

MANUFATURA DE PÁ PARA MICROTURBINA ÉOLICA DE EIXO VERTICAL UTILIZANDO IMPRESSÃO 3D

Leonardo Moreira da Silva, leomores94@gmail.com¹
Filipe Marques de Souza, filipi.souza@ufob.edu.br¹
Luiz Justino da Silva Júnior, luiz.silva@ufob.edu.br¹
Gabriel Pereira Medeiros, gabriel.m6936@ufob.edu.br¹
Kaelaine Carvalho da Silva, kaelaine.s3106@ufob.edu.br¹

¹Centro Multidisciplinar Universidade Federal do Oeste da Bahia, Av. Manoel Novaes, 1064, Centro, Bom Jesus da Lapa/BA, 474600-000

Resumo. A energia eólica é proveniente de uma fonte limpa e renovável que vem apresentando grande relevância no mundo, sendo uma alternativa interessante para a substituição de fontes de energia geradas a partir de combustíveis fósseis. Diante disso, o presente trabalho buscou projetar e desenvolver pás e um suporte para uma microturbina eólica de eixo vertical utilizando o processo de manufatura aditiva, afim de se obter os parâmetros e métodos que permitam a reprodução de novas pás de forma rápida e com baixo custo. Para isto, foi realizado vários procedimentos, como seleção do perfil, modelagem 3D em CAD, conversão de CAD para CAM (Computer Aided Manufacturing) com a utilização de dois softwares (Autodesk Inventor® e Repetier Host®), impressão da peça, acabamento, teste de flexão e teste de eficiência em túnel de vento. Após a análise dos dados e gráficos gerados nesse trabalho foram obtidos resultados satisfatórios. Os resultados indicaram uma geração de energia de aproximadamente 0,5 volts com uma velocidade angular de 1,9 rotações por segundo. Quanto ao carregamento suportado pelo teste de flexão foi uma força de 2kN.

Palavras chave: Energia eólica. Turbina eólica de pequena escala. Manufatura aditiva.

Abstract. Wind energy comes from a clean and renewable source that has been showing great relevance in the world, being an interesting alternative for replacing energy sources generated from fossil fuels. In view of this, the present work sought to design and develop blades and a support for a vertical axis wind microturbine using the additive manufacturing process, in order to obtain the parameters and methods that allow the reproduction of new blades quickly and at low cost. For this, several procedures were carried out, such as profile selection, 3D CAD modeling, conversion from CAD to CAM (Computer Aided Manufacturing) using two software (Autodesk Inventor® and Repetier Host®), part printing, finishing, bending test and efficiency test in a wind tunnel. After analyzing the data and graphs generated in this work, satisfactory results were obtained. The results indicated an energy generation of approximately 0.5 volts with an angular velocity of 1.9 rotations per second. As for the load supported by the bending test, it was a force of 2kN.

Keywords: Wind energy. Vertical axis wind turbine, Additive manufacturing.

1. INTRODUÇÃO

O século XXI tem sido marcado pelo crescente aumento no consumo de energia, e esse fator tem gerado preocupações com o aquecimento global e a poluição do meio ambiente. O intuito de minimizar esses problemas tem incentivado muitos países a buscarem soluções nas fontes de energia renováveis e sustentáveis, tais como a energia eólica, com a finalidade de substituir as energias oriundas dos combustíveis fósseis (TONG, 2010).

Venturosamente, o Brasil é um dos países com maior potencial energético para energias renováveis e essa substituição trará benefícios como o aumento de da segurança no fornecimento de energia e combate às mudanças climáticas (TONG, 2010). Entretanto, a energia eólica gerada no Brasil ainda é pouco explorada, devido a não utilização de micro ou mini geradores para a utilização nas residências localizadas nos centros urbanos (ABEEOLICA, 2021; VIEIRA et al., 2020).

Assim, o processo de engenharia para a construção de uma pá para turbina eólica de microgeração com a utilização de uma impressora 3D, visa à praticidade e a redução de custos de materiais e processos de fabricação. Para isso, o uso da manufatura aditiva pode facilitar o processo de produção de toda a turbina (FERNANDEZ et al., 2014).

Portanto, o presente trabalho buscou desenvolver pás e suporte para um sistema de microturbina eólica de eixo vertical utilizando o processo de impressão 3D, com o intuito de se obter parâmetros e métodos que permitam a produção de novas pás de forma rápida e com baixo custo de processamento e fabricação.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do seguinte trabalho, foram realizadas as seguintes etapas: seleção do perfil aerodinâmico, modelagem em CAD das pás e suportes, conversão dos arquivos de CAD para CAM (Computer Aided Manufacturing), impressão 3D dos componentes, realização do acabamento superficial e execução dos testes experimentais. A Fig. 1, apresenta todas as etapas realizadas no trabalho.

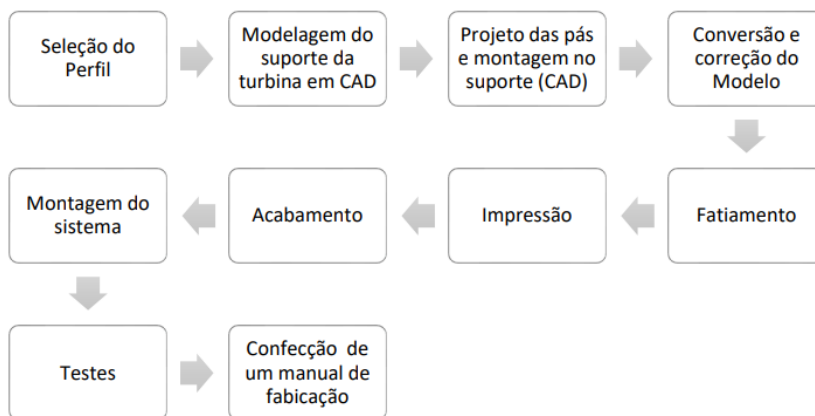


Figura 1. Fluxograma da metodologia a ser utilizada (Autores, 2025)

2.1. Seleção do perfil

Para o perfil aerodinâmico, optou-se pelo S815 (Fig. 2), por seu modelo assimétrico apresentar desempenho superior em relação aos simétricos. Esse modelo oferece especificações mais vantajosas que os outros perfis sem câmbor (arqueamento da pá), como maior torque dinâmico e estático, além de espessura adequada que contribui positivamente para o seu desempenho. Ademais, outro fator que justificou sua escolha, foi o fato de o câmbor além de atuar pela força de sustentação, também apresentar uma fração de trabalho por força de arrasto.

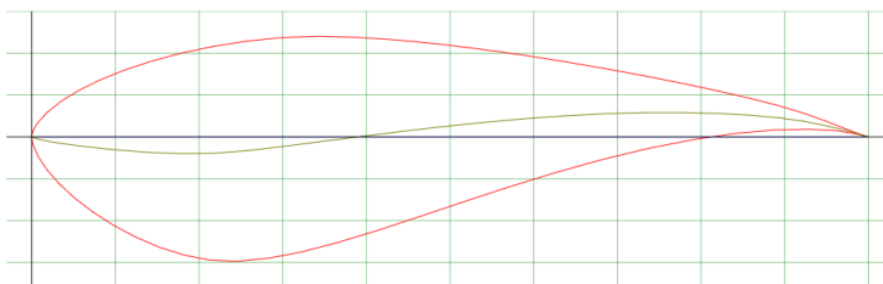


Figura 2. Perfil S815 da NREL (Airfoiltools, 2023)

2.2. Modelagem e conversão do sistema

No processo de modelagem para o projeto e montagem das pás e suporte foi utilizado o software CAD *Autodesk Inventor*®. Nele foi desenvolvido um modelo digital em 3D dos componentes (Fig.3 e Fig.4), visando reduzir erros na conversão para o modelo CAM. Além disso, para minimizar os erros na impressão e facilitar uma posterior montagem, as pás foram impressas de forma contínua, apresentando tamanho e medidas dentro das configurações da impressora 3D. A Fig. 5, ilustra o sistema montado.

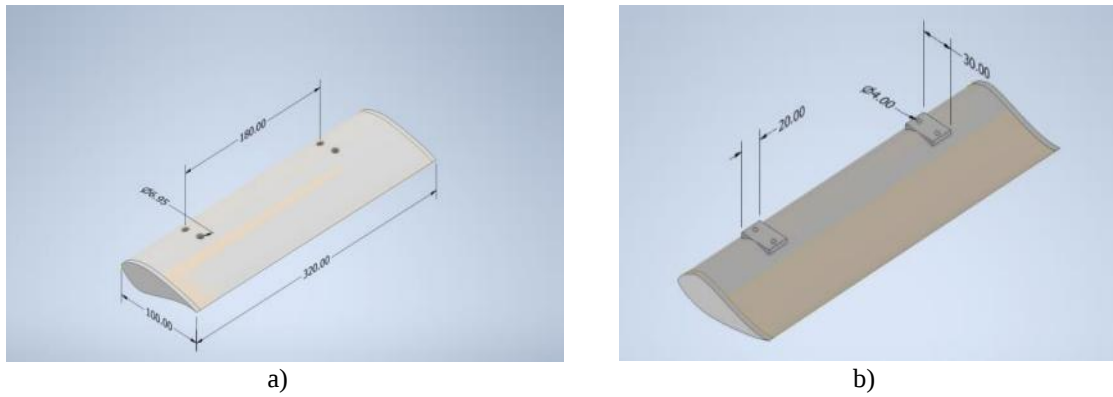


Figura 3. a) Visão do extradorso da pá eólica; b) Visão intradorso da pá eólica (Autores, 2025)

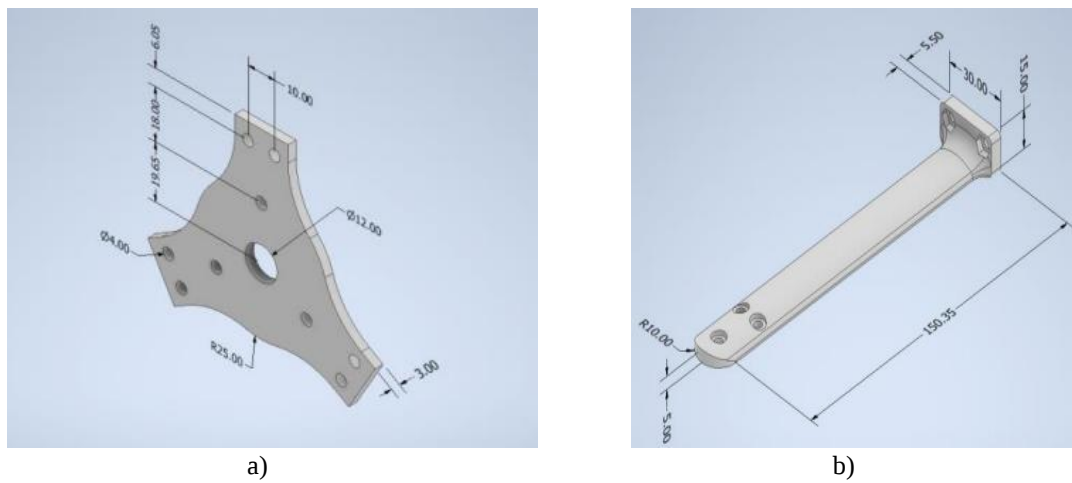


Figura 4. a) Suporte da base; b) Suporte de encaixe (Autores, 2025)

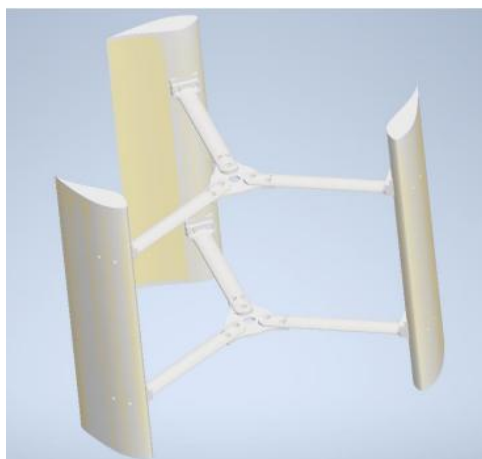


Figura 5. Sistema montado (Autores, 2025)

Para a conversão de CAD para CAM, foram utilizados dois programas, o *Autodesk Inventor®* e o *Repetier Host®*. O procedimento é dividido em algumas etapas. Primeiramente, após a finalização do desenho em 3D, é preciso clicar na aba “Ambientes” e selecionar a opção “Impressão 3D” (Fig.6), com isso é possível estabelecer a configuração ideal para a impressão da peça e salvar o arquivo CAD no formato STL (*STereoLithography*), conforme indicado na Fig.7, e posteriormente selecionar o ícone para sair da impressão 3D.

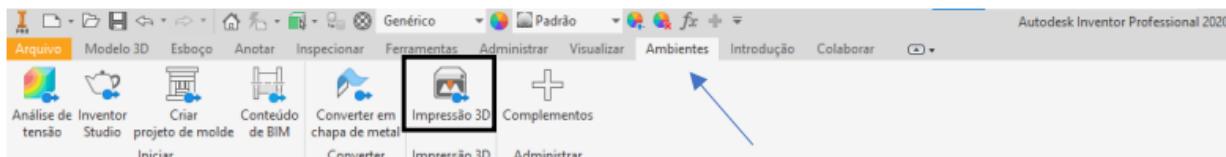


Figura 6. Passo a passo 1 da conversão (Autores, 2025)

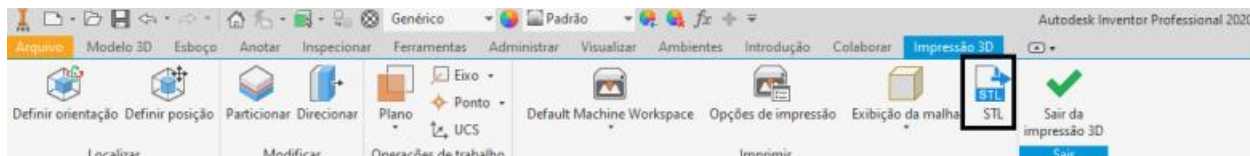


Figura 7. Passo a passo 2 da conversão (Autores, 2025)

Considerando que a impressora 3D somente processa arquivos em formato G-code (linguagem de programação), é necessário usar o software *Repetier Host*® para converter o arquivo STL para o modelo aceito pela impressora, minimizando falhas no processo, como formas inesperadas, deformações e furos em locais indesejados.

2.3. Fatiamento e acabamento

Após a conversão do modelo, realizou-se o processo de fatiamento, no qual a peça é moldada por uma série de seções transversais horizontais, sendo cada parte formada individualmente com base no material utilizado, sendo neste caso o polímero ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*). Assim, para a impressão foi utilizado o procedimento de impressão por camadas, no qual a peça é construída progressivamente, camada por camada, até que sua geometria final seja integralmente formada.

Embora, em determinadas aplicações, a resolução da impressão 3D não interfira significativamente no desempenho do componente, no caso dos aerofólios, é necessário um acabamento posterior para reduzir o atrito entre o escoamento do fluido e a superfície da peça. Para o material ABS, utilizou-se o lixamento como método de acabamento para amenizar possíveis imperfeições.

2.4. Viabilidade econômica do produto

Para a realização do projeto foi feito um levantamento dos materiais essenciais para fabricação da microturbina (Tab.1) e o cálculo do consumo de energia durante a produção de cada peça (Tab.2).

Tabela 1. Orçamento dos materiais

Material	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
Impressora Core H4	1	8.520,00	8.520,00
Filamento (ABS 1,75mm)	1	86,90	86,90
Parafusos (M4)	30	0,60	18,00
Porcas para parafusos (M4)	30	0,25	7,50
Total	-	-	8.632,40

Tabela 2. Orçamento dos materiais

Componente	Tempo de fabricação (h)	Consumo de energia (kWh)
Pá	17	4,25
Suporte de Base	0,834	0,209
Suporte de Pá	1,667	0,417

Tendo sido fabricadas três pás, dois suportes de base e seis suportes de fixação, totalizou-se um tempo de impressão de 62,67 horas. Considerando a potência como 250W e um custo médio da energia elétrica R\$ 0,80/kWh, o consumo de energia estimado foi de R\$ 12,53. Dessa forma, o custo total para a manufatura do rotor para a turbina eólica foi de R\$ 8.644,93. Apesar do alto investimento inicial da impressora Core H4, existem modelos mais acessíveis no mercado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise de eficiência

Três configurações de rotor foram testadas: um rotor de ABS com ângulo de ataque de 0° , um segundo com ângulo de ataque 4° e um rotor de metal utilizado como referencial. A Fig. 8 expõe, respectivamente, os sistemas montados para cada tipo de configuração. As análises para cada modelo foram realizadas no laboratório da Universidade Federal do Oeste da Bahia, utilizando um túnel de vento cuja velocidade era regulada a partir do equipamento mostrado na Fig. 9. Por fim, com o auxílio de um tacômetro, mensurou-se o RPS (Rotação Por Segundo) dos sistemas avaliados, utilizando os resultados com maior similaridade entre si dentre os testes consecutivos.

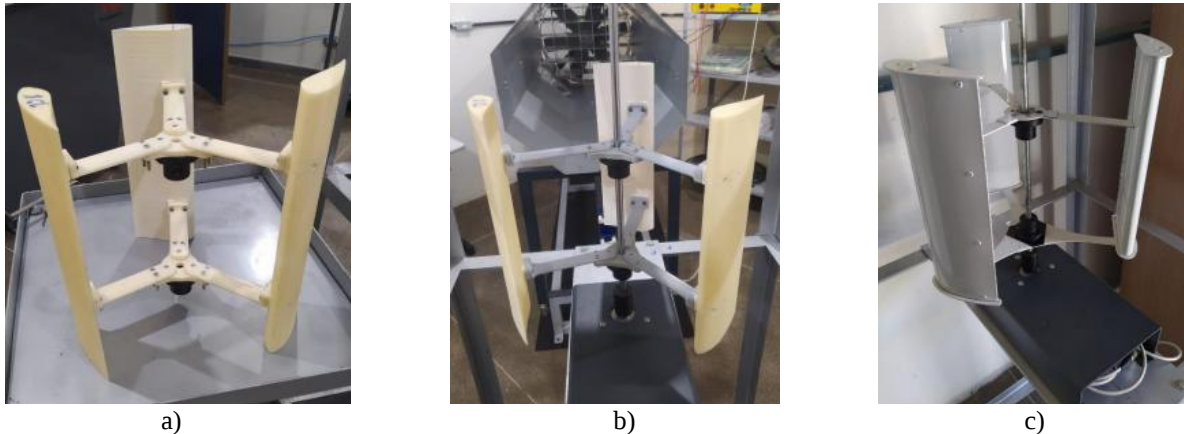


Figura 8. a) Rotor de ABS com ângulo de ataque 0° ; b) Rotor de ABS com ângulo de ataque 4° ; c) Rotor de metal (Autores, 2025)



Figura 9. Equipamento para regular a velocidade do vento

Os dados coletados e expostos na Fig.10a, demonstram que o rotor de ABS sem ângulo de ataque foi incapaz de gerar energia, sendo necessária uma rotação mínima de 1.7 RPS que não foi alcançada. Por sua vez, o rotor de metal obteve uma geração de energia exponencial ao aumento da rotação, alcançando uma máxima de 10,65V de produção energética para rotação de 5,9 RPS (Fig.10b). Após a modificação no ângulo de ataque para 4° , mudança baseada em dados adquiridos do grupo de pesquisa do setor eólico da Universidade Federal do Oeste da Bahia, coordenada pelo Professor Me. Luiz Justino da Silva Júnior, observou-se uma melhora na eficiência da turbina, que foi passou a produzir energia (Fig.10c).

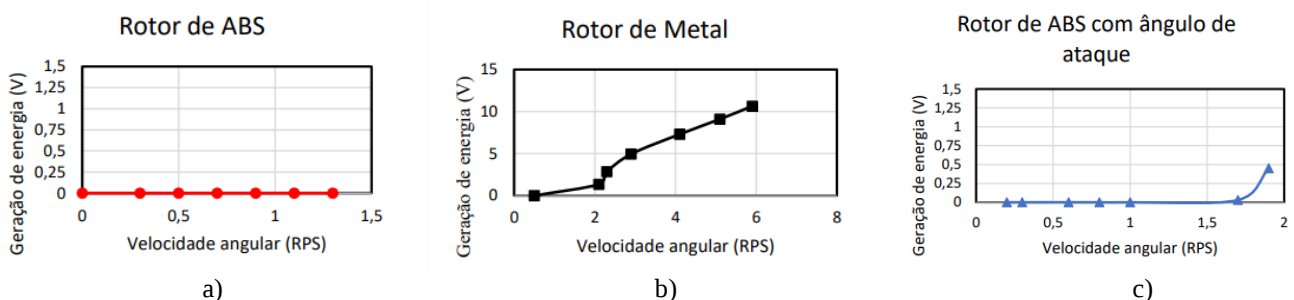


Figura 10. a) Gráfico da análise de eficiência do rotor de ABS sem ângulo de ataque; b) Gráfico da análise de eficiência do rotor de metal; c) Gráfico da análise de eficiência do rotor de ABS com ângulo de ataque (Autores, 2025)

Sendo assim, notou-se que a variação do ângulo de ataque foi benéfica, elevando sua velocidade angular em quase 50% (1,3 RPS para 1,9 RPS). Ademais, foi observado que o processo de acabamento superficial das pás, promoveu uma melhora de aproximadamente 8% em relação ao sistema sem acabamento superficial.

3.2. Análise do ensaio de flexão

Sabendo que as pás eólicas serão afetadas diretamente pelas forças de sustentação e arrasto durante seu funcionamento. Optou-se por submeter o componente a um ensaio de flexão, comparando os resultados obtidos com os dados de uma análise computacional no software XFLR®, visando alcançar resultados mais precisos.

Para a realização do ensaio de flexão, foi necessário desenvolver três suportes de fixação para os cutelos da máquina de teste (Fig.11), uma vez que a pá apresenta superfície irregular o que pode afetar gerar resultados discrepantes. A Fig. 12 apresenta a execução do teste de flexão.

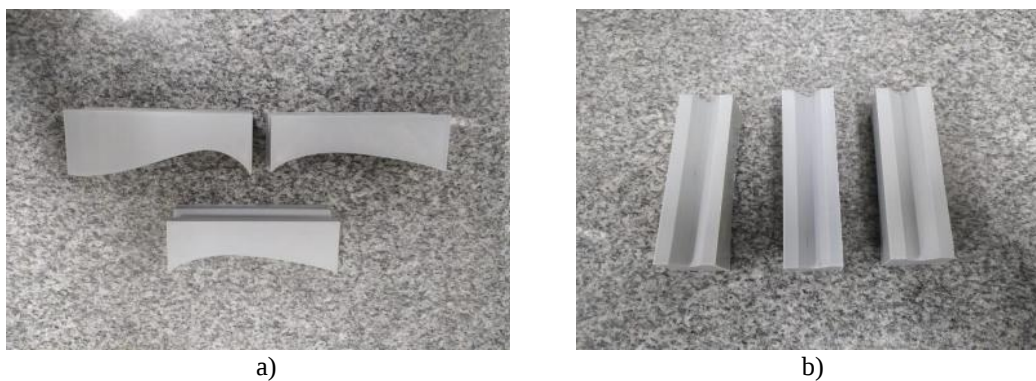


Figura 11. a) Vista lateral do suporte para o teste de flexão; b) Vista superior do suporte para o teste de flexão (Autores, 2025)

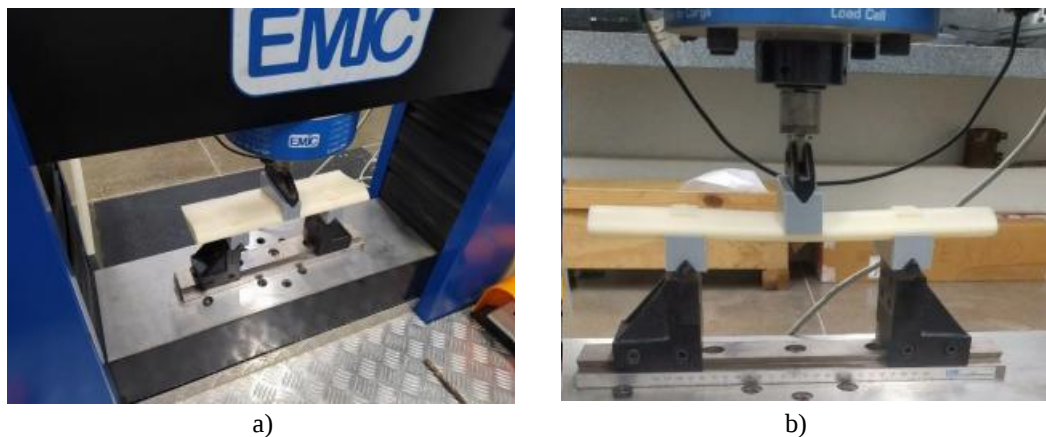


Figura 12. Teste de flexão (Autores, 2025)

Como resultado, foi visto que a pá resistiu uma carga de ruptura de aproximada de 2 kN (Fig.13). Este valor é bastante superior à força de sustentação estimada via XFLR®, que não ultrapassou 0,2 N para velocidades entre 6 e 10 m/s, como expresso na Tab.3. Assim, é possível atestar a robustez estrutural do componente e sua viabilidade para aplicação em uso real.

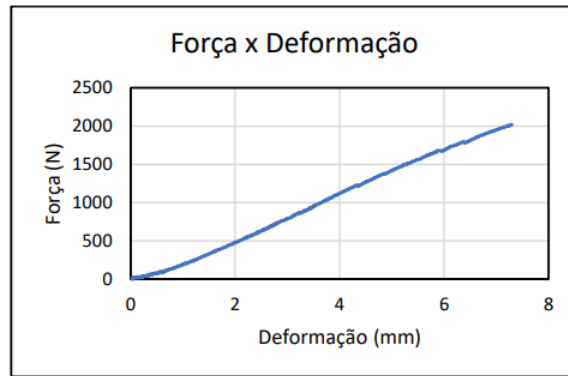


Figura 13. Gráfico Força versus Deformação (Autores, 2025)

Tabela 3. Valores das forças de sustentação para variação do ângulo e das velocidades

Ângulo = 0°		Ângulo = 4°	
Velocidade (m/s)	Força de Sustentação (N)	Velocidade (m/s)	Força de Sustentação (N)
6	0,1192	6	-0,1040
8	0,1590	8	-0,1386
10	0,1987	10	-0,1733

Contudo, ressalta-se que, devido ao perfil da pá ser oco, é possível que tenha ocorrido compressão do aerofólio, permitindo que a peça suportasse maiores cargas antes de falhar, o que pode ser analisado com mais profundidade em estudos futuros. A Figura 14, apresenta o perfil aerodinâmico após o ensaio de flexão.



Figura 14. Resultado do teste de flexão (Autores, 2025)

4. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de pás e suporte para um microturbina eólica de eixo vertical utilizando manufatura aditiva demonstrou ser promissor e viável. O perfil S815 foi inicialmente por sua boa espessura e desempenho destacados na literatura, porém os resultados sugerem que perfis NACA podem apresentar melhor rendimento aerodinâmico. A modelagem e impressão da pá demonstrou simplicidade, sendo necessário acrescentar uma porcentagem de contração dimensional de aproximadamente 1%.

O rotor impresso, com ângulo de ataque de 4°, apresentou melhorias significativas em relação à configuração sem ângulo, alcançando 0,5 V a 1,9 RPS e evidenciou a importância do acabamento superficial pós impressão, que atingiu uma melhora de 8% em relação aos modelos sem acabamento. Além disso, o ensaio de flexão confirmou a viabilidade estrutural da pá, que suportou carga de 2 kN (valor superior aos valores de carga previstas pela simulação via XFLR®).

Assim, os resultados evidenciam, que mesmo com eficiência consideravelmente inferior ao sistema metálico, o desenvolvimento de um rotor e suporte de turbina eólica de eixo vertical pelo processo de manufatura aditiva, demonstrou facilidade e gerou parâmetros para estudos futuros que podem abranger: acréscimo de pás no sistema, avaliação do ângulo de ataque, variação do comprimento do perfil e avaliação do raio do sistema em relação ao seu eixo.

4. REFERÊNCIAS

- Arantegui, R.L. e Jäger-Waldau, A., 2018. “Photovoltaics and wind status in the European Union after the Paris Agreement”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, p. 2460–2471.
- Fernandez, D.D., Pröhl, M., Troyer, T., Feng, G., Runacres, M. e Werner, M., 2014. “Reducing blade manufacturing cost while maintaining aerodynamic performance of vertical axis wind turbines”. In *Proceedings of the EWEA Annual Event*. European Wind Energy Association (EWEA), 2014.
- Kumar, R., Raahemifar, K. e Fung, A.S., 2018. “A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 89, p. 281–291.
- Micallef, D. e Van Bussel, G., 2018. “A review of urban wind energy research: aerodynamics and other challenges”. *Energies*, Vol. 11, No. 9, p. 2204.
- Nambi, S.S. e Herbert, G.M.J., 2018. “Manufacturing of proto type wind turbine blades using rapid prototype technology”. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, Vol. 8, No. 2, p. 103–112.
- Oliveira, S., Muralidhara, H.B., Venkatesh, K., Gopalakrishna, K. e Vivek, C.S., 2016. “Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review”. *Journal of Materials Science*, Vol. 51, No. 8, p. 3657–3674.
- Silva, L.A.H., “Avaliação do potencial eólico em ambiente urbano para aplicação de micro e minigeração distribuída: estudo de caso em edifício no centro da cidade de São Paulo”. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Tong, W., 2010. *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. Boston: WIT Press.
- Volpato, N., 2017. *Manufatura aditiva: tecnologias e Aplicações da Impressão 3D*. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda. ISBN 978-85-212-1151-8. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211518/>. Acesso em: 09 nov. 2021.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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