



VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

INFLUÊNCIA DO REFINAMENTO DA MALHA NOS COEFICIENTES DE ARRASTO, SUSTENTAÇÃO E TORQUE ESTÁTICO DE UMA TURBINA SAVONIUS DE ÚNICO ESTÁGIO

Geovane Nascimento de Oliveira¹, Luiz Alberto Oliveira Rocha², Adriane Prisco Petry², Liércio André Isoldi¹, Rodrigo Spotorno Vieira¹, Elizaldo Domingues dos Santos¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande

Escola de Engenharia

Avenida Itália, km 8, Rio Grande, RS, Brasil

e-mail: engeovaneoliveira@gmail.com

e-mail: liercioisoldi@furg.br

e-mail: spotorno.furg@gmail.com

e-mail: elizaldosantos@furg.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Rua Sarmiento Leite, 425, Porto Alegre, RS, Brasil

e-mail: luizrocha@mecanica.ufrgs.br

e-mail: adrianep@mecanica.ufrgs.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo numérico computacional do escoamento de ar sobre um rotor eólico de eixo vertical baseado no modelo Savonius, em condições estáticas, como as encontradas no início de sua operação. Comparações dos efeitos gerados nos coeficientes de arrasto, sustentação e potência são realizadas ao variar o refinamento da malha empregada no domínio computacional, para diferentes angulações de incidência de vento. Para isso, foi necessário construir um modelo numérico representativo da turbina em questão, considerando o efeito da turbulência. Como recurso, o software GAMBIT® foi utilizado para a confecção do domínio computacional, definição das condições de contorno e criação das duas diferentes malhas, sendo uma definida como grosseira e outra refinada. O software FLUENT® foi empregado para a realização da simulação numérica sobre os domínios gerados baseada no Método dos Volumes Finitos, adequando a metodologia utilizada em outros trabalhos, afim de obter os coeficientes de arrasto, sustentação e torque, e compará-los com a literatura existente. O escoamento é incompressível e turbulento. As simulações são executadas com discretização em duas dimensões e em regime permanente. As equações de conservação de massa e quantidade de movimento médias no tempo (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes) são resolvidas através do método dos volumes finitos. Com relação ao fechamento da turbulência é aplicado o modelo $k-\omega$ SST. A cada simulação, o ângulo das pás em relação à incidência de vento é alterado em 30°, de 0° a 150°. Um total de 12 simulações foram realizadas, sendo 6 para cada malha. Após este estudo, comprovou-se que a utilização de uma malha com um número maior de elementos e estruturada próxima as paredes do rotor tem extrema importância na convergência dos coeficientes de arrasto, sustentação e potência para resultados válidos e com boa concordância com os valores obtidos por outros autores.

Palavras-chave: Simulação Numérica, Escoamento Turbulento, Turbina Savonius, Coeficientes Estáticos, Ângulo de Incidência.

1. INTRODUÇÃO

O planeta vem sofrendo com os graves efeitos decorrentes do mal-uso de fontes de energias não-renováveis desde as últimas décadas. A poluição se encontra em níveis críticos, e uma das possíveis alternativas que podem ser tomadas para amenizar esse problema é a utilização de novas fontes de energia, renováveis e limpas, como a eólica. A emissão de CO₂ pelas turbinas eólicas é nula, ao contrário de usinas termoelétricas, por exemplo, que despejam o composto químico em grande escala na atmosfera pela queima de carvão.

A turbina eólica Savonius, que recebe esse nome por ter sido patenteada pelo engenheiro finlandês Sigurd J. Savonius em 1930, se insere no contexto de aproveitamento energético, mas ainda é pouco difundida. Trata-se de um rotor de eixo vertical pouco convencional, cujas características incluem a simplicidade e o baixo custo de construção, o alto torque na partida, a velocidade angular de operação relativamente baixa (implicando em menor ruído e menor desgaste das partes móveis) e a aceitação de vento em qualquer direção para o funcionamento, eliminando assim a necessidade de sistemas de reorientação (Fraga, 2013).

Devido ao alto torque desenvolvido a baixas velocidades angulares, o rotor Savonius, que funciona principalmente devido às forças de arrasto sobre suas pás, é comumente utilizado em bombeamento e como força motriz. Ao contrário das turbinas eólicas convencionais (de sustentação) que operam bem a altas velocidades angulares e baixo torque. Assim, estas turbinas acabam tendo maior aplicação na geração de energia elétrica, pois o acoplamento com os geradores de energia elétrica, que operam em altas rotações, é facilitado (Akwa, 2010).

O emprego de métodos numéricos em busca da solução das equações que descrevem o escoamento sobre a turbina eólica resulta em aproximações com boa precisão para as características aerodinâmicas da mesma, obtidas a partir dos campos de velocidade e pressão no escoamento. A utilização de métodos numéricos permite economia de tempo e material para instrumentação. De acordo com Patankar (1980) as soluções numéricas permitem a obtenção de resultados fisicamente coerentes com o fenômeno físico estudado quando o processo é realizado adequadamente.

Com o intuito de contribuir com uma matriz energética mais limpa e eficiente, é proposto neste trabalho a avaliação do comportamento de um rotor Savonius sobre incidência de escoamento turbulento e em condições estáticas, como as encontradas no momento de início de operação da turbina, analisando a influência do refinamento da malha sobre os coeficientes de arrasto, sustentação e torque.

2. METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, o software GAMBIT[®] foi utilizado na confecção do domínio computacional, da geometria e das malhas empregadas. Após obtido o domínio representativo, o software FLUENT[®] foi empregado para a obtenção, através da resolução das equações de conservação com o Método dos Volumes Finitos, campos de pressão e velocidade, além dos coeficientes de torque, sustentação e arrasto. Apesar da consideração de um escoamento turbulento, as simulações foram realizadas em um domínio bidimensional, ou seja, considera-se que não existem variações nos coeficientes ao longo da terceira dimensão do rotor Savonius.

Para a verificação da metodologia empregada no modelo de turbina proposto, foram realizadas comparações com dados numéricos existentes na literatura, como os desenvolvidos por Akwa (2010).

2.1 Descrição do Domínio Computacional

O rotor proposto neste trabalho é do tipo vertical, composto por 2 pás separadas entre si por 90°, do tipo semicircular, como mostrado na Fig. 1, onde d_r é o diâmetro do rotor, θ é o ângulo de incidência de vento, e é a espessura das pás, a é o afastamento das pás, s é a sobreposição das pás, c é o comprimento de corda, e V_0 é a velocidade não perturbada do escoamento. No caso em análise, a espessura foi definida como sendo $e = 4$ mm e as pontas arredondadas, dispostas em uma circunferência de diâmetro $d_r = 1000$ mm e de altura $H = 4000$ mm, como mostra a Fig. 2. O afastamento entre as pás a é nulo e a sobreposição s é correspondente a 15% da dimensão da corda adotada, pois, segundo Akwa (2010) e Alaimo et al. (2013), afastamentos nulos e sobreposições com valores entre 10 e 30% do comprimento da corda proporcionam bons resultados para o coeficiente médio.

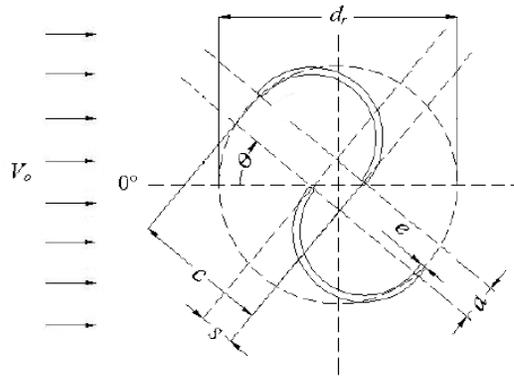


Figura 1. Representação esquemática de um rotor Savonius (Adaptado de Akwa, 2010)

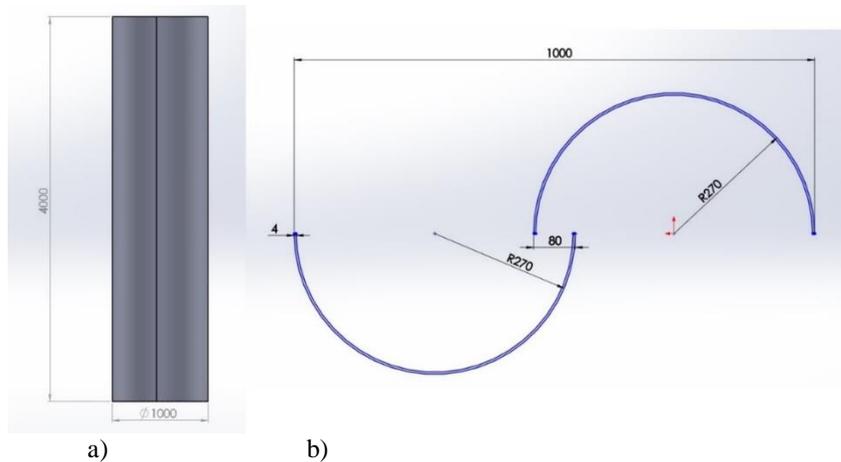


Figura 2. Rotor proposto (unidade em mm): a) Vista frontal; b) Vista superior.

O domínio computacional, região delimitada que ocorre o escoamento ao redor da turbina Savonius, foi definido como tendo um comprimento entre a zona de entrada e saída do escoamento de $L = 36000$ mm e altura de $H = 12000$ mm. A turbina é posicionada a $X = 6000$ mm de distância da zona de entrada do escoamento e a uma altura intermediária de $Y = 6000$ mm distante das linhas superior e inferior, a fim de evitar que a velocidade imposta na entrada do domínio não seja afetada pelas superfícies de contorno do domínio, especialmente as superfícies inferior e superior. Além disso, o rotor foi disposto a uma distância de 30000 mm da zona de saída do escoamento para que, desta forma, não ocorra influência sobre o escoamento na região da turbina devido a essa condição de contorno. Foi imposta na saída uma pressão prescrita igual a atmosférica ($p = 101,325$ kPa). A Figura 3 representa a geometria do domínio computacional empregado neste trabalho.

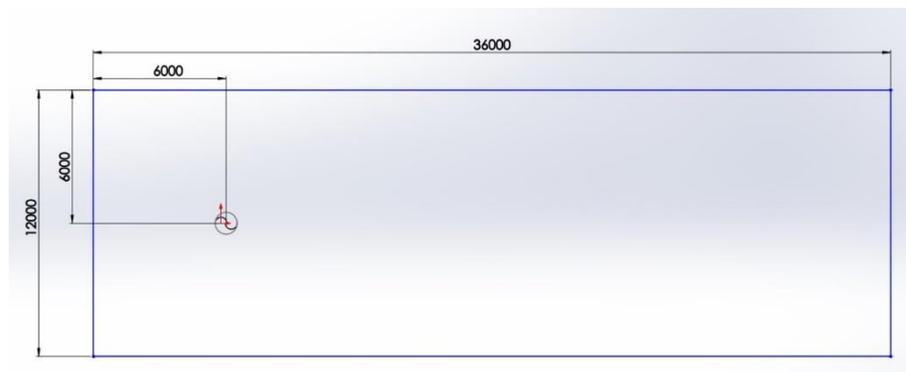


Figura 3. Representação das dimensões do domínio computacional

2.2 Condições de Contorno

As condições de contorno foram impostas no software FLUENT®, sendo a entrada do escoamento definida com uma velocidade prescrita ($V_0 = 7 \text{ m/s}$) de forma que se tenha um escoamento com número de $Re_D = 433.500$, enquanto na saída impõe-se uma condição de pressão prescrita ($p = 101,325 \text{ kPa}$). As superfícies superior e inferior possuem a condição de simetria. Essa última é imposta de forma a evitar que as paredes superior e inferior causem alguma razão de bloqueio sobre a região da turbina, o que poderia afetar os coeficientes estáticos obtidos. As pás do rotor receberam a condição de contorno de não-deslizamento e impermeabilidade (*wall*). O próximo passo foi a caracterização das zonas de fluido, onde o ar foi definido como fluido de trabalho. Foram consideradas as seguintes propriedades termofísicas: $\rho = 1,18415 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(ms)}$.

2.3 Malhas Empregadas

Sabe-se que quanto maior o número de células, menor será o erro na solução do Método dos Volumes Finitos (Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007; FLUENT, 2007). Como o intuito deste trabalho é analisar o efeito do refinamento da malha nos coeficientes de torque, arrasto e sustentação, a discretização espacial do domínio foi feita de duas maneiras, sendo que a primeira gerou uma malha denominada grosseira, e a segunda, definida como malha refinada. Vale destacar que, mesmo a malha grosseira é bastante refinada na região da turbina. Contudo, é empregada uma malha triangular próximo as paredes.

2.3.1 Malha grosseira

A malha empregada neste estudo tem formato triangular e o espaçamento foi estipulado através da divisão das linhas do domínio. As linhas que representam as zonas de entrada e saída do escoamento foram divididas em 100 partes, enquanto que as linhas simétricas (superior e inferior) foram divididas em 200 partes. Já as pás têm suas bordas divididas em 50 partes e os contornos das extremidades em 4 partes. A Figura 4 mostra as divisões recém citadas, enquanto que as Figs. 5 e 6 mostram as malhas geradas na região das pás e no domínio completo, respectivamente, totalizando 142.526 elementos e 71.670 nós.

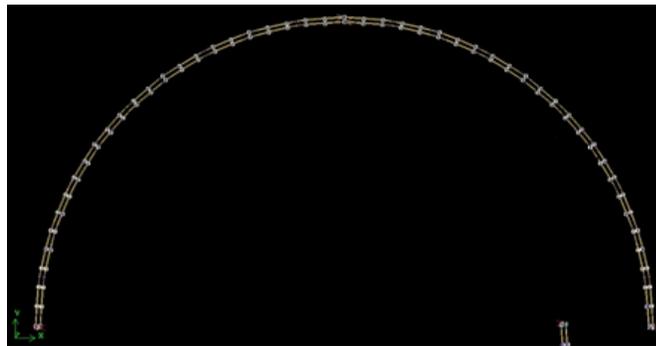


Figura 4. Divisão da malha grosseira nas linhas que definem as pás da turbina.

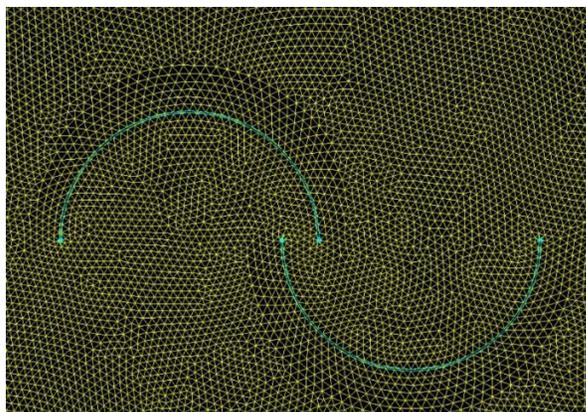


Figura 5. Malha grosseira empregada na região das pás.

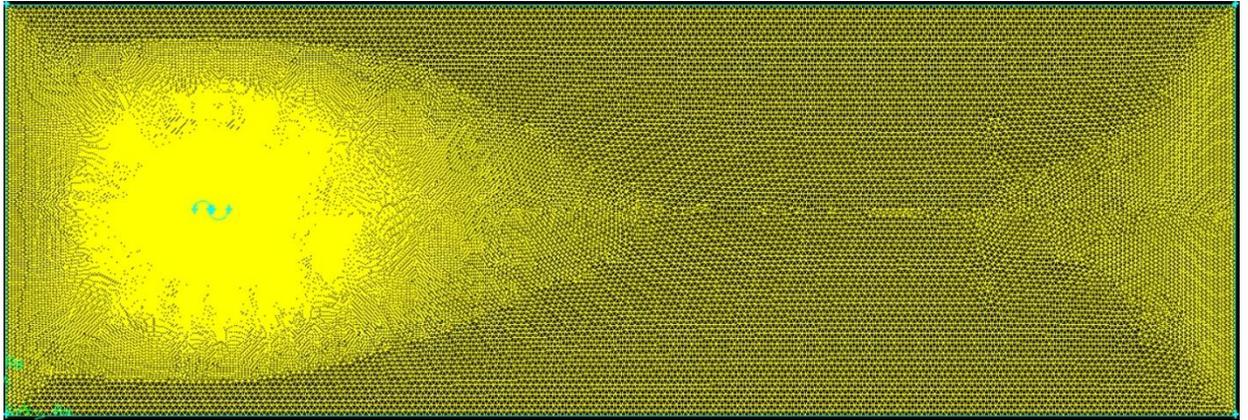


Figura 6. Malha grosseira empregada no domínio computacional.

2.3.2 Malha refinada

Com o intuito de obter uma malha mais refinada em comparação com a criada anteriormente, foram geradas duas novas zonas próximas às pás, onde a análise do escoamento deve ser mais precisa, de modo que fosse possível dividir a malha com diferentes parâmetros. A primeira zona, denominada de alma da pá, possui mesma geometria que as pás porém em escala de 7,75. Em outras palavras, enquanto a espessura das pás é de $e = 4$ mm, as almas possuem $e_a = 31$ mm. A segunda zona, denominada de interface, foi gerada através de uma circunferência de raio $R = 550$ mm, concêntrica com o eixo de rotação da turbina.

O espaçamento foi estipulado através das divisões das linhas do domínio. As linhas das pás e das almas foram divididas em 500 partes, as extremidades das pás e das almas em 30 partes, a interface em 50 partes, as linhas de simetria (superior e inferior) em 120 partes, e as linhas de entrada e saída em 30 partes. A malha foi definida como sendo de formato retangular nas almas das pás, e formato triangular dentro da região de interface e no restante do domínio. Somando as três regiões, alma das pás, interface e o restante do domínio, o número total de elementos presentes na malha foi de 325.362, com 173.480 nós. A Figura 7 demonstra a malha obtida próxima às extremidades das pás, enquanto que a Fig. 8 mostram a malha geradas na região do domínio completo.

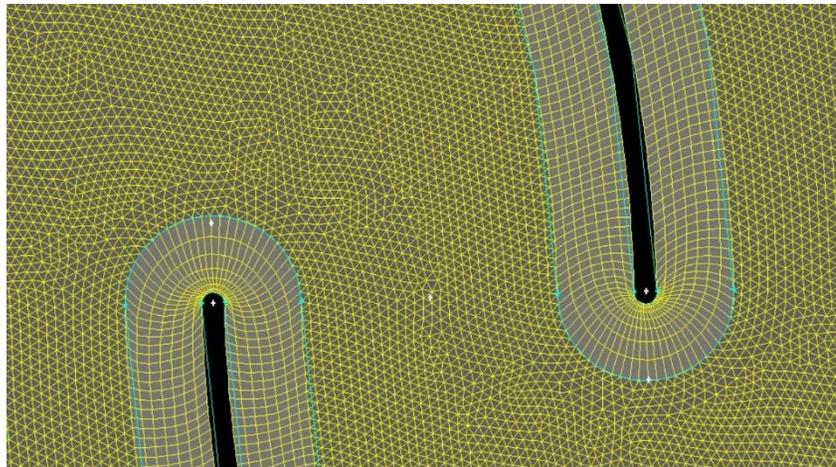


Figura 7. Malha refinada empregada próxima às extremidades das pás.

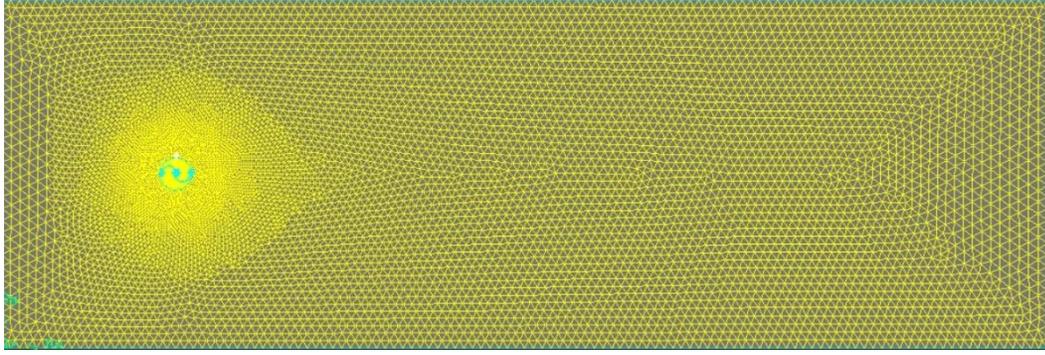


Figura 8. Malha refinada empregada no domínio computacional.

2.4 Modelagem Matemática

A equação da conservação da quantidade de massa é apresentada por Schlichting (1979) da seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

onde v_i - velocidade na direção i , $i = 1$ e 2 (m/s); x_i - corresponde a coordenada espacial, $i = 1$ e 2 (m).

A Eq. (1) recém citada é válida para escoamentos incompressíveis. Como as velocidades neste trabalho serão menores do que a velocidade do som, o escoamento poderá ser considerado como incompressível.

A equação da conservação da quantidade de movimento é descrita como:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{v}_i \bar{v}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \nu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \right\} \quad (2)$$

onde: p é a pressão (N/m²); ν é a viscosidade cinemática (m²/s); ρ é a massa específica do fluido (kg/m³); δ_{ij} é o operador delta de Kronecker; t representa o domínio de tempo (s), $i = 1$ e 2 , $j = 1$ e 2 .

Na solução do problema de escoamento turbulento, a modelagem clássica da turbulência (RANS - do inglês: *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) foi empregada à situação por permitir a análise bidimensional a um menor custo computacional (Akwa, 2010).

O modelo de turbulência $k - \omega$ SST foi empregado para a modelagem das tensões de Reynolds, visto que, segundo Akwa (2010), os resultados obtidos através das simulações são próximos dos valores obtidos experimentalmente.

O modelo de turbulência $k - \omega$ consiste em relacionar as tensões de Reynolds com a taxa de deformação do campo médio através de uma viscosidade turbulenta, que é determinada pelo modelo. Para o caso de escoamento incompressível, o tensor das tensões de Reynolds pode ser descrito como:

$$\tau_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

onde: ν_t é a viscosidade turbulenta (m²/s); k é a energia cinética da turbulência (m²/s²).

Segundo Wilcox (2002), a viscosidade turbulenta é dada por:

$$\nu_t = \alpha_\infty \frac{\rho k}{\omega} \quad (4)$$

onde α_∞ é um coeficiente de fechamento, onde foi empregado o valor padrão do software.

Este modelo resolve duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta (k) e outra para a taxa específica de dissipação (ω). A energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação específica são, respectivamente:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G_k - Y_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right\} + G_\omega - Y_\omega \quad (6)$$

onde G_ω representa a geração de ω , G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido a gradientes de velocidade média, Y_k e Y_ω representam a dissipação de k e ω devido à turbulência.

2.5 Modelagem Numérica

O solver utilizado neste estudo foi o *Pressure-Based*. Neste algoritmo, a limitação de conservação da massa do campo de velocidades é feita através da resolução de uma equação de pressão ou de correção de pressão. A equação de pressão deriva das equações de quantidade de movimento e de continuidade. Como as equações governantes são não-lineares e dependentes umas das outras, o processo se torna iterativo até que uma convergência seja alcançada (FLUENT, 2007).

O esquema de advecção *Upwind* de Segunda Ordem foi definido pelo fato de também ser utilizado por outros autores, por exemplo (Akwa, 2010). O acoplamento pressão-velocidade foi definido como SIMPLE, devido ao fato de que este foi o método aplicado no trabalho de referência de (Akwa, 2010) e de (Akwa, et al., 2012).

Os resíduos empregados foram de 10^{-5} para a continuidade, velocidades, k e ω , sendo que a convergência ocorre quando os resíduos dos cálculos iterativos se encontram abaixo deste valor. O tempo de simulação adotado equivale a $t_f = 8s$ dentro do domínio computacional. Foi empregado um passo de tempo de $\Delta t = 1,0 \times 10^{-4}$ s. Desta forma, é possível garantir que o escoamento percorra todo o domínio com tempo suficiente para que o mesmo atinja o regime permanente e ocorra estabilização dos coeficientes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para ambos os casos de malhas, grosseira e refinada, as condições exibidas pela Tab. 1 foram impostas.

Velocidade de entrada do ar	$V_0 = 7$ m/s
Diâmetro do rotor	$D = 1$ m
Número de Reynolds	$Re_D = 433500$
Pressão de saída	$p = 101325$ Pa
Intensidade de turbulência na entrada	IT = 1%
Comprimento característico da turbulência	= 0,01m

As simulações deste trabalho foram executadas com discretização 2D em regime permanente, ou seja, os termos de variação local das equações de conservação de quantidade de movimento não foram resolvidos. As simulações em regime permanente visam obter as características aproximadas da turbina em condições estáticas com relativo baixo custo computacional e reproduzir as simulações realizadas em Akwa (2010).

Cada malha passou por 6 simulações, sendo que as posições angulares das pás em relação a incidência de vento consideradas foram de: $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ e 150° . Isso foi realizado porque o ciclo dos coeficientes estáticos se repete a cada 180° e a posição angular de 0° equivale a de 180° .

Como a turbina Savonius expõe diferentes contornos das pás ao vento de incidência na medida em que elas rotacionam, é de se esperar que os coeficientes de arrasto, sustentação e torque variem. Em consequência disso, o torque resultante de um rotor Savonius varia de acordo com o ângulo de rotação em que se encontra (Silva Júnior, 2010).

A Figura 9 pode ser utilizada para exemplificar o comportamento obtido em uma simulação em regime permanente da turbina Savonius na posição angular $\theta = 90^\circ$ com escoamento de 7 m/s. Como pode se observar, surge uma esteira de vórtices no escoamento, e devido aos elevados números de recirculações, os valores dos coeficientes oscilam em torno de uma média.

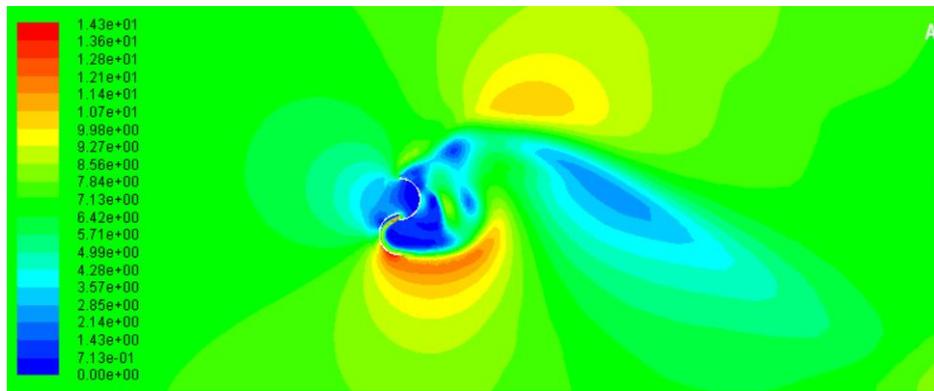


Figura 9. Campo de velocidades no escoamento com o rotor estático, para $\theta = 90^\circ$ e $V_o = 7\text{m/s}$

A verificação da influência do refinamento das malhas nos coeficiente de arrasto, sustentação e de torque estático do rotor Savonius com único estágio foi realizada para θ variando em 30° , de 0° até 150° . A Tabela 2 mostra os valores médios dos coeficientes de arrasto, sustentação e torque na superfície da turbina. Estes valores foram obtidos pelo *software* FLUENT® através da integração das áreas das pás, conhecidos os campos de velocidades e pressão. As Figuras 10, 11 e 12 foram geradas para melhor visualização do efeito do ângulo de incidência sobre os coeficientes de arrasto, sustentação e torque, respectivamente, sendo que os valores obtidos por Akwa (2010) foram incluídos nos gráficos de forma a comparar quantitativamente as duas malhas com diferente refinamento e os valores obtidos pelo autor com outro software numérico (Star-CCM+).

Tabela 2. Variação dos valores obtidos para coeficiente de arrasto (C_d), sustentação (C_l) e torque (C_m) estático para θ variando em 30° , de 0° até 150° , em função do refinamento da malha

	Malha Refinada (325362 elementos)			Malha Grosseira (142526 elementos)		
	C_d	C_l	C_m	C_d	C_l	C_m
0°	0.31044213	0.40131407	0.25395321	0.06998301	0.43964517	0.75925447
30	0.64354832	0.37197848	0.68362772	0.19724558	-0.0216513	1.19103213
60	1.15577718	-0.4434067	0.71291973	1.66305425	-1.050028	1.06381344
90	2.0150942	-0.9577551	0.45908701	2.84326686	-1.1375058	0.92978092
120	1.93833529	-1.402887	0.31063086	2.75186757	-1.47214	0.711179644
150	0.58363726	-0.2637636	0.33407721	1.20743116	-1.3159969	0.53108056

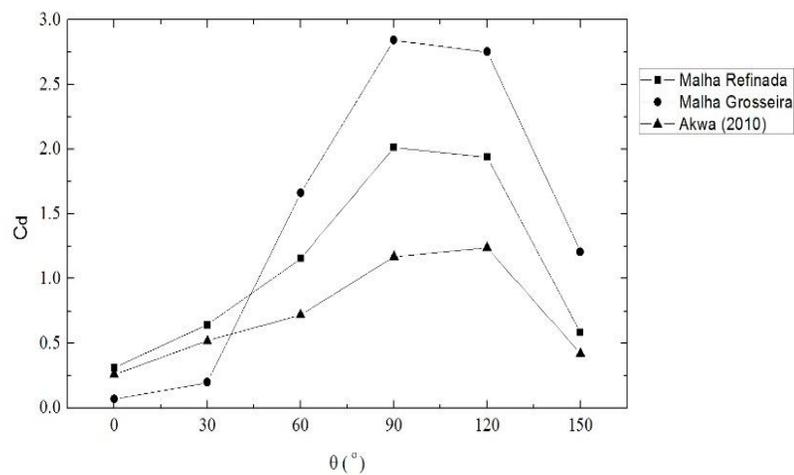


Figura 10. Variação do coeficiente de arrasto (C_d) em relação ao ângulo de incidência de vento obtido com as diferentes malhas estudadas aqui e comparação com os resultados obtidos por Akwa (2010).

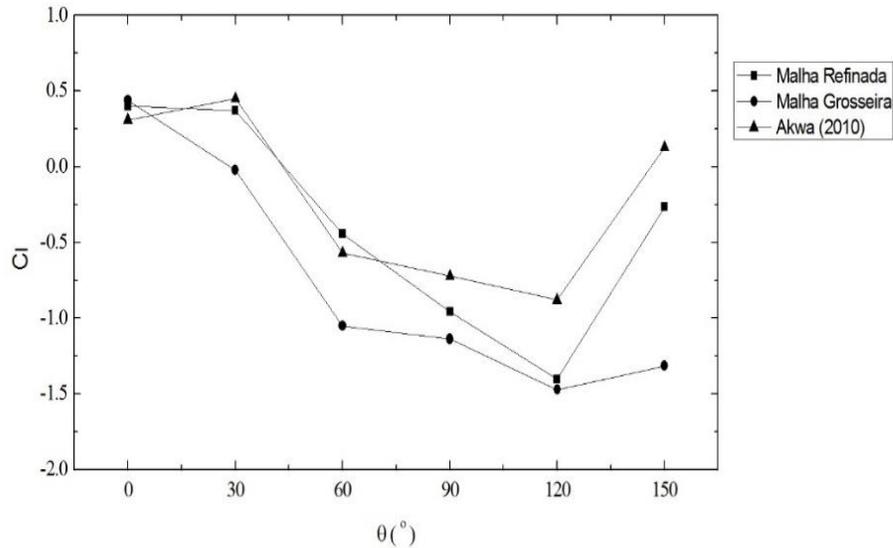


Figura 11. Variação do coeficiente de sustentação (C_l) em relação ao ângulo de incidência de vento obtido com as diferentes malhas estudadas aqui e comparação com os resultados obtidos por Akwa (2010).

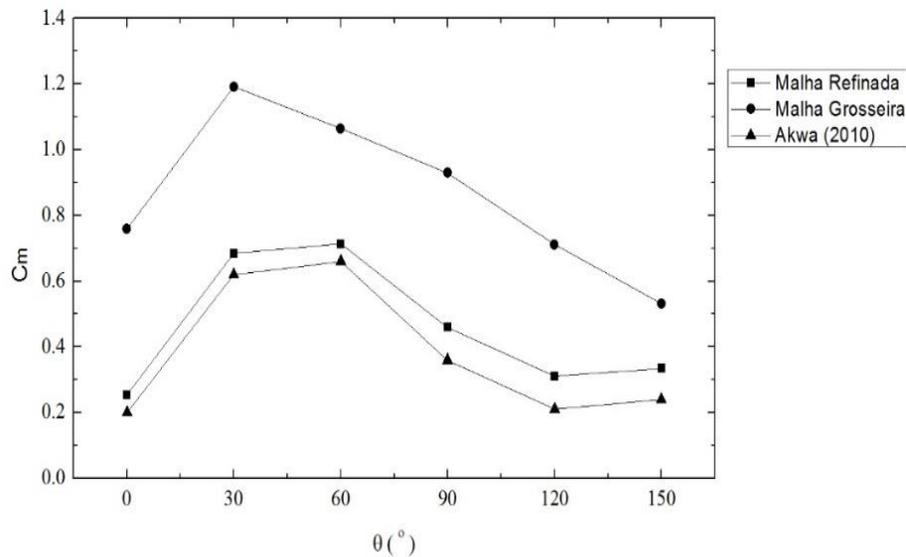


Figura 12. Variação do coeficiente de torque (C_m) em relação ao ângulo de incidência de vento obtido com as diferentes malhas estudadas aqui e comparação com os resultados obtidos por Akwa (2010).

Analisando os gráficos dos coeficientes para condições estáticas, pode-se verificar que o emprego de uma malha com um número maior de elementos, principalmente na região próxima às pás do rotor, resulta em valores mais próximos daqueles obtidos por Akwa (2010), definindo-os, assim, como resultados válidos para este tipo de simulação. A malha grosseira não exprime o que realmente está atuando no rotor, pois a falta de um número maior de elementos impossibilita uma acurada caracterização da zona de interferência entre pá e fluido.

As curvas resultantes da malha refinada apresentam um comportamento muito similar com as obtidas por Akwa (2010), principalmente a curva do coeficiente de torque (C_m). Também é observado que para angulações de 90° e 120° , os valores de coeficiente de arrasto e de sustentação se distanciam consideravelmente, podendo estarem relacionados com não uniformidade da malha na região próxima à interface, onde os elementos têm uma notável variação de tamanho, o que deve ser melhorado para futuros trabalhos. Apesar disso, a estratégia de refinar a malha com elementos retangulares próximo a região das pás da turbina funcionou adequadamente. Em comparação com Akwa (2010), os maiores distanciamentos observados nessas duas angulações utilizando a malha com maior refinamento representaram variações relativas de 72% para o C_d , 59% para o C_l e 45% para o C_m . Para a malha grosseira, as variações relativas chegaram a 143% para o C_d , 67% para o C_l e 239% para o C_m .

4. CONCLUSÃO

Foi realizado um estudo numérico de um escoamento de ar turbulento sobre uma geometria semelhante a uma turbina eólica do tipo Savonius avaliando-se o efeito do ângulo de incidência do escoamento com a turbina sobre os coeficientes estáticos de arrasto, sustentação e torque para duas diferentes malhas denominadas aqui de grosseira e refinada (com malha retangular estruturada próxima a superfície da turbina). Para a simulação do escoamento de ar incompressível e turbulento as equações de conservação de massa e quantidade de movimento médias no tempo (RANS) foram resolvidas com o método de volumes finitos. Para o fechamento da turbulência foi empregado o método $k - \omega$ SST.

As soluções obtidas quando um refinamento maior da malha é utilizado são representativas do fenômeno analisado. Há uma boa concordância com os resultados numéricos obtidos por Akwa (2010), principalmente para o efeito do ângulo de incidência sobre o torque estático. Para os coeficientes de arrasto e sustentação, a tendência foi similar, mesmo com algumas discrepâncias nos resultados. Avaliar esta questão exige um estudo mais amplo a respeito, com a proposição de novas malhas com refinamento melhorado, principalmente na região de interface da turbina. Apesar disso, o refinamento com elementos retangulares próximo as pás da turbina se mostrou adequado para a abordagem desse tipo de problema, sendo esta estratégia recomendada para esse tipo de problema. O desenvolvimento desta metodologia de estudo de um rotor de eixo vertical em um domínio bidimensional possibilitou um melhor entendimento da influência da malha sobre a análise quantitativa do problema. Mesmo que os campos qualitativos obtidos com as diferentes malhas tenham sido similares, o refinamento próximo as pás da turbina são fundamentais nesse tipo de problema para análise e recomendações quantitativas para os coeficientes estáticos. Além disso, foi possível avaliar a dependência dos coeficientes estáticos ao ângulo de incidência de vento.

Os resultados simulados exibidos neste trabalho indicam que o modelo de turbulência empregado aqui, $k - \omega$ SST, é capaz de representar em bom nível as características do escoamento necessárias para avaliar o desempenho estático do rotor Savonius, podendo ser extrapolada para a metodologia de malha em movimento. Acredita-se que a metodologia empregada é adequada para avaliar este tipo de problema. Contudo, são necessárias maiores investigações com relação a discretização na região de interface entre o domínio onde a turbina está contida e o domínio externo, bem como testes de refinamento na região das paredes.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores L. A. O. Rocha, A. P. Petry, L. A. Isoldi e E. D. dos Santos agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akwa, J.V., 2012. Análise Aerodinâmica de Turbinas Eólicas Savonius empregando Dinâmica dos Fluidos Computacional. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2010.
- Akwa, J.V., Silva Júnior, G. A. da, Petry, A. P., 2012, Discussion on the Verification of the Overlap Ratio Influence on Performance Coefficients of a Savonius Wind Rotor using Computational Fluid Dynamics, *Renewable Energy*, Vol. 38, pp. 141 – 149.
- Alaimo, A., Esposito, A., Milazzo, A., Orlando, C., Trentacosti, F., 2013, Slotted Blades Savonius Wind Turbine Analysis by CFD. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Energies*, Vol. 6, pp. 6335 - 6351.
- FLUENT, documentation manual – Fluent 6.3.16, 2007.
- Fraga, G. C., 2013, Análise Numérica do Efeito de Bloqueio no Escoamento sobre uma Turbina Savonius em Túnel Aerodinâmico, Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2013.
- Patankar, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York: McGraw Hill, 1980.
- Schlichting, H. “Boundary-layer Theory”, New York: McGraw-Hill, 1979.
- Silva Júnior, G. A., 2010, Análise da Influência de Diferentes Razões de Sobreposição no Desempenho de Turbinas Eólicas Savonius empregando Dinâmica dos Fluidos Computacional, Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2010.
- Versteeg, H. K.; Malalasekera, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Pearson, 2007.
- Wilcox, D. C. *Turbulence modeling for CFD*, 2nd Ed., DCW Industries, La Canada, USA, 2002.

7. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material apresentado neste artigo.