*. Earthscan.
IEC. (s.d.). *IEC 61400-12-1: Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing*.
International Electrotechnical Commission - IEC. (s.d.). Fonte: <http://www.iec.ch/>
J Laursen, P. E. (2007). 3D CFD Quantification of the Performance of a Multi-Megawatt Wind Turbine. *Journal of Physics*.
Karlsen, J. A. (2009). *Performance Calculations for a Model Turbine*.
Lubitz, W. D. (2009). Effects of Tower Shadowing on Anemometer Data.
Marc S Schneider, J. N. (2016). Accurate load prediction by BEM with airfoil data from 3D-RANS simulations. *Journal of Physics*.
Namiranian, A. (2011). *3D Simulation of a 5MW Wind Turbine*.
Pechlivanoglou, G., Marten, D., G., W., N., M., & Wendler, J. (2009). *QBlade*. Technische Universität Berlin, Berlin.
S J Schreck, N. N. (2007). Aerodynamic Structures and Processes in. *Wind Energy*.
Saab Jr., J. Y. (2016). *TRAILING-EDGE NOISE – DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A NOISE PREDICTION TOOL FOR THE ASSESSMENT AND DESIGN OF WIND TURBINE AIRFOILS*. Acesso em 19 de July de 2017, disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-14032017-140101/pt-br.php>
Shen, W. Z., Hansen, M. O., & Sørensen, J. N. (2006). Determination of Angle of Attack (AOA) for Rotating Blades. *Wind Energy*.
Sørensen, J. J. (2004). Aerofoil Characteristics from 3d CFD Rotor Computations. *Wind Energy*.