

CONCEPÇÃO DE UMA PÁ EÓLICA SEGUNDO A TEORIA DE SCHMITZ-BETZ

Thiago Fernando Santiago de Freitas, thiagosantiago@discente.ufg.br¹

Felipe Pamplona Mariano, fpmariano@ufg.br¹

Andreia Aoyagui Nascimento, aanascimento@ufg.br¹

¹ Escola de Engenharia: Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) - Engenharia Mecânica, Av. Ingá, Prédio B5 (em frente a reitoria) Campus Samambaia, 74690-900, Goiânia-GO

Resumo. No presente trabalho buscou-se desenvolver uma nova pá eólica de uma turbina de pequeno porte localizada no centro-oeste, uma região com baixo potencial eólico. A geometria da pá foi obtida a partir de um código desenvolvido no Octave© junto ao XFOIL a partir de dados coletados no local de instalação da turbina e 4 aerofólios: SD6060, SD7062, SD7037 e SD7032. A nova pá apresenta comprimento maior em relação a pá instalada para se alcançar um maior potencial eólico. Destaca-se que o projeto foi desenvolvido com base na teoria de Schmitz-Betz, a qual não despreza os efeitos da esteira de vórtices na turbina eólica.

Palavras chave: Concepção de Pá Eólica. Turbina Eólica de Pequeno Porte. Teoria de Schmitz-Betz. Algoritmo.

Abstract. In the present work, we sought to develop a new wind turbine for a small turbine located in the Midwest, a region with low wind potential. The blade geometry was obtained from a code developed in the Octave© together with XFOIL from data collected at the location of the turbine and 4 airfoils: SD6060, SD7062, SD7037 and SD7032. The new blade has a longer length in relation to the installed blade to achieve a greater wind potential. It is noteworthy that the project was developed based on the Schmitz-Betz theory, which does not disregard the effects of the vortex wake on the wind turbine.

Keywords: Wind Blade Conception, Small Wind Tubine, Schmitz-Betz Theory, Algorithm

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira é majoritariamente composta de energia hidrelétrica já que as hidrelétricas, grandes usinas e pequenas centrais hidrelétricas, são responsáveis por 64,26% de toda a energia elétrica brasileira produzida. A partir de 2012, o Brasil enfrentou diversas crises hídricas anuais geradas por períodos de seca, o que expôs a fragilidade de uma matriz energética pouco diversificada (Lima *et al.*, 2019).

Com as crises hídricas causadas pela seca foi criado um novo sistema de bandeiras tarifária para a energia elétrica brasileira em que caso termoeletricas sejam utilizadas para a produção energética aciona-se a bandeira em que há um alto custo da energia elétrica para o consumidor final (Lima *et al.*, 2019).

O uso significativo de energias alternativas na matriz energética brasileira a tornará menos vulnerável a períodos de estiagem no país e, concomitantemente, pode reduzir o custo da energia elétrica visto que a energia eólica, por exemplo, é obtida explorando-se um bem inesgotável e perene.

A produção de energia eólica pode ser subdividida em duas categorias: turbinas de grande porte e turbinas de baixo porte, que são mais usadas em ambientes rurais, aplicações comerciais pequenas e operações remotas (Carbon, 2008).

De acordo com DoAmarante *et al.* (2001), o potencial eólico da região centro-oeste brasileira em um altitude de 50 m é caracterizado por velocidades médias na faixa de 3,5 a 5,5 m/s majoritariamente. Essa faixa de velocidades médias indicam que turbinas de grande porte não terão um bom rendimento, entretanto a instalação de turbinas eólicas de pequeno porte pode ser viável.

Os autores Habali and Saleh (1995) realizaram um estudo em que projetaram pás eólicas detalhando o processo de seleção de aerofólios para cada seção da peça. O estudo concluiu que para um pá, com comprimento igual a 5 m, a forma gerada foi obtida a partir de dois diferentes aerofólios, o NACA 63-621 e o FX 66-S-196. A pá desenvolvida foi fabricada com fibra de vidro e instalada em uma turbina com potencial eólico igual a 15 kW. Através de testes, a turbina com a nova pá apresentou um aumento do seu coeficiente de potência (C_P) igual 41,2% e passou a ser capaz de suportar um torque 10 vezes maior ao torque médio de trabalho.

Balijepalli *et al.* (2018) otimizaram pás eólicas de uma torre solar através da teoria de Schmitz-Betz. Para a faixa de 2 a 10 m/s de trabalho da turbina foram otimizadas propriedades como: ângulo de torção ($18,4^\circ < \beta < 42,9^\circ$), ângulo de velocidade relativa do vento ($26,4^\circ < \phi < 50,94^\circ$) e força de sustentação ($0,0052N < F_L < 0,168N$) gerando faixa de potência máximas igual a $0,06W < P < 1,75W$.

A performance aerodinâmica de uma turbina é essencial para avaliar a eficiência da teoria responsável por modelar o rotor e as pás do equipamento. Uma turbina eólica com 3 pás de comprimento igual a 1,1 m foi simulada no túnel de vento de camada limite 2 (BLWT2, em inglês, *Boundary Layer Wind Tunnel 2*) da *University of Western Ontario* (UWO) para avaliar a eficiência da teoria de elemento do momento da pá (BEM, em inglês, *blade element momentum*) na modelagem da turbina. Os resultados apresentados foram obtidos da comparação da teoria analítica e experimental desenvolvida e indicam que embora a acurácia da modelagem seja aceitável para os autores, a teoria BEM não é tão precisa na modelagem de turbinas eólicas de pequeno porte (Refan and Hangan, 2012).

Turbinas eólicas são dispositivos que captam energia do vento através da força de sustentação (L) gerada pelas pás eólicas presentes nesse equipamento. A energia do escoamento do ar é convertida em energia de rotação, a rotação das pás ocorre a partir da geração de L . Em seguida, a energia de rotação é convertida em energia elétrica por, por exemplo, um gerador. Caso o escoamento que gera a rotação das pás seja perpendicular a turbina eólica, esta é classificada como turbina de eixo vertical (VAWT, em inglês, *Vertical Axis Wind Turbine*) e se o escoamento é paralelo a rotação das pás, a turbina é denominada como turbina de eixo horizontal (HAWT, em inglês, *Horizontal Axis Wind Turbine*). O estudo deste trabalho foi desenvolvido para uma VAWT de pequeno porte.

Apesar do desenvolvimento do setor eólico, poucos estudos sobre turbinas eólicas horizontais de pequeno porte são desenvolvidos. Uma possível razão para a baixa produtividade de estudos nessa área são a significativa diferença na produção energética, as turbinas eólicas de pequeno porte produtores de até 1 kW (Refan and Hangan, 2012).

O presente trabalho apresenta um estudo preliminar sobre turbinas eólicas a serem construídas no estado de Goiás. Para esse fim, foi utilizada uma turbina de 10 m , denominada por "EOL-10", instalada em FURNAS - Centrais Elétricas S.A. em Aparecida de Goiânia-GO para estudos da geração energética em turbinas de pequeno porte. As pás instaladas na EOL-10 possuem geometria simples de uma placa reta. Assim, este trabalho propõe a concepção de uma nova pá eólica com melhor eficiência aerodinâmica através da Teoria de Schmitz-Betz. A Figura 1 apresenta a geometria das placas instaladas e o seu comprimento.

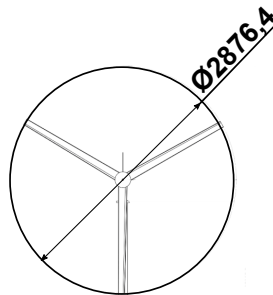


Figura 1: Medida (mm) da pá instalada na turbina eólica de pequeno porte em Furnas

Salienta-se que o projeto desenvolvido para uma nova pá teve considerações apenas no escopo aerodinâmico, *i. e.*, não foi realizado nenhum estudo referente aos esforços que a estrutura suportará tampouco qual seria o material mais indicado para a fabricação da peça mecânica.

2. METODOLOGIA

2.1 Parâmetros Preliminares

Através de um anemômetro ultrassônico foram coletadas as velocidades de vento a 10 m do solo em Aparecida de Goiânia - GO de dezembro/2019 a dezembro/2020 com frequência de amostragem de 100 Hz . A torre de coleta de dados está ao lado da turbina de pequeno porte que motivou este trabalho conforme Fig. 2. As medidas da velocidade do vento apresentaram valor mínimo de 0 m/s e máximo de 14,7 m/s enquanto a velocidade média calculada foi igual a 1,41 m/s . Esses dados são característicos do estado de Goiás por sua baixa velocidade média dos ventos e são similares a outros municípios de Goiás (Valenzuela *et al.*, 2017).

Os valores das propriedades do fluido utilizadas durante o projeto são apresentados na Tab. 1. A partir da massa específica do ar (ρ) em kg/m^3 , da área A definida pelo giro das pás eólicas ($A = \pi R^2$, em que R é o comprimento da pá) e a velocidade média do escoamento (v_0) foi calculada o potencial eólico da região conforme Eq. 1,

$$P_E = \frac{1}{2} \rho A v_0^3. \quad (1)$$



Figura 2: Estação de coleta de dados e turbina eólica de pequeno porte

Tabela 1: Propriedades do ar.

| | |
|--------------|-----------------------|
| $V(m/s)$ | 1,41 |
| $T^{\circ}C$ | 30 |
| $\rho(kg/s)$ | 1,16 |
| $\nu(m^2/s)$ | $1,60 \times 10^{-5}$ |

2.2 Teoria de Schmitz-Betz

A velocidade do escoamento de ar não é a mesma que atua sobre os aerofólios da pá eólica. A partir da composição da velocidade de rotação junto a velocidade do escoamento perpendicular ao aerofólio é gerada a velocidade relativa (\vec{w}) que atua sobre os corpos gerando arrasto e sustentação.

O ângulo ϕ é denominado como o ângulo da velocidade relativa e corresponde ao ângulo de ataque da velocidade relativa (\vec{w}) com o perfil aerodinâmico associado ao ângulo de torção da pá (β). A Figura 3a e 3b apresentam a distribuição de esforços aerodinâmicos e a configuração da velocidade em um perfil aerodinâmico onde \vec{L} representa a força de sustentação e \vec{D} a força de arrasto.

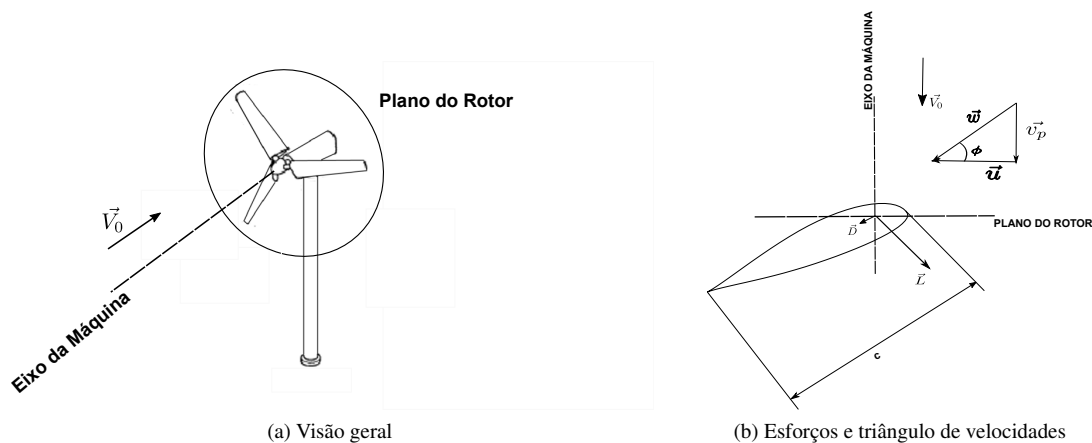


Figura 3: Esquema de funcionamento de uma VAWT

A teoria de Schmitz-Betz consiste no aprimoramento da teoria clássica de Betz ao considerar o escoamento bidimensional a jusante da turbina eólica devido a ação-reação que o fluido sofre ao giro das pás (Gash and Twele, 2002). As considerações da teoria clássica de Betz de um escoamento homogêneo para o ar e unidimensional a montante da turbina são mantidas.

Em resumo, o algoritmo criado caracteriza a geometria da pá a partir do ângulo de ataque (α) que gerar o maior coeficiente de sustentação (C_L) por coeficiente de arrasto (C_D), o ângulo de torção resultante, a corda do perfil na região e o número de Reynolds local (Re) daquele aerofólio considerando a velocidade resultante obtida da velocidade angular da pá e a velocidade média do escoamento. A Figura 4 apresenta o fluxograma do algoritmo implementado no Octave©

junto ao XFOIL.

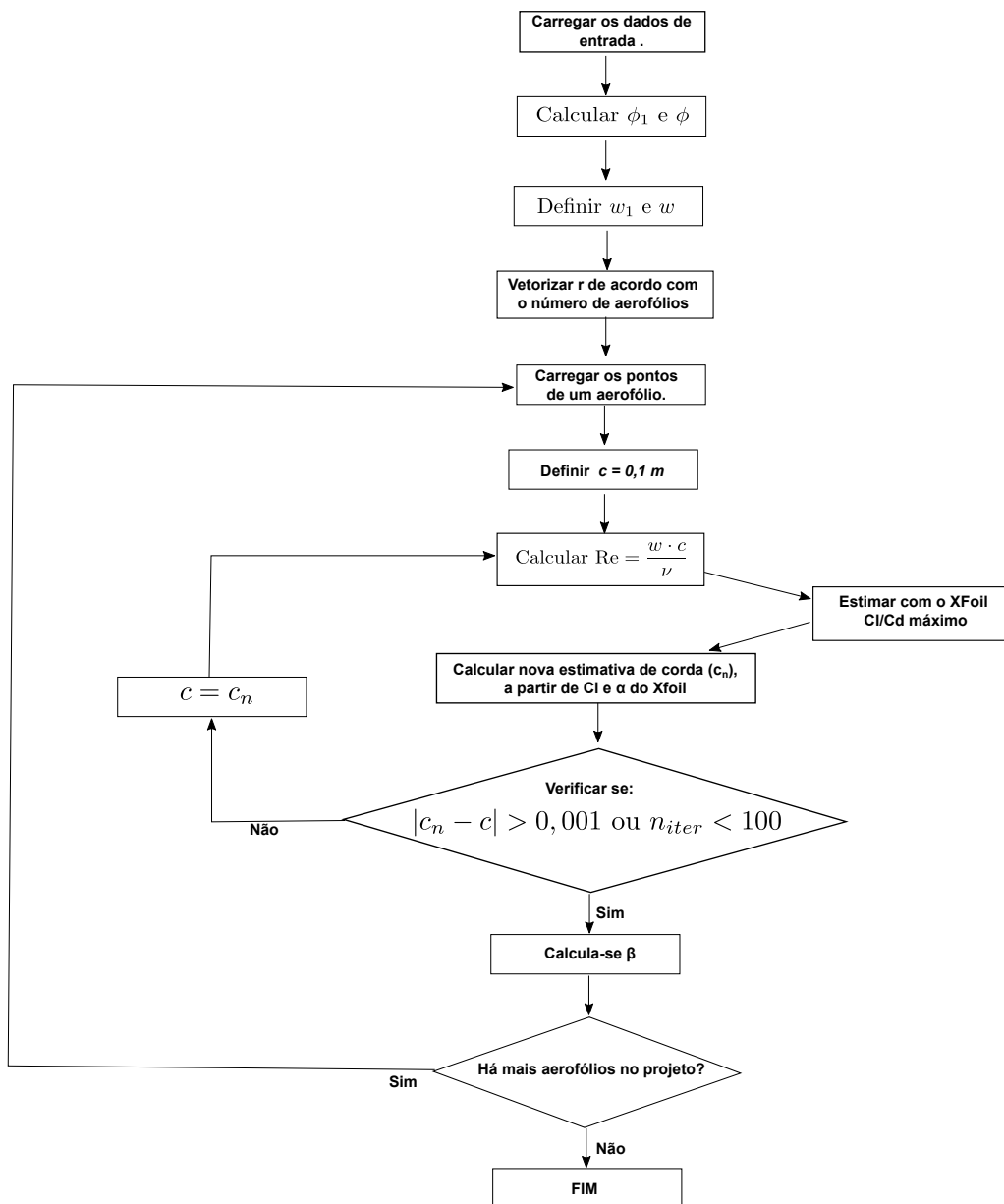


Figura 4: Fluxograma do algoritmo implementado

1. Primeiro, são definidos os dados necessários aos cálculos. Os dados de entrada necessários ao código (Tab. 2), além dos dados do fluido, são: R_h que representa o comprimento do encaixe da pá junto ao rotor da turbina; R_p que é o comprimento da pá; N que se refere ao número de perfis aerodinâmicos selecionados para a construção da geometria da pá; o TSR um adimensional denominado por taxa de velocidade de ponta (em inglês, *tip speed ratio*), Eq. 2, onde ω é a velocidade angular da pá, destaca-se que a escolha do valor do TSR está ligado ao número de pás acopladas no rotor (Gash and Twele, 2002) e no presente estudo preservou-se a quantidade de pás acopladas e instaladas no rotor para manter um bom balanceamento do sistema mecânico; uma faixa de ângulos de ataque para os perfis utilizados (α); e o número de pás da turbina, Z .

Tabela 2: Parâmetros iniciais.

| R_h | R_p | N | TSR | α | Z |
|--------|-------|-----|-------|----------|-----|
| 0,15 m | 2,5 m | 4 | 7 | 0° a 8° | 3 |

$$TSR = \frac{\Omega R_p}{v_0}$$

2. A seguir são calculados os ângulos da velocidade relativa (ϕ_1), desconsiderando a torção da pá e ângulo de ataque (α), pela Eq. 3 e o ângulo da velocidade relativa (ϕ) sem essas simplificações pela Eq. 4.

$$\phi_1 = \arctan\left(\frac{R_p}{TSR \cdot r}\right) \quad (3)$$

$$\phi = \frac{2}{3}\phi_1 \quad (4)$$

3. Após os ângulos definidos, são calculadas a velocidade relativa 1, formada apenas pela velocidade do escoamento e a rotação da turbina, (w_1) pela Eq. 5 e a velocidade relativa (w) atuante nos perfis aerodinâmicos pela Eq. 6.

$$w_1 = \sqrt{v_0^2 + (\Omega r)^2} \quad (5)$$

$$w = w_1 \cos(\phi_1 - \phi) \quad (6)$$

4. É criado um vetor numérico r que varia de R_h a R_p com o número de partições igual ao número de perfis aerodinâmicos que comporão a pá eólica.
5. É selecionado um dos aerofólios que modelará uma parte da pá definida por r . Foram selecionados 4 perfis aerodinâmicos para compor a geometria da pá: SD6060, SD7062, SD7037, SD7032. Os aerofólios foram utilizados de acordo com Giguere and Selig (1997) em que os autores indicam que esses aerofólios apresentam melhor performance em turbinas de pequeno porte sob $Re = 3 \cdot 10^5$. As Figuras 5 apresentam o 4 perfis utilizados no código.

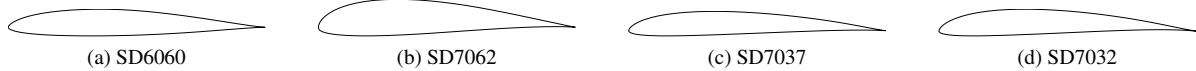


Figura 5: Aerofólios utilizados no algoritmo

6. Aloca-se uma valor de 0,1 m como corda do aerofólio selecionado como estimativa inicial.
7. A partir da velocidade relativa w , da corda c e viscosidade cinemática do ar ν , calcula-se o número de Reynolds, Eq. 7.

$$Re = \frac{w \cdot c}{\nu} \quad (7)$$

8. A partir do número de Reynolds (Re), o aerofólio selecionado e a faixa de ângulos de ataque (α) são estimados os coeficientes de arrasto e sustentação. Por fim, escolhe-se o α que apresenta maior taxa C_L/C_D . Em citeconpeex verificou-se que os resultados do Xfoil tiveram razoável aproximação com resultados obtidos por simulação numérica pelo OpenFoam.
9. Com o novo valor de α e C_L é calculada uma nova corda para o perfil aerodinâmico conforme a Eq. 8.

$$c_n = \frac{16\pi r}{zC_L} \sin^2\left(\frac{\phi_1}{3}\right) \quad (8)$$

10. Caso haja divergência de 0,001 m entre os valores de c_n e c , volta-se ao passo 6 e em caso haja convergência segue-se para o passo seguinte.
11. Calcula-se o ângulo de torção da seção da pá através da Eq. 9.

$$\beta = \phi - \alpha \quad (9)$$

12. Feito os cálculos para uma seção da pá, verifica-se caso haja novas seções para serem contempladas pelo algoritmo, em caso contrário, finaliza-se o código.

Para estimar o coeficiente de potência da pá, determina-se primeiro potência gerada por cada aerofólio (dP) através da Eq. 10.

$$dP = r^2 \Omega \rho 2\pi dr w_1^2 \sin[2(\phi_1 - \phi)] \sin^2(\phi_1) \quad (10)$$

Em seguida, soma-se a potência gerada de ca da aerofólio e assim determina-se a potência gerada pela pá (P). Com o potencial eólico da região onde a pá será instalada, assim como, a estimativa do potência gerada pela pá, calcula-se o coeficiente de potência do equipamento pela Eq. 11.

$$c_P = \frac{P}{P_E} \quad (11)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O potencial eólico calculado é igual a $59 W$ para o valor de um pá com comprimento de $2,5 m$ e aproximadamente $10,6 W$ para um raio de pá igual a $1,44 m$.

Embora ambos os valores sejam baixos para a geração de energia e levando em conta que o objetivo da instalação da EOL-10 seja pesquisa, salienta-se que um aumento do comprimento da pá eólica possibilita um aumento na captação energética e por isso o valor adotado para o projeto da pá foi igual a $2,5 m$.

A tabela 3 apresenta os resultados obtidos pelo código desenvolvido que foram usados na construção do desenho da nova pá eólica. De acordo com a Tab. 3 todos os aerofólios obtiveram coeficientes de sustentação inferiores a pelo menos 40 vezes maiores que os seus respectivos coeficientes de arrasto. Essa taxa é uma medida da qualidade do perfil aerodinâmico definido (Gash and Twele, 2002) a qual os aerofólios não conseguiram atingir pelo baixo Re do escoamento e os perfis usados.

Destaca-se que os coeficiente de sustentação (C_L) e de arrasto (C_D) obtidos pelo XFOIL são um resultado da aplicação do método dos painéis. O método dos painéis considera o escoamento irrotacional e invíscido sobre o aerofólio gerando uma boa estimativa dos coeficientes aerodinâmicos entretanto, apenas estimativas.

Tabela 3: Resultados para o código computacional desenvolvido.

| | α | c (m) | β | Re | C_L/C_D |
|--------|-------------|---------|---------------|---------------------|-----------|
| SD6060 | 7° | 0,4056 | $38,81^\circ$ | $4,7096 \cdot 10^4$ | 28,67 |
| SD7062 | 4° | 0,4078 | $13,23^\circ$ | $5,2725 \cdot 10^4$ | 13,7 |
| SD7037 | 6° | 0,1724 | $4,06^\circ$ | $5,7874 \cdot 10^4$ | 36,62 |
| SD7032 | $6,5^\circ$ | 0,1116 | $0,55^\circ$ | $5,3416 \cdot 10^4$ | 31,21 |

A partir dos aerofólios com o auxílio do *software* solidworks[®] foi possível obter a geometria 3d da pá. A Fig. 6 apresenta a geometria da pá com a distribuição de aerofólios ao longo de seu comprimento, a base da pá é cilíndrica com diâmetro igual a máxima espessura do aerofólio SD6060.



Figura 6: Desenho da pá eólica

Em Singh and Ahmed (2013) foi desenvolvida uma pá eólica para uma turbina de pequeno porte para velocidades do vento na faixa de $3 - 6 m/s$. Após o projeto e a fixação da nova pá eólica na turbina foram realizadas medições que determinaram que o máximo c_P gerado pela nova pá foi igual a $0,291$ durante a velocidade do vento igual a $6 m/s$ a uma altura igual a $8,22 m$. Seguindo os procedimentos teóricos para a determinação do coeficiente de potência da pá desenvolvida (Eq. 10 e 11) chegou-se a um $c_P = 0,277$.

Considerando que a velocidade do vento em Aparecida de Goiânia na maior parte do período analisado foi inferior a $4 m/s$ e que a estimativa da potência gerada pela turbina se baseia em dados teóricos e não experimentais ou numéricos conclui-se que a estimativa de $c_P = 0,277$ deve ser validada por outros meios já que parece ser uma superestimação do valor real.

4. CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, conclui-se que:

- O aumento do comprimento da pá eólica gera maior quantidade de energia elétrica e pode ser uma opção em instalações onde a velocidade média do vento é baixa;

- A modelagem irrotacional do escoamento sobre aerofólios utilizados no método dos painéis no software livre XFOIL é uma alternativa para estimativas rápidas dos coeficientes aerodinâmicos C_L e C_D ;
- A teoria de Schmitz-Betz possibilita o projeto de uma pá simples porém menos idealizada do que uma pá construída segundo a Teoria de Betz;
- De acordo com os resultados obtidos pelo algoritmo, os perfis selecionados não são os mais indicados para a pá eólica devido aos baixos números de Reynolds do escoamento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FURNAS, a Pró-Reitoria de Pesquisa e Inovação (PRPI) e a UFG pelo suporte na execução do estudo.

6. REFERÊNCIAS

- Balijepalli, R., Chandramohan, V. and Kirankumar, K., 2018. “Optimized design and performance parameters for wind turbine blades of a solar updraft tower (sut) plant using theories of schmitz and aerodynamics forces”. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 30, pp. 192 – 200. ISSN 2213-1388. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.10.001>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138818302492>.
- Carbon, T., 2008. “Small-scale wind energy-policy insights and practical guidance”. *Carbon Trust: London, UK*.
- DoAmarante, O.A.C., Brower, M., Zack, J. and De Sa, A.L., 2001. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Cresesb.
- Gash, R. and Twele, J., 2002. *Wind power plants*.
- Giguere, P. and Selig, M.S., 1997. “Low reynolds number airfoils for small horizontal axis wind turbines”. *Wind Engineering*, pp. 367–380.
- Habali, S. and Saleh, I., 1995. “Design and testing of small mixed airfoil wind turbine blades”. *Renewable energy*, Vol. 6, No. 2, pp. 161–169.
- Lima, C.d.C., Mello, K. and Teixeira, L.B., 2019. “Quais são os prós e contras do modelo energético do brasil”. *Forbes*. URL <https://forbes.com.br/negocios/2019/07/quais-sao-os-pros-e-contras-do-modelo-energetico-do-brasil>.
- Refan, M. and Hangan, H., 2012. “Aerodynamic performance of a small horizontal axis wind turbine”. *Journal of solar energy engineering*, Vol. 134, No. 2.
- Singh, R.K. and Ahmed, M.R., 2013. “Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications”. *Renewable Energy*, Vol. 50, pp. 812–819.
- Valenzuela, G., Ramalho, J., Mantovani, J.R.A. and Fahl, G., 2017. “Análise prévia para monitorar a qualidade do ar de 5 municípios goianos”. *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*, Vol. 1, pp. 2103–2114.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.