

ANÁLISE DO ESCOAMENTO SOBRE UMA TURBINA EÓLICA VERTICAL USANDO CFD

Analysis of the flow over a vertical wind turbine using CFD

Roberta Fátima Neumeister¹; Cristiano Vitorino da Silva²

¹ Engenheira Mecânica formada pela Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI Erechim, atualmente é colaboradora na Comil Ônibus S.A.

² Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Brasil, atualmente é professor e coordenador do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI Erechim. E-mail: cristiano@uricer.edu.br

Data do recebimento: 03/03/2013 - Data do aceite: 24/07/2013

RESUMO: O presente trabalho apresenta a análise do escoamento isotérmico de ar sobre uma turbina eólica vertical, operando no regime estacionário. Esta análise é fundamentada nas equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia, para escoamento turbulento. As médias de Reynolds RANS - *Reynolds Average Navier Stokes* com o método dos volumes finitos foram aplicadas através do uso do software Ansys CFX. A turbulência presente no escoamento é resolvida utilizando o modelo $k-\omega$ SST, para a análise do regime estacionário. O torque sobre o eixo vertical da turbina é obtido com a implementação de uma expressão que considera um balanço de forças sobre as pás da turbina. As análises levam em conta três variações de geometria aplicadas ao mesmo escoamento tridimensional com velocidade do ar atmosférico prescrita de 12m/s, uniformemente aplicada no contorno de entrada do domínio, axialmente à turbina. Os resultados obtidos apresentam, além dos campos de pressões no instante de análise entre as geometrias, também os campos de velocidades, torque sobre as pás, linhas de corrente, campos de energia cinética turbulenta e sua dissipação.

Palavras-chave: Turbina eólica. RANS. $k-\omega$ SST. CFD.

ABSTRACT: This paper presents the analysis of the isothermal airflow over a vertical wind turbine operating in steady state. This analysis is based on mass conservation equations, momentum and energy for turbulent flow. The average of Reynolds RANS - Reynolds Average Navier Stoke with finite

volume method was applied through the use of the software Ansys CFX. The turbulence in this flow is solved using the $k-\omega$ SST model for the analysis of steady state. The torque on the vertical axis of the turbine is obtained with the implementation of an expression which finds a balance of force on the turbine blades. The analyses take into account three variations of the geometry applied to the same three-dimensional flow of atmospheric air speed prescribed of 12m/s, evenly applied on the boundary of the input domain, axially to the turbine. Besides the field of pressure in the moment of the analysis among the geometries, the results obtained also present the speed fields, torque on the blades, power lines, fields of turbulent kinetic energy and its dissipation.

Keywords: Wind Turbine. RANS. $k-\omega$ SST. CFD.

Introdução

Somado ao aumento na demanda energética mundial, a conscientização ambiental que vem se tornando cada vez mais importante nos últimos anos, observa-se uma crescente busca por fontes de energia renováveis para substituição dos combustíveis fósseis na produção de eletricidade, tentando-se, assim, uma diminuição nos índices de emissões ao meio ambiente e também uma redução do efeito estufa. Ouve-se muito a respeito de biomassa, biogás, energia solar e eólica, sendo que nesta última percebe-se um grande interesse, principalmente em razão do crescente aumento da eficiência dos aerogeradores, devido à aplicação de novas tecnologias.

Existem diferentes definições para energia eólica, mas segundo Pereira (2009), energia eólica é a energia obtida através dos movimentos gerados pela velocidade de ar, dos ventos. O princípio é a conversão de energia de cinética (velocidade dos ventos) em energia mecânica e então para energia elétrica. A energia eólica é utilizada há muitos séculos. Os primeiros registros estão datados de 200 a.C. na Pérsia, mas, segundo CRESESB (2012), muitos historiadores relatam o uso de equipamentos movidos pela energia do vento desde 2000 a.C. na China, 1700 a.C. no Império Babilônico e em 1000 a.C., os Fe-

nícios utilizavam suas embarcações movidas pelo vento. No século X, muitos dos moinhos para moagem encontrados na Europa eram movidos pela energia do vento. A partir do século XIX, o vento começou a ser aplicado para bombeamento de água, principalmente nos Estados Unidos, onde é utilizado até hoje em pequenas propriedades. Porém, foi durante o século XIX, mais precisamente em 1888, que o americano Charles Brush utilizou a energia do vento para geração de energia elétrica. Em 1897, Poul La Cour constrói uma turbina com menos pás e maior velocidade de rotação, sendo mais adaptada à geração elétrica. A partir de 1970, devido à crise do petróleo e a necessidade de encontrar fontes de energias renováveis, ocorreu um aumento de interesse nesta área. Muitos países tiveram um aumento exponencial em pesquisas relacionadas ao assunto, mas com ênfases diversas. Com o passar dos anos e com o desenvolvimento de novas tecnologias, tanto em simulação quanto em materiais, obtiveram-se grandes inovações e por este motivo, atualmente, encontra-se mais de 30.000 unidades instaladas em todo o mundo (CRESESB, 2012). Os países que mais utilizam geração de energia elétrica a partir do vento, atualmente, são Alemanha, Espanha e Estados Unidos.

A energia eólica é reconhecida mundialmente por ser uma energia alternativa para

geração de eletricidade, visto que diretamente não emite resíduo. É uma fonte energética que cresce cerca de 28,6 % ao ano e uma previsão do Comitê Internacional de Mudanças Climáticas é de que até 2030, o mundo esteja utilizando 30 mil MW gerados a partir de energia eólica (PEREIRA, 2009).

Segundo GWEC (2010), o primeiro atlas eólico brasileiro foi publicado em 2001, estimando um potencial eólico de 143GW em 50m de altura. Já em 2008 e 2009, novas medições foram feitas entre 80 e 100m e mostraram que o potencial eólico é maior que 350GW. Estas informações comparadas ao consumo total do Brasil que foi de 113,4GW até o final de 2010 mostram o quanto de energia vem deixando de ser aproveitada. As regiões com melhores potenciais energéticos no Brasil são as regiões Nordeste e Sul, representados por Rio Grande do Norte, Ceará, Pernambuco, Bahia, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Estima-se que em 2030, o consumo mundial de energia elétrica entre 950 e 1250TWh/ano, sendo que o consumo atual é de 405TWh/ano. Este grande aumento na demanda elétrica exigirá grandes investimentos na expansão da produção de energia elétrica. Desta forma, a aplicação de energia vinda de fontes renováveis é bem propícia e possui grandes incentivos dos governos, incluindo o brasileiro, que criou em 2002 o programa de incentivo à geração de energia limpa.

O rendimento de um gerador eólico depende, inicialmente, do desenho de rotor e da velocidade de rotação, mas na prática é impossível construir geradores eólicos capazes de operar com o mesmo rendimento em todas as velocidades do vento. Primeiro há uma velocidade mínima para que seja possível vencer as forças de atrito e em segundo lugar existe uma limitação de velocidade máxima, pois a potência extraída se mantém constante, estabilizando a rotação do rotor mesmo com velocidades altas para vento. O

rendimento global de um gerador eólico é de no máximo 60%, ou seja, da quantidade máxima disponível, apenas 3/5 pode ser transformado em energia elétrica através do aro gerador (PALZ, 1995).

Depois da primeira crise energética, em 1970, podem-se encontrar diversos estudos na área de aerogeradores e energia eólica. Os mesmos apresentam diversos enfoques, como a análise de viabilidade para implantação, o estudo de potencial eólico em regiões e estados, a modelagem e a simulação de escoamentos e as análises experimentais de diferentes tipos de torres e geometrias e configurações das pás. As modelagens e simulações da física relacionada ao problema podem ser executadas de diversas formas, mas é necessário utilizar modelos adequados para que as respostas obtidas sejam condizentes com a realidade, para que as melhorias propostas nas soluções possam ser empregadas nos parques eólicos em funcionamento e em futuras instalações. Desta forma, Islam et al. (2006) descreveram os modelos para análise aerodinâmica das turbinas Darrieus. Inicialmente, os mesmos citam o modelo do momento que é baseado no cálculo da velocidade do escoamento através da turbina pela equação do melhor escoamento aerodinâmico para as forças nas pás, onde a força é também igual a média de diferenças de pressões antes, depois e ao longo do rotor. A equação de Bernoulli se aplica em cada ponto de fluxo em análise. Existem diversos modelos desenvolvidos para análise dos tubos de corrente como: modelo de tubo de corrente singular, modelo de tubo de corrente múltiplo e modelo de tubo de corrente múltiplo-duplo. O modelo singular é o modelo mais simples para o cálculo do desempenho. Neste modelo, a turbina inteira é considerada enclausurada em um tubo de corrente. Nesta teoria, a velocidade induzida é considerada constante pelo disco e obtida pela equação de melhor fluxo com a mudança do momento axial. Depois

disto, os autores falam sobre o modelo de vorticidade que é basicamente um modelo de escoamento potencial baseado no cálculo do campo de velocidade sobre a turbina pela influência da vorticidade na onda das pás. As pás das turbinas são representadas por limites ou vórtices de linha de descolamento, sendo que seus tamanhos são determinados, utilizando-se coeficientes de aerofólios e cálculos relativos das velocidades de escoamento e de ângulos de ataque. O método de Cascata refere-se ao arranjo equidistante periódico de diversas pás. A cascata é o elemento básico de uma turbo máquina e o seu escoamento é o fenômeno físico essencial para a operação do equipamento. Neste modelo, os aerofólios das pás são assumidos para serem posicionados numa superfície plana com o inter espaço da pá igual à circunferência da turbina, sendo que as características aerodinâmicas de cada elemento da pá são obtidas de forma independente. Como conclusão, os autores apresentam a verificação de três modelos básicos que são mais aplicados para avaliação das turbinas verticais. São eles: modelo de tubo de corrente múltiplo-duplo, vórtices livres e modelo de cascata. Entre estes, o com maior precisão é o modelo de vórtices, mas o mesmo é computacionalmente caro de ser resolvido.

Em outro enfoque, Hartwanger e Horvat (2008) mostram um estudo de eficiência de um aero gerador com simulações em CFD. A eficiência de uma turbina é um componente crítico na viabilização de uma fazenda eólica. A partir de uma turbina comercial foram avaliadas seções das pás em 2D e os resultados foram utilizados para validar o modelo 3D. Então, utilizando o modelo 3D foram simulados escoamentos, encontrando-se os fatores utilizados para modificar o atuador clássico de turbinas eólicas.

Depois disto verifica-se com destaque o trabalho de Li et al. (2012) apresentam uma análise transiente da aerodinâmica de turbi-

nas eólicas, utilizando o CFD. As simulações são executadas numa camada inercial com o rotor consistido de pás e corpo. Simulações do efeito de diferentes velocidades de vento em uma pá com ângulo fixo de 3° , utilizando os métodos RANS e DES com modelo de turbulência são apresentadas. Os dois métodos apresentam pequena variação na média de momentos e forças. Porém, significativas melhoras na análise transiente foram vistas utilizando o método DES. O efeito do ângulo de ataque é avaliado dinamicamente entre -15° e 40° em uma velocidade constante e uniforme de 15m/s. Exaustivas comparações contra resultados experimentais, incluindo potência total e confiabilidade foram executados. As análises transientes da pressão nas pás revelam que o método DES é capaz de prever flutuações de propriedades com frequência similar aos dados experimentais, e apresentam resultados mais aproximados de uma turbina real. No mesmo ano, porém com um enfoque distinto, Castelli et al. (2010) apresentam um estudo com um modelo em CFD para avaliação da performance de energia e ações das forças aerodinâmicas de uma turbina eólica vertical Darrieus com pás retas. Os princípios básicos aplicados à teoria para predição do desempenho do rotor são transferidos para o código CFD, aliando as correlações entre as características do escoamento geométrico e a quantidade dinâmica. Pelas análises da distribuição instantânea do coeficiente de torque e dos relativos ângulos de ataque como uma função de posição azimutal para uma pá singular do rotor, as características do escoamento foram investigadas para diversos valores de velocidade comparados com valores do coeficiente de pressão. Os resultados obtidos apresentam reduções de ângulos de ataque relativos de pás, passando de baixos para altos valores de torque sobre o rotor. Apesar da média de potência do motor ser mais baixa, o coeficiente local instantâneo excede o limite de Betz

três vezes por cada revolução do rotor. Este fenômeno é, provavelmente, causado por um coeficiente repentino de pressão.

Wang et al. (2012) propõem uma análise do desempenho aerodinâmico de uma turbina vertical sujeita a variações de velocidades, no qual se utiliza o método RANS e modelo $k-\epsilon$. Dois campos de escoamento instável da turbina de eixo vertical foram simulados numericamente com diferentes velocidades de vento. Os resultados mostraram que a velocidade calculada na região de rotação da turbina eólica é muito maior do que o escoamento do ar à montante. O comprimento da região jusante da turbina eólica verificado, e há um aumento da dispersão da quantidade de movimento com o aumento da velocidade do vento. Na região traseira da turbina verificam-se lâminas rotativas. Quanto à velocidade de rotação, não há alteração com o aumento da velocidade do vento.

Bhutta et al. (2012) apresentam um trabalho sobre as turbinas de eixo vertical, mostrando que este tipo de turbina possui um mercado promissor, apresentando todos os modelos com suas vantagens e limitações. Eles apresentam, principalmente, as Turbina Darrieus e Savonius com todas as variações existentes nas mesmas. Mostra nos estudos ao decorrer do artigo que estas turbinas possuem viabilidade por diversos motivos: como grande potencial eólico disponível, retorno rápido do investimento e potência maximizada. Da mesma forma, Dobrev e Massouh (2011) mostram um estudo de escoamento através de uma turbina vertical Savonius. O rotor estudado apresenta altura e diâmetro praticamente equivalentes, o que exige um modelo 3D. O princípio da simulação utiliza variações de vento entre 9 e 15 m/s e analisa 6 principais posições com ângulos de 0°, 30°, 60°, 90°, 120° e 150°. Nestas condições, a turbulência no modelo $k-\omega$ e DES permitem obter bons resultados. Utilizando CFD para o estudo da geometria da turbina

Savonius, pode-se utilizar os resultados para qualificação do desenho das pás e da turbina. Para validação da simulação utiliza-se um procedimento experimental de investigação em túnel de vento.

Yao et al. (2012) apresentam uma avaliação de dois modelos dimensionais de turbina vertical, no software FLUENT e em um algoritmo SIMPLEC, combinado com a tecnologia de grade de deslizamento. Os dois métodos foram executados utilizando diferentes modelos de turbulência. Os resultados apresentaram a influência dos diferentes modelos no campo de velocidade e pressão em torno da turbina, porém interferindo significativamente no valor de torque total. O gradiente de velocidade e pressão é aparente em torno das pás de uma turbina eólica. O campo de velocidade e o campo de pressão do domínio computacional muda em diferentes tempos. Na velocidade constante do vento e rotação, o torque total da turbina vertical pode mudar periodicamente. Os resultados calculados proporcionam referência para desenho de uma turbina vertical em engenharia. Um modelo bidimensional turbina eólica vertical de três pás foi estabelecido neste artigo e então o escoamento bidimensional campo instável da turbina foi simulado numericamente para o modelo padrão $k-\epsilon$ e modelo de turbulência $k-\epsilon$ RNG com resultados similares para as opções testadas.

O uso de aerogeradores apresenta diversas vantagens como fonte geradora disponível, não exigindo investimentos para canalizar a energia e não emitindo diretamente na sua operação nenhum poluente, além de demandar baixos investimentos para sua operação. Neste sentido, com o objetivo de obter informações que apontem para melhorias de rendimento dos aerogeradores, neste trabalho propõe-se um estudo sobre diferentes configurações de turbinas eólicas verticais, a fim de obter informações técnicas relacionadas à aerodinâmica destes equipamentos, que

possam facilitar a viabilização de parques eólicos, ampliar a utilização deste tipo de equipamento, principalmente, no Brasil e possibilitar o uso desta fonte de energia para atender a crescente demanda de energia no país. O objetivo principal é desenvolver uma modelagem em CFD para avaliar os perfis aerodinâmicos de pás helicoidais de aerogeradores verticais, buscando-se uma redução na esteira formada na passagem do escoamento de ar pelo equipamento e, desta forma, melhorar a eficiência global do equipamento e do conjunto deles quando instalados em um parque eólico. A análise de eficiência leva em conta o torque efetivo gerado pelo campo de pressão sobre as pás da turbina em relação ao eixo central vertical (axial) do equipamento. Avaliações usando RANS serão utilizadas.

Modelo Matemático

Nesta seção é apresentada a formulação matemática para se descrever o modelo do escoamento de fluido viscoso e incompressível através dos princípios básicos de conservação da massa, da quantidade de movimento, turbulência e da conservação de energia. Considera-se ar atmosférico como fluido de trabalho e o meio contínuo como válido. Para representar a turbulência do escoamento, aplicam-se sobre as equações de conservação o RANS – *Reynolds Average Navier-Stokes* assumindo-se as Médias de Favre para as propriedades do fluido (HINZE, 1975), e o modelo de turbulência *k- ω -SST - Shear Stress Transport* (MENTER, 1993) é utilizado, juntamente com funções de parede.

Conservação da massa

Considerando o regime transiente de operação, a equação da conservação de massa pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{\rho}\tilde{U}_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

onde $\tilde{\rho}$ é a massa específica média do fluido, x é a coordenada espacial, \tilde{U}_i é a velocidade média do componente i , e t é o tempo.

Conservação da quantidade de movimento

Para um escoamento incompressível, a equação da conservação da quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\tilde{\rho}\tilde{U}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{\rho}\tilde{U}_i\tilde{U}_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j}\delta + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_{eff}\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial \sigma}{\partial x_j\partial x_i} + S_u \quad (2)$$

onde a viscosidade efetiva é $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$. Nessa expressão μ é a viscosidade dinâmica da mistura e μ_t é a viscosidade turbulenta, definida como $\mu_t = \rho k / \omega$, onde k e ω são a energia cinética turbulenta e a frequência turbulenta obtidas com o modelo de turbulência. O termo $p' = \bar{p} - (2/3)k$ representa uma pressão modificada, onde \bar{p} é a pressão média da mistura e δ é a função delta de Krönecker para a notação indicial. O termo S_u representa um termo fonte médio.

Modelo de turbulência *k- ω -SST (Shear Stress Transport)*

As equações para energia cinética turbulenta, k , e sua frequência turbulenta, ω são:

$$\frac{\partial(\tilde{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{\rho}\tilde{U}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \mu_t P_k - \beta' \rho k \omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\tilde{\rho}\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{\rho}\tilde{U}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + \alpha \frac{\omega}{k} \mu_t P_k - \rho \beta \omega^2 - \rho S_\omega \quad (4)$$

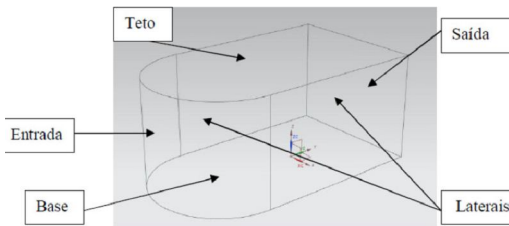
onde β , C_μ , S_ω e α são constantes empíricas do modelo de turbulência, σ_κ e σ_ω são números de Prandtl de energia cinética e frequência respectivamente, e P_k é o termo que representa produção ou destruição de energia cinética turbulenta, sendo este último dado por

$$P_k = S_{ij} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

Modelo físico

Para simular adequadamente o escoamento isotérmico do ar atmosférico sobre o aerogerador e possibilitar a atribuição das condições de contorno construiu-se uma atmosfera externa à torre com o formato apresentado na Fig. 1, onde as seguintes configurações são apresentadas.

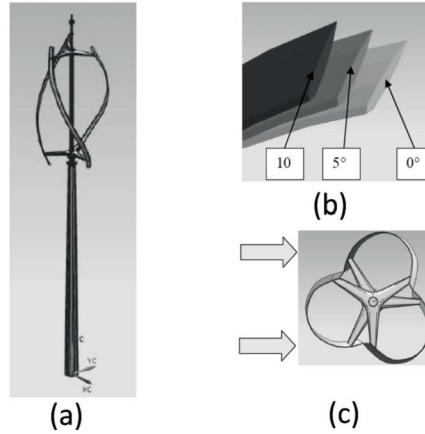
Figura 1 – Formato da Atmosfera.



O modelo físico, representado na Fig. 2-a, em análise trata-se de uma turbina vertical comercial com pás helicoidais, com perfis NACA e altura de torre de 14000 mm e largura de pá de 136 mm. A análise considera um escoamento externo de ar atmosférico sobre a turbina com velocidade média e uniforme de 12 m/s, velocidade esta atribuída a uma altura de 15000 mm para o estado do Rio Grande do Sul pelo Mapa Eólico (GWEC, 2010). As variações dos ângulos de ataque propostos para este trabalho são de 0° relativo ao perfil comercial, 5° graus e 10° graus

a partir da referência, conforme Fig. 2-b. Na Fig. 2-c verifica-se uma vista superior do aerogerador e da orientação do escoamento em relação ao equipamento.

Figura 2 – (a) Turbina vertical Darrieus com pás helicoidais ; (b) Variação de ângulos de ataque das pás ; (c) Vista superior do aerogerador.



Condições de Contorno

Para o escoamento externo sobre a turbina eólica são inferidas diversas condições tanto na atmosfera quanto nas pás em análise e as condições de contorno para a simulação são descritas abaixo:

1 – A velocidade do escoamento na entrada é de 12m/s, sendo que, a entrada refere-se à face geradora do escoamento do fluido, sendo este um escoamento uniforme isotérmico e incompressível de ar atmosférico. Nesta região prescreve-se intensidade média de turbulência.

2 – As pás, itens de análise, e a torre são consideradas superfícies sólidas impermeáveis de paredes lisas, nas quais é executada a análise, atribuindo-se a condição de não deslizamento.

3 – Para os demais contornos laterais, de base e superficiais, nos quais atribui-se

uma condição de viscosidade infinita com deslizamento livre.

4 – Para a saída, considera-se uma condição de contorno de abertura, prescrevendo-se a pressão atmosférica local, 1 atm.

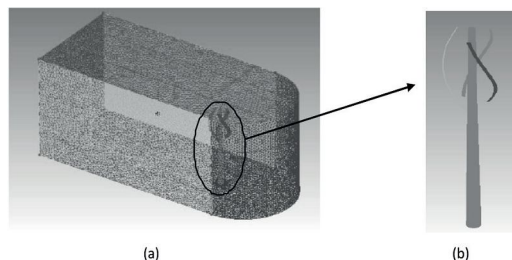
A análise do escoamento sobre as pás de turbina vertical pelo método RANS em simulação no software ANSYS resolve as equações da conservação de massa e quantidade de movimento e executa a resolução da turbulência, utilizando o modelo $k-\omega$ SST. Devido às características do escoamento e do fluido, considera-se esta análise incompressível e isotérmica. Para o regime estacionário, o escoamento é executado sobre as pás estáticas para um determinado instante de tempo. Para obter o torque, força perpendicular multiplicada pela distância de aplicação em relação ao eixo da turbina, implementou-se uma expressão na prescrição dos parâmetros do software Ansys. A expressão é escrita da seguinte forma: $\text{torque_z}()@Pal$. Onde torque corresponde à variável em análise, z é o eixo de giro das pás, Pal o nome da condição de contorno em que se avalia o torque, quanto aos itens $()$ e $@$ são parte da expressão a ser implementada.

Malha Computacional

Para a análise estacionária utiliza-se apenas um domínio fluido, onde a torre encontra-se imersa e assim necessitando de apenas uma malha. Para a criação da malha leva-se em conta o formato do domínio, mostrado na Fig. 3-a, onde uma malha tetraédrica é utilizada. A malha do domínio é grosseira e em torno das pás é mais refinada. Já nas pás e na torre, elementos de interesse, a malha é mais refinada e são geradas 3 camadas de elementos prismáticos, os quais melhoram os resultados das simulações, principalmente, no quesito turbulência, pois com eles é possível verificar melhor a influência da camada

limite do escoamento sobre os contornos da geometria. As pás e a torre com a malha podem ser verificadas na Fig. 3-b.

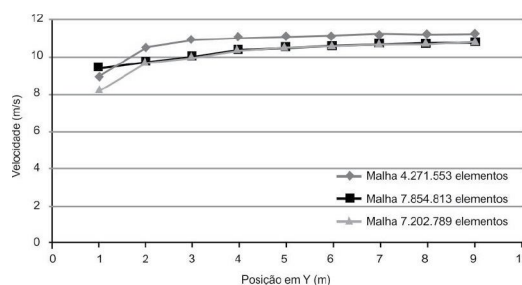
Figura 3 – Detalhe da malha: (a) Malha externa – Atmosfera de análise; (b) Malha da Torre.



A fim de garantir que os resultados obtidos com as malhas geradas sejam coerentes e forneçam informações confiáveis, executou-se um estudo de interdependência de malha. Três simulações, com as mesmas características, foram rodadas, utilizando três malha distintas: Malha 1 – Grosseira – 4.271.553 elementos; Malha 2 – Malha de Análise – 7.202.789 elementos; Malha 3 – Malha Refinada – 7.854.813 elementos.

Após a simulação foram geradas linhas em cada uma das soluções em uma altura de 10000 mm em relação à base da turbina e com 10000 mm de comprimento a partir da face externa do pé da torre. Os valores de velocidade sobre a linha, gerou-se a Fig. 4, a seguir, que compara os resultados. Nesta análise, conforme mostra a figura, verifica-se que as malhas 2 e 3 possuem praticamente os

Figura 4 – Gráfico comparativo dos valores de velocidade para diferentes malhas.



mesmos resultados, o que nos confere uma certeza que a malha utilizada é confiável e pode ser utilizada para os estudos propostos.

Método Numérico

Os resultados para os campos de propriedades foram encontrados utilizando o software comercial Ansys CFX 12.1, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF) de Patankar (1980). Foi selecionada a função “power-law” para avaliar os fluxos nas faces dos volumes de controle e o esquema de interpolação *Up-Wind* para avaliar a relação entre a difusão e a advecção das propriedades. O acoplamento entre pressão e velocidade foi resolvido pelo algoritmo SIMPLE de Patankar (1980). Fatores de relaxação foram utilizados uma vez que as equações de conservação apresentam comportamento não-linear.

O critério de convergência adotado foi o RMS - *Root Mean Square* dos valores residuais, e o valor adotado para todas as equações foi inferior a 1×10^{-6} .

O tempo físico para a solução da formulação com este critério de convergência é de cerca de 7 horas. Para tal, usam-se computadores com processadores Intel Core 5, com 4 Gb de RAM.

Resultados

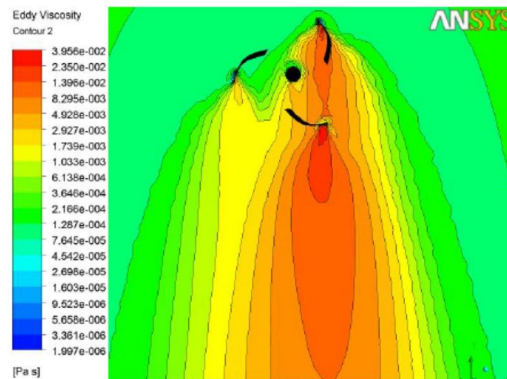
Abaixo pode-se verificar os resultados obtidos para cada uma das configurações geométricas das turbinas, considerando a mesma posição das pás em relação ao escoamento para todos os casos.

Turbina 1

A análise estática da Turbina 1, executada com o modelo *k- ω SST*, mostra a energia ci-

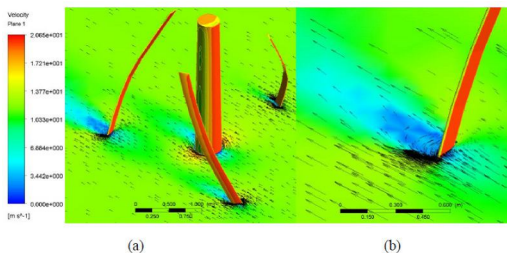
nética turbulenta a qual indica a formação da esteira turbulenta. Na Fig. 5 pode-se verificar o campo de energia cinética turbulenta sobre um plano transversal ao eixo axial da turbina, considerando a geometria e a atmosfera, mostrando o comportamento próximo às pás e a influência do corpo no escoamento do ar atmosférico.

Figura 5 – Energia cinética turbulenta representa a esteira turbulenta sobre Turbina 1.



Na Fig. 6 pode-se verificar os vetores velocidades e o plano de velocidade sobre a turbina e as pás, como já visto anteriormente, sendo que no detalhe é possível verificar as direções dos vetores e a formação de vórtices, principalmente na parte posterior da pá. Como consequência do campo de pressão formado no entorno da turbina e das pás, verifica-se um torque de 47,06 J para o perfil da pá desta turbina.

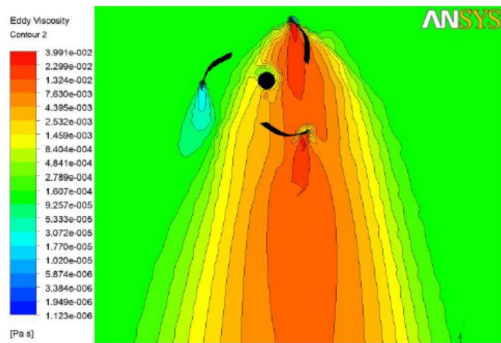
Figura 6 – Plano e vetores velocidades gerados pela solução da Turbina 1. (a) sobre turbina e (b) sobre uma das pás.



Turbina 2

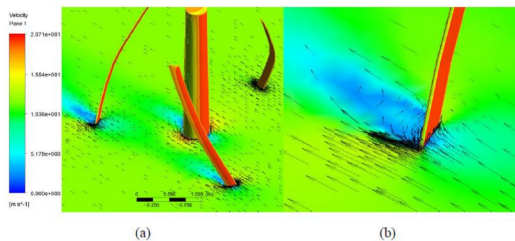
Na análise estacionária da Turbina 2 pode-se verificar alguns aspectos, como a representação da energia turbulenta que pode ser verificada na Fig. 7. Em comparação com os resultados da Fig. 5, que representa a Turbina 1, verifica-se um aumento de 212% no valor superior da energia cinética turbulenta, sendo que na Turbina 1 obteve-se $2,128 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ e na Turbina 2, o valor máximo é de $4,519 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, para valores que estão apresentados na parte anterior das pás.

Figura 7 – Energia cinética turbulenta representada a esteira turbulenta sobre Turbina 2.



Na Fig. 8 pode-se observar o plano e os vetores velocidades sobre a pá, bem como, a recirculação que se forma à jusante da pá.

Figura 8 – Plano e vetores velocidades gerados pela solução da Turbina 2. (a) sobre turbina e (b) sobre uma das pás.



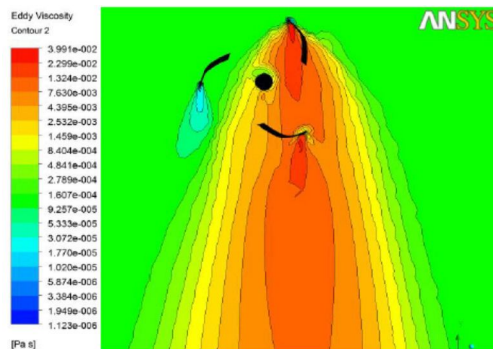
Em comparação aos valores obtidos para a Turbina 1 não verificam-se alterações nas velocidades nem na forma e tamanho do vórtice sobre a zona de baixa pressão no

dorso da pá. Devido a diferente configuração do campo de pressão gerado em função da geometria da pá, aqui o torque resultante é de 41,43J para esta turbina. Comparando-se com os resultados da Turbina 1 verifica-se uma redução de 12%, indicando que a Turbina 1 é melhor para geração de energia em relação à turbina 2.

Turbina 3

Na Fig. 9 está representado o plano de energia cinética turbulenta formado na simulação da Turbina 3. Em comparação com os campos obtidos para as Turbinas 1 e 2, verifica-se que nesta configuração o valor de energia turbulenta máximo é 143% menor que o mostrado na Turbina 2, mas ainda apresenta valor 16% maior que o apresentado na Turbina 1. Além disto verifica-se uma mudança do comportamento da energia turbulenta no plano em relação às Figs. 5 e 7, onde para as Turbinas 1 e 3, os resultados são mais similares e todas as pás ficam na zona turbulenta afetada pelo escoamento, enquanto na Turbina 2 este campo fica fracionado em relação ao campo de energia cinética turbulenta.

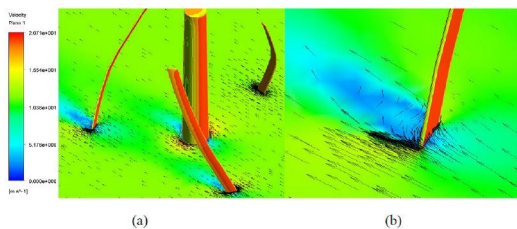
Figura 9 – Energia cinética turbulenta representada a esteira turbulenta sobre Turbina 3.



Na Fig. 10 estão representados os resultados para os vetores velocidade e o plano

de velocidades gerado pela Turbina 3. Comparando estas informações com as Figs. 6 e 8 verifica-se que a recirculação ocorre em todas as configurações, com uma inclinação menor dos vetores na Turbina 3. Porém, os valores de velocidades apresentados nas 3 configurações são basicamente iguais. Na Turbina 3, também como resultado do campo de pressão formado, estima-se que o torque desta geometria apresenta um valor 49% menor que a Turbina 1 e 31% menor que a Turbina 2, tendo assim a pior performance das configurações testadas.

Figura 10 – Plano e vetores velocidades gerados pela solução da Turbina 3. (a) sobre turbina e (b) sobre uma das pás.



Conclusão

A análise estática para um escoamento isotérmico e unidirecional sobre turbinas eólicas geram diversas informações que permitem a avaliação do problema. No presente estudo verifica-se que os resultados estáticos indicam que a melhor configuração, comparando-se as três geometrias, é a da Turbina 1, pois esta turbina apresenta campos de pressão e velocidade mais homogêneos e o maior torque, sendo 12% maior que a Turbina 2 e 49% maior que a Turbina 3. Desta forma, como a quantidade de torque reflete diretamente na eficiência de turbina, conclui-se que a Turbina 1 é a de melhor desempenho aerodinâmico.

REFERÊNCIAS

- BHUTTA, M. A. A.; HAYAT, N.; FARROOQ, A. U.; ALI, Z.; JAMIL, S. R.; HUSSAIN, Z. Vertical axis Wind turbine – A review of various configurations and design techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, Issue 4, p. 1926-1939, 2012.
- CASTELLI, M. R.; ENGLARO, A.; BENINI, E. The Darrieus Wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD. **Energy**, v. 36, Issue 8, p. 4919-4934, 2010.
- CRESESB. **Centro de Referência para energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito**, <www.cresesb.cepel.br>. Acesso em : 16 abr. 2012.
- DOBREV, I. ; MASSOUH, F. CFD and PIV investigation of unsteady flow through Savonius Wind turbine. **Energy Procedia**, v. 6, p. 711-720, 2011. GWEC. **Global Wind Energy Council**, 2010. <http://www.gwec.net/>. Acesso em : ago. 2012.
- HARTWANGER, D.; HORVAT, A. **3D Modelling of a Wind Turbine Using CFD**. In Proceedings of NAFEMS Conference; NAFEMS: Cheltenham, UK, 2008.
- HINZE, J.O. **Turbulence**. 2.ed. McGraw-Hill: New York, 1975.
- ISLAM, M.; TING, D S-K.; FARTAJ, A. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis Wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, Issue 4, p. 1087-

1109, 2008.

LI, Y.; PAIK, K.; XING, T.; CARRICA, P. M. Dynamic overset CFD simulations of Wind turbine aerodynamics. **Renewable Energy**, v. 37, Issue 1, p. 285-298, 2012.

MENTER, F.R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence model for aerodynamic flows. In: 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida, USA, July, **AIAA Journal**, p. 93-2906, 1993.

PALZ, W. **Energia Solar e fontes alternativas**. Hemus: São Paulo, 1995.

PEREIRA, J. P. **Energia: Eficiência e alternativas**. Ciência Moderna: São Paulo, 2009.

PATANKAR, S.V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Hemisphere: Washington, DC, 1980.

WANG, H.; WANG, J.; YAO, J.; YUAN, W.; CAO, L. Analysis on the aerodynamic performance of vertical axis Wind turbine subjected to the change of Wind velocity. **Procedia Engineering**, v. 31, p. 213-219, 2012.

YAO, J.; WANG, J.; YUAN, W.; WANG, H.; CAO, L. Analysis on the influence of turbulence model changes to aerodynamic performance of vertical axis wind turbine. **Procedia Engineering**, v. 31, p. 274-281, 2012.