



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS CFD DE SIMULAÇÃO DE TURBINAS HIDROKINÉTICAS

Rafael Castilho Faria Mendes

Marianela Machuca Macias

Paulo Augusto Strobel Freitas Silva

Taygoara Felamingo de Oliveira

Antonio Cesar Pinho Brasil Junior

rafael.cfmendes@gmail.com

nelamacmac@gmail.com

paulostrobel@gmail.com

taygoara@unb.br

brasiljr@unb.br

Universidade de Brasília. Laboratório de Energia e Ambiente. 70910-900 Brasília. DF. BRASIL

Abstract. *The recent advances in technologies turned able that a computer provides a numerical simulation of fluid flows, well known as Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. It means that the physical laws that govern the fluid behavior is in a “virtual” environment, where we can visualise the whole prototype system, such as a turbine, and how it works with great levels of realism. For many reasons, such as turbulence level and computational resource available, it is often impossible to describe the entire system with its all details. Consequently, we simplify the problem as much as possible to achieve the solution. In this sense, the aim of this work is to assess two different methodologies of CFD simulations of a 3 blade hydrokinetic turbine: full rotor and just one blade with symmetry simplification. As a result of it, the simulation of one blade rotor showed similar values of torque and pressure coefficient with the full rotor case. Thereby, this simplification presented the same level of results with a third of mesh.*

Keywords: *Hydrokinetic turbine, full rotor method, blade method, CFD*

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos tempos, grandes esforços foram feitos pelas entidades privadas que operam no setor eólico e pelos governos, em termos de financiamento, que permitiram o desenvolvimento de avanços tecnológicos e melhorias na eficiência das turbinas eólicas. O constante estudo nesta área, avanços aerodinâmicos, estruturais e a introdução de métodos computacionais de simulação, tem tornado a tecnologia mais competitiva se comparada às fontes tradicionais como os combustíveis fósseis, de acordo com Schaffarczyk (2014).

Segundo Khan et al. (2009), baseando nos mesmos princípios que a energia eólica, a energia hidrocinética contida em correntes aquáticas (rios) é considerada uma fonte de energia renovável que pode ser utilizada para produzir energia elétrica. De fato, o aproveitamento do fluxo de água em turbinas hidrocinéticas está se tornando uma atraente fonte de energia devido à alta densidade de energia da água corrente, à sua boa previsibilidade e ao baixo impacto ambiental e humano. A tecnologia de turbinas hidrocinéticas está se desenvolvendo de forma rápida com diferentes conceitos e protótipos desenvolvidos em vários países, conforme apresentado em Kinsey et al. (2011).

O estudo de turbinas hidrocinéticas de eixo horizontal ainda é muito incipiente e grande parte de sua concepção é feita em analogia com as turbinas eólicas. Essa similaridade também é reproduzida em ensaios experimentais, devido a complexidade e custo de desenvolvimento de bancadas de ensaio adequadas para operação desses rotores. Atualmente, devido ao progresso tecnológico de técnicas computacionais, primeiramente é realizado um estudo numérico e posteriormente inicia-se a construção de protótipos e análises experimentais, de acordo com e Silva (2014).

Por meio do trabalho de Lignarolo et al. (2016), pode-se dizer que a capacidade de desenvolver modelos que compreendam o comportamento de uma turbina de forma precisa, contemplando fenômenos aerodinâmicos complexos, tais como estol, fluxo dinâmico e efeitos de torre, é um fator fundamental para o desenvolvimento de turbinas eólicas. Sendo, portanto, o uso da dinâmica de fluidos computacional, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), para turbinas uma das chaves para conseguir um maior entendimento dos fenômenos físicos presentes, permitindo uma abordagem complexa do funcionamento de turbinas.

O escoamento em torno a uma turbina hidrocinética apresenta fenômenos com alto nível de turbulência, portanto, a escolha da modelagem da turbulência segundo o grau de precisão requerido nos cálculos é uma fator fundamental na hora de usar a dinâmica de fluidos computacional para simular escoamentos. As principais metodologias para modelar turbulência encontradas na literatura são as metodologias DNS (*Direct Numerical Simulations*), RANS (*Reynolds Average Navier-Stoke*) e LES (*Large-Eddy Simulation*), de acordo com o artigo de Blocken (2014).

Nas simulações DNS as equações da mecânica de fluidos e termodinâmica são resolvidas diretamente calculando os vórtices em todas as escalas de turbulência. Sendo portanto, um método muito preciso mas com um grande custo computacional que não permite a aplicação em problemas complexos devido, entre outros fatores, ao alto grau de elaboração das malhas, como mostrado Gopalan et al. (2013).

No caso das simulações de escoamento em turbinas eólicas são maiormente utilizadas as metodologias LES e RANS. A principal diferença entre elas é o método pelo qual a turbulência é resolvida. A metodologia LES calcula diretamente as grandes escalas turbulentas e utiliza

modelos matemáticos para resolver as pequenas, diminuindo assim o esforço computacional da metodologia DNS. Por outro lado, nas simulações RANS todas as escalas de turbulência são resolvidas utilizando uma modelagem de turbulência média demandando menor custo computacional e oferecendo menor grau de precisão que as simulações DNS e LES. A metodologia RANS é uma boa escolha para grande parte dos problemas estacionários encontrados na engenharia, e para alguns problemas transitórios utilizando a metodologia URANS (*Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes*) onde a variável tempo passa a ser considerada, como apresentado nos trabalhos de Mehta et al. (2014) e Zhiyin (2015).

Na última década várias propostas foram realizadas em torno ao desenvolvimento de uma metodologia capaz de estabelecer uma ponte entre as metodologias RANS e LES procurando uma interface contínua, uma transição entre os modelos de turbulência de forma suave, como mostrado em Frlhlich and von Terzi (2008), Friess et al. (2015) e Lignarolo et al. (2016). Este tipo de simulações permite o estudo do escoamento em torno a uma turbina de forma eficiente, atingindo um equilíbrio entre precisão e custo computacional, combinando as metodologias de modelagem da turbulência RANS e LES, segundo a região do escoamento calculada. O modelo híbrido RANS/LES conhecido como DES (Detached-Eddy Simulation) é baseado no modelo de Spalart et al. (1997) é um dos mais utilizados até o momento, como constatado no trabalho de Strelets (2001).

O presente trabalho apresenta o estudo numérico de uma turbina hidrocínética axial de eixo horizontal com três pás, 10 m de diâmetro e 500 kW, desenvolvida para aproveitar o potencial remanescente de uma central hidrelétrica.

O fluxo através da turbina foi simulado utilizando a metodologia RANS da dinâmica de fluidos computacional, devido aos bons resultados obtidos em um menor tempo de simulação. O modelo de turbulência utilizado foi o $k-\omega/SST$ (Shear-Stress Transport), descrito por Menter (1993, 1994), que combina os modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$, dependendo da região calculada. Segundo Sorensen et al. (2002) e Mo and Lee (2012), este modelo foi escolhido por ser o mais utilizado no caso de simulações de turbinas de eixo horizontal.

O objetivo desse trabalho é apresentar duas abordagens diferentes de simulação numérica utilizadas na análise do comportamento aerodinâmico de uma turbina hidrocínética. O primeiro caso é a metodologia tradicional, observado na maior parte da literatura, em que usa-se a geometria completa, com todas as pás, para se calcular a potência da máquina. Já o segundo caso apresentado aqui, utiliza uma simplificação da geometria do rotor, onde a simulação é realizada em uma pá somente.

2 METODOLOGIA

Ambas as simulações foram realizadas no código comercial ANSYS-CFX aplicando a metodologia estacionária da média de Reynolds (RANS) e simulando o comportamento da turbina no seu ponto de operação. O modelo de turbulência escolhido para esse trabalho foi o $k-\omega/SST$ devido a sua boa aplicabilidade em casos de turbinas de eixo horizontal. Essa estratégia foi utilizada com a desejo de calcular os campos de velocidade e pressão no fluido ao redor da máquina e posteriormente calcular o coeficiente de potência (C_p) da turbina para o ponto de funcionamento da máquina. Sendo que $C_p = \frac{\omega T}{0,5\rho AU_\infty^3}$, onde ω é a velocidade de rotação, T o torque

total produzido, ρ a massa específica da água, A a área da seção transversal do rotor e U_∞ a velocidade do escoamento.

2.1 Domínio e condições de contorno

Nos dois casos o domínio computacional foi separado em dois volumes: um interior, rotativo e um exterior, estacionário. Na metodologia do rotor completo, o domínio rotativo é formado por um cilindro e o domínio estacionário por um prisma retangular, como é possível ver na Figura 1. Já no caso da metodologia de uma pá, ambos os domínios são formados por um terço de cilindro, Figura 2. Em ambas as metodologias a velocidade do domínio rotativa foi configurada pra 1,6 rad/s.

O tamanho de ambos os domínios foram escolhidos de tal maneira que a fronteira não interferisse nos campos de velocidade e pressão do rotor. Uma região muito importante a se definir é a distância do limite a jusante do domínio. Nessa região encontram-se os maiores gradientes de velocidade e pressão, devido a esteira hidrodinâmica. Desta maneira ficou definido o tamanho do domínio como: 5D a montante, 20D a jusante e 4D a distância da parede.

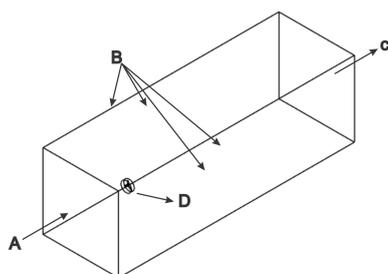


Figura 1: Domínio utilizado para metodologia do rotor completo.

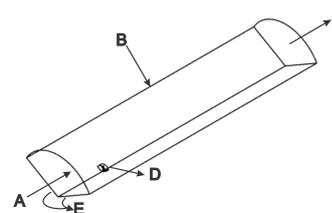


Figura 2: Domínio utilizado para metodologia de uma pá.

As condições de contorno aplicadas neste trabalho são as mesmas usadas na maioria dos estudos de turbinas de fluxo livre, como apresentado nos trabalhos de Lee et al. (2012); Moshfeghi et al. (2012); e Silva (2014); Mendes (2015); Macías (2016). Esses parâmetros visam representar a simulação o mais próximo do modelo real.

As condições de contorno aplicadas, Figura 1 e Figura 2, são:

- (A) Seção de entrada: A condição de contorno imposta ao escoamento na seção de entrada ao domínio estacionário é uma condição de perfil uniforme de velocidade de 1.8 m/s e com intensidade de turbulência 10 %. A pressão é dada pelas equações de movimento.
- (B) Paredes laterais: Nas paredes laterais do domínio estacionário é imposta a condição de deslizamento livre para evitar a interferência do túnel no escoamento. Já que a tensão de cisalhamento entre as paredes e o fluido é nula.
- (C) Seção de saída: A condição de pressão atmosférica é imposta ao escoamento na seção de saída ao domínio estacionário.
- (D) Superfície do rotor: Condição de não deslizamento na superfície do rotor sendo a velocidade nula na dita superfície.

- (E) Laterais do cilindro: Com o intuito de simular a rotação da turbina cilindro a condição de periodicidade rotativa foi aplicada nessas duas superfícies. Com isso, os elementos de uma superfície tem as mesmas propriedades que os elementos da outra, porém com a direção invertida.

2.2 Estudo de convergência de malha

As Figuras 3 e 4 mostram os refinamentos realizados na malha, mostrando uma aproximação na região que representa a parede do rotor. Segundo o trabalho de Moshfeghi, Song e Xie (2012), o refinamento a jusante da turbina influencia o valor da potência total produzida pela turbina, tendo em vista que nessa área há um elevado gradiente de pressão e velocidade devido a esteira aerodinâmica da turbina. Outra região que foi realizado o adensamento da malha numérica foi na superfície do rotor. Essa região é onde está a camada limite da turbina, portanto além de refinar, foram colocados algumas camadas de elementos prismáticos para captar toda a produção e dissipação de turbulência.

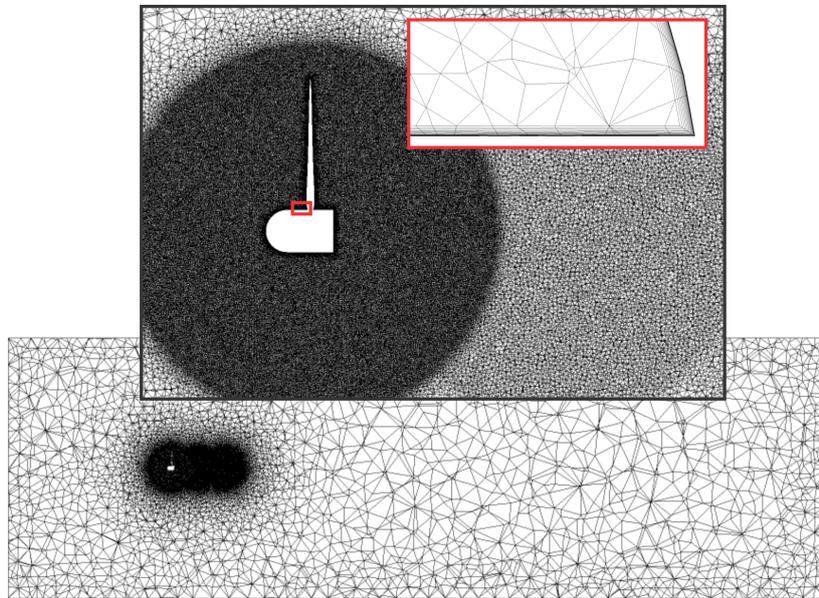


Figura 3: Malha gerada para o método do rotor completo.

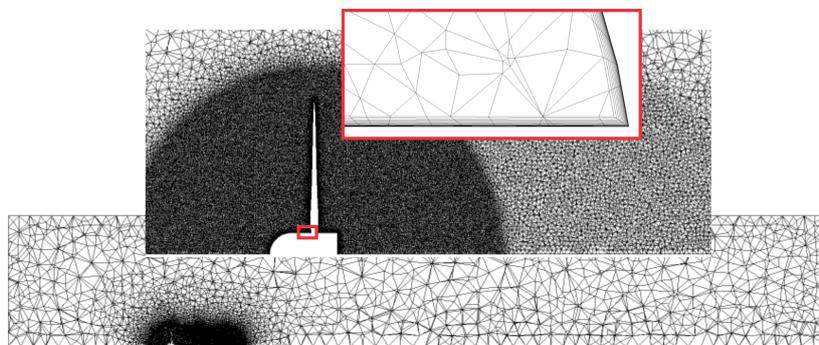


Figura 4: Malha gerada para o método de uma pá.

O tamanho da malha foi definido utilizando o estudo de convergência, onde alguns parâmetros de tamanho e refinamento foram variados gerando varias malhas, e simulados para o mesmo ponto de operação da turbina, obtendo os valores apresentados na Tabela 1. Os parâmetros mais relevantes foram o valor do C_p , pois a convergência do problema será realizada por meio dessa variável e o valor do y^+ , devido sua importância no modelo de turbulência $k-\omega/SST$. É possível observar na tabela que o valor de C_p melhora a medida do crescimento da quantidade de nós da malha, porém é possível notar que depois da Malha 4 o aumento na quantidade de nós não surte uma melhora no valor de C_p . Sendo assim, os parâmetros escolhidos pra realizar todas as simulações desse trabalho foram o da Malha 4.

Tabela 1: Estudo de convergência de malha.

	N de nós [10 ⁶]	Refinamento na esteira [m]	y^+		C_p
			Máximo	Médio	
Malha 1	1,84	0,5	42,7610	1,5737	0,290748
Malha 2	3,96	0,9	36,0161	1,4166	0,330149
Malha 3	5,69	0,9	40,3347	1,4386	0,339699
Malha 4	8,53	1,4	42,6638	1,5572	0,399234
Malha 5	9,51	1,4	31,6976	0,4157	0,403607

Depois das definições dos parâmetros de malha para o caso do rotor completo, uma malha para o método de uma pá foi gerada utilizando as mesmas configurações de tamanho e densidade de elementos, gerando uma malha de 2.87×10^6 nós para esse caso, aproximadamente um terço da malha do método tradicional. As Figuras 5 e 6 mostram o resultado dos parâmetros finais utilizado para o cálculo da malha.

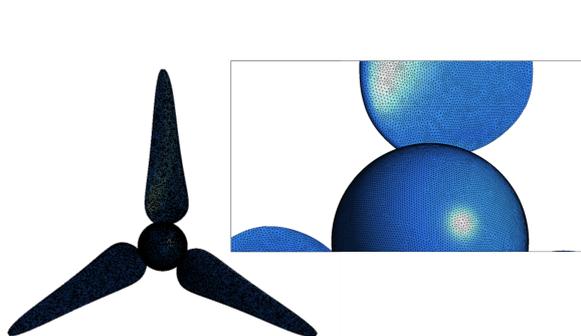


Figura 5: Malha na superfície da pá do método do rotor completo.

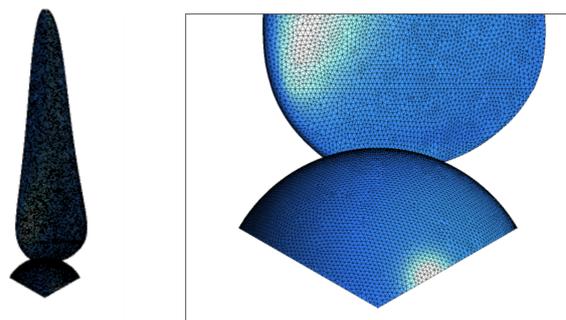


Figura 6: Malha na superfície da pá do método de uma pá.

3 RESULTADOS

Como já tido anteriormente o C_p foi utilizado como parâmetro para convergência do problema. O gráfico da Figura 7 apresenta o resultado do C_p em função das interações (time step)

para cada metodologia testada. É possível notar que a diferença entre as curvas é praticamente nula e que ambas convergem para o mesmo valor de C_p , evidenciando que a metodologia de simulação para uma pá recupera o mesmo resultado do outro método.

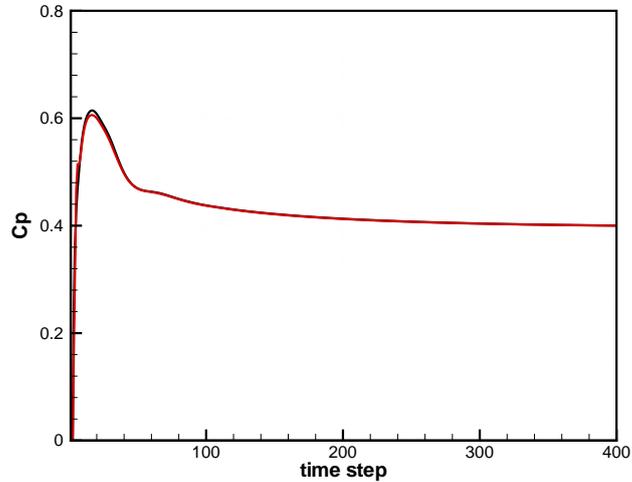


Figura 7: Convergência do valor de C_p para as duas metodologias estudadas. [—] método do rotor completo [—] método com uma pá.

Nota-se também que ambos os casos convergiram com aproximadamente o mesmo número de interações. Contudo, com os dados do tempo computacional, mostrados na Tabela 2, a simulação com o rotor completo demorou mais de 4 vezes do tempo computacional do método de uma pá sozinha. Resultado esse já esperado, visto a diferença do tamanhos das malhas.

Tabela 2: Tempo computacional

	Interações	CPU seconds
Rotor completo	400	1.369×10^6
Uma pá	400	3.288×10^5

3.1 Análise do escoamento entre os métodos

Para saber a qualidade entre os resultados é preciso avaliar o escoamento além do resultado de C_p . Um resultado importante em uma turbina desse tipo é o campo de pressão na sua superfície, pois essa variável indica os esforços que essa máquina irá sofrer durante sua operação. É comum na literatura, utilizar o coeficiente de pressão para identificar a pressão em torno de um aerofólio. As Figuras 8 e 9 mostram o campo de pressão juntamente com as linhas de corrente em uma seção a metade da pá.

Já a Figura 10 apresenta a comparação do coeficiente de pressão entre os dois casos. Esse coeficiente é definido como $C_{pressao} = \frac{P - P_{atm}}{0.5\rho U_{\infty}^2}$, onde P é a pressão local em um ponto do aerofólio e P_{atm} é a pressão atmosférica. Com esse coeficiente é possível calcular um erro médio

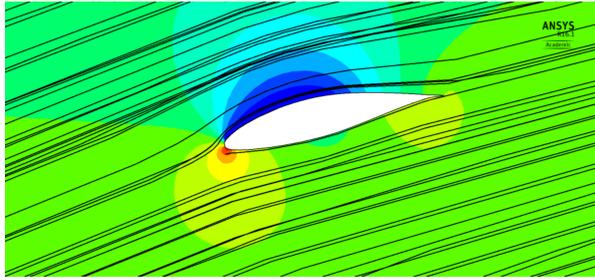


Figura 8: Corte seção transversal da pá, metodologia do rotor completo.

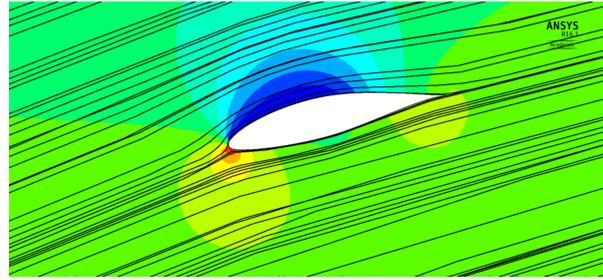


Figura 9: Corte seção transversal da pá, metodologia de simulação de uma pá.

menor que 1% entre os dois métodos. Pode se observar que os maiores erros se encontram nas extremidades do aerofólio, representados nos valores 0 e 1 do gráfico.

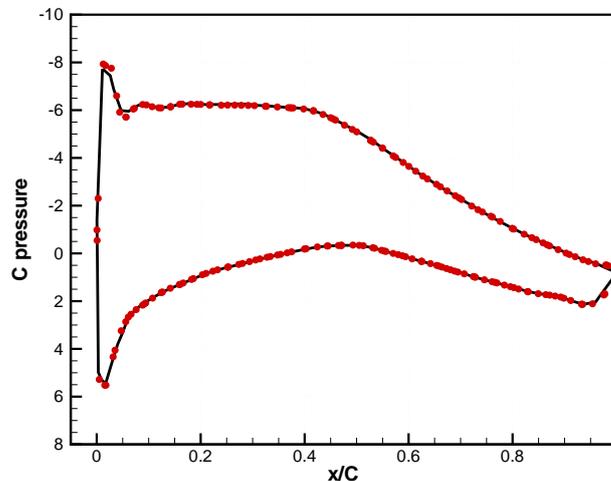


Figura 10: Coeficiente de pressão.

As Figuras 11 e 12 apresentam os resultados da velocidade axial normalizada e turbulência normalizada, consecutivamente, para as duas metodologias. Nota-se, em ambas figuras, que é possível diferenciar partes do escoamento entre as metodologias, porém nada de muito significativo, resultado já esperado visto que o valor do C_p foi recuperado em ambas simulações. A principal diferença aparente é o tamanho da esteira em cada caso, sendo que a esteira da metodologia completa, figura de cima, se desenvolve em uma distância maior que a metodologia de uma pá, essa divergência pode ser observada nas variáveis de velocidade axial e na turbulência.

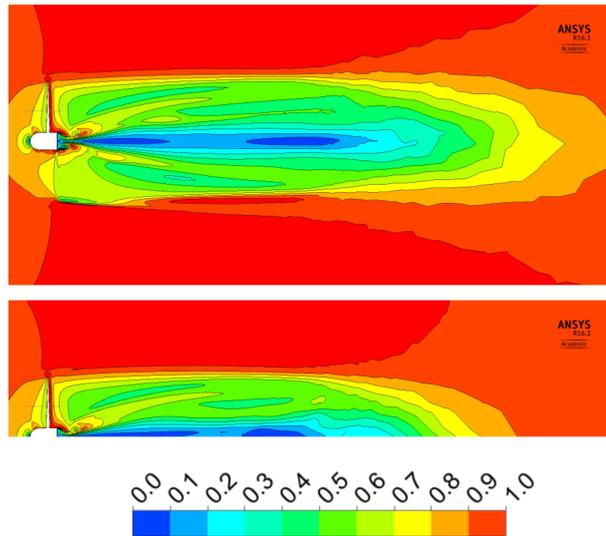


Figura 11: Velocidade axial normalizada em ambas metodologias.

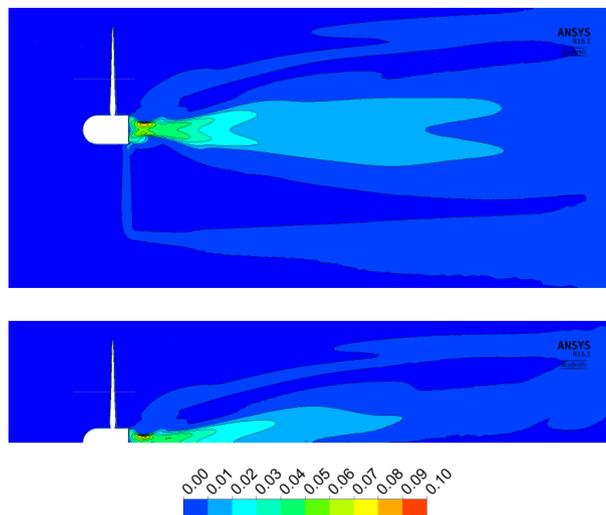


Figura 12: Energia cinética de turbulência normalizada em ambas metodologias.

4 CONCLUSÃO

Por meio dos resultados apresentados da comparação das duas metodologias, é possível concluir que ambas recuperam o mesmo resultado. Porém, cabe ressaltar que a diferença do tempo computacional de cálculo é bastante diferente. Sendo o tempo da metodologia de uma pá cerca de 4 vezes mais rápido que o método tradicional de simulação completa da turbina. Resultado justificado pela grande diferença do número de nós utilizados, visto que a simulação completa tem 8,53 milhões de nós e a malha da metodologia simplificada 2,87 milhões. Levando em conta que uma malha com muito mais nós demanda um esforço maior para se desenvolver, o método de uma pá leva vantagem sobre o outro novamente.

Entretanto para estudo mais avançados de estruturas do escoamento, ainda é recomendado a utilização da metodologia tradicional completa. Podendo justificar essa escolha a presença de pequenas divergências no campo de velocidade e turbulência a jusante do escoamento.

Referências

- B. Blocken. 50 years of computational wind engineering: Past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129:69 – 102, 2014. ISSN 0167-6105.
- P. A. S. F. e Silva. Estudo numérico de turbinas hidrocinéticas de eixo horizontal. *Dissertação de Mestrado UnB*, 2014.
- C. Friess, R. Manceau, and T. Gatski. Toward an equivalence criterion for hybrid rans/les methods. *Computers & Fluids*, 122:233 – 246, 2015. ISSN 0045-7930.
- J. Frihlich and D. von Terzi. Hybrid les/rans methods for the simulation of turbulent flows. *Progress in Aerospace Sciences*, 44(5):349 – 377, 2008. ISSN 0376-0421.
- H. Gopalan, S. Heinz, and M. K. Stieler. A unified rans-les model: Computational development, accuracy and cost. *Journal of Computational Physics*, 249:249 – 274, 2013. ISSN 0021-9991.
- M. Khan, G. Bhuyan, M. Iqbal, and J. Quaicoe. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied Energy*, 86(10):1823 – 1835, 2009. ISSN 0306-2619.
- T. Kinsey, G. Dumas, G. Lalande, J. Ruel, A. Mijchels, P. Viarouge, J. Lemay, and Y. Jean. Prototype testing of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils. *Renewable Energy*, 36(6):1710 – 1718, 2011. ISSN 0960-1481.
- S. G. Lee, S. J. Park, K. S. Lee, and C. Chung. Performance prediction of {NREL} (national renewable energy laboratory) phase {VI} blade adopting blunt trailing edge airfoil. *Energy*, 47(1):47 – 61, 2012. ISSN 0360-5442. Asia-Pacific Forum on Renewable Energy 2011.
- L. E. Lignarolo, D. Mehta, R. J. Stevens, A. E. Yilmaz, G. van Kuik, S. J. Andersen, C. Meneveau, C. J. Ferreira, D. Ragni, J. Meyers, G. J. van Bussel, and J. Holierhoek. Validation of four les and a vortex model against stereo-piv measurements in the near wake of an actuator disc and a wind turbine. *Renewable Energy*, 94:510 – 523, 2016. ISSN 0960-1481.
- M. M. Macías. Estudo experimental em túnel de vento de turbinas de eixo horizontal. *Dissertação de Mestrado UnB*, 2016.
- D. Mehta, A. van Zuijlen, B. Koren, J. Holierhoek, and H. Bijl. Large eddy simulation of wind farm aerodynamics: A review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 133: 1 – 17, 2014. ISSN 0167-6105.
- R. C. F. Mendes. Estudo do fator de indução axial em turbinas de eixo horizontal. *Dissertação de Mestrado UnB*, 2015.
- F. Menter. Zonal two equation k-w turbulence models for aerodynamic flows. in: Fluid dynamics and co-located conferences. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*,, 1993.
- F. R. Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal, American Institute of Aeronautics and Astronautics*, v. 32, n. 8, p. 1598-1605, ago. 1994. ISSN 0001-1452, 1994.
- J.-O. Mo and Y.-H. Lee. Cfd investigation on the aerodynamic characteristics of a small-sized wind turbine of nrel phase vi operating with a stall-regulated method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(1):81–92, 2012. ISSN 1738-494X.

- M. Moshfeghi, Y. J. Song, and Y. H. Xie. Effects of near-wall grid spacing on sst- $k-\omega$ model using {NREL} phase {VI} horizontal axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 107108(0):94 – 105, 2012. ISSN 0167-6105.
- A. Schaffarczyk. *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*. Springer, 2014.
- N. N. Sorensen, J. Michelsen, and S. Schreck. Navier-stokes predictions of the nrel phase vi rotor in the nasa ames 80 ft x 120 ft wind tunnel. *Wind Energy*, 5:151–169, 2002.
- P. R. Spalart, W. H. Jou, M. Strelets, and S. R. Allmaras. Comments on the feasibility of les for wings and on the hybrid rans/les approach. In *Advances in DNS/LES, Proceedings of the First AFOSR International Conference on DNS/LES*, 1997.
- M. Strelets. Detached eddy simulation of massively separated flows. In *AIAA*, 2001.
- Y. Zhiyin. Large-eddy simulation: Past, present and the future. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28(1):11 – 24, 2015. ISSN 1000-9361.