

PARAMETRIZAÇÃO E ANÁLISE DO ESCOAMENTO DE UMA TURBINA SAVONIUS UTILIZANDO O ANSYS WORKBENCH®

Gustavo C. S. Diniz¹ (IC), Angie L. E. Sarmiento¹ (PQ)

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Ansys. Computational Fluid Dynamics (CFD). Parametrização. Turbina eólica de eixo vertical. Turbina Savonius.

Introdução

A energia eólica tem-se despontado como uma alternativa cada vez mais presente no sistema energético de vários países – inclusive o Brasil. Entretanto, a maior parte dessa energia é gerada em plantas industriais, com turbinas de grande porte. Esse tipo de equipamento possui algumas limitações como o alto custo de implantação, regulação por parte da legislação e dependência de uma certa incidência mínima de ventos.

Nesse sentido, o uso de pequenas e microturbinas para geração de energia elétrica ou conversão direta de energia eólica em mecânica se torna atrativo. Entre os diversos designs de turbinas que se prestam a esse propósito, se destaca a turbina Savonius. Ela possui uma configuração de eixo vertical, é movida, primariamente, pelo arrasto do vento em suas pás e é capaz de gerar um alto torque quando comparada com outros modelos. Por conta de suas propriedades, muitos estudos têm sido conduzidos para avaliar seu comportamento e buscar formas otimizadas para sua construção.

O trabalho presente é uma continuação de “Análise do escoamento em uma turbina eólica de eixo vertical tipo Savonius mediante CFD” Fernandes (2019), buscando estudar formas de se otimizar o modelo de turbina analisada. Para tal, foi recriada a geometria anteriormente estudada e uma malha que levou a soluções em regime permanente e transiente semelhantes. Procedeu-se então às simulações em regime permanente e transiente para avaliação do comportamento da turbina e por fim um estudo sobre a parametrização da turbina de forma a permitir uma futura otimização pela metodologia de geração de superfície de resposta do software comercial Ansys®, visando obter uma potência ótima.

Metodologia

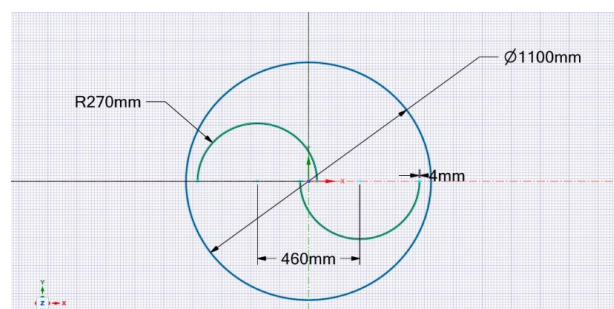
Foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito das

turbinas eólicas, em especial da turbina Savonius, da geração de energia eólica, do uso do Ansys Fluent® para estudos aerodinâmicos e de parametrização entre outros temas pertinentes em livros, artigos, teses e cursos.

A seguir, iniciou-se o a elaboração da geometria. Ela e todo o trabalho computacional que se seguiu foram realizados em uma workstation do grupo de pesquisa FDT (Fluid Dynamics and Turbomachinery) da UNIFEI, com processador Intel Xeon E-2236, 64GB RAM e placa gráfica NVIDIA Quadro P2200 5GB. A versão utilizada do Ansys foi a 2022, tanto R1 quanto R2, instalada em um OS Windows 10 Pro for Workstations.

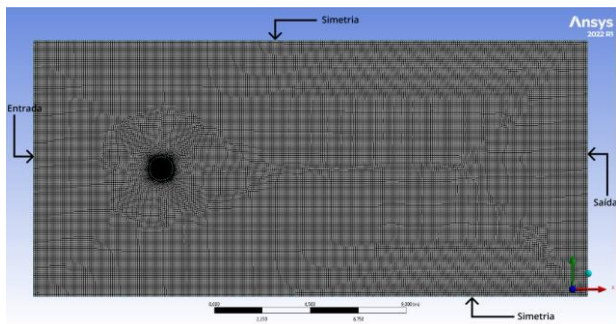
A geometria da turbina e do domínio fluidodinâmico, como o detalhe mostrado na Figura 1, foi construída utilizando o Ansys DesignModeler®, tendo como referência o trabalho de Fernandes (2019).

Figura 1 – Geometria básica das pás da turbina.



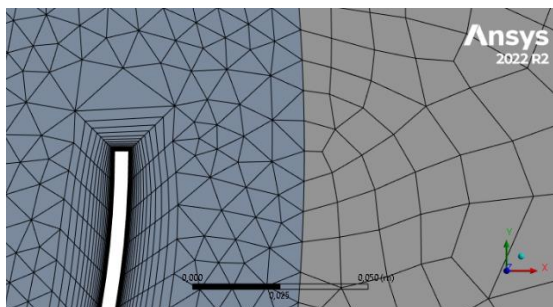
A geometria foi exportada para o Ansys Mesh®, onde a malha, ilustrada pela figura 2, foi gerada. Ela foi configurada para permitir utilizar o método Sliding Mesh durante a simulação transiente no Ansys Fluent® que se seguiria. A região do domínio fluido dinâmico recebeu elementos quadrangulares e foi configurada com as condições de contorno entrada, saída e simetria.

Figura 2 – Visão geral da malha computacional.



Na figura 3, pode-se ver que a região do rotor e a próxima às pás da turbina receberam maior refinamento afim de capturar melhor o escoamento de ar complexo gerado pelas pás. Foram utilizados elementos triangulares de menores dimensões, uma gradação no tamanho dos elementos partindo das bordas da zona rotativa para o domínio fluidodinâmico e 23 camadas de elementos prismáticos nas pás.

Figura 3 – Detalhe da malha na região do rotor da turbina.



Por fim, obteve-se uma malha com 72.450 elementos, *Aspect Ratio* médio de 7,2766 e *Orthogonal Quality* médio de 0,96986. De acordo com ANSYS (2021), esses são valores razoáveis e são compatíveis com os trabalhos de Akwa (2010) e Fernandes (2019).

Em seguida, a malha foi importada para o *Ansys Fluent*®. Primeiramente, foram configuradas as condições de contorno, velocidade na entrada de 7m/s e pressão na saída de 101.325 Pa, tendo por base Fernandes (2019). Foram utilizadas velocidade na entrada e pressão na saída por facilitarem a convergência da solução e serem mais usuais na literatura. O método de solução empregado foi o *SIMPLE default*.

O modelo de turbulência utilizado foi o RANS $K-\omega$ que, de acordo *Ansys Fluent User Guide*, ANSYS (2021), estima a turbulência por duas equações diferenciais parciais com duas variáveis, onde k é a energia cinética de turbulência e ω é a taxa específica de dissipação da

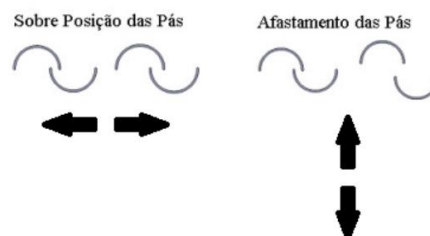
energia cinética de turbulência k . A massa específica do ar foi corrigida para 1,18415 kg/m³ e a viscosidade para 1,7894 x 10⁻⁵ kg/m s seguindo Fernandes (2019).

Os resíduos, foram configurados para 10⁻³, para reduzir o custo computacional e por não haver divergências significativas para critérios de convergência mais estreitos.

Para as simulações em regime permanente, manteve-se o rotor estático na posição $\Theta = 0^\circ$ e procederam-se 20.000 iterações. Esse tipo de simulação teve duração média aproximada de 2h. Já para as simulações em regime transiente, o rotor foi posto a girar à 14 rad/s. Foram realizados 2.400 *Time steps* com 0,01s de duração. Nessas configurações a simulação levou cerca de, aproximadamente, 2h e 30min para ser concluída.

Após as simulações, procedeu-se uma nova etapa de revisão da literatura, buscando-se determinar quais as principais características geométricas que influenciam o comportamento aerodinâmico da turbina.

Figura 4 – Definição de afastamento e sobreposição das pás.
Fonte: AKWA (2010) adaptado.



Finalmente, decidiu-se qual seria o item a ser parametrizado e procedeu-se a parametrização da sobreposição e afastamento das pás da turbina como parâmetros de entrada e do torque como parâmetro de saída, de modo a permitir uma futura otimização utilizando os recursos do *Ansys Design Exploration*® em um trabalho posterior.

Resultados e discussão

As primeiras simulações, em regime permanente, foram configuradas com a turbina estática, vento incidente à $V=7\text{m/s}$, pressão na saída de 101.325 Pa e as pás da turbina na posição $\Theta = 0^\circ$. Os coeficientes de arrasto, torque e potência foram computados e podem ser conferidos na Tabela 1. Houve uma pequena discrepância que pode ser considerada razoável em relação ao trabalho de referência, apesar de serem usadas as mesmas condições iniciais e de contorno e malha semelhante.

Tabela 1 – Comparação dos principais coeficientes obtidos para a simulação em regime permanente.

Estudo	C_A	Erro C_A [%]	C_P	Erro C_P [%]	C_T	Erro C_T [%]
Fernandes (2019)	0,258	-	0,306	-	0,210	-
Presente trabalho	0,210	18,6	0,325	6,3	0,227	8,2

Os *plots* de pressão (Figura 5) e velocidade (Figura 6), da simulação permitem observar o comportamento do escoamento de ar nas regiões concava e convexa das pás, com evidência para as zonas de alta velocidade que correspondem a zonas de baixa pressão e vice-versa, a região de estagnação na extremidade à montante do rotor e a recirculação na região central da turbina como era esperado de acordo com Akwa (2010).

Figura 5 – Contornos de pressão estática na região da turbina, obtido da simulação em regime permanente.

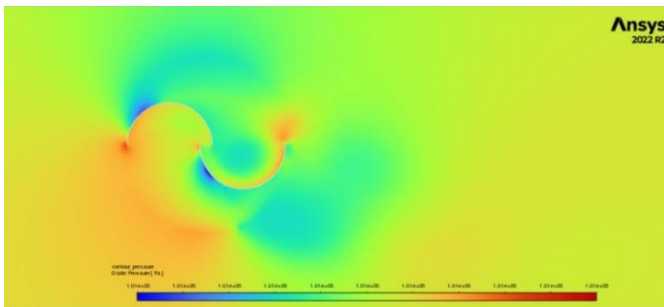
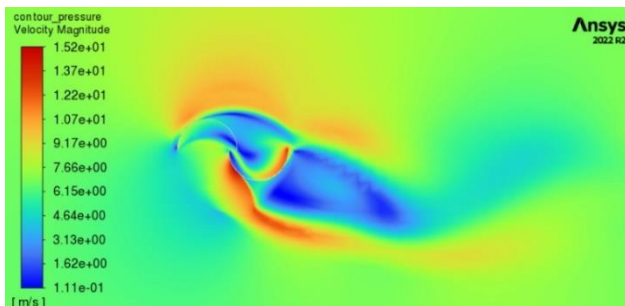


Figura 6 – Contornos de magnitude de velocidade na região do rotor, obtido da simulação em regime permanente.



As simulações em regime transiente ocorreram com a turbina girando à 14 rad/s, vento incidente à 7 m/s e pressão na saída de 101.325 Pa. Foram computados os coeficientes de arrasto, sustentação, torque e potência, além do torque e potência, que podem ser consultados na

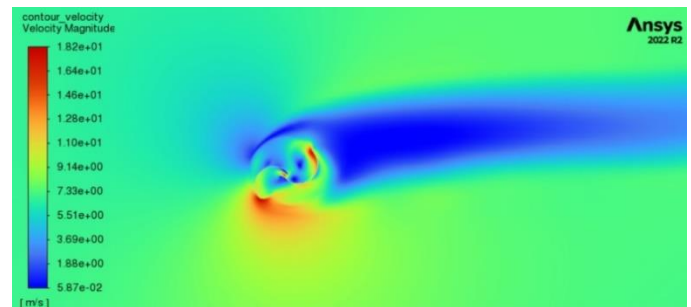
Tabela 2. Nessa situação, os resultados apresentaram melhor aderência às referências.

Tabela 2 – Principais coeficientes obtidos para a simulação em regime transiente.

Estudo	C_A	C_S	C_T	T [Nm]	P [W]	C_P
Akwa (2010)	1,08	1,14	0,25	14,5	203	0,25
Fernandes (2019)	1,11	0,99	0,21	11,94	167,21	0,21
Presente trabalho	1,13	0,87	0,19	10,51	147,18	0,19

Os contornos de magnitude de velocidade (Figura 7) permitem identificar os principais escoamentos descritos por Nakajima et al (2008), o escoamento Coanda na região externa da pá de avanço, o escoamento de arrasto da pá de retorno e o escoamento entre as pás.

Figura 7 – Contornos de magnitude de velocidade na região das pás da turbina em regime transiente.

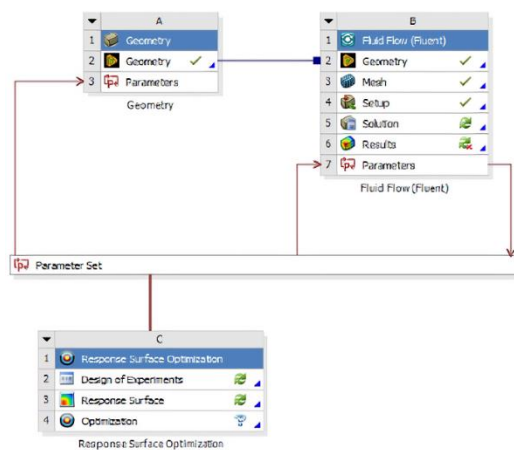


Partiu-se então para a parametrização. Em uma nova etapa de revisão bibliográfica, foram consultados trabalhos como os de Akwa (2010), M. Mohamed (2011) e Roy (2013) que possuem discussões sobre as características que influenciam o comportamento da turbina, como número de pás, número de estágios, presença de estatores, formato e perfil dos rotores entre outros. Segundo M. Mohamed (2011), a parametrização é uma etapa anterior a otimização, sendo vital para a metodologia utilizada no *Ansys Design Exploration*®, que necessita de parâmetros de entrada atrelados à geometria ou à malha e parâmetros de saída relacionados ao *solver*.

Desse modo, optou-se por selecionar como parâmetros de entrada, a sobreposição e o espaçamento entre as pás, pois esses parâmetros têm grande influência no escoamento de ar interno da turbina e, portanto, afetam a potência e torque estático. Para isso, as cotas representando essas dimensões foram parametrizadas no *Ansys*

DesignModeler®. Já os parâmetros de saída estão relacionados com o que se pretende otimizar, como o objetivo da turbina é a geração de energia, inicialmente se considerou ter como *output* a potência. Entretanto, para reduzir-se o custo computacional, optou-se por ter como parâmetro de saída o torque que pode ser utilizado para se calcular a potência máxima. Dessa forma, foi criado um *report* de potência no *Ansys Fluent*® e ele foi configurado como parâmetro, obtendo o esquema de projeto da Figura 8.

Figura 8 - Esquema final do projeto com os parâmetros de entrada e saída configurados acoplados ao bloco de otimização.



Conclusões

A malha construída apresentou número de elementos similar ao utilizado por Akwa (2010) e Fernandes (2019) com uma qualidade aceitável. As simulações finais em ambos os regimes atingiram valores relativamente próximos ao relatado anteriormente por Fernandes (2019) e AKWA (2010), as divergências se devem, principalmente, às variações de malha e à diferença na versão do software utilizado, além disso, os resultados das simulações finais foram obtidos após a parametrização que acabou levando à uma pequena variação no afastamento das pás por conta da limitação nas dimensões aceitas para os parâmetros no *Ansys DesignModeler*®.

De acordo com a literatura, há muitas configurações que poderiam permitir um incremento da potência gerada pela turbina Savonius em relação ao *design* padrão, entretanto, variar o espaçamento entre as pás e a sobreposição das mesmas se mostrou mais viável para estudos via *Ansys Design Exploration*®, dessa forma, a parametrização realizada abre caminho para futuras otimizações visando

o escoamento de ar no interior da turbina e pode servir de referência para outros trabalhos que busquem parametrizações envolvendo aspectos diferentes da turbina.

Agradecimento

Este trabalho contou com a ajuda e apoio de diversas pessoas, sem as quais não seria possível finalizá-lo. Gostaria de prestar meus agradecimentos e homenagens à: minha orientadora, a professora Angie Lizeth Espinosa Sarmiento, pelo suporte e paciência na resolução das minhas dificuldades; aos membros do grupo de pesquisa FDT (*Fluid Dynamics and Turbomachinery*) da UNIFEI pelo apoio, ao PIBIC-CNPq por me conceder uma bolsa durante a realização do estudo e à Universidade de Santo Tomás de Aquino (USTA), por me permitir contribuir com o projeto *Disenõ aerodinâmico de uma turbina eólica de eje vertical de baja potencia para aplicaciones em uma região com importante potencial eólico em Boyacá*.

Referências

AKWA, João Vicente. **Análise aerodinâmica de turbinas eólicas Savonius empregando dinâmica dos fluidos computacional**. Orientador: Prof. Dr. Adriane Prisco Petry. 2010. 149 p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ANSYS (EUA). **Ansys Fluent Theory Guide: 2021 R1**. Cannonsburg: Ansys, jan. 2021. 1052 p.

FERNANDES, Matheus Noronha. **Análise do escoamento em uma turbina eólica de eixo vertical tipo Savonius mediante CFD**. Orientadora: Angie Lizeth Espinosa Sarmiento. 2019. 54 p. Relatório final - Programa PIVIC (Graduando em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

M. MOHAMED, Hassan Ahmed. **Design Optimization of Savonius and Wells Turbines**. Orientador: Prof. Dr. Ing. Dominique Thévenin. 2011. 197 p. Tese de doutorado (Doktoringenieur) - Otto von Guericke Universität, Magdeburg, Deutschland, 2011.

NAKAJIMA, Miyoshi et al. Performance of Double-step Savonius Rotor for Environmentally Friendly Hydraulic Turbine. **Journal of Fluid Science and Technology**, Nagano, Japão, v. 3, n. 3, p. 410-419, 3 mar. 2008.

ROY, Sukanta; SAHA, Ujjwal K. Review of Experimental Investigations into the Design, Performance and Optimization of the Savonius Rotor. **Journal of Power and Energy**, v.227, n. 4, p. 528-542, 22 jan. 2013.