



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

NATASHA MARTINS RODRIGUES DE JESUS

Concepção e *desing* de pás eólicas com materiais poliméricos em impressora 3D

Guaratinguetá - SP
2023

Natasha Martins Rodrigues de Jesus

Concepção e *desing* de pás eólicas com materiais poliméricos em impressora 3D

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza
Co-orientadora: Prof^ª. Thais Santos Castro

Guaratinguetá - SP
2023

J58c	Jesus, Natasha Martins Rodrigues de Concepção e <i>desing</i> de pás eólicas com materiais poliméricos em impressora 3D / Natasha Martins Rodrigues de Jesus - Guaratinguetá, 2023. 129 f : il. Bibliografia: f. 86-93 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza Coorientador: Prof^a. Dr^a Thais Santos Castro 1. Energia eólica. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Impressão tridimensional. I. Título CDU 658.56 (043)
------	---

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Este trabalho engloba os quatro itens dos objetivos de desenvolvimentos sustentáveis, que são energias renováveis de forma acessível e mais limpa, inovação e infraestrutura, cidades e comunidades sustentáveis e consumo responsável. Ela oferece pesquisas inovadoras no setor de fontes alternativas de energia, especificamente com uma turbina tripá.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This work encompasses the four items of the sustainable development objectives, which are renewable energy in an accessible and cleaner way, innovation and infrastructure, sustainable cities and communities and responsible consumption. It offers innovative research in the alternative energy sources sector, specifically with a tripod turbine.

Natasha Martins Rodrigues de Jesus

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA
CURSO: MESTRADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Documento assinado digitalmente
 **MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES**
Data: 21/11/2023 10:11:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza
Orientador / UNESP/FEG
participou por videoconferência

Documento assinado digitalmente
 **TEOFILO MIGUEL DE SOUZA**
Data: 04/11/2023 12:40:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Luiz Reis Rangel
UNESP/FEG
participou por videoconferência

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE LUIZ REIS RANGEL**
Data: 17/11/2023 16:43:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Osiris Canciglieri
Júnior PUC/PR
participou por videoconferência

Documento assinado digitalmente
 **OSIRIS CANCEGLIERI JUNIOR**
Data: 09/11/2023 13:27:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Novembro de 2023

DADOS CURRICULARES
NATASHA MARTINS RODRIGUES DE JESUS

NASCIMENTO: 04.07.1996 – São José dos Campos / SP

FILIAÇÃO: Antônio Luiz de Jesus
Marta Martins Rodrigues de Jesus

2021/2023 - Curso de Pós-Graduação em Engenharia – Área de Materiais
Mestrado – UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

2021/2025 - Curso de Graduação em Engenharia – Mecânica
UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

2019/2021 - Projetos de Estruturas Aeronáuticas, Tecnólogo
Fatec – Faculdade de Tecnologia de São José do Campos – Prof. Jessen Vidal.

2015/2018 - Automação e Manufatura Digital, Tecnólogo
Fatec – Faculdade de Tecnologia de São José do Campos – Prof. Jessen Vidal.

2012/2014 - Mecânica Industrial, Técnico
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo / Campus São José dos Campos.

.

Dedico primeiramente a Deus, ao qual sou muito grata por todas as graças e bençãos que recebo em cada dia de vida. Dedico de modo especial, à minha família por me apoiarem e serem fonte de inspiração em minha vida, para que pudesse realizar esse projeto e tantos outros. Dedico também a minha Mãe, que sempre se esforçou, sacrificou e se dedicou muito em todos os âmbitos, para que eu me tornasse a pessoa que sou hoje.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar, capacitar e fortalecer para realizar a conclusão do meu projeto de mestrado.

Agradeço a minha família por sempre acreditar em mim e fornecer apoio durante toda minha vida.

Agradeço ao meu noivo Rafael por me proporcionar apoio e auxílio em todos os momentos de dificuldades

Agradeço em especial ao meu tio e professor orientador Teófilo e a professora coorientadora Thais por auxiliarem e instruir sempre que foi necessário para o progresso desta pesquisa.

Agradeço à banca composta pelo Prof^a Dr. André Luiz Reis Rangel, pelo Prof. Dr. Osiris Canciglieri Junior, e as professoras que fizeram parte da banca de qualificação Prof. Dra. Isabel Cristina de Barros Trannin, e Prof. Dra. Raphaela Carvalho Machado, que com suas sábias colocações permitiram este trabalho ficar melhor ainda.

Agradeço aos técnicos da UNESP – FEG, Rodolfo dos Santos e Antonio Augusto Moretti Rizzato por terem auxiliado na construção dos suportes do aerogerador, do variador de ângulo das pás e demais ajustes dos experimentos, e todos as nossas conversas de muita torcida e conselhos, que me acompanharam sempre.

Agradeço ao professor Marcelo Sampaio, pela liberação e auxílio no Laboratório de Prototipagem Rápida na UNESP – FEG, para a impressão das pás eólicas.

Agradeço aos funcionários da biblioteca da UNESP – FEG, por toda assistência e disponibilidade prestada.

Agradeço aos funcionários da pós-graduação da UNESP – FEG, por todo auxílio e disponibilidade oferecidos.

E por último agradecer a comunidade da UNESP – FEG de modo geral pela oportunidade de contribuir com o meio científico e por disponibilizarem os recursos necessários para a realização de meu trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – número do processo 155832/2021-2.

“Muitos são os planos no coração do homem,
mas é sempre a vontade de Deus que se realiza.”
(Provérbios 19:20)

RESUMO

A sociedade vem intensificando o foco na preservação ambiental ao longo dos anos devido ao cenário crítico atual do aquecimento global por emissões dos gases de efeito estufa. Uma das soluções adotadas é utilizar energias renováveis, sendo a eólica uma das principais. Seu funcionamento principal é por meio de aeromotores, onde permite a captação da energia do vento. Com base nisso, essa dissertação visa trazer a proposta de projetar e fabricar pás eólicas por meio da impressão 3D. Os materiais poliméricos utilizados foram o ABS, PETG, PLA e Tritan. Os modelos projetados foram de formato reta, curvada e ponta curva para o Tritan e formato reta para os demais materiais. Após a impressão, estas pás eólicas foram submetidas a testes de desempenho utilizando um aerogerador acoplado de um alternador constituído por uma turbina tripá, disponível no Centro de Energias Renováveis da UNESP, campus de Guaratinguetá. Os conjuntos das pás eólicas foram submetidas a experimentos nos quais foram variados o material de construção, o formato e o ângulo de ataque em função da velocidade linear do vento gerado por um túnel de vento. Os dados obtidos foram comparados para determinar quais as melhores combinações de material, formato e ângulo de ataque. Após a realização da pesquisa, concluiu-se que os conjuntos das pás impressas podem ser aplicados nas condições de baixa, média e altas velocidades do vento, pois além de apresentar bom desempenho das rotações, eles possuem as melhores propriedades mecânicas, como resistência e melhor desempenho no processo de impressão 3D em todos os formatos de pás em comparação com os outros materiais estudados.

PALAVRAS-CHAVE: Turbina tripá; Energia eólica; Catia V5; Modelagem 3D CAD, Impressão 3D.

ABSTRACT

Society has intensified its focus on environmental preservation over the years due to the current critical scenario of global warming due to greenhouse gas emissions. One of the solutions adopted is to use renewable energy, wind power being one of the main ones. Its main operation is through aeromotors, which allow the capture of wind energy. Based on this, this dissertation aims to bring the proposal of designing and manufacturing wind blades through 3D printing. The polymeric materials used were ABS, PETG, PLA and Tritan. The models designed were straight, curved and curved for Tritan and straight for the other materials. After printing, these wind blades were subjected to performance tests using a wind turbine coupled to an alternator consisting of a tripod turbine, available at the UNESP Renewable Energy Center, Guaratinguetá campus. The wind blade sets were subjected to experiments in which the construction material, shape and angle of attack were varied depending on the linear wind speed generated by a wind tunnel. The data obtained was compared to determine the best combinations of material, shape and angle of attack. After carrying out the research, it was concluded that the printed blade sets can be applied in conditions of low, medium and high wind speeds, as in addition to presenting good rotational performance, they have the best mechanical properties, such as resistance and better performance in the 3D printing process in all blade shapes compared to the other materials studied.

KEYWORDS: Three-piece turbine; Wind energy; Catia V5; 3D CAD modeling; 3D printing.

.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aerogerador de pequeno porte utilizado no estudo	21
Figura 2. Tipos energias renováveis no mundo	25
Figura 3. Imagem ilustra a projeção da capacidade até 2024	30
Figura 4. Projeção da capacidade instalada até 2023	31
Figura 5. Principais componentes do aerogerador	32
Figura 6. Rotores de eixo vertical	33
Figura 7. Rotores de eixo horizontal	34
Figura 8. Modelo de pá eólica reta.	35
Figura 9. Modelo de pá curvada.	35
Figura 10. Modelo de pá eólica ponta curva	35
Figura 11. Exemplos de aplicação de polímeros termoplásticos	38
Figura 12. Representações esquemáticas dos copolímeros	38
Figura 13. Monômero constituído na composição química de ABS	39
Figura 14. Monômeros constituído na composição química do PETG	42
Figura 15. Cadeia polimérica do PETG após o processo de copolimerização	42
Figura 16. Exemplos de aplicação do PETG	43
Figura 17. A cadeia polimérica do PLA	44
Figura 18. Exemplo de aplicação do PLA	45
Figura 19. Comparativo entre os processos de manufatura subtrativa A) e aditiva B)	46
Figura 20. Processo de manufatura aditiva	48
Figura 21. Processo de impressão 3D	48
Figura 22. Processo de impressão 3D	49
Figura 23. Fluxograma da pesquisa	53
Figura 24. Perfil aerofólio NACA 2412	54
Figura 25. Vista isométrica da pá de formato reta	55
Figura 26. Vista isométrica da pá de formato curvada	56
Figura 27. Vista isométrica da pá de formato com ponta curva	57
Figura 28. Projeção da primeira parte dos encaixes da pá eólica.	58
Figura 29. Desenho 3D da primeira parte dos encaixes das pás eólicas.	58
Figura 30. Desenho 3D da primeira parte dos encaixes das pás eólicas.	59
Figura 31. Desenho 3D da segunda parte dos encaixes das pás eólicas.	59
Figura 32. Desenho 3D dos pinos para o encaixe das partes pás eólicas.	60

Figura 33. Túnel de vento para obtenção da velocidade linear do vento	60
Figura 34. Anemômetro para velocidade linear do vento em m/s	61
Figura 35. Termômetro digital	61
Figura 36. Tacômetro digital.....	62
Figura 37. Amperímetro digital	62
Figura 38. Multímetro digital	63
Figura 39. Conjunto de <i>Coolers</i> 21W/12V	63
Figura 40. Inclinômetro digital	64
Figura 41. Diagrama elétrico e o conjunto de <i>coolers</i>	64
Figura 42. Turbina tripás com alternador Delco-Arno	65
Figura 43. Impressora 3D 400x400x500mm.	66
Figura 44. Óleo <i>Singer</i>	68
Figura 45. Óleo <i>spray</i> Karina 400 ml	68
Figura 46. Massa plástica Ultra Light 495 g.....	69
Figura 47. Cola superbonder utilizada para colagem das partes das pás eólicas.	69
Figura 48. Gráfico de documentos relacionado ao tema publicados por ano	72
Figura 49. Gráfico dos tipos de documentos encontrados na base de dados <i>Scopus</i>	72
Figura 50. Pá de formato reta em ABS	74
Figura 51. Pá de formato curvada em Tritan	74
Figura 52. Pá de formato ponta curva em ABS	74
Figura 53. Gráfico da frequência do ventilador do túnel de vento versus velocidade linear do vento incidente no centro da turbina tripás	76
Figura 54. Gráfico da relação entre as rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 3,6 m/s	77
Figura 55. Gráfico das rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 6,6 m/s	78
Figura 56. Gráfico das rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 11,7 m/s	79
Figura 57. Gráfico das rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 3,6 m/s para o material Tritan	80
Figura 58. Gráfico das rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 6,6 m/s para o material Tritan	81
Figura 59. Gráfico das rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 11,7 m/s para o material Tritan	82

Figura 60. Mapa das regiões do Brasil com as variações velocidades do vento	83
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Vantagens e desvantagens das impressões 3D com os materiais poliméricos	67
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variação percentual de monômeros do ABS.....	40
Tabela 2. Base de dados <i>Scopus</i>	71
Tabela 3. Base de dados <i>Web of Science</i>	73
Tabela 4. Base de dados Periódicos Capes	73
Tabela 5. Pás de melhor desempenho à vazio e com carga	83
Tabela 6. Custos para a fabricação das pás eólicas	84
Tabela 7. Preço estimado das impressões 3D	85
Tabela 8. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material ABS com ângulo de ataque de 5°.....	97
Tabela 9. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PETG com ângulo de ataque de 5°.....	98
Tabela 10. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PLA com ângulo de ataque de 5°.....	99
Tabela 11. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material Tritan com ângulo de ataque de 5°.....	100
Tabela 12. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material ABS com ângulo de ataque de 10°.....	101
Tabela 13. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PETG com ângulo de ataque de 10°.....	102
Tabela 14. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PLA com ângulo de ataque de 10°.....	103
Tabela 15. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material Tritan com ângulo de ataque de 10°.....	104
Tabela 16. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material ABS com ângulo de ataque de 15°.....	105
Tabela 17. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PETG com ângulo de ataque de 15°.....	106
Tabela 18. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PLA com ângulo de ataque de 15°.....	107
Tabela 19. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material Tritan com ângulo de ataque de 15°.....	108
Tabela 20. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material ABS com ângulo de	

ataque de 20°	109
Tabela 21. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PETG com ângulo de ataque de 20°	110
Tabela 22. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PLA com ângulo de ataque de 20°	111
Tabela 23. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material Tritan com ângulo de ataque de 20°	112
Tabela 24. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material ABS com ângulo de ataque de 25°	113
Tabela 25. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PETG com ângulo de ataque de 25°	114
Tabela 26. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PLA com ângulo de ataque de 25°	115
Tabela 27. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material Tritan com ângulo de ataque de 25°	116
Tabela 28. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato curvada e ângulo de ataque de 5°	117
Tabela 29. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato curvada e ângulo de ataque de 10°	118
Tabela 30. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 1 e ângulo de ataque de 10°	119
Tabela 31. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 2 e ângulo de ataque de 10°	120
Tabela 32. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato curvada e ângulo de ataque de 15°	121
Tabela 33. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 1 e ângulo de ataque de 15°	122
Tabela 34. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 2 e ângulo de ataque de 15°	123
Tabela 35. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato curvada e ângulo de ataque de 20°	124
Tabela 36. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 1 e ângulo de ataque de 20°	125
Tabela 37. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 2 e	

ângulo de ataque de 20°	126
Tabela 38. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato curvada e ângulo de ataque de 25°	127
Tabela 39. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 1 e ângulo de ataque de 25°	128
Tabela 40. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 2 e ângulo de ataque de 25°	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
CAD	Computer aided design
CHDM	Ciclohexanodimetanol
DMT	Dimetiltereftalato
FDM	Fused Deposition Modeling
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
ONU	Organização das nações unidas
PETG	Polietileno Tereftalato + Glicol
PET	Polietilenotereftalato
PLA	Poli(ácido láctico)
SIGA	Sistema de informações de geração da ANEEL
TMCD	Tetrametilciclobutanadiol
Tritan	Dimetiltereftalato, ciclohexanodimetanol, tetrametilciclobutanodiol
3D	Tree dimension

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	20
2.	OBJETIVOS	22
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	22
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2.3.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1.	HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DE MATRIZES ENERGÉTICAS	24
3.2.	ENERGIAS RENOVÁVEIS	25
3.3.	GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA.....	26
3.4.	PANORAMA ATUAL DOS AEROGERADORES DISPONÍVEIS NO MERCADO	29
3.5.	AEROGERADORES	31
3.6.	PÁS EÓLICAS	34
3.7.	MATERIAIS POLIMÉRICOS	36
3.8.	A IMPRESSÃO 3D	45
3.9.	ESTUDOS CORRELATOS.....	50
4.	METODOLOGIA	52
4.1.	MATERIAIS.....	52
4.2.	MÉTODOS	52
4.3.	ETAPAS DO PROJETO	52
4.4.	OS EXPERIMENTOS.....	53
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	71
5.2.	RESULTADOS DOS PROJETOS DAS PÁS EÓLICAS.....	73
5.3.	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS COM TRÊS FORMATOS DAS PÁS EÓLICAS.....	75
5.4.	CUSTOS DOS MATERIAIS E IMPRESSÃO	84
6.	CONCLUSÕES	86
7.	TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE 1	97
	TRABALHOS DESENVOLVIDOS E APRESENTADOS DURANTE O MESTRADO	

SOLICITAÇÃO DE PATENTE	131
-------------------------------------	------------

1. INTRODUÇÃO

Devido ao aumento do consumo e à dependência mundial de energia gerada por meio de recursos não renováveis, o conceito de energia sustentável é evidenciado na sociedade atual e destaca-se a necessidade de sistemas alternativos de energia (ALMEIDA et al., 2021).

Um dos maiores desafios e preocupação mundial é a emissão dos gases de efeito estufa devido as mudanças climáticas, em especial ao dano causado na camada de ozônio que por consequência resulta no aumento de temperatura ambiente. Neste aspecto, o Brasil apresentou reduzidos índices de emissão em 2018 e emitiu cerca de 85% menos que a China, 76% menos que os Estados Unidos e 69% menos que a União Europeia para gerar cada MWh, segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2021 (EPE, 2021).

Diante disso, segundo a ONU (2018), no Brasil, a importância da preservação ambiental incluiu em suas metas de sustentabilidade de energia viável, sustentável, renovável e moderna para todos. Para isso, as fontes de energia implicam o uso de elementos mais limpos e renováveis (BARBOSA et al., 2022). Segundo Carr e Thomson (2022), a eficiência energética é a maneira mais efetiva de ao mesmo tempo reduzir os custos e os impactos ambientais locais e globais. O uso das fontes renováveis de energia possui grandes benefícios como a redução das emissões atmosféricas de gases do efeito estufa, oferta de meios de diversificação de suprimento energético e de combustíveis e, além de reduzir as contas mensais dos consumidores.

A energia eólica é uma energia renovável e sustentável, uma das mais avançadas em termos de tecnologia e aplicação, pois além de não emitir gases poluentes, utiliza de uma inesgotável fonte de combustível, o vento (FREIRE; FONTGALLAND, 2022). Atualmente, é uma das opções responsável por aumentar o fornecimento a novas fontes de energia e como consequência dessa produção constata-se o baixo custo em comparação com outras fontes de energia renováveis (AZEVEDO, 2022). Sendo assim, o Brasil tem apostado e investido intensamente nessa nova opção de energia, embora ainda a população brasileira tenha pouco conhecimento sobre suas características (ALMEIDA et al., 2022). Em vista disso, a utilização dos aerogeradores contribui para a redução do aumento do efeito estufa (SILVA et al., 2021).

Para a construção de um aerogerador são necessários os seguintes componentes: as pás, o rotor, a *nacelle* e a torre (SILVEIRA, 2021). Os aeromotores podem ser classificados em três grupos devido à variedade de tamanhos existentes, essa divisão é realizada a partir da potência de cada um (SANTOS, 2018):

- Pequeno porte: Potência de 0,1 kW até 100 kW;
- Médio porte: Potência de 101 kW até 300 kW;

- Grande porte: Potência acima de 300 kW.

Além disso, existem dois tipos básicos de turbinas eólicas, as de eixo vertical e eixo horizontal (BARACAT, 2021). Essa divisão dos dois grupos, é definida de acordo com a orientação do eixo de rotação do rotor.

As pás eólicas que compõem o conjunto, são compostas em sua fabricação por materiais compósitos como resina epóxi e fibra de vidro (MORAIS, 2018; FERNANDES, 2019), fibra de carbono (XU, 2021) e composições metálicas (MANHÃES et al., 2022). Com isso, a fabricação das pás acaba por gerar muitos resíduos e o processo de fabricação delas dificulta o acesso e o custo encarece, a impressão 3D pode otimizar e facilitar o processo de fabricação.

Com isso, uma das áreas que tem apresentado uma exponencial evolução, é o processo de impressão 3D e com ela surge novos processos, cada vez mais específicos (CABREIRA, 2018). A atual forma de manufatura, é composta por um conjunto de processos de fabricação aditiva que proporcionam a produção de protótipos, peças e dispositivos, por meio da extrusão e deposição de vários materiais, como, polímero na geometria desejada (GONZAGA, 2021).

Visando esses conteúdos e entendendo a importância do crescimento do setor de manufatura aditiva para as indústrias, este trabalho tem por objetivo apresentar um processo inovador de fabricação de pás eólicas para sistemas de aerogeradores de pequeno porte horizontal, utilizando materiais poliméricos e para a fabricação delas o processo de impressão 3D. A Figura 1, mostra um modelo utilizado com o formato de pá reta.

Figura 1. Aerogerador de pequeno porte utilizado no estudo



Fonte: Autor (2023).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa a fabricação das pás eólicas em materiais poliméricos com impressão 3D. É proposto um novo meio de fabricação para as pás eólicas, em que, se possa ter mais facilidade e acesso na produção delas, melhorar a eficiência do rendimento da turbina tripás por meio das pás em materiais poliméricos em que o desempenho dela seja otimizado com a geometrias dos perfis aerodinâmicos específicos. Para esse estudo, o projeto das pás eólicas é desenvolvido para um aerogerador de pequeno porte com orientação do rotor horizontal utilizando um alternador Delco - Arno para geração de 400 W/12VDC/35A/1000 rpm.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- a) Elaborar o projeto das pás eólica com modelagem 3D, para eixo horizontal utilizando o *software* CATIA V5®.
- b) Fabricar os modelos projetados das pás eólicas em impressão 3D com os ajustes do projeto.
- c) Realizar os experimentos e analisar com coleta de dados sobre velocidade do vento, temperatura ambiente, rotação da turbina tripás a vazio e com carga com os diversos modelos fabricados utilizando o alternador Delco – Arno.
- d) Analisar e sintetizar os dados coletados em campo e, avaliar o melhor desempenho dos conjuntos no processo de fabricação de impressão 3D.

2.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A distribuição das etapas desta dissertação está disposta em cinco capítulos, sendo eles introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e discussões e conclusões. Por último são apresentadas as referências utilizadas.

A primeira etapa deste estudo está descrita no Capítulo 1, com a apresentação do estado da arte sobre energia renováveis e eólica, a proposta do desenvolvimento da dissertação. No Capítulo 2 estão apresentados os objetivos e a estrutura da dissertação. O Capítulo 3, consiste em uma revisão bibliográfica sobre energia eólica, aerogeradores, pás eólicas, materiais poliméricos e impressão 3D. Nela os principais modelos de turbinas eólicas bem como suas

principais características foram abordadas. A evolução da construção das máquinas eólicas foi brevemente descrita nesta etapa do trabalho assim como suas principais características, no que tange ao projeto e construção, conceitos de aerodinâmica, impacto ambiental. E descreve os sistemas de geração eólica explicando o princípio de funcionamento dos aeromotores de eixo horizontal. O Capítulo 4 é a parte experimental com os ensaios do aerogerador para quantificar o rendimento. Com os ensaios detalhados do funcionamento e construção das pás eólicas e quais equipamentos e parâmetros foram utilizados nos experimentos. O projeto do aeromotor é apresentado passo a passo neste capítulo. Na sequência foram tratadas as diversas variáveis que vieram a determinar o modelo de aeromotor construído. O *software* CATIA V5® foi utilizado para modelar o perfil aerodinâmico, utilizado para a construção das pás do aeromotor; através da utilização deste *software* foi possível fazer modificações no perfil NACA padrão e assim aumentar a capacidade de geração de força de sustentação no perfil final utilizado, em comparação ao perfil padrão. O Capítulo 5 são os resultados obtidos durante a parte experimental e as análises através de textos, tabelas, gráficos, na mesma sequência dos experimentos. Foram realizados experimentos no aeromotor de eixo vertical com a finalidade de determinar seu desempenho geral, para isto foram medidos diversos parâmetros, tais como, comparação entre os modelos apresentados das pás, rotação das pás do aeromotor e torque na saída do redutor de velocidades. Os resultados dos experimentos são apresentados através de gráficos. Ainda no Capítulo 5, fez-se um comparativo dos resultados de potência e velocidade da pá já disponível do modelo antigo. O Capítulo 6 trata das conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros, onde foram feitas as considerações para o completo entendimento dos resultados obtidos nos experimentos e foram apontados pontos de melhoria no projeto, com a finalidade de melhorar o desempenho, a serem consideradas em trabalhos futuros.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentado a revisão de literatura sobre energia eólica, aerogeradores, pás eólicas, materiais poliméricos e impressão 3D, bem como trabalhos correlatos ao estudo atual.

3.1. HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DE MATRIZES ENERGÉTICAS

Segundo Almeida et al., (2021), existem duas escalas temporais bem distintas para o consumo de energia, antes e depois da Revolução Industrial.

Antes, as energias utilizadas eram em sua maioria renováveis. Após a Revolução Industrial, as fontes de energia passaram a ser não renovável e o carvão era a principal fonte de energia (PIFFERO *et al.*, 2020). Ele possuía característica de ser uma fonte barata e abundante de energia e, possibilitou a invenção de inúmeras máquinas a vapor, entre elas: trens, embarcações e maquinários de fábricas (ALMEIDA et al., 2021).

Até 1961, o carvão era a fonte de energia mais utilizada, quando foi substituído pelo petróleo (PIFFERO *et al.*, 2020). O petróleo é uma fonte de energia não renovável e rica em hidrocarbonetos por ser derivada de resíduos fósseis (CAMPOS; RODRIGUES, 2022). Essa mistura complexa de hidrocarbonetos com quantidade bastante significativa de isômeros, além destes, apresenta compostos contendo nitrogênio, oxigênio e enxofre, que dificultam as etapas de extração, isolamento e caracterização dos compostos (ALMEIDA et al., 2021). Elevadas pressões e temperaturas são essenciais para a criação do produto final (TORQUATO, 2022). Essa fonte de energia ainda é a principal matriz energética da sociedade, mesmo que seu processo de extração gere impactos para o meio ambiente (MARTINS et al., 2021).

Segundo Piffero *et al.* (2020), o desafio com a emissão dos gases poluentes provenientes do uso de combustíveis fósseis passa a ser uma preocupação para lideranças mundiais em meados da década de 70, porém existem outros motivos para a busca de novas fontes energéticas. Na mesma década, houve duas crises de petróleo que desencadearam uma mobilização político-econômica, permitindo o reconhecimento das fontes renováveis com foco na energia eólica (TORQUATO, 2022).

Com esses fatos consolidados, foi possível perceber que o domínio e o desenvolvimento de uma nação estão estritamente ligados a capacidade de produção promovida pelo uso de energia em diversas formas e que a nação mais influente era aquela que utilizava melhor a

energia eólica em suas organizações marítimas, uma vez que esse tipo de energia era a base da navegação desde a idade média até a revolução industrial (MACIEL, 2021).

3.2. ENERGIAS RENOVÁVEIS

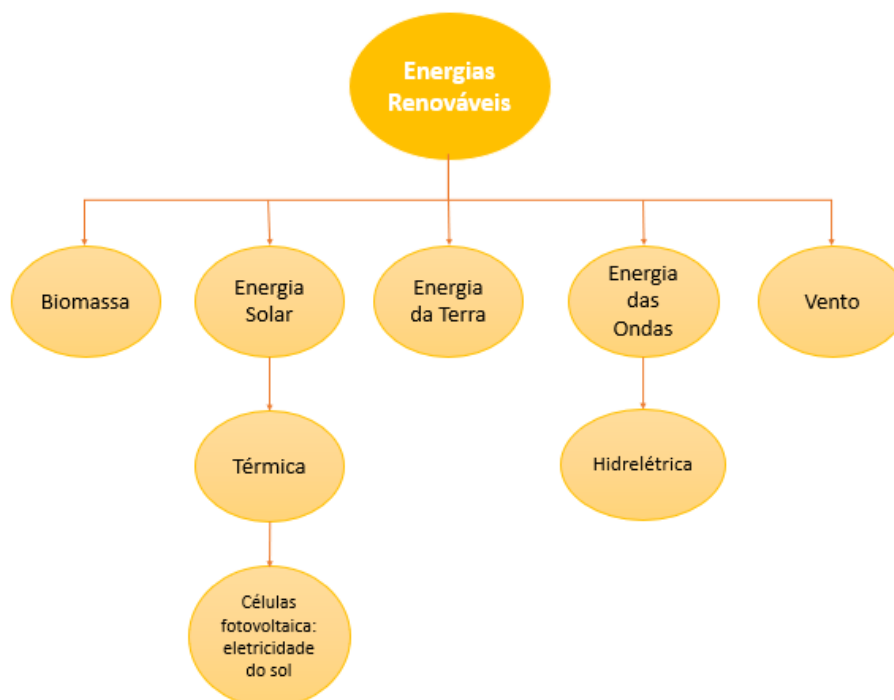
O ganho com as fontes renováveis de energia tem tido cada vez mais destaque no cenário mundial atual, sendo os pilares da busca pela preservação ambiental e desenvolvimento sustentável (FORTES; ELIAS, 2019).

O estudo da geração de energias renováveis e não renováveis e, do meio ambiente como parte integrante do currículo escolar, é um campo multidisciplinar que requer abordagens próprias, considerando conhecimentos que os alunos desenvolveram durante a vida e o conhecimento científico vigente (LLOYD, 2017).

As energias renováveis surgem como alternativa de viver bem na inter-relação com o sistema econômico, além da necessidade de substituir a energia suja (não renovável) pela energia limpa (renovável) sem proporcionar uma redução do crescimento econômico, e sim, agregar alternativas para crescer, desenvolver e sustentar a economia, o social e o ambiental simultaneamente (VIEIRA, 2021).

Atualmente, as energias renováveis de fontes da natureza e processadas pelas tecnologias estão destacadas no organograma da Figura 2.

Figura 2. Tipos energias renováveis no mundo



Fonte: Adaptado de Vieira (2021).

Cada elemento da natureza, destacado na Figura 2, possibilita uma maneira particular de transformar os movimentos em energias através da ciência com o uso da tecnologia. Como por exemplo a energia solar térmica que utiliza o calor do sol para aquecer prédios ou a água, além de fornece calor para processos industriais e produzir eletricidade. A energia proveniente da água, hidreletricidade, que usa a energia da água corrente, sem reduzir sua quantidade, para produzir eletricidade. A energia do vento, que pode ser utilizada para geração de eletricidade ou bombeamento d'água (VIEIRA, 2021).

Conforme Carvalho et al., (2022), tentativas ambiciosas foram feitas para prever como a disseminação de tecnologias renováveis transformará a economia moderna.

Isso significa que essas fontes de energia não geram contaminações quando usadas e que se reabastecem naturalmente. Para elas, devem ter a capacidade de suprir as necessidades da geração atual sem comprometer as necessidades das gerações futuras (CARVALHO, 2023). Destaca-se que fontes de energia renováveis não são sempre sustentáveis, uma vez que as fontes renováveis podem tornar-se insustentáveis se o recurso for usado numa velocidade e quantidade superior à sua capacidade de reposição.

Diversos países do mundo vêm buscando utilizar fontes alternativas e renováveis de energias para substituir as tradicionais, visando reduzir os impactos ambientais e ampliar a oferta, diversificando a matriz energética. Para atender a essa crescente demanda e tornar a produção de energia alternativa mais independente, o desafio com o sistema energético dos países deve ser enfrentado com urgência para reduzir os danos ao planeta e à sociedade (SOUZA; NOGUEIRA, 2022).

3.3. GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

Entende-se, segundo Koslinsk (2022) que a energia eólica é proveniente do deslocamento de massas de ar, o deslocamento é dado por conta da diferença de pressão entre os locais, assim massas de ar em áreas de grande pressão tendem a ir para áreas de baixa pressão. Tal diferença ocorre por conta do aquecimento das massas de ar pelo sol. Para conversão de energia, são utilizadas turbinas eólicas que rotacionam e transformam a energia cinética em energia rotacional e com a utilização de um aerogerador, é possível obter energia elétrica (XU, 2021).

Consta-se que no final do século XIX, na América criou-se o primeiro cata-vento cuja a finalidade era gerar energia elétrica. Durante a segunda Guerra Mundial, a maior turbina eólica construída foi na época de 1940, estava localizada no estado de Vermont. A turbina fornecia

cerca de 1,25 MW e alimentava a energia da rede pública do local. Os anos seguintes, o investimento na energia eólica decresceu em detrimento de outras fontes com maior rentabilidade econômica, como é o caso do petróleo e de outras fontes fósseis (BRISEÑO; ROJAS, 2020).

Segundo Martins et al., (2021) em 1980, a preocupação ambiental teve uma crescente com a necessidade de investir em fontes de energias renováveis que atenuassem o impacto negativo da utilização de fontes mais agressivas. Desde então, a energia eólica teve uma notória evolução na sua concessão de forma a melhorar o desempenho (MARTINS et al., 2021). O Brasil, por possuir abundância de recursos hídricos, começou a aumentar sua capacidade geradora através da instalação de usinas hidroelétricas, que apesar de não lançarem diretamente gases poluentes na atmosfera durante a produção de energia elétrica, agredem o meio ambiente devido à inundação de áreas próximas dos reservatórios, além do que, a inundação de áreas de florestas causa a liberação de gases tóxicos na atmosfera, devido à decomposição da madeira em contato com a água (BARBOSA et al., 2022). Outras fontes de energias alternativas estão sendo cada vez mais estudadas, aplicadas e passam a fazer parte das matrizes energéticas dos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Estas fontes de energia trazem em sua maioria a grande vantagem de não emitir ou emitir em escala reduzida gases e agentes poluidores ao meio ambiente. Que segundo Santos (2018), diversos componentes levam a afirmação que é necessário investir mais nas energias renováveis por elas possibilitarem usar uma energia mais barata, preservar o meio ambiente e a saúde humana. Entre as mais utilizadas atualmente segundo Siqueira (2021), está a energia eólica e é notável a ascensão do interesse sobre o estudo de fontes alternativas de energias renováveis, tem-se visto seu crescimento acelerado durante a última década no Brasil. Ela se tornou a principal opção para os planejadores e os governos nacionais, que procuram diversificar os recursos energéticos e reduzir as emissões de CO₂, fomentar novas indústrias e gerar novas oportunidades de emprego (AZEVEDO, 2022).

Desta forma, a energia eólica é uma das opções e atualmente é a responsável por aumentar o fornecimento a novas fontes de energia. Como consequência dessa produção constata-se o baixo custo em comparação com outras fontes de energia renováveis (HATJE, 2018).

O crescimento rápido das energias renováveis vem difundindo cada vez mais em empresas públicas e particulares, famílias e comunidades como um todo (VIEIRA, 2021).

A energia eólica fornece uma parte substancial da eletricidade em um número crescente de países. Em 2019, a energia eólica gerou energia suficiente para fornecer cerca de 15% do consumo anual de eletricidade da União Europeia e parcelas iguais ou superiores em pelo menos

sete Estados-Membros individuais. A energia eólica atendeu a cerca de 47% da demanda de eletricidade da Dinamarca em 2019 e representou quase 57% da geração total do país. Outros países da Europa com participações de geração eólica acima de 20% em todo o ano de 2019 incluíram a Irlanda (32%), Portugal (26,4%), Alemanha (21,8%) e Espanha (20,9%). Uruguai (29,5%), Nicarágua (17,4%) e Costa Rica (15,8%) também alcançaram altas participações de geração de energia eólica em 2019, e foram altos no nível subnacional em vários países. No final do ano, a capacidade de energia eólica em operação em todo o mundo era suficiente para fornecer cerca de 5,9% da geração total de eletricidade global (REN21, 2020).

Um dos fatores que nortearam a expansão e atrelou ao crescimento com produção de energia suja para a mudança de energias limpas foi o acordo em Paris, através da Conferência das Partes (COP) em 2015, conhecida como COP-21. Nessa convenção foi finalizada as negociações ao adotar o Acordo de Paris, na COP 22/CMA1 e constituiu a primeira sessão da Conferência das Partes no Acordo de Paris (CMA1), com isso os países comprometeram-se em usar mais energias renováveis no processo produtivo, auxiliando comunidades ao uso delas, como uma das formas de conter o aumento da temperatura média do planeta, reavaliando os seus subsídios a combustíveis fósseis (VIEIRA, 2021)

Os relatórios elaborados e a Agenda 21 possibilitaram a necessidade de organizar mudanças na geração de energias suja para energias limpas, para que ocorram reduções no aquecimento do planeta. Em cada país, a matriz energética expande com o aceleração do capitalismo e nela percebe-se a renovação de energias para as renováveis no setor produtivo e social (VIEIRA, 2021)

O Balanço Energético Nacional de 2019 (dados relativos a 2018) e 2020 (dados relativos a 2019), retratam que a repartição da oferta interna do Brasil em 2018 foi de 54,7% de energias não renováveis, em 2019 reduziu para 53,9%. Enquanto nos mesmos períodos a energia renovável aumentou passando de 45,3% em 2018, para 46,1% em 2019. Um cenário de expansão da energia renovável no país, gerada pela biomassa, hidráulica, solar, eólica, dentre outras, favorecendo mudanças na geração de energia com o auxílio de políticas governamentais (REN21, 2020).

A produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 57.051 GWh em 2020, equivalente a um aumento de 1,9% em relação ao ano anterior, quando se atingiu 55.986 GWh. Ainda em 2020, a potência instalada para geração eólica no país expandiu 11,4%. Segundo o banco de Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o parque eólico nacional atingiu 17.131 MW (EPE, 2021).

A produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 72,3 TWh em 2021,

equivalente a um aumento de 26,7% em relação ao ano anterior, quando se atingiu 57,1 TWh. Em 2021, a potência instalada para geração eólica no país expandiu 21,2%. Segundo o banco SIGA, da ANEEL, o parque eólico nacional atingiu 20.771 MW (EPE, 2022).

Atualmente, o Brasil produz cerca de 9,5 gigawatts de energia por ano através da fonte eólica. Esse montante corresponde a cerca de 8,6% da matriz energética brasileira. São 520 parques eólicos instalados no Brasil (dados relativos a 2020), segundo a Aneel (2018), que produzem cerca de 56 mil GWh de energia elétrica. A região Nordeste é a que mais gera energia eólica no Brasil, sendo o Rio Grande do Norte e a Bahia os maiores estados produtores deste importante tipo de energia renovável (CAMPOS; RODRIGUES, 2022).

3.4. PANORAMA ATUAL DOS AEROGERADORES DISPONÍVEIS NO MERCADO

A partir dos anos 2000 os incentivos com investimentos alcançam mais de 30 mil aerogeradores fornecendo uma produção mundial de energia elétrica de origem eólica. A perspectiva era de chegar em 2020 com uma produção mundial de 12% de fornecimento de energia eólica, o que corresponde a 12000 GW (ANEEL, 2018). Com isso, é notável que utilizar a geração de energia renovável é uma alternativa para uma produção energética independente de combustíveis fósseis.

O setor energético eólico brasileiro é dividido em três categorias conforme sua situação no fornecimento de energia elétrica:

- Construção: são classificados os setores em que ainda estão em fase de planejamento e construção.
- Operação: são parques eólicos aptos para produzirem eletricidade, mas ainda não são contratos para o fornecimento de energia para o sistema elétrico de potência.
- Contratação: são os setores responsáveis pela geração eólica fornecida ao sistema elétrico de potência.

Já em 2018, o crescimento da energia eólica no Brasil atendeu e surpreendeu as previsões de um mercado promissor, o investimento para o futuro chega a R\$60 bilhões (EPE, 2021). O Brasil operava com 520 parques eólicos, aproximadamente 6.600 aerogeradores e fornecendo 13 GW de potência instalada, o suficiente para atender 67 milhões de pessoas ou equivalente a 22 milhões de residência (ANEEL, 2018). Em 2021 segundo Aneel (2021), o Brasil opera com 726 parques eólicos, 8.500 aerogeradores e fornecendo 17 GW de potência instalada atendendo a 87,63 milhões de pessoas.

Estima-se que o crescimento da geração de energia eólica brasileira terá um crescimento, conforme ilustra na Figura 3. A expectativa para instalação em 2024 chegará a 18,8 GW em todo território brasileiro. Os dados apresentados referenciam os setores contratados e em operação (ABEEOLICA, 2018).

Figura 3. Imagem ilustra a projeção da capacidade até 2024



Fonte: (ABEEOLICA, 2018).

No cenário de 2018, o parque eólico brasileiro atingiu o patamar com potência instalada de 14 GW, que corresponde à capacidade instalada da hidrelétrica de Itaipu e representa aproximadamente 14% da potência fornecida para o Sistema Interligado Nacional – SIN (AGÊNCIA BRASIL, 2018).

A queda da geração de energia eólica entre 2019 à 2022, representada na Figura 3, se justifica pelo motivo que neste período a geração e a procura por energia solar aumentou e com isso o desinteresse na energia eólica decaiu. Mas posteriormente em 2022, a produção da energia dos ventos aumentou (ABEEOLICA, 2018).

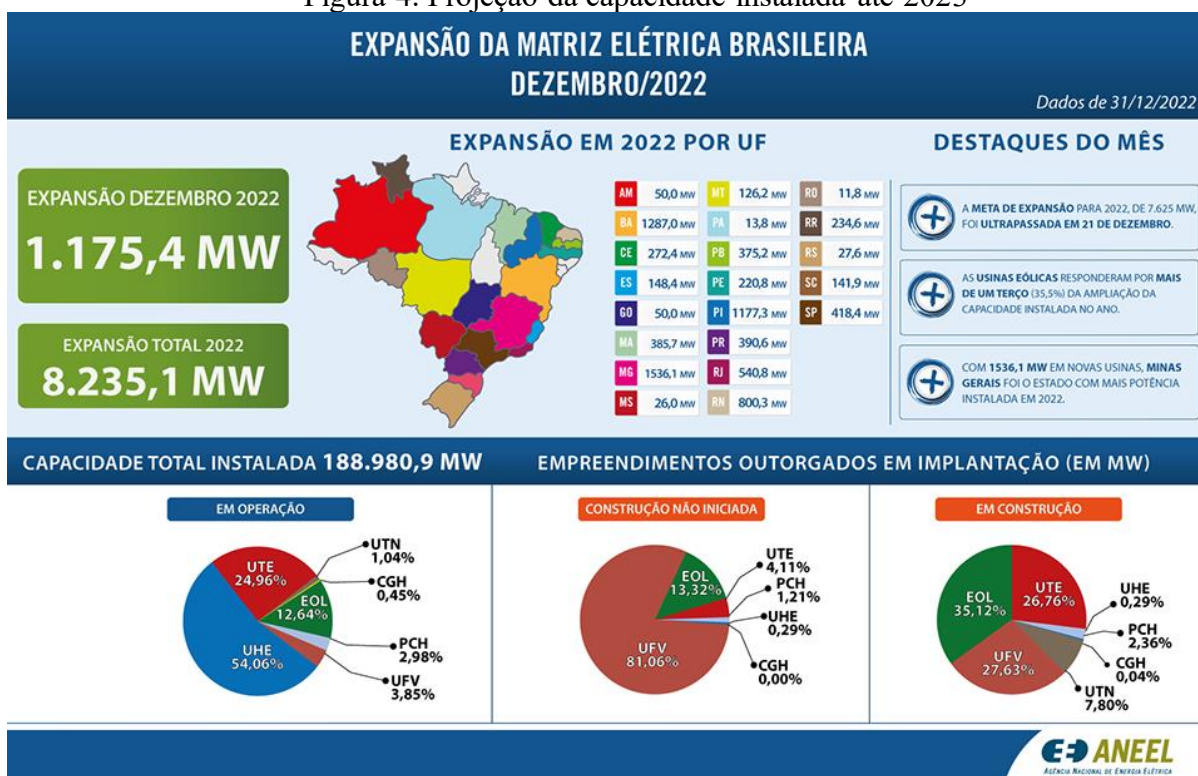
No ranking mundial, o Brasil está entre os sete países que mais dispõem de potência eólica no mundo (GWEC, 2021). Esse potencial energético é devido à capacidade de geração dos parques e complexos eólicos distribuídos no território brasileiro, sendo que o nordeste do país é a região de maior disponibilidade no fornecimento de potência proveniente do vento, tendo como principais estados o Rio Grande do Norte e a Bahia (VITAL *et al.*, 2020).

No Brasil, das fontes renováveis existentes, a energia eólica apresenta um grande crescimento, aumentando cerca de 40,6% entre janeiro e agosto do ano de 2021 de acordo com o site Aneel (2021), no nordeste brasileiro a mesma fonte é responsável por 87% de todo o setor

elétrico da região, com aproximadamente 620 parques eólicos distribuídos ao longo de todo o território.

Em 2022, o Brasil investiu na expansão da matriz elétrica, alcançando o índice de 188.980,9 MW de capacidade total instalada. A Figura 4 apresenta o aumento por estado.

Figura 4. Projeção da capacidade instalada até 2023



Fonte: (ANEEL, 2023).

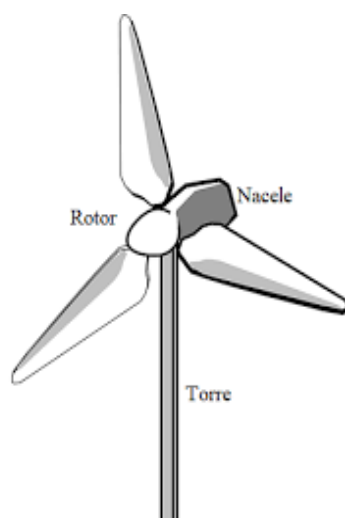
O estado de Minas Gerais teve o maior aumento na disponibilidade de potência eólica do Brasil ultrapassando o Rio Grande do Norte e a Bahia. Com expansão de 360,1 MW, em dezembro de 2022, totalizando a capacidade de instalada de 1536,1 MW. O Nordeste continua com o maior registro de ampliação com 4.518,7 MW, representando 55% do total do acréscimo no ano.

3.5. AEROGERADORES

Os aerogeradores, em formato de cata-vento, são colocados em locais abertos e com boa quantidade de vento. Por meio de um gerador, o movimento destas turbinas produz energia elétrica (CAMPOS; RODRIGUES, 2022). Os componentes de um aerogerador são a caixa de velocidade e o gerador.

A caixa de velocidade torna possível a transmissão e o controle da energia mecânica que chega ao gerador. E o gerador por sua vez, possui a função de receber e transformar a energia mecânica do torque do eixo em energia elétrica para a distribuição (LIU et al., 2020). Estes dispositivos estão localizados no alinhamento do rotor numa estrutura de proteção, denominada de *nacelle*. Nesta estrutura também existe um freio mecânico com o intuito de parar a turbina quando necessário (CAMPOS; RODRIGUES, 2022). A representação do conjunto está apresentada na Figura 5.

Figura 5. Principais componentes do aerogerador



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2020).

As turbinas de eixo horizontal têm como componentes principais:

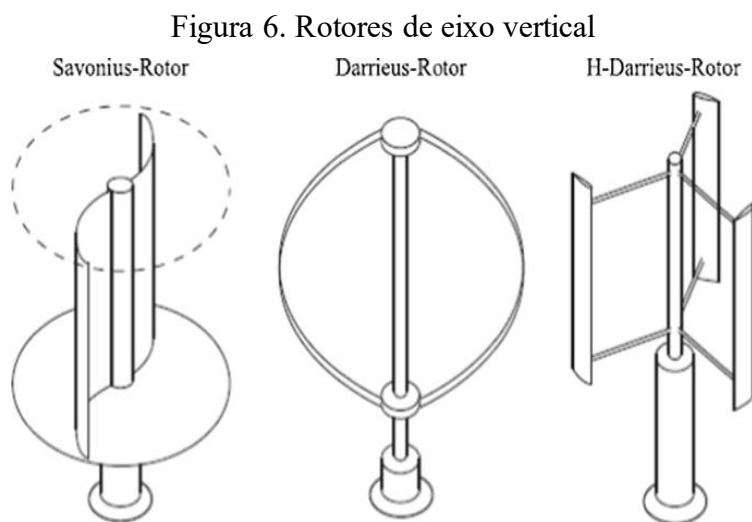
- Rotor – cubo de fixação das pás e do *hub*, nele transmite-se o movimento de rotação para o sistema gerador.
- *Nacelle* – abriga componentes como o gerador, o sistema de *yaw* que é alinhamento a turbina com o vento, a caixa multiplicadora onde adapta a rotação a velocidade do gerador e os sistemas hidráulicos e de controle eletrônico.
- Torre – construída em aço ou concreto, sustenta o rotor e a *nacelle*.
- Pás – captam o vento convertendo sua potência ao centro do rotor. Seu design segue soluções de engenharia das asas de aviões.

O funcionamento do aerogerador está na movimentação das pás com a força do vento que acionam o rotor, gerando uma força mecânica. Com o apoio da caixa multiplicadora (caso tenha), o rotor faz girar o eixo do gerador. Junto ao conversor de potência, o gerador transforma a energia mecânica em eletricidade (LIU et al., 2020).

As turbinas eólicas podem ser divididas em dois grandes grupos de acordo com a orientação do eixo de rotação do rotor, em vertical ou horizontal. As turbinas de eixo horizontal são as mais comuns comparadas às turbinas eólicas de eixo vertical, uma vez que estas apresentam alguns aspectos negativos como a baixa taxa de velocidade da ponta da pá, resultando em um menor rendimento, a incapacidade de iniciar o movimento autonomamente e dificuldade de controlar a velocidade do rotor (MARTINS et al., 2021)

Os rotores de eixo vertical possuem complexidade de projeto e esforços devido às forças de *Coriolis* baixos, pois não exigem de mecanismos de acompanhamento para alterações da direção do vento. Além disso, possuem a possibilidade de serem motivados por forças de sustentação (*lift*) e por forças de arrasto (*drag*) (OKITA, 2017).

Na Figura 6 observa-se os principais tipos de rotores de eixo vertical. As turbinas com torre de vórtices são chamadas Darrieus e Savonius, e o Darrieus H, é a versão mais utilizada em aplicações urbanas, pelo fato de o fluxo de ar ter muita turbulência e mudanças constantes em sua direção (SANTOS, 2018).

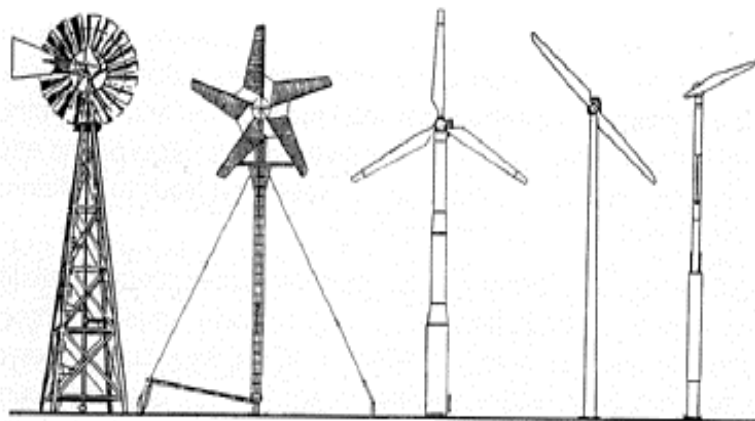


Fonte: (SANTOS, 2018).

Os rotores de eixo horizontal são os mais usados mundialmente, movidos por forças de sustentação (*lift*) e de arrasto (*drag*) (OKITA, 2017). Os subsistemas das turbinas horizontais ficam localizados na *nacelle* com exceção do motor de guinada. A altura da torre é de fundamental importância para se obter um escoamento livre laminar e bem desenvolvido. O diâmetro do rotor também é importante pois a potência gerada depende de sua área. A maior utilização está devido a serem mais eficientes, compensando seu custo mais elevado. Além disso, podem ser encontrados contendo uma, duas, três ou múltiplas pás, sendo a de três pás a mais comum e utilizada neste trabalho. A Figura 7 ilustra os exemplos dos aerogeradores

horizontais (SANTOS, 2018).

Figura 7. Rotores de eixo horizontal



Fonte: (OKITA, 2017).

O aeromotor de uma pá necessita de um contrapeso para evitar a vibração. A turbina de duas pás é simétrica, simples e mais barata do que a turbina de três pás. E a turbina tripás é mais estável, devido a melhor distribuição das tensões durante a rotação, acompanhando melhor a direção do vento. A utilização de aerogeradores de duas e três pás é mais comum devido à grande relação de potência extraída por área de varredura do rotor para elevadas velocidades. No entanto, os aerogeradores de três pás são mais estáveis por distribuírem melhor as tensões durante a rotação acompanhando a rotação do vento. Já os rotores de múltiplas pás são utilizados quando há necessidade de um maior torque de partida, porém resultará em menor eficiência (SANTOS, 2018).

3.6. PÁS EÓLICAS

As turbinas eólicas são classificadas quanto à sua forma construtiva de eixo horizontal e de eixo vertical. Neste trabalho será utilizado o sistema de eixo horizontal. Nele o movimento gerado é por meio de forças de sustentação e arrasto aerodinâmico. A força de sustentação atua perpendicularmente ao escoamento e é predominante no movimento, enquanto a força de arrasto atua em sua direção. O principal fator é direção do vento, necessário para a produção de energia desse modelo de turbina (Silva et al., 2020). Na Figura 8, é observado que a pá eólica denominada reta apresenta maior área em toda sua superfície, mantendo uma proporção da raiz até a ponta que possui uma área mais espessa.

Figura 8. Modelo de pá eólica reta.



Fonte: Adaptada de Baracat (2021).

Na Figura 9 pode ser observado que o formato curvada possui uma angulação no bordo de fuga entre a raiz até a ponta da pá, e no decorrer da superfície dela possui área mais fina.

Figura 9. Modelo de pá curvada.



Fonte: Adaptada de Freitas (2019).

Na Figura 10 observa-se que na pá ponta curva existe uma curvatura muito maior em relação aos outros formatos, isso faz com que ela tenha mais facilidade para vencer a velocidade do vento sem que haja muitos esforços gerado sobre a peça.

Figura 10. Modelo de pá eólica ponta curva



Fonte: Adaptado de Moraes (2019).

3.7. MATERIAIS POLIMÉRICOS

Anterior à primeira guerra mundial (1914 -1918), o ser humano não possuía conhecimento consolidado sobre materiais poliméricos e menos ainda das suas características complexas. No ano de 1920, o cientista alemão Hermann Staudinger, propôs uma teoria de estudo sobre moléculas de elevada massa molecular, a macromolécula, sendo premiado com o Prêmio Nobel de Química em 1953. Mas foi Wallace H. Carothers, químico norte-americano, que a partir do ano de 1929, realizou as reações de condensação que deram origem as poliamidas e os poliésteres, futuramente denominados como Nylon, surgindo então, os polímeros de caráter sintético (FILHO; SANFELICE, 2018).

Ao passar dos tempos, houve uma crescente dos estudos sobre o tema, ainda relacionados a questão de condensação dos materiais poliméricos, e com eles foi notado que estes materiais apresentam grande resistência aos ataques de natureza química e ambiental, o que os tornam viável para o uso em ambientes sujeitos à poluição ou à brisa marítima. Também houve comprovação de que a umidade, vento, sol e oscilações térmicas têm pouco efeito sobre os materiais poliméricos (Souza et al., 2020).

Os materiais poliméricos possuem baixo valor de massa específica em comparação aos materiais metálicos, permitindo que eles tenham diversas utilizações, entre elas, o uso em pás de turbinas eólicas (PEIXOTO, 2019).

O polímero é considerado um material orgânico e inorgânico de alta massa molar, cuja estrutura consiste na repetição dessas pequenas unidades. Ao apresentar essa variação quanto à forma como os meros se repetem ao longo da cadeia, podem afetar diretamente no comportamento físico-químico do material (CARDOSO, 2020).

As propriedades intrínsecas dos materiais poliméricos são definidas a partir do monômero presente na estrutura e do tipo de ligação covalente estabelecida, a partir desses parâmetros pode-se dividir os polímeros em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras (DECARLI, 2018).

A classe de materiais plásticos indica os materiais poliméricos de alta massa molar, sólido como produto acabado e que pode ser subdividido em termoplásticos e termorrígidos, as quais veremos as definições a diante (LUCENA et al., 2017). Os materiais que se comportam como elastômeros naturais ou sintéticos, são as borrachas. Já as fibras são os materiais termoplástico pré-orientados com a direção principal das cadeias poliméricas posicionadas paralelas ao sentido longitudinal e deve satisfazer a condição geométrica do comprimento ser, no mínimo, cem vezes maior que o diâmetro (DECARLI, 2018). Cada classe de material se difere das

demais devido seu conjunto específico de propriedades. Parâmetros que influenciam diretamente sobre a molécula polimérica, um deles é o peso molecular e a distribuição dos monômeros (LUCENA et al., 2017).

Como os polímeros normalmente envolvem uma larga faixa de valores de massa molar, existe uma grande variação em suas propriedades, as pequenas alterações no tamanho da molécula provocam grandes mudanças nas suas propriedades físicas. Estas alterações produzem comercialmente vários tipos de polímeros para atender as necessidades particulares de uma dada aplicação ou técnica de processamento (CALLISTER, 2018). Esses materiais apresentam grandes vantagens em relação a outros materiais estruturais, porque é possível dispor de fabricação em moldes com geometrias complexas em suas superfícies e formatos especiais. Devido as composições químicas e os processos poliméricos formados durante a moldagem, eles apresentam uma alta durabilidade e são de simples reparo e manutenção (LUCENA et al., 2017). As propriedades mecânicas dos polímeros são especificadas por muitos dos mesmos parâmetros que são usados para os metais, isto é, módulo de elasticidade, limite de escoamento e limite de resistência à tração. Para muitos materiais poliméricos, um simples ensaio tensão-deformação é empregado para caracterizar alguns desses parâmetros mecânicos (MARTINS et al., 2021).

De acordo com as diferentes propriedades presentes na estrutura dos materiais poliméricos pode-se classificar as características distintas de cada grupo, nos quais eles são divididos em termorrígidos, termoplásticos e elastômeros. As duas subdivisões mais importantes são os termorrígidos e os termoplásticos. Isso se deve ao fato que, de acordo com Callister (2018), a resposta de um polímero às forças mecânicas em temperaturas elevadas está relacionada à sua estrutura molecular dominante.

Nesta dissertação será utilizada a subdivisão termoplásticos dos materiais poliméricos. Nesta classificação, os dados materiais termoplásticos, são polímeros que têm a capacidade de amolecer, fundir e fluir quando submetidos a um aumento de temperatura e pressão (PIACINI, 2018). Ao retirar esses elementos, o polímero solidifica-se e adquire o formato do molde no qual foi colocado (ROMÃO et al., 2022). Eles possuem estrutura molecular linear ou ramificada, podendo amolecer quando aquecidos e endurecem quando são resfriados. Estes processos são totalmente reversíveis e podem ser repetidos (PIACINI, 2018). A alteração desses materiais é uma transformação física e reversível na qual acontece quando o polímero é semicristalino, pois o amolecimento se dá com a fusão da fase cristalina (ASSIS et al., 2018). Conforme a temperatura eleva, as forças de ligação secundárias diminuem devido ao aumento do movimento da molécula, de tal forma que o movimento relativo de cadeias adjacentes é facilitado quando uma tensão é aplicada (ASSIS et al., 2018). Com o aumento gradual da

temperatura pode-se atingir uma temperatura elevada o suficiente para gerar uma degradação irreversível (ROMÃO et al., 2022). Com isso, é possível compreender que os termoplásticos podem ser reciclados. Alguns exemplos de aplicação de termoplásticos estão identificados na Figura 11.

Figura 11. Exemplos de aplicação de polímeros termoplásticos

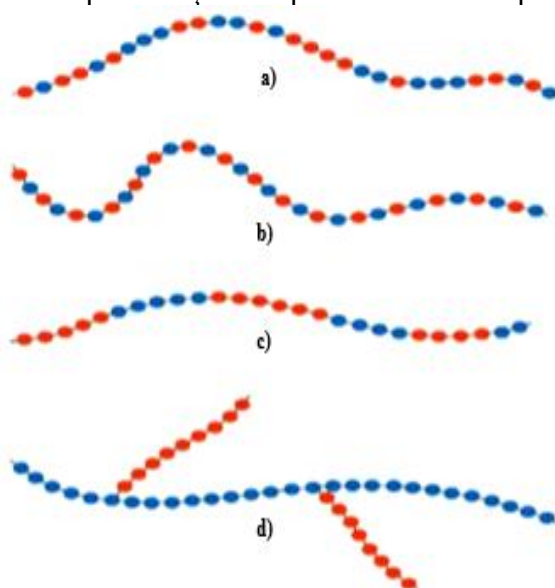


Fonte: (FILAMENT2PRINT, 2023).

É possível observar que a aplicação dos polímeros termoplásticos, ocorre em diversas áreas desde alimentícia a materiais estruturais. Neste trabalho o foco da pesquisa será nos termoplásticos ABS, PETG, PLA e Tritan.

Os copolímeros foram criados afim de aumentar as combinações entre os materiais poliméricos (CALLISTER, 2018). Os copolímeros são polímeros compostos por duas ou mais unidades de repetição com diferentes sequencias de arranjos das unidades repetidas ao longo das cadeias poliméricas, um copolímero pode ser classificado como: aleatório (a), alternado (b), bloco (c) e enxertado (d), como apresentado na Figura 12 (CALLISTER, 2018).

Figura 12. Representações esquemáticas dos copolímeros



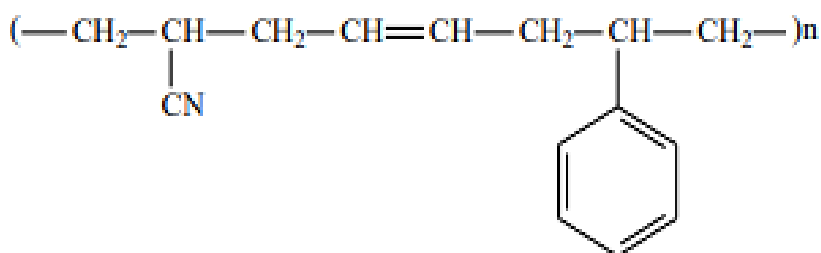
Fonte: (CALLISTER, 2018).

Quando são feitas modificações no processamento de poliésteres com combinações de diácidos e dióis, introduzindo outros diácidos, como ácido isoftálico ou outros dióis, como ciclohexanona dimetanol ao poliéster polietileno tereftalato, o material se torna um copoliéster devido ao número de monômero em sua estrutura (RIBEIRO, 2019). São materiais que apresentam características de ser forte e amplamente utilizados. São materiais higroscópicos, claros e amorfos que se formam quando são feitas modificações nos poliésteres (FERNANDES, 2022). Esses materiais retêm propriedades mecânicas como resistência e clareza, mesmo quando expostos a produtos químicos que normalmente afetam outros materiais, como policarbonatos. São efetivamente usados no projeto de peças de alto volume e baixo custo, bem como peças componentes mais caras. Duráveis e resistente a quebras, os copoliésteres são confiáveis para aplicações que exigem estabilidade a longo prazo (FERNANDES, 2022).

O ABS é um copolímero classificado como terpolímero, o qual tem como característica a formação da cadeia principal por três meros diferentes, acrilonitrila-butadieno-estireno (SANCHEZ JUNIOR, 2021). Classificado como copolímero, é um termoplástico que apresenta elevada resistência mecânica e tenacidade em comparação aos outros polímeros, resistência térmica, isolante elétrico e é solúvel em alguns solventes orgânicos (SANCHEZ JUNIOR, 2021).

Segundo Sanchez Junior (2021), o modo de distribuição dos meros dentro da cadeia polimérica é de forma grafitizado ou enxertado, onde a estrutura química é formada principalmente por uma cadeia de homopolibutadieno enxertada com um copolímero aleatório de estireno-acrilonitrila, como indicada na Figura 13.

Figura 13. Monômero constituído na composição química de ABS



Fonte: (RABELLO, 2023).

A síntese do monômero acrilonitrila foi inicialmente relatada pelo químico francês Charles Moureu em 1893. Cuj material é derivado do petróleo e sua fórmula química é $\text{C}_8\text{H}_8\text{-C}_4\text{H}_6\text{-C}_3\text{H}_3\text{N}$, onde a proporção de cada componente pode variar conforme o processo de fabricação (RABELLO, 2023).

A alteração da proporção de cada componente e a adição de aditivos especiais permitem a produção de grades com propriedades bem específicas, pois, cada monômero confere diferentes propriedades ao terpolímero (SANCHEZ JUNIOR, 2021). Dessa forma, o monômero de estireno reflete uma boa processabilidade, a acrilonitrila rigidez, resistência térmica e química enquanto o butadieno torna o produto mais resiliente à baixas temperaturas (RABELLO, 2023). A proporção de monômeros pode variar conforme o indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Variação percentual de monômeros do ABS.

Monômeros	Acrilnitrila	Butadieno	Estireno
Percentual	15-35%	5-30%	40-60%

Fonte: (RABELLO, 2023).

O ABS é resistente à ácidos aquosos, alcalinos, ácidos hidrocloreídricos e fosfóricos concentrados, álcoois e óleos animais, vegetais e minerais, mas é atacado por ácidos sulfúrico e nítrico concentrado. O ABS é solúvel em ésteres, cetonas, etileno diclorídrico (HUANG et al., 2018).

O resultado físico deste copolímero é um material termoplástico rígido e leve, com uma flexibilidade e resistência na absorção de impacto, este termoplástico pode assumir quaisquer formas e cores com a adição de pigmentos. Atualmente é um dos materiais mais utilizados em impressoras 3D, na forma de filamentos para manufatura aditiva (SANCHEZ JUNIOR, 2021). O ABS é muito usado na indústria por ser economicamente viável, leve e fácil de moldar, é um material que detém propriedades específicas como boa resistência à impacto, à tração e à abrasão, desgaste por fricção e raspagem (HSUEH et al., 2021).

Em estudos literários as características encontradas e esperadas do polímero, são (SANTOS, 2018):

- Densidade: 1,05 g.cm⁻³
- Módulo elasticidade: 2300,0 MPa.
- Resistência a flexão: 70,5 MPa.
- Tensão de Escoamento: 38 MPa.
- Tm: 175 - 220°C.
- Tg: 100 - 109°C.

Quando comparado a outros materiais o plástico ABS apresenta certa resistência ao calor e às baixas temperaturas, podendo ser utilizado normalmente em temperaturas que variam de -20°C a 80°C. Além disso, também funciona como um isolante

elétrico (SANTOS et al., 2021). Com excelente aspecto visual, o ABS pode ser metalizado e altamente pigmentado com cores vívidas e saturadas, que variam do transparente ao opaco. Resultando em ótimo acabamento (SANTANA et al, 2018).

Dentre as suas aplicações citam-se os materiais para construção, dispositivos de segurança e outros objetos de uso cotidiano como eletrodomésticos, na indústria automobilística, entre outros (HUANG et al., 2018). O ABS possui uma excelente relação custo-benefício, o que o torna um produto econômico e eficaz, pode ser processado por meio de moldagem por injeção e extrusão. Atualmente é um dos materiais mais utilizados em impressoras 3D, na forma de filamentos para manufatura aditiva (RABELLO, 2021).

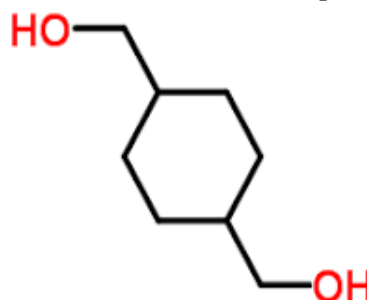
Entre os principais poliésteres utilizados comercialmente, o PETG (Polietileno Tereftalato + Glicol), é um copolímero e tem como principal área de aplicação a impressão 3D. Isso se deve as suas propriedades específicas, como facilidade de extrusão e estabilidade térmica (SANCHEZ JUNIOR, 2021).

Para entender sobre o PETG é necessário entender sua formulação base, que é o PET (Polietileno Tereftalato). A duas rotas existentes para a obtenção da molécula, a primeira se dá através da reação de condensação entre grupos álcool e ácido carboxílico de uma molécula, sendo necessário que cada molécula envolvida possua mais de um grupo funcional, por exemplo, um diálcool e um ácido dicarboxílico (WANG et al., 2021). E a outra, o PET é obtido através da reação de esterificação entre o ácido tereftálico e o etileno glicol ou através da reação de transesterificação entre dimetiltereftalato e etileno glicol, normalmente catalisada por um ácido (PARISI; CANTARUTI, 2021). É um polímero semicristalino, de baixa densidade, translúcido, com excelentes propriedades térmicas e mecânicas, além de baixa permeabilidade a gases, sendo vastamente utilizado nas indústrias de embalagens e indústria têxtil (CARDOSO, 2020). O PETG é um produto derivado do PET, onde são realizadas melhorias no material.

Desta forma o PETG é um termoplástico amorfo, com elevada resistência química e durabilidade. Este material é um copolímero Polietileno Tereftalato + Glicol, isto é, um produto derivado de dois monómeros diferentes. É uma versão modificada com glicol proveniente do polímero PET, possui cadeia heterogenia e aromática (ARANGDAD et al., 2019). O único diferencial entre os dois materiais, é a maior quantidade existente da substancia glicol e por essa diferença, este material não possui as características frágeis derivado do produto anterior (FRANCISZCZAK et al., 2018).

O PET é o estado inicial do material PETG, produzido a partir do etileno glicol com ácido tereftalático. O poliéster modificado é obtido quando se adiciona outro comonômero, o CHDM (1,4 ciclohexanodimentanol), à receita conforme mostra a Figura 14.

Figura 14. Monômeros constituído na composição química do PETG



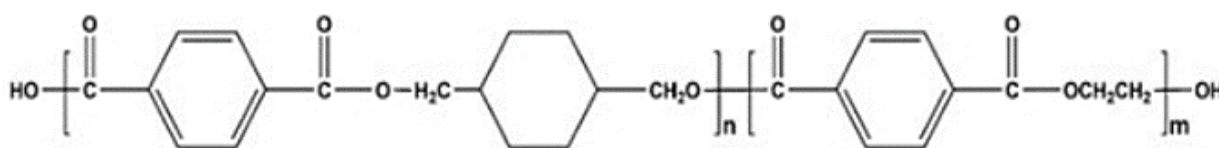
Fonte: (SANTOS, 2018).

Com a adição deste novo glicol, é possível reduzir a cristalinidade da resina final, aumentar a ductibilidade e resistência ao impacto. O polímero resultante, é um material amorfo que apresenta um balanço de propriedades especiais o direcionado para aplicações específicas, como por exemplo o mercado de chapas extrudadas (KIM; HUANG, 2022).

Outras propriedades marcantes nele segundo Castro (2021), o material apresenta boa resistência mecânica, térmica e química. Possibilidade de ser apresentado no estado transparente, parcialmente cristalino e orientado (translúcido) e altamente cristalino (opaco).

O PETG é um material bastante insolúvel a reagentes químicos, levando a ser uma característica importante (PIACINI, 2018). Mas, muito vantajosa no emprego a processamento por sopro, com o objetivo de fabricar embalagens para bebidas carbonatadas como o exemplo apresentado a Figura 15 (MATMATCH, 2021).

Figura 15. Cadeia polimérica do PETG após o processo de copolimerização



Fonte: (MATMATCH, 2021).

Parâmetros como cristalinidade, massa molar e cristalização, são essenciais para a definição das propriedades do polímero, durante o processo de produção. Em específico, se o material possuir uma alta cristalinidade, suas propriedades mecânicas serão melhores, mas caso contrário, elas serão de qualidade inferior. O isoftalato de etileno, 2,6 – naftalato de etileno, 1,4 – butanodiol, são exemplos que podem ser citados quando o assunto é a sintetização do PETG (PIACINI, 2018). Na Figura 16, está identificado um exemplo de aplicação do material PETG.

Figura 16. Exemplos de aplicação do PETG



Fonte: (FILLAMENTUM, 2023).

A utilização do PETG como material fabricação e utilização na impressão 3D, é positiva por ele apresentar características um baixo nível de retração, garantindo que medidas originais permaneçam iguais (ASSIS et al., 2018). O termoplástico também apresenta um baixo nível de deterioração no que diz respeito à absorção. Sendo assim, o PETG não absorve água e isso garante que ele permaneça forte e durável. Ademais, o material é resistente a agentes químicos e por isso é praticamente perfeito em qualquer área, como exemplo na fabricação de pás eólicas (ALCALDE, 2019).

Em estudos literários as características encontradas e esperadas do polímero, são (RIGID, 2020).:

- Densidade: 1,27 g.cm³.
- Módulo de elasticidade: 2120 MPa.
- Resistencia a flexão: 72 MPa.
- Tensão de Escoamento: 51 MPa.
- Tm: 240 - 250° C.
- Tg: 85° C.

O dimetiltereftalato, ciclohexanodimetanol, tetrametilciclobutanodiol (Tritan) é considerado um copoliéster. O Tritan é composto por três monômeros principais dimetiltereftalato (DMT), 1,4-ciclohexanodimetanol (CHDM), 2,2,4,4-tetrametil-1,3-ciclobutanodiol (TMCD), o nome comercial deste plástico é patenteado e fabricado pela empresa *Eastman Chemical Company* (SKELTON; RAJAGOPALAN, 2017). O DMT e o CHDM são os monômeros bases de construção do PET, quando combinado com etilenoglicol (diol básico), base da química de copoliéster, fornece para o material clareza, cristalização lenta, dureza, resistência química, resistência térmica, durável, resistência química e estabilidade

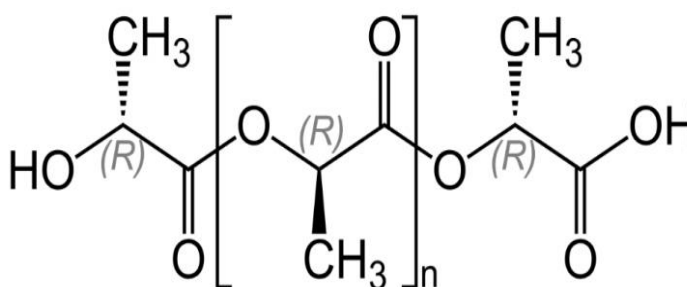
hidrolítica. O Tritan pode resistir a muitos ambientes químicos e hostis. Todas essas características fazem com que o material seja mais resistente mecanicamente que os outros materiais poliméricos termoplásticos (SKELTON; RAJAGOPALAN, 2017).

Em estudos literários as características encontradas e esperadas do polímero, são (SANTOS et al., 2021):

- Densidade: 1,19 g.cm⁻³
- Módulo de elasticidade: 1500 MPa.
- Resistência a flexão: 64 MPa.
- Tensão de Escoamento: 45 MPa.
- Tm: 280°C.
- Tg: 98°.

O políácido láctil (PLA) é um biopolímero, termoplástico biodegradável de origem natural e de fontes renováveis, como amido de milho ou cana-de-açúcar. Produção parte da fermentação de vegetais como milho e mandioca, obtendo assim o ácido láctico (SANTOS et al., 2021). Há um processo químico complexo para se chegar ao material em grão ou pellets, insumos para a produção em impressoras 3D (MATMATCH, 2021). É um dos materiais mais utilizados na impressão 3D por possuir características como elevada dureza, brilho, facilidade de impressão (MATMATCH, 2021). Conforme na Figura 17 pode ser observado o polímero PLA.

Figura 17. A cadeia polimérica do PLA



Fonte: (SANTANA et al., 2018).

Há um processo químico complexo para se chegar ao material em grão ou pellets, insumos para a produção em impressoras 3D (MATMATCH, 2021). Na Figura 18 apresenta um exemplo de aplicação do material PLA.

Figura 18. Exemplo de aplicação do PLA



Fonte: (SIMPLIFY3D, 2023).

Em estudos literários as características encontradas e esperadas do polímero, são (SANTOS et al., 2021):

- Densidade: $1,24 \text{ g.cm}^{-3}$
- Tensão de Escoamento: 66 MPa.
- Resistência a flexão: 130 MPa.
- Módulo elasticidade: 4350 MPa.
- Tm: 190°C .
- Tg: 60°C .

3.8. A IMPRESSÃO 3D

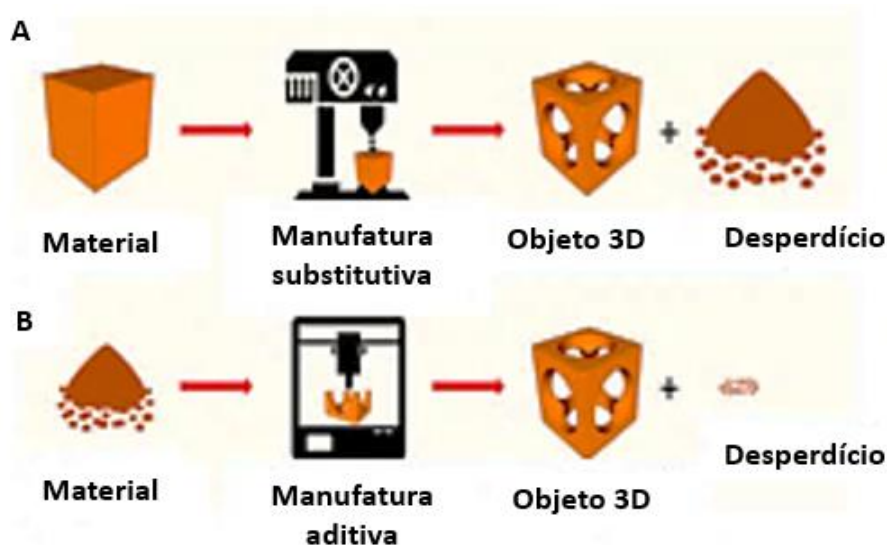
A manufatura aditiva é uma técnica capaz de desempenhar um grande papel na sociedade e nos campos de pesquisa, uma vez que, permite a fabricação de novos materiais, explorando novas aplicações e aprimorando outras já existentes em tempos de fabricação de produtos finais bem menores que outras técnicas, além de ser bastante flexível (CARDOSO, 2020).

A impressão 3D é considerada hoje um método de desenvolvimento de produto fundamental para definição do modelo, testes de intercambialidade, montagem de protótipos, amostras, moldes, entre outras possibilidades, permitindo assim ganhar tempo e reduzir custos (ALCALDE; WILTGEN, 2018). Assim, é possível afirmar que é uma ferramenta importante para um projeto robusto, segundo Silva et al., (2020), a prototipagem é uma parte essencial no desenvolvimento de produto e ciclo de manufatura para verificar forma, encaixes e funcionalidade antes de um possível investimento em ferramental para a produção em larga escala.

O termo impressão 3D, abrange uma gama de novas tecnologias para produção de peças precisas diretamente do modelo CAD (*computer aided design*) em poucas horas, com pouca intervenção humana (SOUZA, 2020). Segundo Volpato et al., (2017) devido a elevada concorrência, e a crescente complexidade dos produtos têm exigido das empresas alterações substanciais no processo de desenvolvimento de produtos. Com isso, atualmente as empresas tem como um recurso a manufatura aditiva, que pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma apresentação geométrica computacional 3D do componente (ALCALDE; WILTGEN, 2018).

A prototipagem rápida pode ser obtida de várias formas, as principais são duas muito diferentes entre si. Uma dessas formas é a de subtração de material como nas máquinas CNC tradicionais, a outra forma é com a deposição de material, como no método de impressão 3D (SILVA et al., 2020). Segundo Volpato et al., (2017) na Figura 19, os processos sendo a) manufatura subtrativa e b) manufatura aditiva. A principal vantagem do método de deposição aditivo é justamente o menor desperdício de matéria prima, quando comparado ao método subtrativo tradicional (Figura 19).

Figura 19. Comparativo entre os processos de manufatura subtrativa A) e aditiva B)



Fonte: (VOLPATO et al., 2017).

Um dos grandes diferenciais da técnica de impressão 3D é a possibilidade de construir peças complexas e personalizadas, e quando comparadas as tecnologias em relação ao tempo gasto para construção de uma mesma peça, é sem dúvida um grande diferencial (SOUZA, 2020). Além disso, existem técnicas de impressão 3D no qual um sistema todo pode ser

fabricado de uma só vez, incluindo todas as partes móveis, já quando comparadas as precisões de fabricação, a tecnologia subtrativa ainda possui grande precisão devido a forma com que as ferramentas atuam sobre as peças, porém com a evolução da técnica aditiva, é possível que em alguns anos a técnica de fabricação aditiva possa ser equivalente ou melhor do que a técnica de fabricação subtrativa (GONZAGA, 2021).

Atualmente existem diversas técnicas de impressão 3D, a pesquisa se limitou as técnicas que tivessem seus métodos mais conhecidos e difundidos no meio acadêmico e industrial. Segundo Valvez et al., (2022), os principais métodos, tem-se:

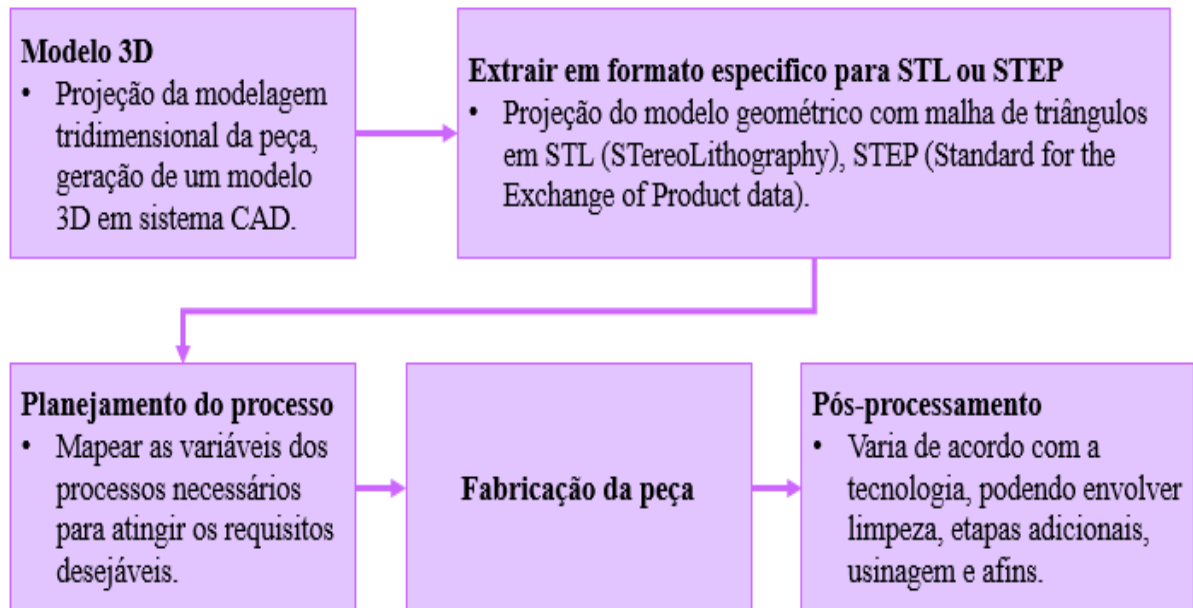
- *Stereolithography* (Estereolitografia - SLA).
- *Fused Deposition Modeling* (Deposição por Material Fundido - FDM).
- *Selective Laser Sintering* (Sinterização Seletiva a Laser - SLS).

Dentre as técnicas de manufatura aditiva, a Moldagem por Deposição de Material Fundido (FDM) é a técnica mais utilizada (MORAIS et al, 2022). Nesse processo, um filamento é extrusado acima de sua temperatura de fusão através de uma de bico móvel e aquecido (GONSALVES, 2022). O filamento fundido é então, depositado como um fio em uma plataforma com movimento de três eixos (X, Y, Z) de acordo com o modelo CAD (*computer aided design*) previamente estabelecido. Em seguida, os filamentos depositados solidificam-se para formar um objeto camada por camada até a obtenção de uma peça 3D completa.

O movimento do bico extrusor é guiado pelo caminho gerado pelo *software* responsável pelo fatiamento das camadas da peça 3D (CARDOSO, 2020). A elevada concorrência e a crescente complexidade dos produtos têm exigido do mercado alterações no desenvolvimento visando reduzir o tempo de produção, aumentar a qualidade e competitividade dos produtos (SILVA et al., 2020).

Essas alterações podem envolver aspectos de gestão, quanto o emprego de novas técnicas e ferramentas para auxílio do projeto. Sabe-se que o sucesso comercial está associado em entender a demanda, identificar a real necessidade do cliente e desenvolver rapidamente um produto para atendê-los. Desse modo, é de suma importância reduzir a possibilidade de falhas e melhorar a qualidade, atendendo aos requisitos do cliente (SOUZA, 2020). O processo de prototipagem rápida consiste nas etapas apresentadas na Figura 20.

Figura 20. Processo de manufatura aditiva

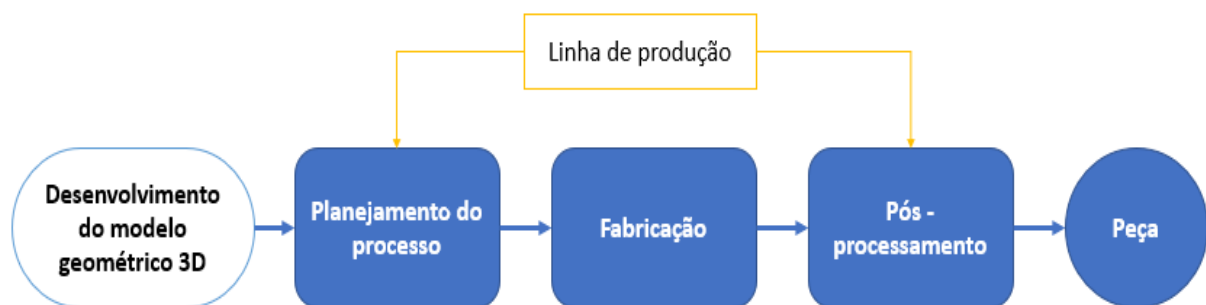


Fonte: Adaptado Souza (2020).

Em virtude de seu processo, possui uma capacidade de fabricação de peças com geometrias complexas, uma vez que transforma uma geometria 3D em uma série de geometria 2D simplificada.

A técnica de impressão 3D consiste em transformar um sólido digital construído utilizando um programa de CAD para um arquivo especialmente fatiado na altura (Z) e com sua localização em X e Y. Este arquivo é comum para todas as impressões em 3D, cada qual com suas características de orientação de coordenadas X, Y e Z (MORAIS et al, 2022). Um arquivo de CAD comum deve ser transformado em um arquivo de impressão 3D para que suas coordenadas sejam correlacionadas ao modelo a ser impresso, cujo etapas podem ser observadas na Figura 21.

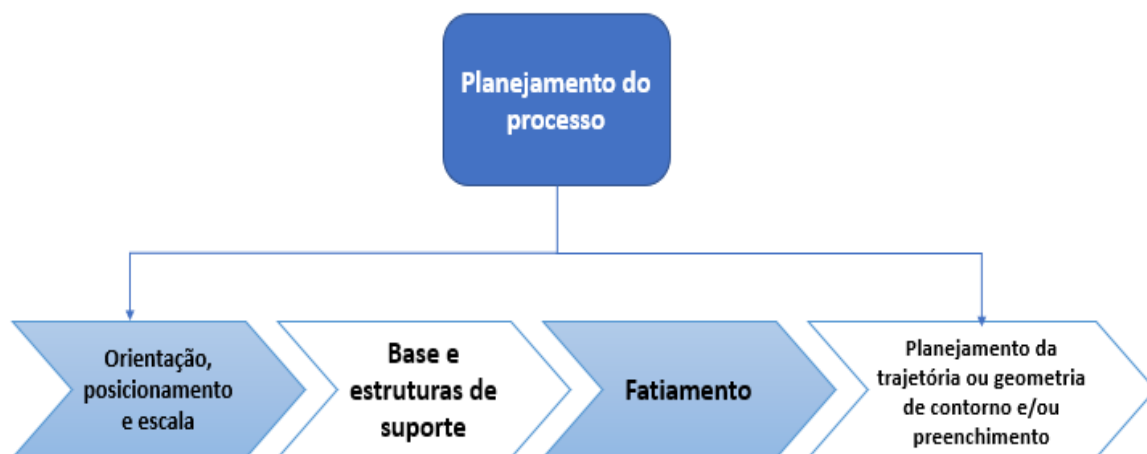
Figura 21. Processo de impressão 3D



Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2017).

Com base na Figura 21, o trabalho realizado para a fabricação das peças, se inicia desde o planejamento do CAD com o modelo geométrico 3D, a linha de produção que é todo o desenvolvimento da fabricação da peça, até o produto final que é a peça finalizada. A Figura 22 apresenta de forma mais detalhada as etapas do planejamento do processo onde são destacados detalhes importantes para um processo melhorado.

Figura 22. Processo de impressão 3D



Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2017).

Portanto, dentre diferentes materiais, as aplicações mais usuais de impressão 3D são de polímeros, destacando-se o ABS, PLA, PETG e o Tritan, os quais podem ser empregados na produção de componentes estruturais (CAMARGO; BARBOSA; SANTOS, 2021). Produtos impressos em PLA e ABS possuem caráter anisotrópico e apresentam resistência à tração, à flexão e à compressão. Com o desenvolvimento da tecnologia de impressão 3D e com a utilização de polímeros têm-se a necessidade de harmonizar, desenvolver, aplicar e reutilizar os materiais usados no processo.

O ABS possui boas propriedades mecânicas, tais como resistência ao impacto e à tração, flexibilidade além de leveza e preço moderado. O PLA é um termoplástico biodegradável, suas principais características são rigidez e resistência (MARTINEZ et al., 2019). O PETG possui temperatura de transição vítrea próxima a 80°C, tendo como vantagens ao PET a tenacidade, flexibilidade e alta capacidade de processamento (SANTANA et al., 2018).

Uma característica importante para a manufatura aditiva é a sua facilidade em automatizar, minimizando a intervenção do operador durante o processo. É necessário um operador para a preparação do equipamento, com a alimentação de materiais e ajustes de parâmetros e no final do processo com retirada da peça e limpeza da máquina (ALCALDE; WILTGEN, 2018).

Porém, durante a fabricação o sistema é integrado ao *software* da impressora que o abastece de informações geométricas da representação gráfica do produto (SILVA et al., 2020).

Com o uso de materiais polímeros de engenharia a prototipagem rápida apresenta uma flexibilidade para a produção de peças com grandes aplicações e com grande diversidade geométrica, essa produção apresenta uma relação de custo menor para demandas menores. Para a produção de peças em aditivos poliméricos pode ser utilizado quatro tipos de técnicas para o processo de fabricação, sendo: a extrusão de materiais, fusão em pó, polimerização em cuba e jateamento de material (CARDOSO, 2020). Para cada tipo de polímero é utilizado um processo diferente para melhor compatibilidade entre processo e material, para os polímeros termoplásticos é utilizado técnicas de extrusão e fusão em pó (SANTOS et al., 2021).

3.9. ESTUDOS CORRELATOS

O aumento populacional e o desenvolvimento industrial, em escala global, tiveram como consequência a crescente demanda por energia elétrica. A conscientização do homem frente aos problemas ambientais tem promovido a esperança em recorrer por novas formas de energias que possam ser mais limpas e sustentáveis e renováveis, que causem menos impacto ao meio ambiente e promovam o desenvolvimento sustentável. Condições essas que requerem avanços científicos, buscando diversificar a matriz energética e implantando fontes alternativas e renováveis de energia (SOUZA; NOGUEIRA, 2022). Entretanto, Chaves (2017) certifica que a energia disponível para uma aeromotor é a energia cinética associada a uma massa de ar que se desloca a uma velocidade constante (HATJE, 2018). Esta energia pode ser utilizada para a geração de eletricidade ou para bombeamento d'água (SOUZA et al., 2020). Sabe-se que o fator energético é um dos pontos mais importantes para o desenvolvimento da humanidade, considerando a vulnerabilidade dos atuais mecanismos de suprimento de energia que também é conhecida.

Embora empresas de parques eólicos, com o uso de torres gigantes, tenham crescido nos últimos anos, a produção de pequenas turbinas eólicas não cresceu na mesma proporção (HATJE, 2018). Segundo Moraes (2018), para que os pequenos aerogeradores funcionem adequadamente, o desenvolvimento da mão de obra e o correto formato das pás são essencialmente importantes, pois são responsáveis por converter a energia mecânica do aerogerador em fonte energética. Além disso, as pás eólicas em materiais poliméricos serão mais leves, de construção simples, tornando-as competitivas no mercado.

Com base nas informações anteriores, são abordados os tópicos relevantes desta pesquisa

como a revisão bibliográfica dos materiais empregados e os formatos das pás eólicas (DAVID et al., 2020). De acordo com a pesquisa bibliográfica foram encontrados os seguintes materiais poliméricos:

- Acrilonitrila butadieno estireno (ABS); Políácido láctico (PLA), Polietileno tereftalato de etileno glicol (PETG) e o copoliéster (Tritan) (ALCALDE, 2019);

Para os formatos das pás foram encontrados a seguintes geometrias:

- Reta (BARACAT, 2021); Curvada (FREITAS, 2019); Ponta curva (MORAES, 2019);

4. METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os materiais utilizados, os métodos aplicados e as etapas desenvolvidas para realizar as impressões das pás eólicas e o planejamento do estudo.

4.1. MATERIAIS

Os materiais poliméricos usados para a fabricação das pás eólicas:

- Acrilonitrila butadieno estireno (ABS).
- Políácido láctico (PLA).
- Polietileno tereftalato de etileno glicol (PETG).
- Dimetiltereftalato, ciclohexanodimetanol, tetrametilciclobutanodiol (Tritan),.

4.2. MÉTODOS

A pesquisa se classifica de natureza básica e aplicada, objetivos exploratórios, abordagem quantitativa com o método de experimento, modelagem e simulação. Trata-se de uma abordagem em que o estudo, ao fazer importantes aprofundamentos na associação ou em correlação, faz análises e inferências dos porquês das causas e de que forma essas causas são estabelecidas, esse método visa o conjunto de dados exploratórios e não dados individuais (SAMPAIO, 2022).

Com esses conceitos estudados, foi selecionado um método quantitativo pois sua função coincide com a pesquisa proposta.

Para a realização dos experimentos foi definido dois grupos de ensaio o primeiro é mantido o formato de pá reta e variou-se os materiais ABS, PETG e PLA. O segundo conjunto foi mantido o material Tritan e variou-se os formatos reta, curvada e ponta curva. Com a pá de formato ponta curva foi feito em dois ângulos com a inversão de sentido do bordo de fuga da pá, foram classificadas com o nome ponta curva 1 e 2.

4.3. ETAPAS DO PROJETO

Inicialmente para a dissertação, foi realizado um levantamento bibliográfico. Nele efetuou-se a consulta nas bases de dados Periódicos Capes, *Scopus* e Google Acadêmico, a procura de encontrar trabalhos que fossem correlatos ao tema de aerogeradores e pás eólicas.

A segunda etapa, apresenta os modelos das pás eólicas e dos materiais selecionados. A

terceira etapa, é apresentada a modelagem 3D das pás eólicas. A Figura 23 demonstra o esquema de elaboração e execução do estudo, desde a sua concepção até a análise da eficiência do projeto.

Figura 23. Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autor (2023).

4.4. OS EXPERIMENTOS

A etapa experimental do trabalho consistiu no projeto de pás eólicas com diversos tipos de formatos e materiais poliméricos. Para os testes foi utilizado um alternador Delco - Arno para geração de 400 W / 12 VDC / 35 A / 1000 rpm, um túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos do campus da UNESP de Guaratinguetá, SP e os aparelhos de medições, como o anemômetro digital, tacômetro digital, amperímetro DC, inclinômetro digital, multímetro DC e termômetro digital.

Após a realização de diversos estudos referentes as pás eólicas e suas diferentes formações e características, foi possível criar uma síntese de quais requisitos principais um material deve atender.

O primeiro requisito é elas terem uma estrutura firme, pois, a pá eólica necessita de resistência mecânica para que possa suportar as forças aerodinâmicas e a fadiga ocasionada por seus movimentos cíclicos e repetitivos.

As pás devem possuir um material com resistência a fluência, já que as pás eólicas normalmente ficam expostas as diversas condições climáticas.

É necessário que o material apresente também, resistência a flexão, pois dependendo da velocidade atingida pela pá ela pode aumentar as turbulências com o fluxo de vento e, aumentar as tensões exercidas sobre a peça (podendo causar na ponta da pá um ângulo de torção reduzindo o diâmetro da turbina, ocasionando uma eventual quebra da estrutura).

Um bom acabamento resulta no melhor desempenho das pás, outro importante fator é a rugosidade de sua superfície, em que quanto menor for seu valor melhor é para sua funcionalidade.

Em seguida foi definido o perfil aerodinâmico que as pás teriam.

Para definir o tamanho das pás foi realizado um estudo de modelos comerciais disponíveis de aerogeradores de pequeno porte. Assim, o modelo utilizado para a obtenção das dimensões das pás, foi o modelo do aerogerador de pequeno porte da marca *Primus Air Max Marine* (PRIMUS WIND POWER, 2020). As pás que são acopladas nele, teriam a mesma dimensão das pás projetadas para o modelo utilizado neste trabalho.

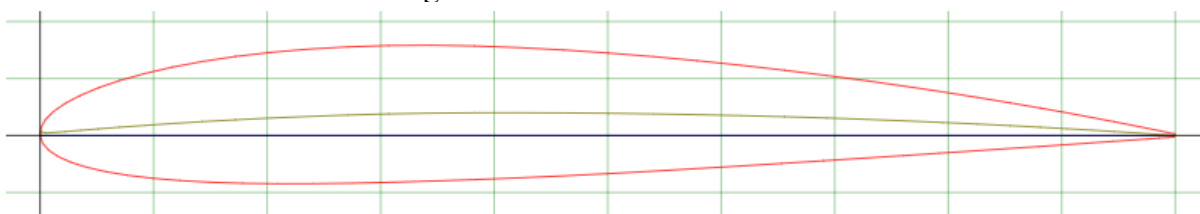
Desta forma, para a geração e escolha do formato do aerofólio foi utilizado uma biblioteca do *software Airfoils Tools* (2023), no acervo deve-se inserir o perfil aerodinâmico que será utilizado, no qual deverá conter suas características aerodinâmicas como coeficiente de sustentação e arrasto em função do ângulo de ataque. Eles serão adicionados a uma base de dados, cujo acesso será realizado pelo algoritmo na busca da geometria da pá mais eficiente. Para este trabalho serão considerados aerofólios da família NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) por serem aerofólios com coeficiente de sustentação maiores que os aerofólios tradicionais (OKITA, 2017).

Os aerofólios NACA 24 são muito utilizados em aerogeradores de pequeno porte porque possuem o intradorso relativamente plano, facilitando a sua construção e também por apresentar insensibilidade à rugosidade (KOSLINSKI, 2022), mas neste estudo em particular não será abordado sobre a rugosidade da peça impressa e será objeto de exploração futura.

Desta maneira será utilizado o perfil padrão do aerofólio NACA 2412 como apresentado na Figura 24, por possuir maior espessura no extradorso relativa ao intradorso e para que essa ação aconteça o escoamento no extradorso vai ter maior velocidade, já que, para uma mesma seção o escoamento tem de percorrer maior distância (KOSLINSKI, 2022).

Sendo assim conclui-se que em um perfil não simétrico, o extradorso vai apresentar uma pressão estática inferior ao intradorso. Esta diferença de pressões causa uma força centrífuga no perfil, conhecida como força de sustentação (NOBRE, 2021).

Figura 24. Perfil aerofólio NACA 2412



Fonte: Autor (2023).

Os projetos das pás eólicas consistiram em três formatos diferentes com quatro materiais diferentes. Os desenhos foram desenvolvidos no CAD por intermédio do *software CATIA V5®*.

A escolha das geometrias foi baseada nos modelos que são encontrados no mercado e é resultado da pesquisa bibliográfica.

Entre os tipos encontrados na literatura foram escolhidos os de pá reta é a mais comum na indústria de aerogeradores. E como opções alternativas, foram escolhidas os modelo curvada e ponta curva que tem menor aplicação no mercado.

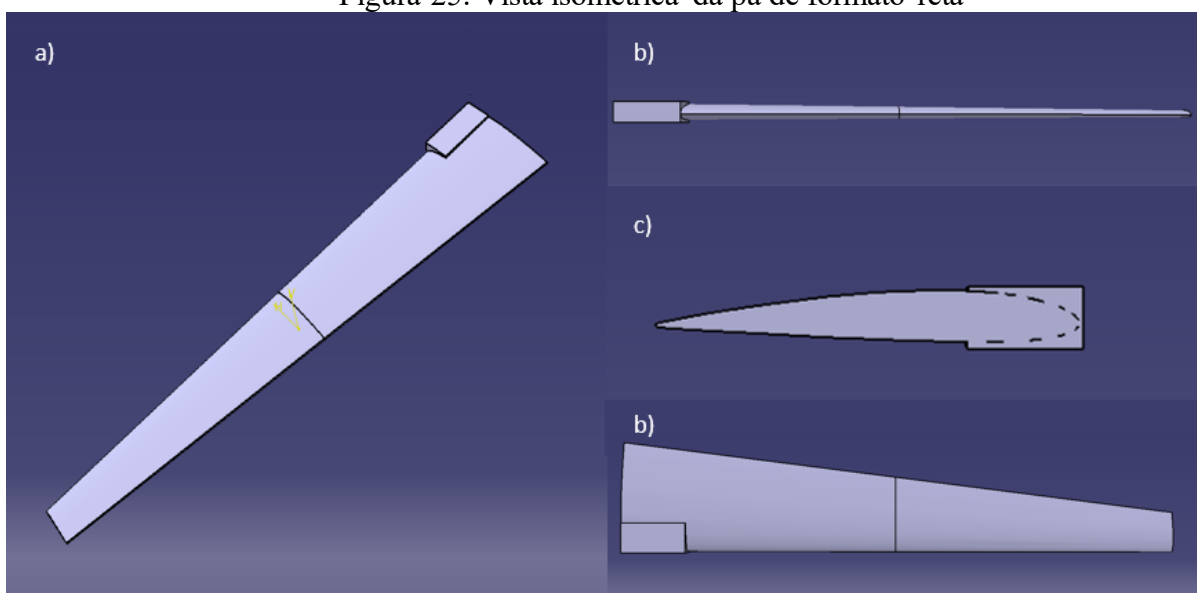
A primeira geometria de pá eólica, trata-se do modelo reta. Nela pode-se observar que não há angulação no decorrer de sua superfície.

Diferente dos outros formatos apresentados, ela tem uma área superficial maior. Isso quer dizer que ela possui área de contato maior com o vento.

A pá reta possui 570 mm de comprimento, 114,2 mm de largura da raiz, 41,3 mm largura da ponta, maior espessura 17 mm e menor espessura 5,8 mm.

A Figura 25 mostra a vista isométrica da pá de geometria reta, sendo a) isométrica, b) superior, c) lateral esquerda e d) frontal para a visualização de mais detalhes.

Figura 25. Vista isométrica da pá de formato reta



Fonte: Autor (2023).

O modelo de pá reta é vastamente utilizado em aerogeradores de pequeno e grande porte, considerando o investimento em uma construção mais simples e mais rápida de ser produzida. Sua aerodinâmica fica mais por conta do formato do perfil aerodinâmico.

O segundo formato de pá eólica, trata-se da geometria curvada. Esse modelo possui uma curvatura entre a raiz até a ponta no bordo de fuga, deixando as extremidades com a área bem menor em comparação aos outros modelos. A aerodinâmica desse tipo de formato, possui maior

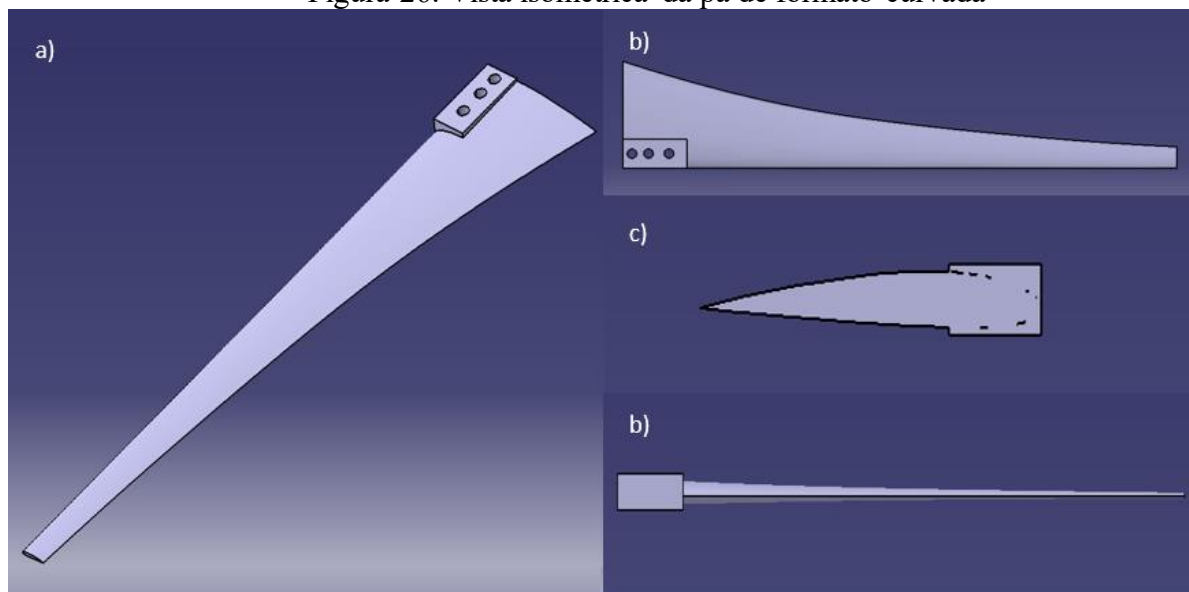
estabilidade nas regiões que existem turbulências, geradas pelo fluxo de vento, dando maior sustentação a pá.

Esse modelo favorece o torque mantendo o mesmo em toda superfície de escoamento do vento. É um dos modelos mais utilizado em aerogeradores de pequeno porte, pois construções com estruturas maiores exigiriam um planejamento da estrutura da pá com mais detalhes e reforços, por ela possuir a ponta da pá mais fina em relação ao restante do corpo.

Para a realização do raio de curvatura no bordo de fuga da pá, foi feito por concordância de hiperboloides de forma experimental até que ela obtivesse o formato esperado, com raios de R 1900 mm.

A pá curvada possui 570 mm de comprimento, 114,5 mm de largura da raiz, 22,2 mm largura da ponta, maior espessura 17 mm e menor espessura 4 mm e a Figura 26 ilustra a vista isométrica da pá de geometria curvada, sendo a) isométrica, b) superior, c) lateral esquerda e d) frontal para a visualização de mais detalhes.

Figura 26. Vista isométrica da pá de formato curvada



Fonte: Autor (2023).

E por fim o último e terceiro modelo, o da geometria de ponta curva.

O nome dado a esse modelo de pá está intrinsicamente relacionado a sua geometria. É o modelo mais usual em aerogeradores de pequeno porte, pois sua construção é de alta complexidade para estruturas de aerogeradores de grande porte.

Esse formato por apresentar uma curvatura mais acentuada em sua extremidade, alcança velocidades mais altas e reduz as turbulências causadas pelo fluxo de vento no bordo de fuga, mais precisamente na ponta de sua estrutura.

Essa turbulência, ocorre pelo fato de que quando as pás alcançam a velocidade do som ou uma velocidade muito alta, acabam entortando a sua ponta. Esse evento causa redução do diâmetro de captação do vento de ponta a ponta de pá, aumentando os esforços mecânicos exercidos sobre a estrutura da peça prejudicando o desempenho e reduzindo a velocidade alcançada podendo até quebra-las.

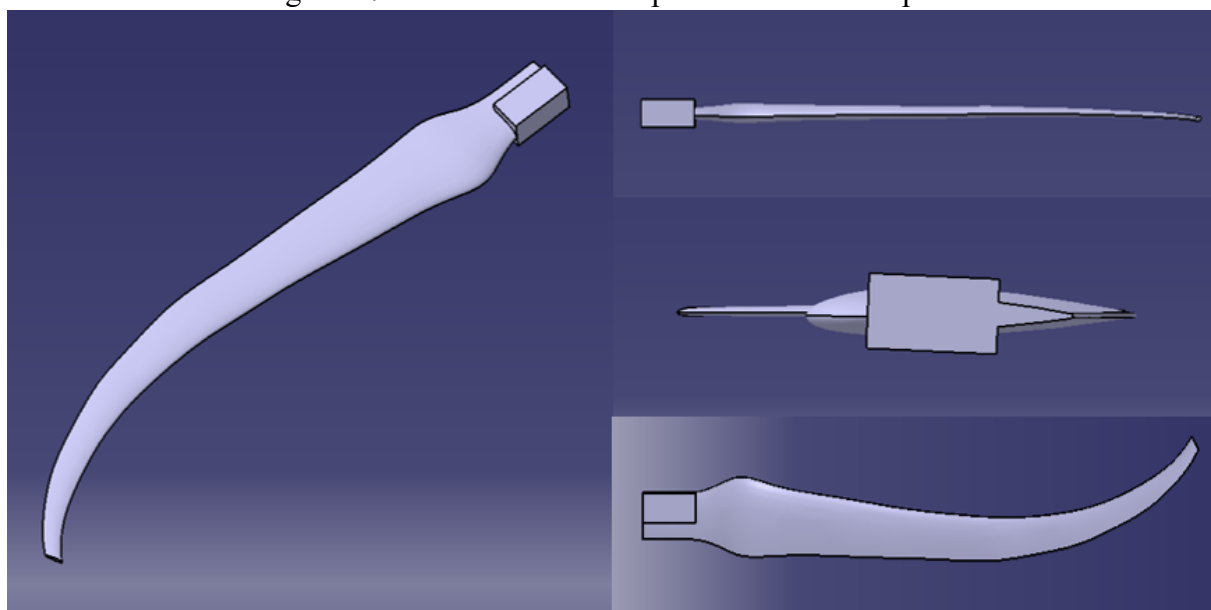
Seu processo de fabricação usual é o de injeção, sendo o único desafio encontrado o desenvolvimento dos desenhos e a produção dos moldes para esse processo.

Para a realização do raio de curvatura na extremidade da pá, foi feito por concordância de raios de forma experimental até que ela aparentasse o formato esperado, com raios de R 350 mm e R 420 mm.

A pá curvada possui 570 mm de comprimento, 80,8 mm de largura da raiz, 15,5 mm de largura da ponta, maior espessura 17,2 mm e menor espessura 3 mm.

A Figura 27 mostra a vista isométrica da pá de geometria com ponta curva, sendo a) isométrica, b) superior, c) lateral esquerda e d) frontal para a visualização de mais detalhes.

Figura 27. Vista isométrica da pá de formato com ponta curva



Fonte: Autor (2023).

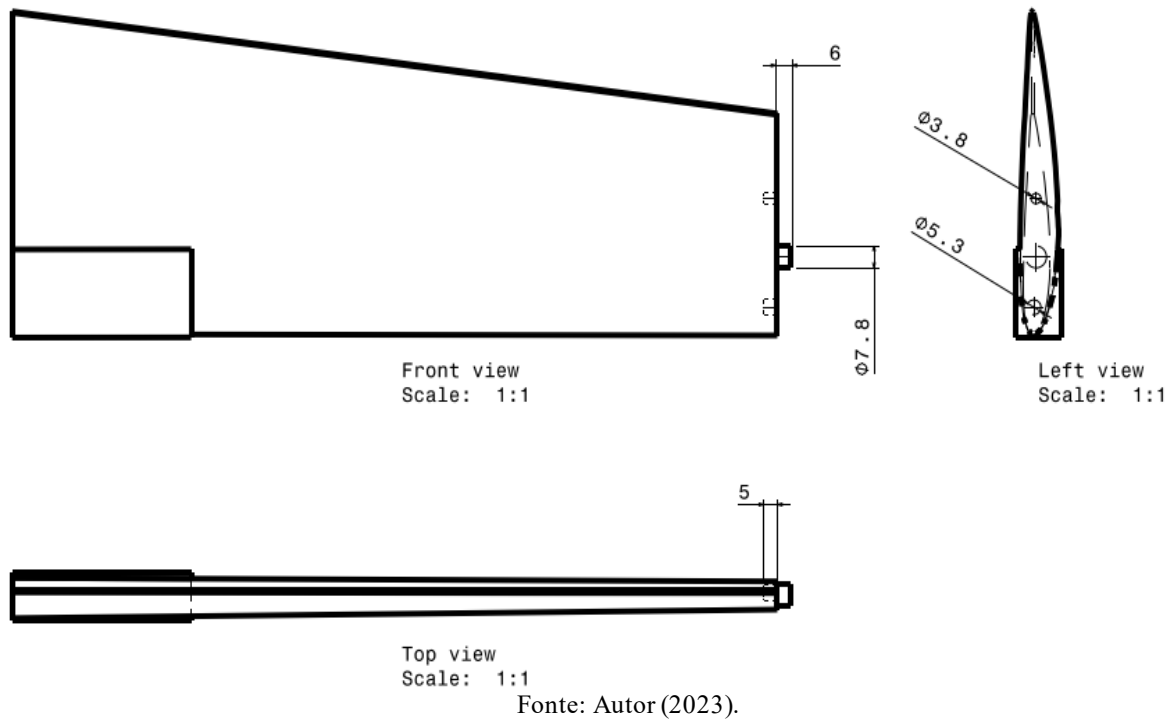
Para realização da fabricação das pás, foi necessário imprimi-las em duas partes. Por serem peças bastante esbeltas e longas, foi desenvolvido o encaixe das peças no mesmo *software* de desenho das peças completas.

Como as pás tem o mesmo comprimento, foi realizado um corte no centro da peça e projetado os encaixes para a posterior junção pós as impressões.

A Figura 28, apresenta o primeiro corte realizado para a impressão da primeira peça, nela

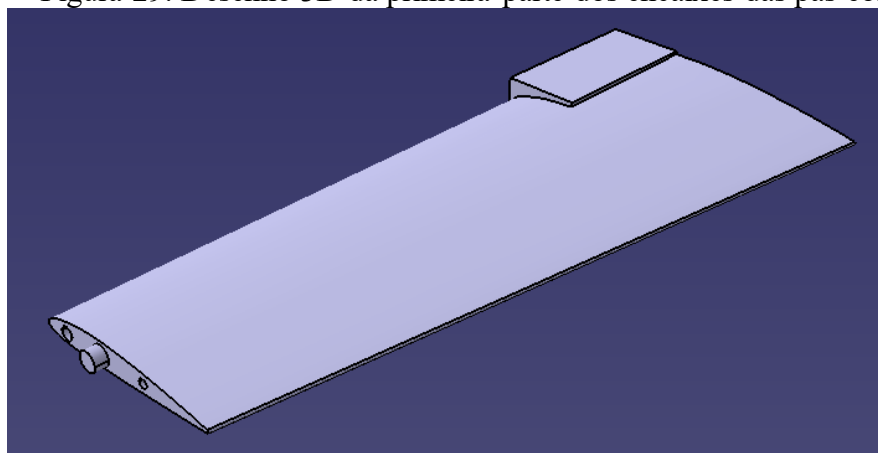
pode-se observar como os encaixes foram projetados. Um pino central de seis milímetros de comprimento e 7,8 mm de diâmetro, com dois encaixes laterais de diâmetro de 3,8 mm e o outro de 5,3 mm.

Figura 28. Projeção da primeira parte dos encaixes da pá eólica.



A Figura 29, ilustra a projeção 3D da vista isométrica da primeira parte da pá eólica.

Figura 29. Desenho 3D da primeira parte dos encaixes das pás eólicas.

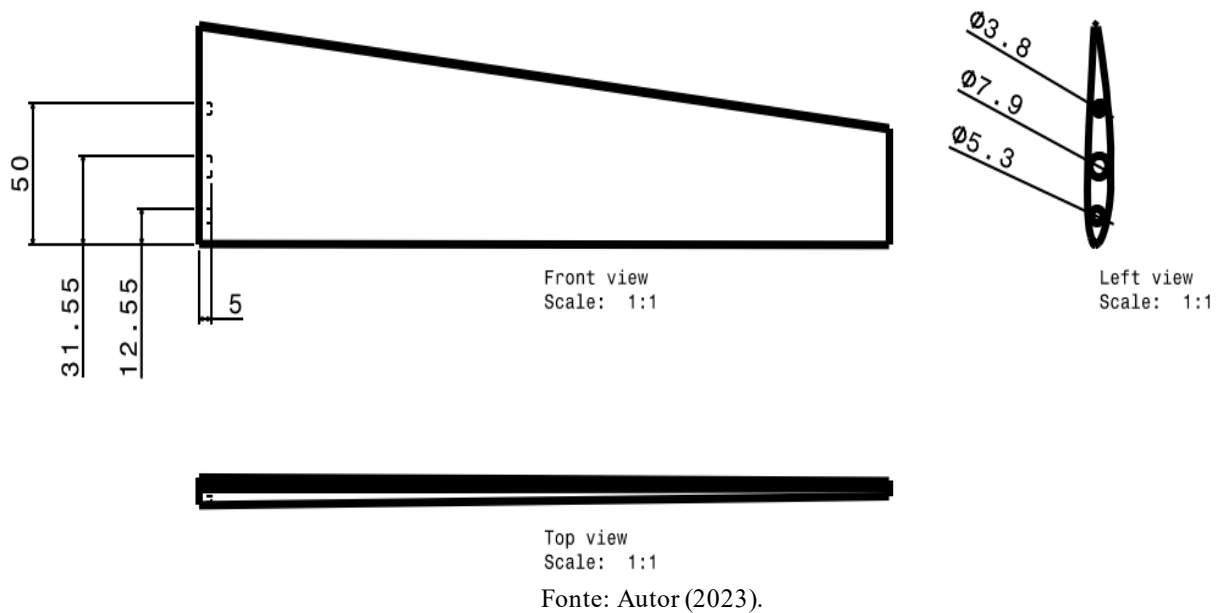


Fonte: Autor (2023).

A segunda parte projetada da pá eólica para a junção das peças impressas posteriormente, é apresentada na Figura 30 da mesma forma. Um furo central de seis milímetros de

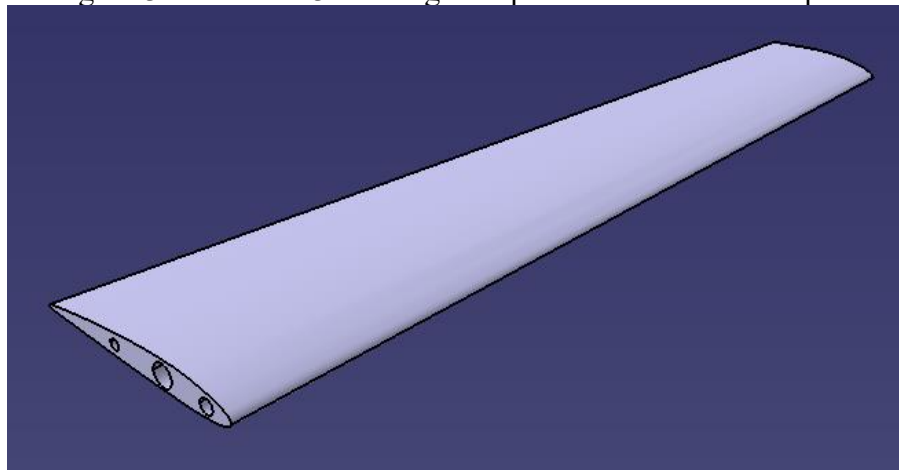
comprimento e 7,9 mm de diâmetro, com dois encaixes laterais de diâmetro de 3,8 mm e o outro de 5,3 mm

Figura 30. Desenho 3D da primeira parte dos encaixes das pás eólicas.



A Figura 31, ilustra a projeção 3D da vista isométrica da segunda parte da pá eólica.

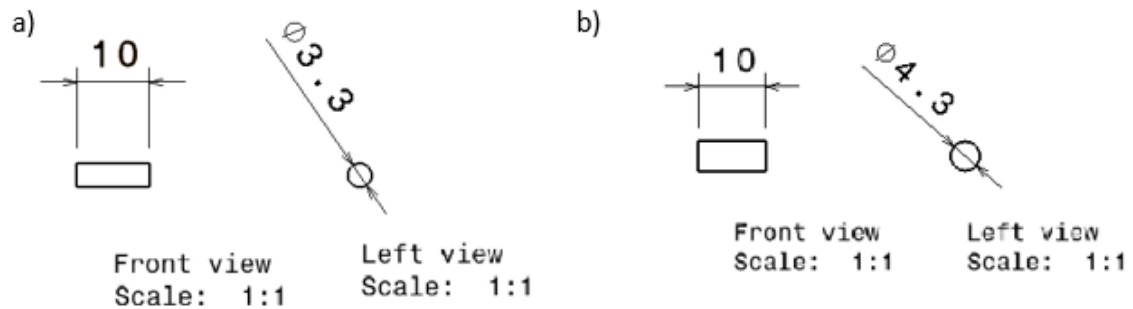
Figura 31. Desenho 3D da segunda parte dos encaixes das pás eólicas.



Fonte: Autor (2023).

E por fim, a Figura 32 apresenta os pinos para os encaixes laterais. Na parte a) pino 1 com 10 mm de comprimento e 3,3 mm de diâmetro e no item b) pino 2 com 10 mm de comprimento e 4,3 mm de diâmetro.

Figura 32. Desenho 3D dos pinos para o encaixe das partes pás eólicas.



Fonte: Autor (2023).

Esse procedimento foi realizado da mesma forma para todas os conjuntos impressos. Os furos para o encaixe na estrutura foram feitos pós a impressões 3D.

Os desenhos foram desenvolvidos no CAD por intermédio do *software* CATIA V5®, com o padrão de dimensão para as cotas foi em milímetros.

A parte experimental consistiu em colocar as pás eólicas sob condições de ventos obtidas no Laboratório de Fluidos Mecânica com os seguintes equipamentos disponíveis:

O túnel de vento siroco, conforme Figura 33 que permite ventos com velocidade de um a 15 m/s.

Figura 33. Túnel de vento para obtenção da velocidade linear do vento



Fonte: Autor (2023).

O anemômetro do fabricante HOMIS modelo LM-81AM foi utilizado para medir a velocidade linear do vento em m/s (Figura 34).

Figura 34. Anemômetro para velocidade linear do vento em m/s



Fonte: Autor (2023).

O termômetro digital, do fabricante *Instrutherm* modelo TE-400 utilizado para medir a temperatura ambiente do local onde foi feito as medições (Figura 35).

Figura 35. Termômetro digital



Fonte: Autor (2023).

O tacômetro digital, do fabricante *Instrutherm* modelo TD-812, resolução de 0,1 rpm. Usado para as medidas de rotações por minuto das pás eólicas, como pode ser observado Figura 36.

Figura 36. Tacômetro digital



Fonte: Autor (2023).

O amperímetro digital, sem contato, do fabricante HOMIS que permite medidas de tensões e correntes elétricas que realiza as medidas de da carga elétrica, representada por um conjunto de *coolers* 21 W/12V (Figura 37).

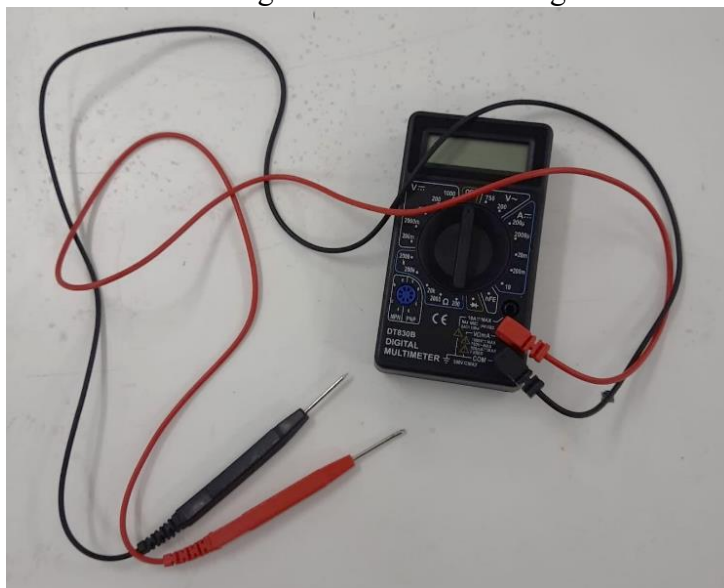
Figura 37. Amperímetro digital



Fonte: Autor (2023).

O multímetro digital, sem contato, sem fabricante, modelo DT830B que realiza as medidas de tensão gerada pelo aerogerador, como pode ser observado na Figura 38.

Figura 38. Multímetro digital



Fonte: Autor (2023).

Os conjuntos de *Coolers*, sem contato, do fabricante *Sunon*, 21W, tensão 12VDC para o teste de geração de eletricidade do aerogerador apresentado na Figura 39.

Figura 39. Conjunto de *Coolers* 21W/12V

Fonte: Autor (2023).

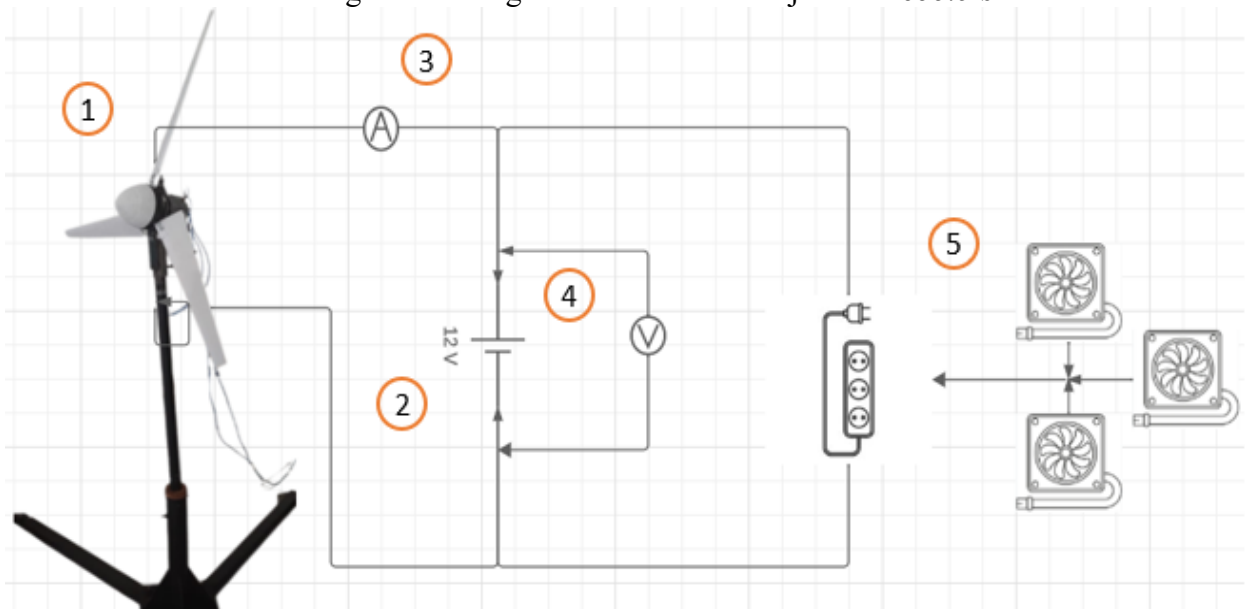
O inclinômetro digital, sem contato, fabricante *Newhorse - Afzos*, modelo NH-004, para a medição da variação de ângulos de ataque das pás eólicas como apresentado na Figura 40.

Figura 40. Inclínômetro digital



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 41, está representado o *layout* dos equipamentos de medição e o diagrama elétrico usados para os experimentos de geração de eletricidade da turbina tripás com o alternador.

Figura 41. Diagrama elétrico e o conjunto de *coolers*

Fonte: Autor (2023).

A descrição do diagrama elétrico para a geração de energia da turbina tripás é apresentada na Figura 41, inicia-se no item 1) o aerogerador acoplado de um alternador ligado a um cabo

na bateria, para o carregamento 2) bateria para o armazenamento de carga e, para os ensaios de carga e descarga dos *coolers* 3) amperímetro para as medições de tensão em DC na saída do aerogerador conectado a bateria 4) multímetro usado como voltímetro, para as medições de tensão em DC na bateria 5) conjunto de *coolers* de 21 W conectados a um cabo na tomada que conecta a régua de tomadas, para a realização de descarga no experimento.

Alternador – componente da turbina tripás

No desenvolvimento do experimento, foi utilizado um alternador do fabricante Delco-Arno, da montadora GM como ilustrado na Figura 42, composto de um gerador elétrico 1000rpm / 35A / 12VDC acoplado a um regulador de tensão.

Figura 42. Turbina tripás com alternador Delco-Arno



Fonte: Autor (2023).

Impressão 3D – fabricação das pás eólicas

Para a fabricação das pás eólicas, foi utilizado o processo de manufatura aditiva, este processo contém 7 etapas.

1ª etapa: criação de um desenho com o auxílio de um *software* CAD. No presente trabalho foi utilizado o *software* CATIA V5®.

2º etapa: conversão do desenho em 3D para o formato de arquivo de extensão *Stereolithography* (STL).

3º etapa: transferência do arquivo de extensão STL para o *software* fatiar a peça, neste trabalho foi usado o *Simplify*® mostrando como será realizada a impressão camada por camada, suas características de fabrico como espessura e tempo de impressão.

4º etapa: preparação da impressora, caso haja necessidade de realizar a limpeza e calibração do equipamento.

5º etapa: construção do objeto em um processo automatizado, ou seja, o momento da impressão da peça.

6º etapa: remoção da peça do equipamento, quando a mesma se solta da mesa com a redução da temperatura.

7º etapa: retirada de suportes que foram impressos e utilização da peça na aplicação final. É apresentado na Figura 43, a impressora 3D utilizada para a fabricação das pás.

Figura 43. Impressora 3D 400x400x500mm.



Fonte: Autor (2023).

Após seguir todos os passos à risca de impressão 3D é necessário levar em consideração que cada material utilizado nesse processo tem uma característica própria. As vantagens e desvantagens vivenciadas nesse processo estão identificadas no Quadro 1.

Quadro 1. Vantagens e desvantagens das impressões 3D com os materiais poliméricos

Material	Característica de impressão	Desempenho
ABS	Tempo de impressão foi de 18hrs cada peça, com preenchimento de 30%. Cuidados a serem adotados são acompanhar as impressões; a impressão deve ser feita em câmara fechada e com o ar condicionado ligado, para manter o ambiente sem muita alteração de intemperes – como variação no ar. Temperatura de impressão 250°C e mesa de impressão com 70°C.	Peças em ABS quanto muito finas, tendem a ter maior dificuldade com descolamento de camadas e empenamento, no período de esfriamento da peça ou até durante a impressão. É necessário a impressão com parede mais espessa, por esse motivo o preenchimento foi maior que os outros materiais.
PETG	Tempos de impressão foi de 13hrs cada peça, com preenchimento de 20%. É um material que exige que a máquina tenha ou o operador tenha um controle de temperatura mais minucioso. Bastante higroscópico, então, é necessário cuidado com a umidade. A máquina deve ter ventilação, mas também de forma regulada. Temperatura de impressão em 240°C e mesa de impressão com 70°C.	Impressão com o material PETG são mais trabalhosas, se a temperatura utilizada esquentar de mais na extrusão do material, a resposta do material é um comportamento de cola, fica mais tempo na fase elástica e isso pode entupir a máquina. Os cuidados com PETG são bem menores do que com o ABS que, por exemplo, não pode haver nenhuma alteração no ambiente. Mas é um material que pode ser impresso com velocidade mais rápida, com configurações corretas.
PLA	Tempo de impressão foi de 9hrs cada peça, com preenchimento de 20%. Impresso em máquina aberta ou sem mesa aquecida. É necessário lubrificação no filamento para melhor acabamento e para evitar que o material fique quebradiço. Temperatura de impressão em 220°C e mesa de impressão com 55°C.	Impressão rápida e fluida, nas configurações corretas. Acabamento das peças bem acabadas. Para o material PLA foi necessário utilizar um lubrificante da marca <i>Singer</i>, pois é um material que obstrui muito a mangueira de impressão, por ser quebradiço e também é um material que trabalha em condições abertas e arejadas.
Tritan	Tempo de impressão foi de 17hrs cada peça, com preenchimento de 20%. Temperatura de impressão em 270°C e mesa de impressão com 100°C. Impressão realizada em câmara fechada para uma maior estabilidade do processo. Baixa retração. Material não quebradiço. Material com melhor propriedade mecânica.	Impressão com bom acabamento estético e melhor estrutural. O filamento também rende mais. Material que trabalha com temperatura mais altas, na máquina utilizada para a impressão foi realizada com 270°C pois era a temperatura máxima da máquina e para conseguir realizar a impressão foi feito um ajuste na velocidade de impressão.

Fonte: Autor (2023).

Como citado no Quadro 1, as impressões confeccionadas no material PLA, foi necessário utilizar um lubrificante da marca *Singer*, a Figura 44 ilustra o lubrificante usado.

Figura 44. Óleo *Singer*



Fonte: Autor (2023).

Em todas as impressões a cola utilizadas para aderir o material na mesa foi o *spray* da marca Karina de 400 ml, é apresentado na Figura 45.

Figura 45. Óleo *spray* Karina 400 ml



Fonte: Autor (2023).

Para a colagem das peças impressas foi utilizado cola superbonder e massa plástica Ultra Light 495 g, para que não fique nenhuma fresta ou fissura na superfície da peça conforme a Figura 46 apresenta.

Figura 46. Massa plástica Ultra Light 495 g.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 47 apresenta a cola superbonder utilizada para fazer a junção dos encaixes nas peças e a junção das faces das pás eólicas.

Figura 47. Cola superbonder utilizada para colagem das partes das pás eólicas.



Fonte: Autor (2023).

Experimento com o túnel de vento

O ventilador do túnel de vento foi utilizado para a geração da variação da velocidade linear do vento. Para os testes seguiu-se os seguintes procedimentos.

O aerogerador tem como característica diâmetro de área varrida de pás 1200 mm, potência de especificação 400 W / 12 V e rotação nominal do alternador de especificação 1000 rpm, para velocidade de 12 m/s.

O primeiro experimento foi feito para alinhar o centro da turbina eólica com a área que tinha maior incidência de velocidade do vento no bocal do túnel, com a distância definida entre os dois equipamentos de um metro e a altura do centro da turbina tripás ao piso foi de um metro e vinte. Após isso, o experimento foi realizado com cada conjunto de material e formato das pás para analisar qual conjunto teria o melhor desempenho. Para os experimentos, as pás eólicas foram expostas à ventos de 2,6 m/s até 11,7 m/s.

Nesta etapa do experimento, iniciou-se a variação da velocidade linear do vento com 0 m/s aumentando até 12 m/s. Depois, ia-se reduzindo a velocidade do vento de 12 m/s até 0 m/s onde a pá parava o movimento. E novamente repetia-se o teste aumentando a velocidade de 0 m/s até 12 m/s.

Esse procedimento foi realizado quatro vezes com cada conjunto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da parte experimental consistiram da execução do projeto das pás eólicas, em fabricá-las em três formatos diferentes com quatro materiais diferentes e foi utilizada um modelo de pá eólica com o material de PVC, como referência para as medições e comparação das pás eólicas que foram fabricadas por impressão 3D.

5.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Após estabelecida a metodologia, foi possível realizar o levantamento de dados para a alimentação da revisão bibliográfica de forma mais tratada. Inicialmente foi feita uma busca nas bases de dados citados. A primeira consultada foi a base de dados *Scopus*, as palavras chaves que foram utilizadas na busca de pás eólicas foram *wind* e *blades*. A plataforma *Scopus* oferece um refinamento muito mais avançado de pesquisa, com ferramentas como adicionar palavras chaves ao seu código de pesquisa, ou delimitar a área desejada conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Base de dados *Scopus*

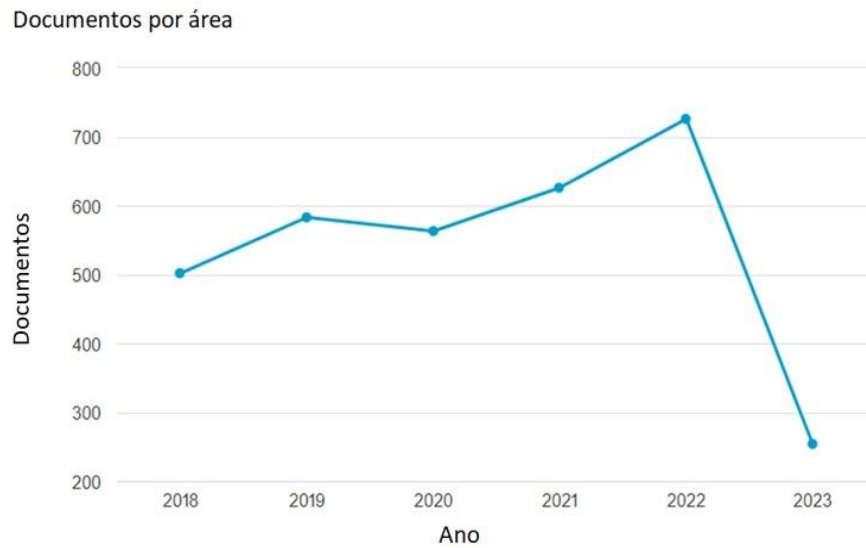
Item	<i>Scopus</i>	Ano	<i>Keywords</i>	Área
1	26.078	Todos os anos	<i>Wind blades</i>	Todas
2	9.475	2018 á 2023	<i>Wind blades</i>	Todas
3	5.914	2018 á 2023	<i>Wind blades</i>	Engenharia
4	7.649	2018 á 2023	<i>Wind blades</i>	Energia e Engenharia
5	3.254	2018 á 2023	<i>Wind blades</i>	Energia

Fonte: Adaptada da base de dados *Scopus* (2023).

Na plataforma da *Scopus* é possível realizar análises mais profundas dos trabalhos com títulos que continham as palavras pás eólica, houve um resultado de 26.078 trabalhos que possivelmente estão ligados diretamente a pesquisa. Com esses dados, foi feita uma análise específica desses dados.

A primeira análise extraída desses dados, foi a de publicação por ano, e pode-se observar que o maior pico de publicação desta área foi em 2022 com 726 trabalhos encontrados, o que se mostra um tema atual e que vem se destacando. Mas vale ressaltar que em 2023 houve uma queda na área pesquisada, é importante salientar que deve haver investimento em novas pesquisas para esta linha. Na Figura 48 apresenta o gráfico do número de publicações por ano.

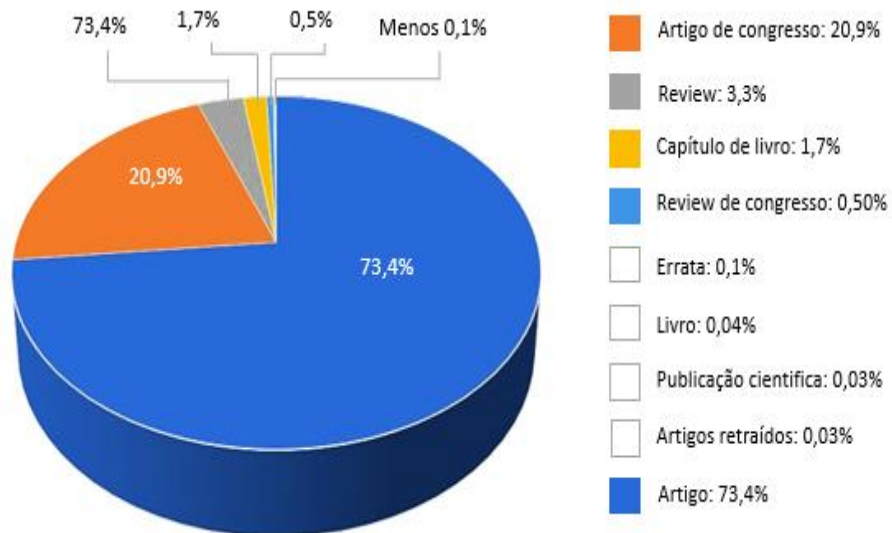
Figura 48. Gráfico de documentos relacionado ao tema publicados por ano



Fonte: Adaptado da base de dados *Scopus* (2023).

A segunda análise extraída desses dados foi a dos tipos encontrados nesta busca e o resultado foi de 73,40% de artigos e 3,30% de *reviews* sobre o tema. A Figura 49 ilustra o gráfico destes dados.

Figura 49. Gráfico dos tipos de documentos encontrados na base de dados *Scopus*



Fonte: Adaptado da base de dados *Scopus* (2023).

A segunda base de dados consultada foi a *Web of Science*. As palavras chaves inicialmente também foram *wind blades*. A Tabela 3 apresenta os dados obtidos na busca nessa base de dados. O *Web of Science* permite delimitar dados fornecidas pela plataforma, a ponto de buscar apenas artigos de revisão ou que tenham relação com esse tema e pesquisar por trabalhos entre os anos 2017 e 2023, e, em português, o resultado foi entorno de 45 artigos.

Tabela 3 está relatada essa busca.

Tabela 3. Base de dados *Web of Science*

Item	<i>Web of Science</i>	Ano	<i>Keywords</i>	Área
1	15.087	Todos os anos	<i>Wind blades</i>	Todas
2	8.292	2017 á 2023	<i>Wind blades</i>	Todas
3	3.812	2017 á 2023	<i>Wind blades</i>	Engenharia
4	2.570	2018 á 2023	<i>Wind blades</i>	Energia
5	818	2018 á 2023	<i>Wind blades</i>	Energia e Engenharia

Fonte: Adaptada da base de dados *Web of Science* (2023).

E a terceira ferramenta utilizada para a consulta de pesquisa de trabalho acadêmicos, foi a Periódicos Capes. Dentro da plataforma é possível realizar uma filtragem na biblioteca virtual, que compõem todo o acervo com diversas bases dados. As palavras chaves inicialmente também foram *wind blades*. A Tabela 4 demonstra os dados obtidos com a ferramenta Periódico Capes. O acervo também possui um processo de refinamento e um campo de busca mais diversos em arquivos, com ferramentas como adicionar palavras chaves ao seu código de pesquisa ou delimitar a área desejada.

Tabela 4. Base de dados Periódicos Capes

Item	<i>Periódicos Capes</i>	Ano	<i>Keywords</i>	Áreas
1	15.504	Todos os anos	<i>Wind blades</i>	Todas
2	12.976	Todos os anos	<i>Wind blades</i>	Artigos
3	10.279	2017 á 2023	<i>Wind blades</i>	Artigos e Engenharia
4	3.060	2017 á 2023	<i>Wind blades</i>	Turbina eólica
5	1.492	2017 á 2023	<i>Wind blades</i>	Engenharia e Turbina eólica

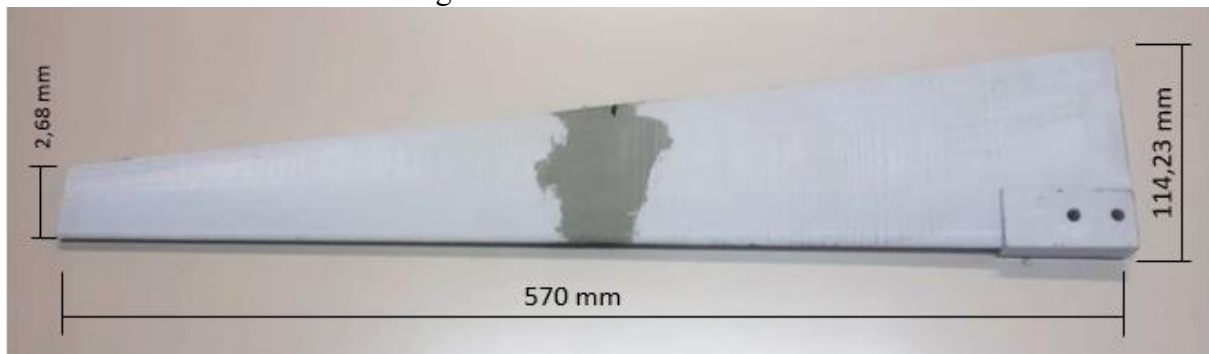
Fonte: Adaptada da base de dados Periódicos Capes (2023).

5.2. RESULTADOS DOS PROJETOS DAS PÁS EÓLICAS

O formato de pá eólica reta com material em ABS, possui a dimensão de 570,0 mm de comprimento, 114,2 mm de largura, maior espessura 17,0 mm e menor espessura 5,8 mm.

Essas dimensões foram padronizadas para os outros materiais no formato de pá reta. Sendo assim, os modelos desse formato estão iguais, conforme é apresentado na Figura 50.

Figura 50. Pá de formato reta em ABS



Fonte: Autor (2023).

O formato de pá eólica curvada com material em Tritan, possui a dimensão de 570,0 mm de comprimento, 111,0 mm de largura, maior espessura 17,0 mm e menor espessura 4 mm, está apresentado na Figura 51.

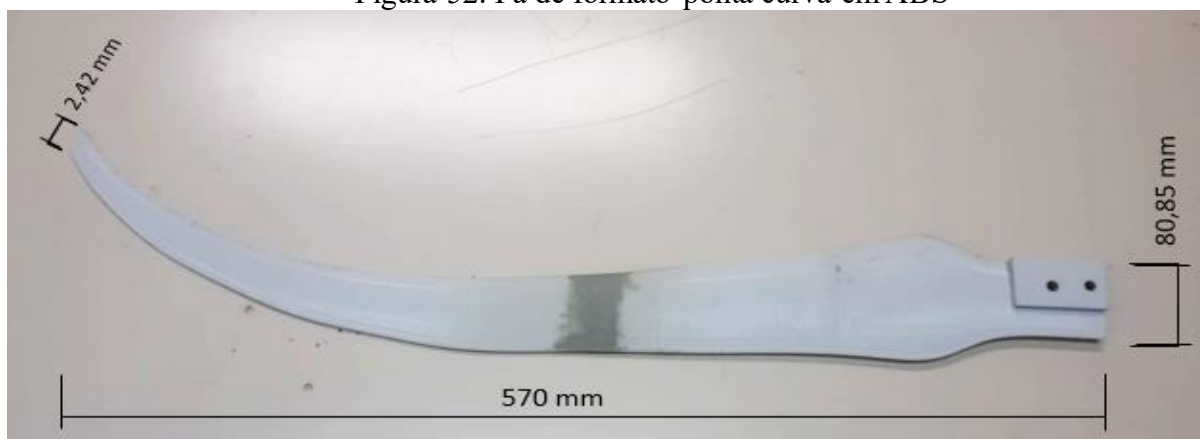
Figura 51. Pá de formato curvada em Tritan



Fonte: Autor (2023).

O formato de pá eólica ponta curva com material em Tritan, possui a dimensão de 570,0 mm de comprimento, 80,8 mm de largura, maior espessura 17,2 mm e menor espessura 3 mm, está apresentado na Figura 52.

Figura 52. Pá de formato ponta curva em ABS



Fonte: Autor (2023).

5.3. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS COM TRÊS FORMATOS DAS PÁS EÓLICAS

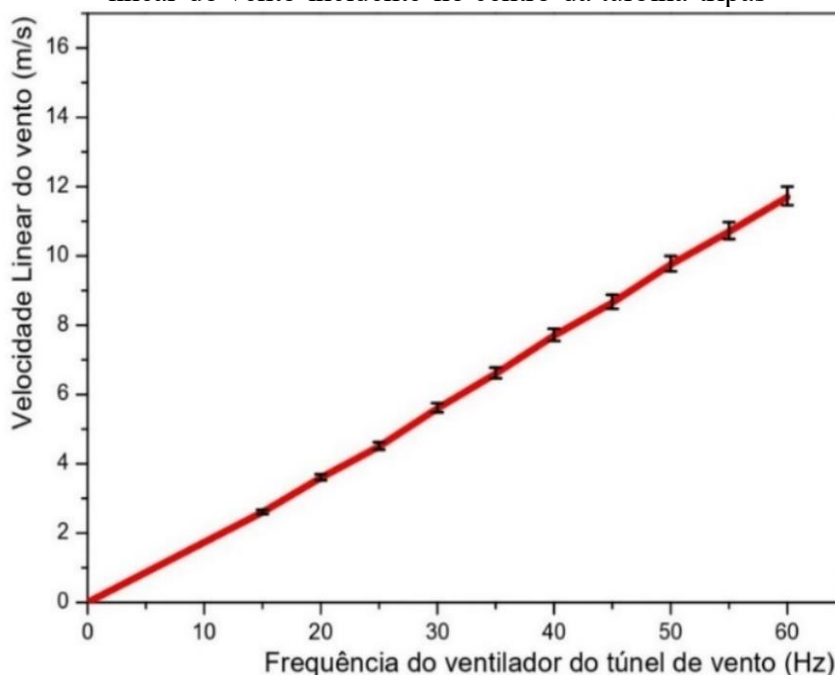
A parte experimental consistiu em colocar as pás eólicas sob condições de ventos, obtidas no Laboratório de Fluidos Mecânicos, com os resultados apresentados em tabelas e gráficos. Com o modelo da pá reta foram feitos os experimentos para verificar o desempenho das pás eólicas, mostrar os resultados das rotações obtidas em relação aos ângulos de ataques que foram usados, são eles de (5°, 10°, 15°, 20° e 25°). Os ângulos usados foram obtidos de acordo com perfis aerodinâmicos NACA 2412 (AIRFOIL TOOLS, 2023) e obteve-se os resultados das tabelas, que estão dispostas no Apêndice 1.

O primeiro conjunto submetido aos ensaios foi o de pás eólicas no formato reto com o material ABS. Esse primeiro experimento foi feito para padronizar as medidas de distância do aerogerador em relação a saída do túnel de vento. Também regular a altura entre o centro da saída do túnel de vento e o da turbina tripás para um melhor aproveitamento da captação do vento.

Foram medidas as velocidades lineares do vento de saída, de acordo com a velocidade de rotação do ventilador siroco do túnel de vento. Para isso a distância usada entre a saída do túnel de vento e a aerogerador foi de um metro e, a altura do centro da turbina tripás ao piso foi de um metro e vinte.

Para os experimentos, as pás eólicas foram expostas à ventos de 2,6 m/s até 11,7 m/s, conforme apresenta a Figura 53 o gráfico da frequência do ventilador do túnel de vento versus velocidade linear do vento incidente no centro da turbina tripás (Apêndice 1 e Tabela 8).

Figura 53. Gráfico da frequência do ventilador do túnel de vento versus velocidade linear do vento incidente no centro da turbina tripás



Fonte: Autor (2023).

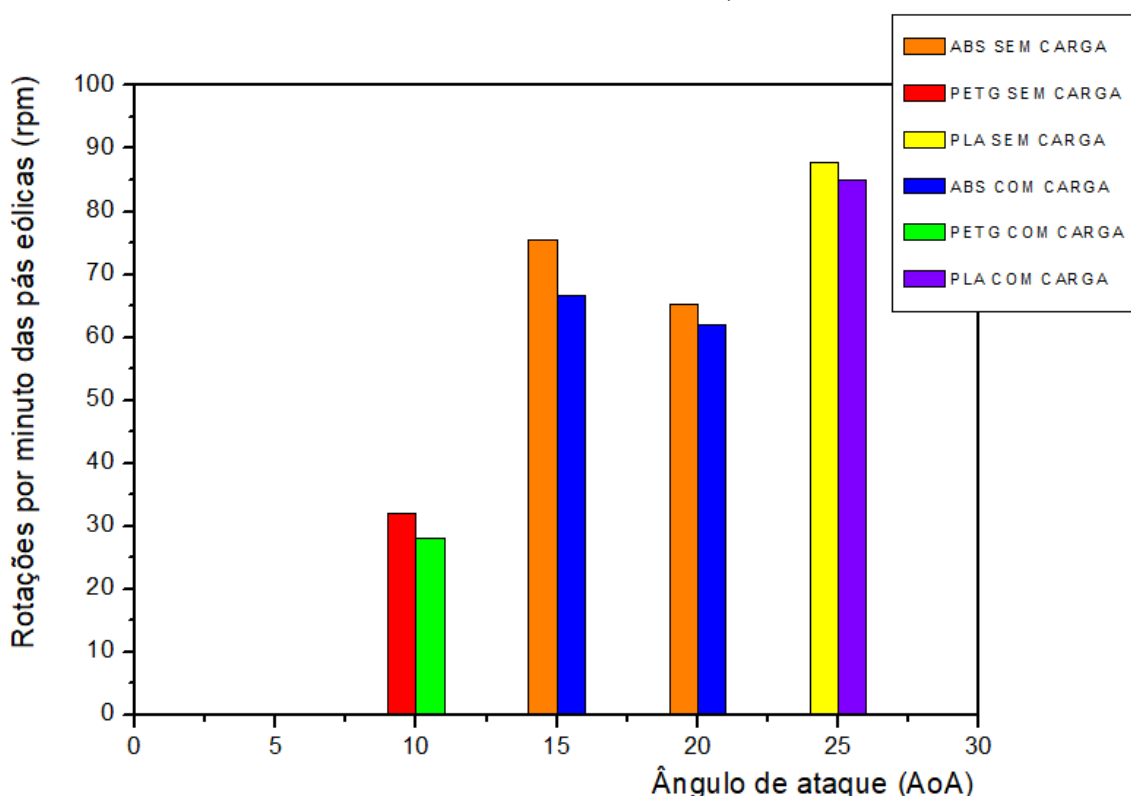
No decorrer do experimento houve um aumento proporcional entre a velocidade linear do vento e da frequência do ventilador do túnel de vento. Como é um ambiente controlado as variações do ambiente são mínimas e ele pode ser utilizado para todos os experimentos, com temperatura controlada de 25°C e laboratório fechado, sem interferência externa. Essas condições ambientais serão utilizadas para todos os conjuntos de pás.

A Figura 54 apresenta o gráfico obtidos pelos experimentos. Eles apresentam o gráfico entre as rotações por minutos das pás e a potência gerada pela turbina. A carga máxima submetida as turbinas eólicas foi de 21W/12VDC constituída de três *coolers*. O alternador disponível para a utilização nos experimentos tem a rotação nominal de 1000 rpm. Foi necessário estabelecer uma carga máxima para que o gerador suprisse a bateria e não descarregasse a mesma.

A Figura 54 apresenta o gráfico de rotações em função dos ângulos de ataque para velocidade linear do vento para 3,6 m/s (Apêndice 1; Tabela 13, Tabela 16, Tabela 20, e Tabela 26). Observa-se que para o ângulo de 5° não houve nenhum conjunto de pás que iniciou a rotação. A menor rotação das pás eólicas para a condição de carregamento sem carga foi a com material PLA, de 32,0 rpm e com ângulo de 10° e, a maior na mesma condição foi a pá de material PLA, de 87,8 rpm, e com ângulo de ataque 25° (ângulo formado entre a linha da corda do perfil e a velocidade relativa do vento).

Apresenta-se agora as condições com a carga de 21 W, verifica-se que a menor rotação das pás eólicas com o material ABS, de 28,0 rpm e com ângulo de 10° e a maior na mesma condição foi a pá de material PLA, de 84,9 rpm e com ângulo de 25°. O ângulo de ataque que permitiu maior rotação foi de 10° com 87,8 rpm a vazio e 84,9 rpm com carga com a redução de 3,3% na condição com carga.

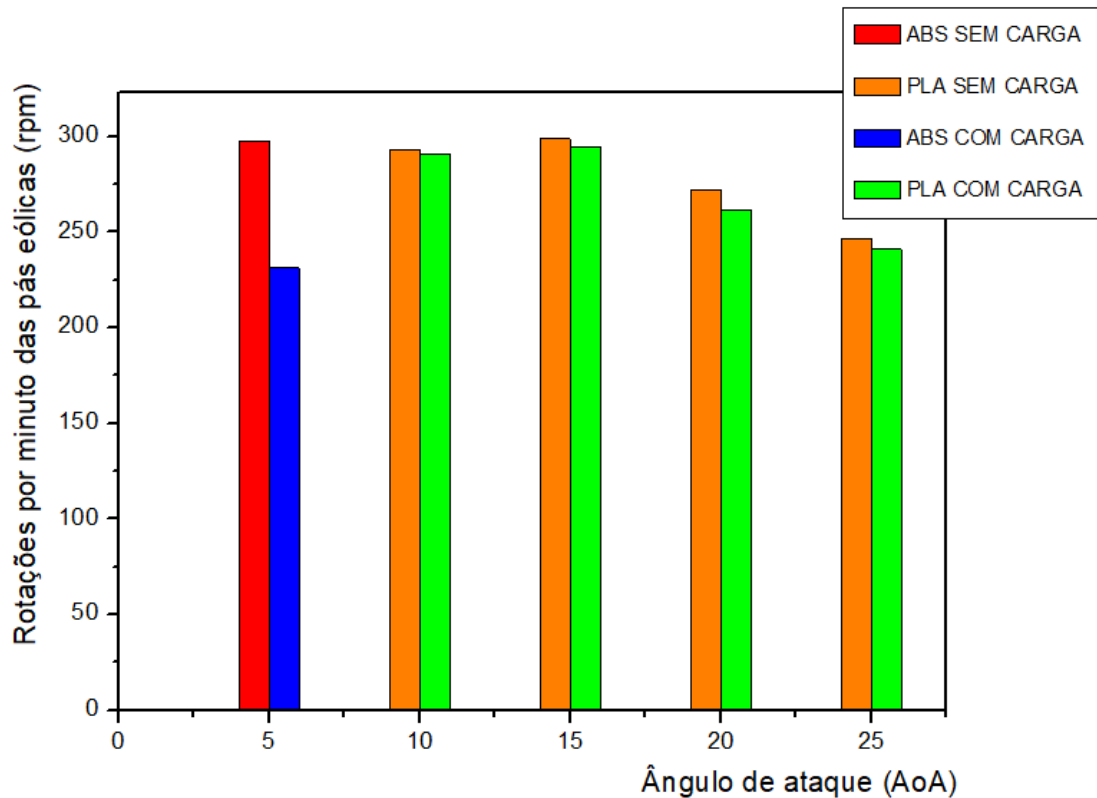
Figura 54. Gráfico da relação entre as rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 3,6 m/s



Fonte: Autor (2023).

O gráfico da Figura 55, apresenta as rotações em função dos ângulos de ataque para velocidade linear do vento para 6,6 m/s (Apêndice 1; Tabela 8, Tabela 14, Tabela 18, Tabela 26 e Tabela 37). A menor rotação das pás eólicas para a condição de carregamento sem carga foi a com material PLA, de 246,3 rpm e com ângulo de 25° e, a maior na mesma condição foi a pá de material PLA, de 298,7 rpm, e com ângulo de ataque 15°. Apresenta-se agora as condições com a carga de 21 W, verifica-se que a menor rotação das pás eólicas com o material ABS, de 231,0 rpm e com ângulo de 5° e a maior na mesma condição foi a pá de material PLA, de 294,7 rpm e com ângulo de 15°. O ângulo de ataque que permitiu maior rotação foi de 15° com 298,7 rpm a vazio e 294,7 rpm com carga com a redução de 1,4% na condição com carga.

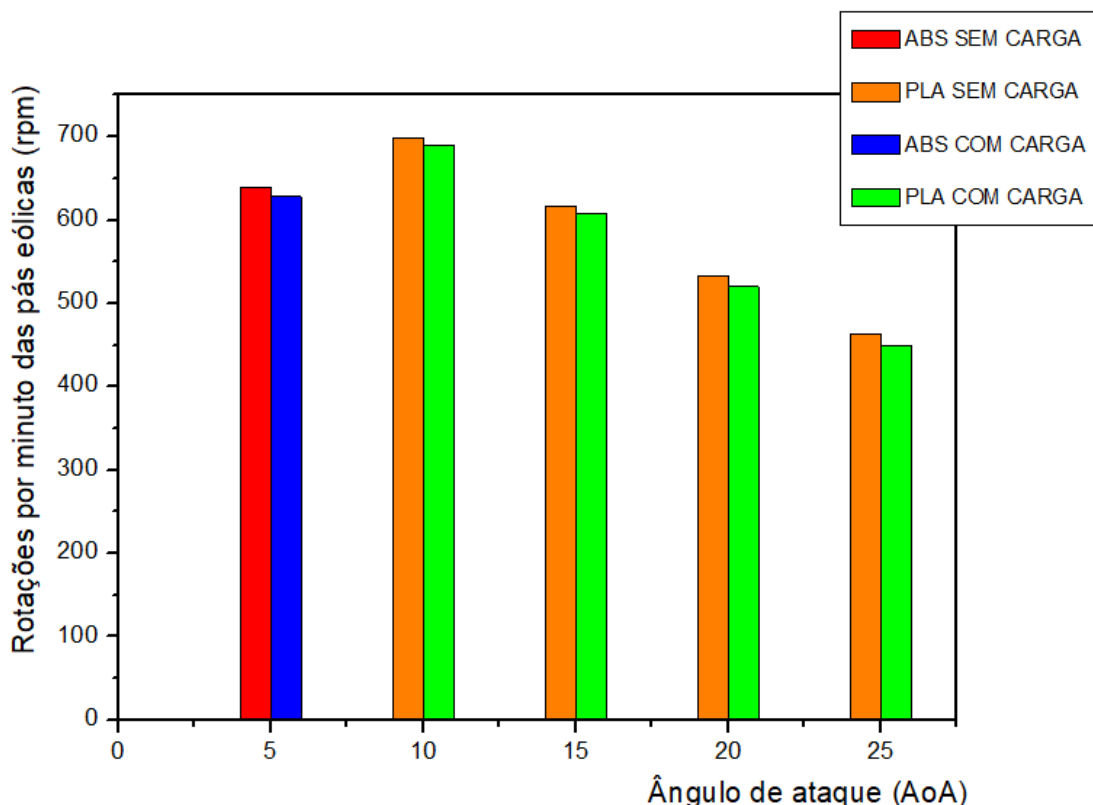
Figura 55. Gráfico das rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 6,6 m/s



Fonte: Autor (2023).

O gráfico da Figura 56, apresenta as rotações em função dos ângulos de ataque para velocidade linear do vento de 11,7 m/s (Apêndice 1; Tabela 8, Tabela 14, Tabela 18, Tabela 22 e Tabela 26). A menor rotação das pás eólicas para a condição de carregamento sem carga foi a com material PLA, de 463,7 rpm e com ângulo de 25° e, a maior na mesma condição foi a pá de material PLA, de 698,8 rpm, e com ângulo de ataque 10°. Apresenta-se agora as condições com a carga de 21W, verifica-se que a menor rotação das pás eólicas com o material PLA, de 449,7 rpm e com ângulo de 25° e a maior na mesma condição foi a pá de material PLA, de 689,7 rpm e com ângulo de 10°. O ângulo de ataque que permitiu maior rotação foi de 10° com 698,8 rpm a vazio e 689,7 rpm com carga com a redução de 1,3% na condição com carga.

Figura 56. Gráfico das rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 11,7 m/s



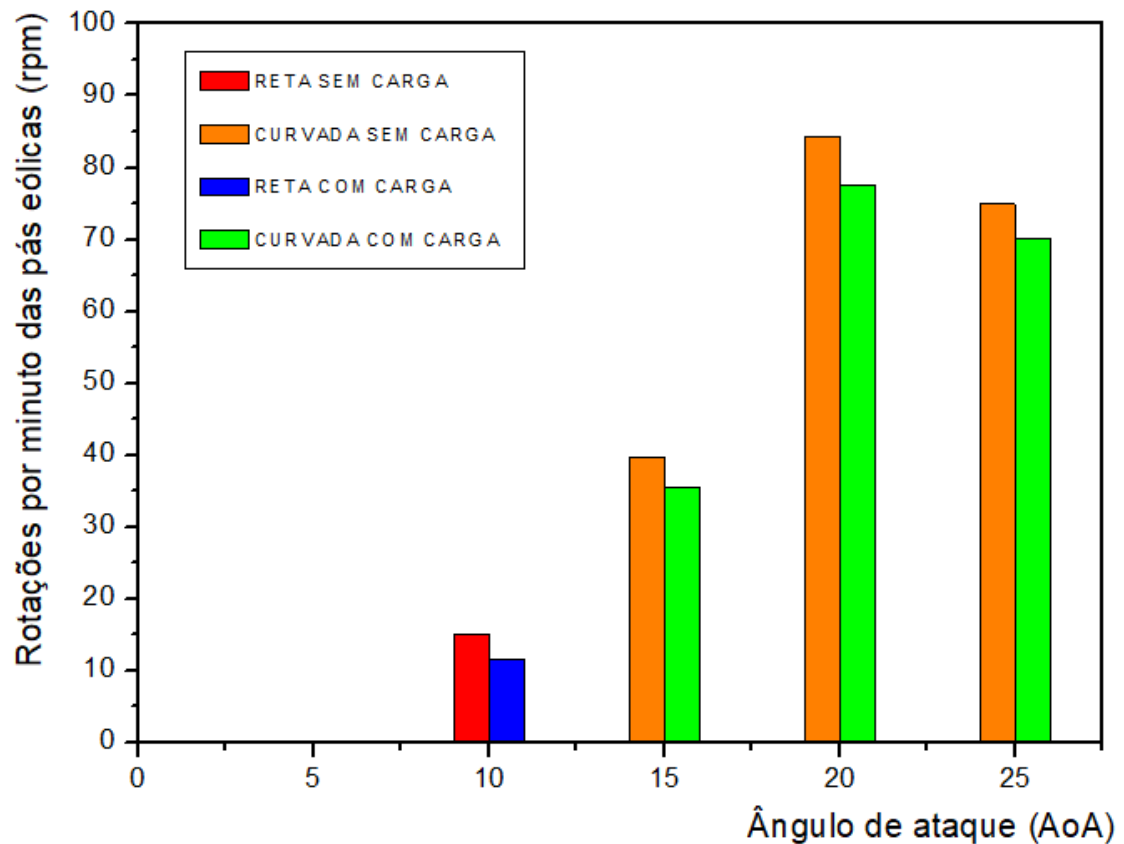
Fonte: Autor (2023).

Os mesmos experimentos realizados com os formatos de pás reta, foram realizados somente com o material Tritan, modificando as geometrias das pás eólicas sendo elas reta, curvada e ponta curva 1 e ponta curva 2. As pás, ponta curva 1 e 2 recebem esse nome pelo fato de os experimentos terem sido feitos com a inversão de sentido do bordo de fuga da pá.

A carga e o alternador utilizados nesses experimentos foram os mesmos dos itens anteriores.

O gráfico da Figura 57, apresenta as rotações em função dos ângulos de ataque para velocidade linear do vento de 3,6 m/s (Apêndice 1; Tabela 15, Tabela 28, Tabela 32, Tabela 35 e Tabela 38). Nota-se que as pás eólicas ponta curva 1 e 2, não conseguiram obter o torque necessário para iniciar a rotação para o ângulo de 5°. A menor rotação das pás eólicas no formato reto, para a condição de carregamento sem carga foi de 15,10 rpm e com ângulo de 10°. A maior na mesma condição foi a pá de formato curvada, de 84,3 rpm, e com ângulo de ataque 20°. Para as condições com a carga de 21 W, verifica-se que a menor rotação das pás eólicas reta, de 11,5 rpm e com ângulo de 10° e a maior na mesma condição foi a pá de formato curvada, de 77,6 rpm e com ângulo de 20°. O ângulo de ataque que permitiu maior rotação foi o de 20° com 84,3 rpm a vazio e 77,6 rpm com carga com a redução de 7,9% na condição em carga.

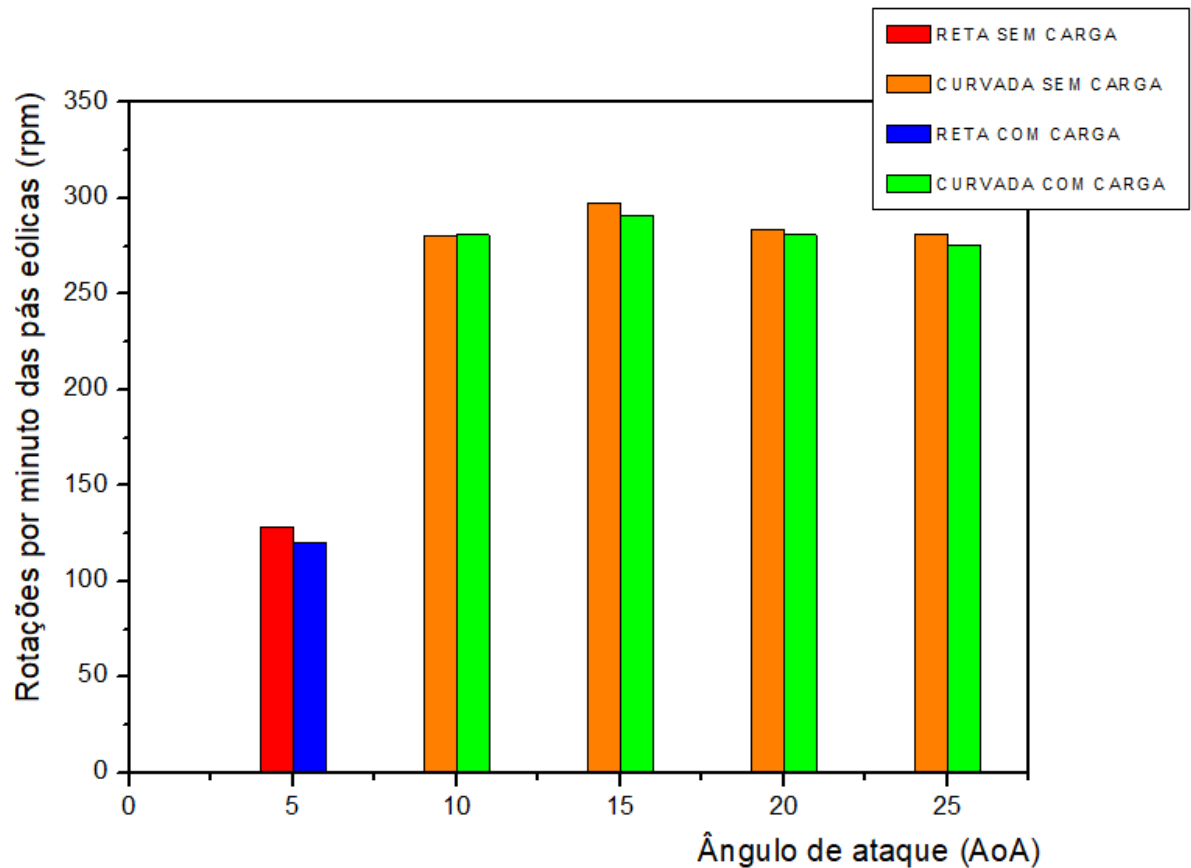
Figura 57. Gráfico das rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 3,6 m/s para o material Tritan



Fonte: Autor (2023).

O gráfico da Figura 58, apresenta as rotações em função dos ângulos de ataque para velocidade linear do vento de 6,6 m/s (Apêndice 1; Tabela 11, Tabela 29, Tabela 32, Tabela 35 e Tabela 38). A menor rotação das pás eólicas no formato reto, para a condição de carregamento sem carga foi de 128,3 rpm e com ângulo de 5°. A maior na mesma condição foi a pá de formato curvada, de 297,4 rpm, e com ângulo de ataque 15°. Para as condições com a carga de 21 W, verifica-se que a menor rotação das pás eólicas reta, de 120,2 rpm e com ângulo de 5° e a maior na mesma condição foi a pá de formato curvada, de 290,4 rpm e com ângulo de 15°. O ângulo de ataque que permitiu maior rotação foi de 15° com 297,4 rpm a vazio e 290,4 rpm com carga com a redução de 2,4% na condição com carga.

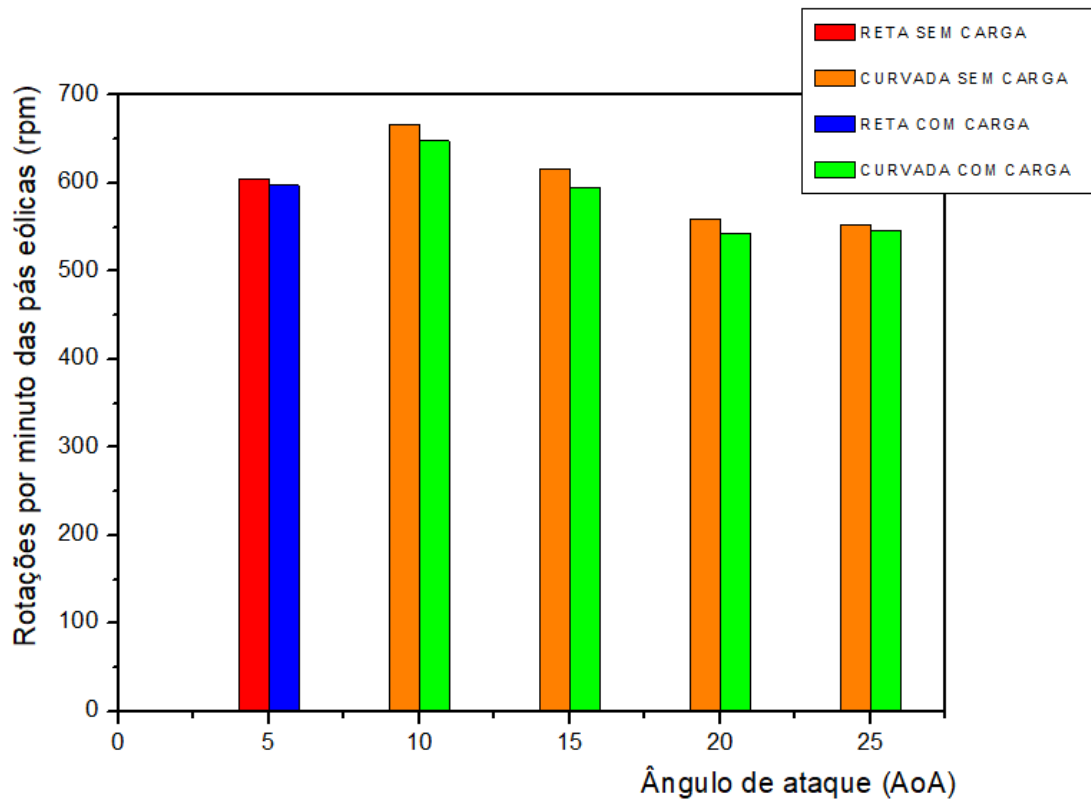
Figura 58. Gráfico das rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 6,6 m/s para o material Tritan



Fonte: Autor (2023).

O gráfico da Figura 59, apresenta as rotações em função dos ângulos de ataque para velocidade linear do vento de 11,7 m/s (Apêndice 1; Tabela 11, Tabela 29, Tabela 32, Tabela 35 e Tabela 38). A menor rotação das pás eólicas no formato reto, para a condição de carregamento sem carga foi de 604,7 rpm e com ângulo de 5°. A maior na mesma condição foi a pá de formato curvada, de 666,6 rpm, e com ângulo de ataque 10°. Para as condições com a carga de 21 W, verifica-se que a menor rotação das pás eólicas reta, de 597,4 rpm e com ângulo de 5° e a maior na mesma condição foi a pá de formato curvada, de 648,1 rpm e com ângulo de 10°. O ângulo de ataque que permitiu maior rotação foi de 10° com 666,6 rpm a vazio e 648,1 rpm com carga com a redução de 2,77% na condição com carga.

Figura 59. Gráfico das rotações por minuto e o ângulo de ataque com a velocidade linear do vento em 11,7 m/s para o material Tritan

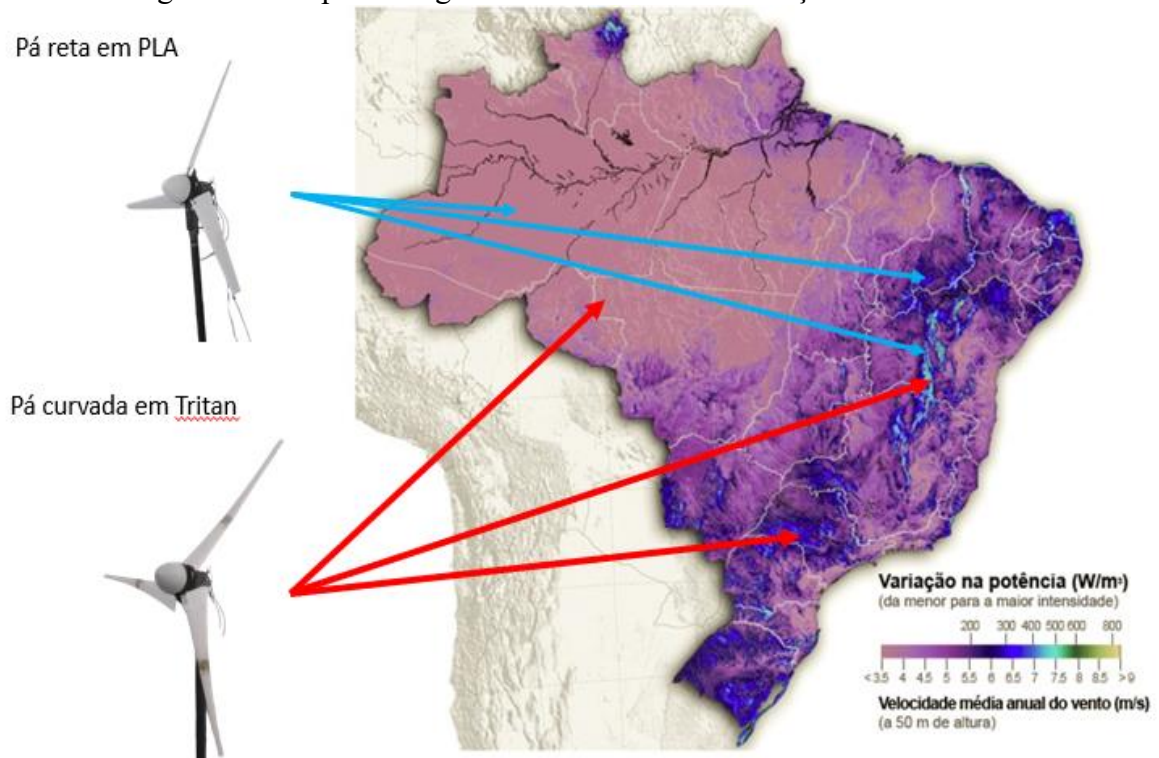


Fonte: Autor (2023).

Após a análise dos gráficos apresentados a cima, resulta-se nos melhores modelos das pás eólicas, sendo elas, a de formato reta em PLA e a de formato curvada em Tritan.

De acordo com a Figura 60, observa-se os valores da velocidade do vento nas regiões do Brasil.

Figura 60. Mapa das regiões do Brasil com as variações velocidades do vento



Fonte: Adaptado de ABEEólica (2018).

Com a análise dos gráficos apresentados a cima (a partir da Figura 54 até a Figura 60), conclui-se que as pás que obtiveram melhor desempenho foram as de formato reta em PLA e a curvada em Tritan, foi possível relacionar qual é o modelo mais adequado para cada região do Brasil, a Tabela 5 mostra essa associação com os dados das velocidades obtidas nos experimentos.

Tabela 5. Pás de melhor desempenho à vazio e com carga

Condições	Pás eólica reta em PLA		Pá eólica curvada em Tritan	
	sem carga (rpm)	com carga (rpm)	sem carga (rpm)	com carga (rpm)
Velocidades do vento abaixo de 5 m/s	87,8 rpm	84,9 rpm	84,3 rpm	77,6 rpm
Velocidades do vento média de 6,6 m/s	298,7 rpm	294,6 rpm	297,4 rpm	290,9 rpm
Velocidades do vento acima de 11,7 m/s	698,8 rpm	689,7 rpm	666,6 rpm	648,1 rpm

Fonte: Autor (2023).

Os resultados das velocidades dos dois conjuntos de pás, mostram-se com valores aproximados. Com a condição de baixas velocidades do vento, a abaixo de 5 m/s a média de velocidade das pás foi de 84 rpm e, para velocidades do vento de 6,6 m/s a média foi de 295 rpm. E por fim, a última condição imposta, foi para velocidades do vento de 11,7 m/s com uma

média de velocidade das pás de 676 rpm. Com isso, é importante salientar que os dois conjuntos atendem as condições imposta e pode ter aplicação nos mesmos locais das regiões do Brasil.

5.4. CUSTOS DOS MATERIAIS E IMPRESSÃO

Neste tópico foi descrito, na Tabela 6, os gastos realizados para a fabricação das pás eólicas por meio do processo de impressão 3D, estando incluídos o preço do material para a fabricação, componentes que auxiliaram na construção e montagem das peças, manutenção das máquinas de impressão durante as impressões e a mão de obra.

Tabela 6. Custos para a fabricação das pás eólicas

Itens	Materiais	Quantidade	Custo
Custo de material prima para os conjuntos de pás eólicas			
1	Filamento ABS 1,75 mm	5 kg	R\$ 144,0
2	Filamento PLA 1,75 mm	5 kg	R\$ 163,7
3	Filamento PETG 1,75 mm	5 kg	R\$ 202,3
4	Filamento Tritan 1,75 mm	5 kg	R\$ 301,5
Total + frete + IPI			R\$ 811,5
Investimento utilizados no processo de impressão 3D			
5	Alternador Delco - Arno 35A/12V/1000rpm	1	R\$ 383,0
6	Brocas 2 mm e 2,5 mm	1	R\$ 14,5
7	Mangueira de impressora 3D	1	R\$ 40,0
Total			R\$ 437,5
Custos para a fabricação das pás eólicas (18 unidades)			
8	Cola superbonder	15	R\$ 2,5
9	Massa plástica Ultra Light 495 g	1	R\$ 14,9
10	Lubrificante Singer 100 ml	1	R\$ 9,0
11	Spray fixador Karina 400 ml	9	R\$ 25,6
Total			R\$ 87,0

Fonte: Autor (2023).

Os serviços técnicos especializados, foram realizados pelo técnico mecânico Antonio Augusto Moretti Rizzato, da oficina de pesquisa localizada na UNESP de Guaratinguetá. Ele auxiliou na montagem da estrutura final, o pedestal da turbina tripás, o suporte das pás com o variador do ângulo de ataque das pás e a fixação do alternador na estrutura da turbina tripás.

Considerando uma jornada de trabalho mensal de 220 h, corresponde a 44 h semanais com 8 h trabalhados por dia, de segunda à sábado e um salário por projeto correspondente R\$ 1.495,0 tem-se o valor por hora trabalhada R\$ 6,8.

Na Equação 1, o preço estimado para a fabricação das pás eólicas em impressão 3D, pode ser feito da seguinte forma:

$$1) \quad P = C_M + C_F + M_O$$

C_M : custo matéria prima.

C_F : custo da fabricação.

M_O : soma da mão de obra.

A Tabela 7 mostra o custo estimado das pás eólicas fabricadas em impressões 3D.

Tabela 7. Preço estimado das impressões 3D

Itens	Descrição	Quantidade	Preenchimento	Valor unitário	Valor total
1	Pá eólica ABS	3,0	30%	± R\$ 256,8	R\$ 770,4
2	Pá eólica PLA	3,0	20%	± R\$ 263,4	R\$ 790,2
3	Pá eólica PETG	3,0	20%	± R\$ 276,2	R\$ 828,6
4	Pá eólica Tritan	3,0	20%	± R\$ 309,3	R\$ 927,9

Fonte: Autor (2023).

6. CONCLUSÕES

Em relação ao processo de impressão 3D, foi possível concluir que o material que obteve melhor facilidade de impressão foi no formato de pá reta em PLA, pois, no processo, a impressão não exigiu da máquina temperaturas muito elevadas. Além disso, foi o conjunto de peças que teve o melhor acabamento com o menor tempo de impressão.

O outro material que também se destacou durante as impressões foi o Tritan, um material flexível e bastante fluído, que não apresentou muitas complicações durante as impressões. Inclusive, foi o filamento que mais teve rendimento de impressão e apresentou características mecânicas melhores em comparação ao PLA, por não ser um material em sua peça final quebradiço segundo apresentado em literatura, dando mais estabilidade e firmeza estrutural as pás.

Já o material ABS, foi a impressão que teve maior complexidade. Ele é um material que exige condições específicas de impressão como câmara fechada, controle da temperatura e umidade do ambiente. Além do material liberar toxidade durante o processo, ele também apresenta descolamento de camadas o que faz com que as impressões tenham um desafio muito maior.

E o material PETG, que em muitos momentos das impressões se apresentou na forma de um material pegajoso, entupindo tanto o bico da extrusora como a mangueira. Isso faz com que seja necessário um controle maior das condições de impressão.

Destacam-se entre os resultados da pesquisa que existe viabilidade técnica da fabricação das pás eólicas por meio da impressão 3D e dentre todos os conjuntos, os que se destacaram foram com os materiais PLA e Tritan.

Com o PLA foi possível a fabricação com o formato de pá reta. Em relação aos resultados obtidos com o PLA, pode-se concluir que para velocidades do vento abaixo de 5 m/s, a pá reta teve o melhor desempenho foi no material PLA, com velocidade de partida 3,6 m/s com ângulo de ataque 25° atingindo uma rotação de 87,8 rpm e com carga 84,9 rpm. No Brasil isso corresponderia mais de 81,8% de utilização.

Para velocidades médias do vento de 6,6 m/s, a pá reta apresentou o melhor desempenho no material PLA, com velocidade de partida 6,6 m/s com ângulo de ataque 15° atingindo uma rotação 298,7 rpm à vazio e com carga de 294,6 rpm. No Brasil isso corresponderia mais de 13,1% de utilização.

Para velocidades do vento de 11,7 m/s, a pá reta apresentou o melhor desempenho no material PLA, com velocidade de partida 11,7 m/s com ângulo de ataque 10° atingindo uma

rotação 698,8 rpm à vazio e com carga de 689,7 rpm. No Brasil isso corresponderia mais de 5,1% de utilização.

Com o material Tritan foi possível fabricar as pás em três formatos diferentes, que são o reto, curvado e de ponta curva, pois ele apresentou melhor resistência mecânica, mostrou não ser um material quebradiço na peça final e demonstrou alcançar temperaturas elevadas de impressão.

Para todas as condições de velocidade do vento, baixa, média e alta, que as pás eólicas em Tritan foram submetidas, o formato que apresentou melhor desempenho foi a curvada com variação dos ângulos.

Para a velocidade do vento abaixo de 3,6 m/s, a pá em Tritan que apresentou melhor desempenho foi a de formato curvada com rotação de 84,3 rpm à vazio e com carga de 77,6 rpm com ângulo de ataque de 20°.

Para a velocidade do vento abaixo de 6,6 m/s, a pá em Tritan apresentou melhor desempenho foi também a de formato curvada com rotação de 297,4 rpm à vazio e com carga de 290,9 rpm com ângulo de ataque de 15°.

E para a velocidade do vento abaixo de 11,7 m/s, novamente a que apresentou melhor desempenho foi a de formato curvada com rotação de 666,6 rpm à vazio e com carga de 648,1 rpm com ângulo de ataque de 15°.

Para a escolha do melhor material para a fabricação de pás eólicas em impressão 3D, o material recomendado é o Tritan, em quaisquer condições de velocidade do vento, devido ele apresentar as melhores propriedades mecânicas, maiores rotações comparadas com outros materiais e permitir imprimir diversos formatos das pás com melhor desempenho.

7. TRABALHOS FUTUROS

Finalmente sugere-se para trabalhos futuros:

- o acoplamento de um multiplicador de velocidade, para ter maior aproveitamento das rotações das pás para locais com baixa velocidade do vento;
- realizar a pintura nas pás eólicas, para melhorar o acabamento das peças; estudos sobre a rugosidade na superfície das pás e, analisar se há influência e como as peças se comportam;
- aprimorar o projeto das pás (modelagens em que as peças tenham área mais largas e com mais área de impressão), desenvolver a impressão das pás que tiveram o melhor desempenho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Associação brasileira de energia eólica**: Boletim de geração eólica 2018. Bela Vista: ABEEólica, 2018.

AGENCIA BRASIL. **Produção de energia eólica no país atinge marca de 14 gigawatts**. Brasília: EBD, 2018. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2018-11/pr-oducacao-de-energia-eolica-no-pais-atinge-marca-de-14-gigawatts>. Acesso em: 08 de nov. de 2018.

ALCALDE, E; WILTGEN, F. **Estudo das tecnologias em prototipagem rápida**: passado, presente e futuro. Revista Ciências Exatas, v. 24, n. 2, p 12-20, 2018. Disponível em: <http://periodicos.unitau.br/ojs/index.php/exatas/article/view/2757>. Acesso em: 01 out. 2022.

ALCALDE, E. G. **Prototipagem rápida aditiva**: aplicação em dispositivo funcional de auxílio humano para membros superiores. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

ALMEIDA, J. R. *et al.* Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente: avanços, retrocessos e novas perspectivas. In: ALMEIDA, J. R. de; BAHÉ, J. M. C. de F.; PEREIRA, R. do C. **Fontes de energia alternativas**. São Paulo, 2022. p. 276 –288. Disponível em: <http://www.editoracientifica.com.br/articles/code/211206874>. Acesso em: 15 abr. 2023.

ALMEIDA, E. de C. V. de, **Potencialidade da energia fotovoltaica no semiárido nordestino e sua relação com o desenvolvimento sustentável**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) - Universidade Estadual da Paraíba, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ELÉTRICA. **Energia Eólica**, Brasília: ANP. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ELÉTRICA. **ANEEL bate meta de expansão da matriz elétrica em 2021, três meses antes do previsto**. Brasília: Sala de Imprensa, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ELÉTRICA. **Brasil supera em 2022 os 8 GW de expansão na capacidade instalada**. Brasília: Sala de Imprensa, 2023.

ARANGDAD, K. *et al.* Influence of UV stabilizers on the weathering of PETG and PCTT films. **Journal of Applied Polymer Science**, Raleigh, v. 136, n. 47, p. 48198, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary-wiley.ez87.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1002/app.48198>. Acesso em: 30 mar. 2022.

AIRFOIL TOOLS. **NACA 1412 (naca1412-il)**. [Estados Unidos], 2023. Disponível em: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca1412-il>. Acesso em: 1 out. 2023.

ASSIS, C. L. F. *et al.* Influência da orientação de deposição e do tipo de material polimérico na resistência mecânica de peças produzidas por impressão 3D. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência do Materiais**, Foz do Iguaçu, v. 23, p. 1–13, 2018. Disponível em: <https://docplayer.com.br/144060349-Influencia-da-orientacao-de-deposicao-e-do-tipo-de-material-polimerico-na-resistencia-mecanica-de-pecas-produzidas-por-impressao-3d.html>. Acesso em: 1 out. 2023.

- AZEVEDO, T. S. P. de. **Dimensionamento de Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes para Energia Eólica**. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis e Eficiência Energética) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná e a Universidade da Coruña, 2022.
- BARACAT, P. A. A. **Metodologia de baixo custo computacional para análise de turbinas eólicas de eixo vertical com pás retas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2021.
- BARBOSA, M. dos S. *et al.* **Interações entre meio ambiente, desenvolvimento sustentável e economia circular: Mudanças climáticas e cidades resilientes: de desafios a soluções**. Ponta Grossa: AYA, 2022. Disponível em: <https://ayaeditora.com.br/wp-content/uploads/2022/01/L105.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2023.
- BRISEÑO, H.; ROJAS, O. Factors associated with electricity theft in Mexico. **International Journal of Energy Economics and Policy**, México, v. 10, n. 3, p. 250–254, 2020. Disponível em: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/9002>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- CABREIRA, V. **Avaliação dos parâmetros de processamento em impressão 3D nas propriedades do poliácido láctico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- CALLISTER, W. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. *In*: CALLISTER, W. **Estruturas Poliméricas**. Rio de Janeiro: LTC, 2018. v. 9, cap. 15, p. 309-327.
- CAMARGO, G. R. R. *et al.* Impressão 3D na manutenção industrial e a redução de custos. **Revista ABCustos**, São Leopoldo: Associação Brasileira de Custos, v. 16, n. 1, p. 118–143, 2021. Disponível em: <https://revista.abcustos.org.br/abcustos/article/view/593> 2021. Acesso em: 10 nov. 2023.
- CAMPOS, D. R. de O.; RODRIGUES, K. S. Impactos e consequências ambientais causados pela instituição de mecanismos geradores de energia. **Ânima Educação**, Minas Gerais, v. 12, p. 1-31, 2022.
- CARR, D.; THOMSON, M. Non-Technical Electricity Losses. **MDPI: Energies**, Loughborough, v. 15, n. 6, p. 2218, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2218>. Acesso em: 12 nov. 2023.
- CARDOSO, P. H. M. **Caracterização de peças à base de nanocompósitos híbridos de poli (ácido láctico) / alumina / negro de fumo fabricadas utilizando tecnologia de impressão 3D**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.
- CASTRO, F. F. A. de. **Análise da influência da pigmentação na qualidade de peças impressas por FFF em PLA e PETG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2021.
- CARVALHO, D. P. *et al.* Estudo sobre as alternativas de geração de energia e seu impacto ambiental. **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**, Londrina, v. 38, p. 1-14, 2022. Disponível em: <file:///C:/Users/Natasha/Downloads/2696-1-7512-1-10->

20221108.pdf. Acesso em: 14 abr. 2023.

CARVALHO, A. P. M. Certificação ambiental. In: CARVALHO, A. P. M. de **Contribuições para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: relatos e práticas**. Ponta Grossa: AYA, v. 2, p. 121–132, 2023. Disponível em: <https://ayaeditora.com.br/Livro/22897>. Acesso em: 14 nov. 2023.

CHAVES, G. C. B. **Estudo do sistema eólico para bombeamento de água na zona rural de limoeiro do norte**. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2017.

DAVID, T. M. *et al.* Análise abrangente de sistema hidrostático e de turbina eólica com base bibliométrica, 1983 - 2019. **Revista SODEBRAS, Web Conference**, v. 15, n. 174, p. 111–117, 2020. Disponível em: <http://www.sodebras.com.br/edicoes/N174.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2023.

DECARLI, N. O. **Síntese e caracterização de derivados acilados do polímero poli (éter imida) (Ultem 1000)**. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021**. Brasília: EPE, 2021.

ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Balço energético nacional 2022**. Brasília: EPE, 2022.

FERNANDES, A. P. **Potencial de utilização de resíduos de filmes poliméricos e de fibras de vidro provenientes do processo de fabricação de pás eólicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, 2019.

FERNANDES, R. G. G. **Melhoria da gestão da informação aplicando princípios Lean Thinking no Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade de Minho, 2022.

FILAMENT2PRINT. **Que é o PETG?** Pontevedra: Filament2print, 2023. Disponível em: https://filament2print.com/pt/blog/49_petg.html. Acesso em: 1 out. 2023.

FILLAMENTUM. **Filamento | polímeros adictivos**. Hulin: Fillamentum, 2023. Disponível em: <https://fillamentum.com/>. Acesso em: 1 out. 2023.

SIMAN FILHO, A. J.; SANFELICE, R. C. Estudo bibliográfico sobre polímeros ambientalmente sustentáveis. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**. Uberaba, v. 3, n. 2, p. 131-148, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18554/rbcti.v3i2.3347>. Acesso em: 2 out. 2023.

FRANCISZCZAK, P. *et al.* Manufacturing and properties of r-PETG/PET fibre composite – Novel approach for recycling of PETG plastic scrap into engineering compound for injection moulding. **Composites Part B: Engineering**, Latvia, v. 154, p. 430–438, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836818312368>. Acesso em: 30 mar. 2022.

FREIRE, A. Í.; FONTGALLAND, I. L. Perspectivas e desafios econômicos da geração de energia eólica na região Nordeste do Brasil. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 1, p. e58911125429, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/25429>. Acesso em: 10 ago. 2022.

FREITAS, R. C. M. de. **Sistema de gerenciamento de carga de baterias para bancada solar eólica**. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) - Universidade de Brasília, 2019.

FORTES, A. G.; ELIAS, C. B. Importância das energias renováveis no cotidiano: percepções dos alunos da escola secundária de ancuabe – sede. **Revista de Extensão**, Criciúma, v. 4, n. 1, p. 1, 2021. Disponível em: <http://periodicos.unec.c.net/revistaextensao/article/view/5312>. Acesso em: 10 ago. 2022.

GONZAGA, G. L. **Comportamento da biodegradação de amostras de PLA natural e pigmentado obtidas por impressão 3D**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário FEI, 2021.

GONÇALVES, M. I. M. **Impressão 3D na Direção de Abastecimento Viabilidade da sua aplicação na produção de sobressalentes para as Unidades Navais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Militares Navais) – Escola Naval Alfeite, Alfeite, 2022.

GLOBAL WIND REPORT. **GWEC: Global wind report 2021**. Belgium: GWEC, 2021.

HATJE, A. E. **Desenvolvimento de molde para pás de turbina eólica de pequenas proporções**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Tres Passos, 2018.

HUANG, L. *et al.* Performance of waste-paper / PETG wood–plastic composites. **AIP Advances**, Melville, v. 8, n. 5, p. 055204, 2018. Disponível em: <https://aip-scitation-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1063/1.5026265>. Acesso em: 30 mar. 2022.

HSUEH, M. H. *et al.* Effect of Printing Parameters on the Thermal and Mechanical Properties of 3D-Printed PLA and PETG, Using Fused Deposition Modeling. **MDPI: Polymers**, Loughborough, v. 13, n. 11, p. 1758, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/11/1758/htm>. Acesso em: 31 mar. 2022.

KIM, H. S.; HUANG, S. S-N Curve Characterisation for Composite Materials and Prediction of Remaining Fatigue Life Using Damage Function. **Journal of Composites Science**, Loughborough, v. 5, n. 3, p. 76, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-477X/5/3/76/htm>. Acesso em: 31 mar. 2022.

KOSLINSKI, D. M. **Análise de um Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes através do Método dos Elementos Finitos para Sistemas de Conversão de Energia Eólica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Tecnológica Federal Paraná e Escola de Tecnologia e Gestão de Bragança, Bragança, 2022.

LIU, A. *et al.* Impactos negativos para a saúde humana ocasionados pelo ruído dos geradores

eólicos. **JORNACITEC**, Botucatu, v. 9, p. 1-8, 2020. Disponível em: <http://www.jornacitec.fatecbt.edu.br/index.php/IXJTC/IXJTC/paper/viewFile/2385/2836>. Acesso em: 31 mar. 2022.

LUCENA, P. F. *et al.* Desenvolvimento de materiais compósitos híbridos a partir do reaproveitamento de fibra de vidro proveniente da indústria eólica. **International Journal of Energy Economics and Policy**, CONTEXMOD, São Paulo, v. 1, n. 5, p. 162–170, 2017. Disponível em: <http://contextmod.net.br/index.php/quinto/article/view/733>. Acesso em: 30 set. 2021.

LLOYD, P. J. The role of energy in development. **Journal of Energy in Southern Africa**. Bellville, v. 28, n. 1, p. 54–62, 2017. Disponível em: https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-447X2017000100006. Acesso em: 27 set. 2021.

MACIEL, D. R. **Estudo de eficiência de estrutura móvel de rastreamento solar com variação de temperatura e pressão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.

MANHÃES, R. R. *et al.* Uma breve revisão sobre energia eólica, sustentabilidade, reciclagem e suas relações. **CETEM**, [Rio de Janeiro], v. 6, n. 3, p. 1-5, 2022. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2614/1/Renan%20Rodrigues%20Manh%C3%A3es.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2023.

MARTINEZ, A. C. P. *et al.* Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 14, n. 1, p. 125–141, 2019. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/148289>. Acesso em: 30 set. 2021.

MARTINS, A. P. **Influência da modelação numérica na avaliação da fadiga em torres de geradores eólicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Porto, 2021.

MATMATCH. **PETG vs PLA**. Lechbruck: Matmatch, 2021. Disponível em: <https://matmatch.com/learn/material/petg-vs-pla>. Acesso em: 30 set. 2022.

MORAES, L. F. B. de. **Modelagem e Análise de um Aerogerador de Eixo Horizontal Sujeito à Ação de Ventos Turbulentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2019.

MORAIS, G. L. **Projeto aerodinâmico de pás de uma turbina eólica**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semi-árido, Caraúbas, 2018.

MORAIS, M. de O. *et al.* A Utilização das Impressoras 3D nos Principais Segmentos Setoriais. **Journal of Technology & Information 1 Journal of Technology & Information**, São Paulo, v. 2, n. 4, p. 1-49, 2022. Disponível em: <https://jttni.com.br/index.php/JTnI/article/view/63>. Acesso em: 3 out. 2022.

NOBRE, S. N. da S. **O efeito de geradores de vorticidade numa asa de perfil NACA 2412**.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade NOVA Lisboa, 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Nações Unidas no Brasil: Investimentos em energias renováveis supera o de combustíveis fósseis em 2018 no Mundo.** Brasília: ONU, 2018. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/83454-investimento-em-energias-renovaveis-supera-o-de-combustiveis-fosseis-em-2018-no-mundo>. Acesso em: 21 ago. 2023.

OKITA, W. **Simulação Numérica do Desempenho Aerodinâmico de Aerogeradores de Eixo Horizontal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2017.

PARISI, G. C. **Reciclagem enzimática do PET para reuso de monômeros.** Monográfica (Graduação em Engenharia Química Tecnológica) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2021.

PEIXOTO, D. L. **Tipos de materiais compósitos.** Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.

PIACINI, Í. **Estudo de alternativas de solvente para o poli (tereftalato de etileno) através do modelo termodinâmico.** Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

PIFFERO, E. de L. F. *et al.* Proposta de unidades de ensino potencialmente significativa para estudo de fontes de energia. **Research, Society and Development**, Pampa, v. 9, n. 7, p. e17973631, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/issue/archive>. Acesso em: 15 ago. 2023.

PRIMUS WIND POWER. **Owner's manual Installation.** Operation: Maintenance: Air Max Marine. Lakewood: Pimus Wind Power, 2023.

RABELLO, M. S. **Estrutura e propriedades de polímeros.** 2º ed. Campina Grande: Ed. Do Autor, 2023. 341p.

RIGID. **PETG.** Data sheet Mechanical Properties (Injection Molded), São Paulo: ATSM Method: Data sheet Petg, 2020. Catálogo de exposição.

RENEWABLES NOW. **Global Status Report. REN21, 2020.** Paris: REN21, 2021.

RIBEIRO, G. P. **Caracterização Mecânica de Estruturas Manufaturadas por Adição de Material Termoplástico com diferentes níveis e formas de preenchimento.** Monografia (Graduação em Engenharia Aeroespacial) – Universidade de Brasília, 2019.

ROMÃO, W. *et al.* Poli (tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros Ciência e Tecnologia**, Vila Clementino, v. 19, n. 2, p. 121–132, 2022. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/po/a/M977rShFktsW4DpHbqk6KYN/?lang=pt>. Acesso em: 30 mar. 2022.

SANCHEZ JUNIOR, M. **Construção de equipamento para obtenção de filamentos para impressão 3d: um estudo com copolímero ABS e microcompósitos com fibras de**

celulose. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulos, 2021. Disponível em: <https://adelpha-api.mackenzie.br/server/api/core/bitstreams/8029cc77-6a30-4c1d-a724-3fcc3ff273e4/content>. Acesso em: 21 set. 2023.

SANTANA, L. *et al.* A comparative study between PETG and PLA for 3D printing through thermal, chemical and mechanical characterization. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/dpWDvBJzSXYtzbKnJdDqHVg/?lang=pt>. Acesso em: 30 mar. 2022.

SANTOS, A. U. **Análise de aerogeradores de sistemas de energia eólica.** Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) – Faculdade Doctum, Juiz de Fora, 2018. Disponível em: <https://dspace.doctum.edu.br/bitstream/123456789/1896/1/ANÁLISE%20DE%20AEROGERADORES%20DE%20SISTEMAS%20DE%20ENERGIA%20EÓLICA.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SANTOS, F. A. *et al.* Low velocity impact response of 3D printed structures formed by cellular metamaterials and stiffening plates: PLA vs. PETg. **Composite Structures**, Italia, v. 256, p. 113128, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822320330543>. Acesso em: 30 mar. 2022.

SAMPAIO, T. B. **Metodologia da pesquisa.** Universidade Federal de Santa Maria, 1 ed., Santa Maria, RS: UFSM, CTE, UAB, 2022.

SIMPLIFY3D. **Guia definitivo de materiais:** dicas para impressão 3D com PLA. [Estados Unidos]: Simplify3D, 2023. Disponível em: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/pla/>. Acesso em: 1 out. 2023.

SIQUEIRA, R. da S. **Sistema híbrido de fontes de energia renovável em barragem de abastecimento de água.** Dissertação (Mestrado em Energia e Sustentabilidade) – Universidade Federal de Santa Catarina Campus Araranguá, 2021.

SILVA, B. M. M. *et al.* Protótipo de sistema direcionador de vento automatizado para aerogeradores de eixo horizontal. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, Mossoró, v. 2, n. 1, p. 13–21, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/r4em>. Acesso em: 1 out. 2023.

SILVA, P. A. P. *et al.* Self-healing polymer blend based on PETG and EMAA. **Journal of Applied Polymer Science**, Pampulha, v. 138, n. 14, p. 50148, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary-wiley.ez87.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1002/app.50148>. Acesso em: 30 mar. 2022.

SILVEIRA, A. D. S. **Análise técnica e econômica para a implantação de gerador eólico residencial.** Monografia (Graduação em Tecnólogo em Sistemas de Energia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2021.

SKELTON, J.; RAJAGOPALAN, K. Improving Manufacturability Through Part and Mold Design for Eastman Tritan™ Copolyester Jeffrey Skelton and Krish Rajagopalan Eastman Specialty Plastics. In: International Conference & Exhibits, 27, 2017, *Web Conference*. Disponível em: <https://slideplayer.com /slide/16493923/>. Acesso em: 2 fev. 2023.

SOUZA, G. B. de et al. Energias renováveis e as alternativas das matrizes energéticas sustentáveis. In: JESUS, E. S.; PEREIRA JÚNIOR, A.; RIBEIRO, J. M. F. (Org.). *As múltiplas visões do meio ambiente e os impactos ambientais*. Paragominas: Editora Uniedusul, 2020. v. 3, p. 7–23. Disponível em: <https://www.uniedusul.com.br/wp-content/uploads/2020/11/AS-MULTIPLAS-VISOES-DO-MEIO-AMBIENTE-E-OS-IMPACTOS.pdf>.

SOUZA, N. S. de *et al.* Resíduos sólidos industriais: compósito com resíduos de plástico reforçado com fibra de vidro. **Research, Society and Development**. Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 9, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/7136>. Acesso em: 3 out. 2021.

SOUZA, T. A. de; NOGUEIRA, F. J. Fontes Alternativas de energia no Brasil: Biomassa, Eólica e Solar. **Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica**, [Juiz de Fora], v. 4, n. 1, 2022. Disponível em: <http://seer.uniacademia.edu.br/index.php/elettrica/article/view/3252>. Acesso em: 14 mar. 2023.

TORQUATO, F. C. R. **Sustentabilidade no reaproveitamento de rejeitos de mineração: uma revisão sistemática sobre as diferentes técnicas**. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2022. Disponível em: <https://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/handle/123456789/16714>. Acesso em: 23 ago. 2023.

VALVEZ, S. *et al.* Compressive Behaviour of 3D-Printed PETG Composites. **Aerospace**. Coimbra, v. 9, n. 3, p. 124, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/9/3/124/htm>. Acesso em: 31 mar. 2022.

VIEIRA, A. C. F. Energias renováveis e sua eficiência na nova economia energética no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**. Mamanguapé, v. 8, n. 18, p. 211–223, 2021. Disponível em: <http://revista.ecogestaobrasil.net/v8n18/v08n18a13a.html>. Acesso em: 2 fev. 2023.

VITAL, R. M. *et al.* Análise do uso e potencial da produção de energia solar, eólica e de biomassa no estado do maranhão. **Revista SODEBRAS**, [São Paulo], v. 15, n. 171, p. 6–11, 2020. Disponível em: <http://www.sodebras.com.br/edicoes/N146.pdf>. Acesso em: 30 set. 2021.

VOLPATO, N. *et al.* An optimal algorithm for 3D triangle mesh slicing. **Computer-Aided Design**, [Nova York], v. 92, p. 1–10, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448517301215>. Acesso em: 7 maio. 2023.

XU, J. **Estudo de compósitos estruturais no processo de produção de pás eólicas**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra., 2021.

WANG, K. *et al.* Preparation and Properties of Poly (ethylene glycol-co-cyclohexane-1,4-dimethanol terephthalate) / Polyglycolic Acid (PETG/PGA) Blends. **MDPI: Polymers**, Loughborough, 2021, v. 13, n. 3, p. 452, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/3/452/htm>. Acesso em: 30 mar. 2022.

APÊNDICE 1

A Tabela 8 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 5°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 8. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material ABS com ângulo de ataque de 5°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência saída (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	24,65	62	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	24,65	62	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	24,65	62	25	4,5	37,2	34,1	0	0,27	5,8	5,8	0	1,6
	24,65	62	30	5,6	202,5	165,7	0	0,54	11,7	11,7	0	1,6
	24,65	62	35	6,6	297,4	231,0	0	0,55	11,7	11,7	0	1,7
	24,65	62	40	7,7	339,0	337,3	0	0,55	11,7	11,7	0	1,6
	24,65	62	45	8,7	399,8	392,1	0	0,55	11,7	11,7	0	6,6
	24,65	62	50	9,8	488,8	479,5	0	0,55	11,7	11,7	0	6,6
	24,65	62	55	10,7	565,7	555,9	0	0,52	11,7	11,7	0	6,6
24,65	62	60	11,7	638,9	627,9	0	0,52	11,7	11,7	0	6,7	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 9 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 5°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 9. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PETG com ângulo de ataque de 5°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	23,9	62	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	23,9	62	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	23,9	62	25	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	23,9	62	30	5,6	123,5	116,0	0	0,5	11,8	11,3	0	6,4
	23,9	62	35	6,6	216,2	208,7	0	0,5	11,8	11,4	0	6,2
	23,9	62	40	7,7	297,1	288,0	0	0,6	11,8	11,4	0	7,2
	23,9	62	45	8,65	374,8	368,4	0	0,7	11,8	11,4	0	8,1
	23,9	62	50	9,75	452,5	443,9	0	0,7	11,8	11,4	0	8,1
	23,9	62	55	10,7	531	531,5	0	0,5	11,8	11,4	0	5,8
	23,9	62	60	11,7	629,9	624,2	0	0,6	11,9	11,4	0	7,9

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 10 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 5°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 10. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PLA com ângulo de ataque de 5°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	26,45	42,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	26,45	42,5	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	26,45	42,5	25	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	26,45	42,5	30	5,6	41,3	36,5	0	0,2	5,6	5,3	0	1,3
	26,45	42,5	35	6,6	157,3	148,4	0	0,4	11,2	10,6	0	4,7
	26,45	42,5	40	7,7	211,7	205,5	0	0,4	11,2	10,6	0	5,1
	26,45	42,5	45	8,65	332,4	330,1	0	0,4	11,2	10,6	0	4,9
	26,45	42,5	50	9,75	384,3	351,1	0	0,4	11,2	10,6	0	5,1
	26,45	42,5	55	10,7	412,6	404,8	0	0,4	11,2	10,6	0	5,0
26,45	42,5	60	11,7	501,2	496,9	0	0,4	11,2	10,6	0	5,1	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 11 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 5°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 11. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material Tritan com ângulo de ataque de 5°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	26,55	40	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	26,55	40	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	26,55	40	25	4,5	43,1	37,3	0	0	5,8	5,8	0	1,6
	26,55	40	30	5,6	71,6	69,9	0	0	5,8	5,8	0	1,6
	26,55	40	35	6,6	128,3	120,2	0	0,2	5,8	5,8	0	1,7
	26,55	40	40	7,7	164,4	160,4	0	0,2	5,8	5,8	0	1,6
	26,55	40	45	8,65	379,7	377,7	0	0,5	11,7	11,7	0	6,6
	26,55	40	50	9,75	457,5	455,9	0	0,5	11,7	11,7	0	6,6
	26,55	40	55	10,7	532,5	529,5	0	0,5	11,7	11,7	0	6,6
26,55	40	60	11,7	604,7	597,4	0	0,5	11,7	11,7	0	6,7	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 12 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 10°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 12. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material ABS com ângulo de ataque de 10°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	23,7	61,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	23,7	61,5	25	3,6	18,8	16,5	0	0,2	5,9	5,8	0	1,5
	23,7	61,5	30	4,5	105,1	102,0	0	0,5	11,7	11,7	0	6,1
	23,7	61,5	35	5,6	189,6	177,6	0	0,5	11,7	11,7	0	6,0
	23,7	61,5	40	6,6	246,6	241,3	0	0,5	11,7	11,7	0	6,1
	23,7	61,5	45	7,7	314,8	307,6	0	0,5	11,7	11,7	0	6,2
	23,7	61,5	50	8,65	374,7	364,5	0	0,5	11,7	11,7	0	6,3
	23,7	61,5	55	9,75	444,2	432,5	0	0,5	11,7	11,7	0	6,4
	23,7	61,5	60	10,7	513,2	506,3	0	0,5	11,7	11,7	0	6,2
23,7	61,5	20	11,7	587,6	560,3	0	0,5	11,7	11,7	0	6,2	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 13 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 10°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 13. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PETG com ângulo de ataque de 10°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	26,85	28,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	26,85	28,5	20	3,6	32,0	28,0	0	0,3	5,6	5,6	0	1,6
	26,85	28,5	25	4,5	146,9	139,3	0	0,5	11,3	11,2	0	5,8
	26,85	28,5	30	5,6	222,5	215,0	0	0,5	11,3	11,2	0	5,9
	26,85	28,5	35	6,6	290,2	287,7	0	0,5	11,3	11,2	0	6,0
	26,85	28,5	40	7,7	357,5	356,7	0	0,5	11,3	11,2	0	6,0
	26,85	28,5	45	8,65	405,2	396,7	0	0,5	11,3	11,2	0	5,9
	26,85	28,5	50	9,75	455,9	455,4	0	0,5	11,3	11,2	0	6,2
	26,85	28,5	55	10,7	499,8	491,5	0	0,5	11,3	11,2	0	6,0
26,85	28,5	60	11,7	614,4	571,3	0	0,5	11,3	11,2	0	6,0	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 14 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 10°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 14. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PLA com ângulo de ataque de 10°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	29	22	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	29	22	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	29	22	25	4,5	56,7	55,3	0	0,2	5,6	5,2	0	1,3
	29	22	30	5,6	209,1	200,5	0	0,4	11,2	10,5	0	4,9
	29	22	35	6,6	292,8	290,9	0	0,4	11,2	10,5	0	4,9
	29	22	40	7,7	378,4	365,8	0	0,4	11,2	10,5	0	4,9
	29	22	45	8,7	460,1	453,6	0	0,4	11,2	10,6	0	5,0
	29	22	50	9,8	526,4	522,2	0	0,4	11,2	10,6	0	5,2
	29	22	55	10,7	617,4	612,4	0	0,4	11,2	10,7	0	5,2
29	22	60	11,7	698,7	689,6	0	0,4	11,2	10,6	0	4,7	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 15 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 10°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 15. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material Tritan com ângulo de ataque de 10°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	27,15	26,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	27,15	26,5	20	3,6	15,1	11,5	0	0,2	5,8	5,8	0	1,6
	27,15	26,5	25	4,5	107,8	106,3	0	0,5	11,7	11,7	0	6,6
	27,15	26,5	30	5,6	181,8	180,4	0	0,5	11,7	11,7	0	6,5
	27,15	26,5	35	6,6	254,5	246,0	0	0,5	11,7	11,7	0	6,4
	27,15	26,5	40	7,7	308,3	299,3	0	0,5	11,7	11,7	0	6,4
	27,15	26,5	45	8,7	378,7	370,6	0	0,5	11,7	11,7	0	6,4
	27,15	26,5	50	9,8	428,7	426,9	0	0,5	11,7	11,7	0	6,4
	27,15	26,5	55	10,7	489,7	480,5	0	0,5	11,7	11,7	0	6,7
27,15	26,5	60	11,7	557,8	534,9	0	0,5	11,7	11,7	0	6,7	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 16 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 15°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 16. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material ABS com ângulo de ataque de 15°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	24,4	57	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	24,4	57	20	3,6	75,5	66,7	0	0,4	11,7	11,7	0	5,2
	24,4	57	25	4,5	126,4	121,7	0	0,5	11,7	11,7	0	5,9
	24,4	57	30	5,6	179,8	175,1	0	0,4	11,7	11,7	0	5,5
	24,4	57	35	6,6	232,1	227,6	0	0,5	11,7	11,7	0	6,5
	24,4	57	40	7,7	283,9	280,4	0	0,5	11,7	11,7	0	6,3
	24,4	57	45	8,7	339,5	334,9	0	0,5	11,7	11,7	0	6,0
	24,4	57	50	9,8	388,2	380,4	0	0,5	11,7	11,7	0	5,9
	24,4	57	55	10,7	425,1	418,5	0	0,4	11,8	11,7	0	5,7
24,4	57	60	11,7	491,4	464,8	0	0,5	11,8	11,7	0	6,5	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 17 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 15°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 17. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PETG com ângulo de ataque de 15°

<i>Wunderground</i>			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
MÉDIA	26,35	32	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	26,35	32	20	3,6	44,7	41,5	0	0,2	5,6	5,6	0	1,5
	26,35	32	25	4,5	171,4	164,6	0	0,5	11,3	11,2	0	6,0
	26,35	32	30	5,6	223,4	219,2	0	0,5	11,3	11,2	0	6,2
	26,35	32	35	6,6	283,7	280,2	0	0,5	11,3	11,2	0	5,9
	26,35	32	40	7,7	343,8	339,2	0	0,5	11,3	11,2	0	6,0
	26,35	32	45	8,7	392,8	389,2	0	0,5	11,3	11,2	0	5,7
	26,35	32	50	9,8	457,3	451,2	0	0,5	11,3	11,2	0	5,8
	26,35	32	55	10,7	482,5	478,7	0	0,5	11,3	11,2	0	6,0
	26,35	32	60	11,7	533,6	527,6	0	0,5	11,3	11,2	0	5,9

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 18 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 15°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 18. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PLA com ângulo de ataque de 15°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	29,75	20,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	29,75	20,5	20	3,6	38,1	32,3	0	0,2	5,6	5,3	0	1,2
	29,75	20,5	25	4,5	77,0	75,3	0	0,2	5,6	5,3	0	1,3
	29,75	20,5	30	5,6	225,5	224,5	0	0,4	11,2	10,6	0	5,2
	29,75	20,5	35	6,6	298,7	294,7	0	0,4	11,2	10,6	0	4,9
	29,75	20,5	40	7,7	362,5	364,3	0	0,4	11,2	10,7	0	5,1
	29,75	20,5	45	8,7	433,2	422,8	0	0,4	11,2	10,6	0	5,2
	29,75	20,5	50	9,8	496,6	485,4	0	0,5	11,2	10,6	0	5,3
	29,75	20,5	55	10,7	555,1	552,1	0	0,5	11,2	10,6	0	5,3
29,75	20,5	60	11,7	617,0	607,9	0	0,5	11,2	10,6	0	5,3	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 19 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 15°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 19. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material Tritan com ângulo de ataque de 15°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	27,2	27,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	27,2	27,5	20	3,6	34,0	30,2	0	0,2	5,8	5,8	0	1,7
	27,2	27,5	25	4,5	59,2	59,0	0	0,3	5,8	5,8	0	1,8
	27,2	27,5	30	5,6	185,1	174,1	0	0,5	11,7	11,7	0	6,8
	27,2	27,5	35	6,6	220,6	217,5	0	0,5	11,7	11,7	0	6,6
	27,2	27,5	40	7,7	273,9	271,3	0	0,5	11,7	11,7	0	6,7
	27,2	27,5	45	8,7	332,2	316,9	0	0,6	11,7	11,7	0	7,0
	27,2	27,5	50	9,8	376,1	353,2	0	0,6	11,7	11,7	0	7,0
	27,2	27,5	55	10,7	425,9	396,3	0	0,6	11,7	11,7	0	7,0
27,2	27,5	60	11,7	461,2	445,9	0	0,5	11,7	11,7	0	6,7	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 20 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 20°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 20. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material ABS com ângulo de ataque de 20°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	26,5	53	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	26,5	53	20	3,6	65,2	62,0	0	0,5	11,8	11,7	0	6,1
	26,5	53	25	4,5	125,9	122,7	0	0,4	11,8	11,7	0	5,2
	26,5	53	30	5,6	171,7	164,0	0	0,4	11,8	11,7	0	5,1
	26,5	53	35	6,6	220,4	211,9	0	0,4	11,8	11,7	0	4,9
	26,5	53	40	7,7	252,0	243,1	0	0,4	11,8	11,7	0	4,9
	26,5	53	45	8,7	295,8	290,8	0	0,4	11,8	11,7	0	5,2
	26,5	53	50	9,8	343,8	337,8	0	0,4	11,8	11,7	0	5,5
	26,5	53	55	10,7	383,5	379,1	0	0,5	11,8	11,7	0	5,9
26,5	53	60	11,7	420,1	410,4	0	0,5	11,8	11,7	0	6,0	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 21 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 20°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 21. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PETG com ângulo de ataque de 20°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	25,25	56	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,25	56	20	3,6	44,4	42,2	0	0	5,6	5,5	0	1,4
	25,25	56	25	4,5	146,4	140,5	0	0,5	11,3	11,1	0	5,6
	25,25	56	30	5,6	201,8	199,5	0	0,5	11,3	11,1	0	5,6
	25,25	56	35	6,6	260,2	255,0	0	0,5	11,3	11,0	0	5,6
	25,25	56	40	7,7	302,7	300,1	0	0,5	11,3	10,9	0	5,8
	25,25	56	45	8,7	341,7	332,3	0	0,5	11,3	11,0	0	6,0
	25,25	56	50	9,8	385,8	372,7	0	0,5	11,3	11,0	0	6,0
	25,25	56	55	10,7	440,2	439,0	0	0,5	11,3	10,9	0	5,8
25,25	56	60	11,7	480,3	462,2	0	0,5	11,3	11,0	0	5,8	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 22 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 20°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 22. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PLA com ângulo de ataque de 20°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	28	22	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	22	20	3,6	44,1	43,6	0	0,2	5,6	5,3	0	1,4
	28	22	25	4,5	151,2	150,0	0	0,5	11,2	10,6	0	5,3
	28	22	30	5,6	217,6	208,4	0	0,5	11,2	10,6	0	5,4
	28	22	35	6,6	272,2	261,3	0	0,5	11,2	10,6	0	5,3
	28	22	40	7,7	321,4	314,8	0	0,5	11,2	10,6	0	5,3
	28	22	45	8,7	383,5	371,8	0	0,5	11,2	10,6	0	5,3
	28	22	50	9,8	424,0	415,0	0	0,4	11,2	10,6	0	5,2
	28	22	55	10,7	479,4	464,3	0	0,5	11,2	10,7	0	5,4
28	22	60	11,7	533,4	519,7	0	0,5	11,2	10,6	0	5,6	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 23 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 20°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 23. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material Tritan com ângulo de ataque de 20°

<i>Wunderground</i>		Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
MÉDIA	27,1	33	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0
	27,1	33	20	3,6	36,7	32,4	0	0,2	5,6	5,7	1,1
	27,1	33	25	4,5	118,2	110,4	0	0,3	11,5	11,1	3,7
	27,1	33	30	5,6	164,7	156,6	0	0,3	11,5	11,1	4,2
	27,1	33	35	6,6	210,3	207,3	0	0,4	11,5	11,1	4,8
	27,1	33	40	7,7	247,6	244,10	0	0,3	11,5	11,1	4,2
	27,1	33	45	8,7	286,3	282,9	0	0,3	11,5	11,1	3,7
	27,1	33	50	9,8	327,4	314,20	0	0,3	11,5	11,1	4,3
	27,1	33	55	10,7	361,6	353,0	0	0,4	11,5	11,1	5,1
	27,1	33	60	11,7	360,4	388,2	0	0,4	11,5	11,1	4,9

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 24 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 25°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 24. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material ABS com ângulo de ataque de 25°

Wunderground		Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
MÉDIA	25,75	64	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0,0
	25,75	64	20	3,6	33,3	31,7	0	0,3	5,9	5,8	1,8
	25,75	64	25	4,5	118,0	113,3	0	0,5	11,8	11,7	6,5
	25,75	64	30	5,6	163,3	157,1	0	0,5	11,8	11,7	5,8
	25,75	64	35	6,6	210,7	202,7	0	0,5	11,8	11,7	5,9
	25,75	64	40	7,7	240,0	238,3	0	0,5	11,8	11,7	6,2
	25,75	64	45	8,7	273,5	267,3	0	0,5	11,8	11,7	6,6
	25,75	64	50	9,8	328,9	315,6	0	0,6	11,8	11,7	7,3
	25,75	64	55	10,7	350,8	341,2	0	0,5	11,8	11,7	6,9
	25,75	64	60	11,7	391,2	381,4	0	0,5	11,8	11,7	6,6

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 25 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 25°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 25. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PETG com ângulo de ataque de 25°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	25,25	56	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,25	56	20	3,6	43,6	40,5	0	0	5,7	5,2	0	1,5
	25,25	56	25	4,5	138,2	160,5	0	0,5	11,5	10,9	0	6,0
	25,25	56	30	5,6	190,3	186,7	0	0,5	11,6	10,8	0	5,7
	25,25	56	35	6,6	240,2	239,5	0	0,5	11,6	10,9	0	6,2
	25,25	56	40	7,7	291,2	272,1	0	0,5	11,6	11,0	0	5,9
	25,25	56	45	8,7	314,7	307,6	0	0,4	11,6	11,0	0	5,1
	25,25	56	50	9,8	347,0	327,5	0	0,5	11,6	11,1	0	6,1
	25,25	56	55	10,7	402,0	395,8	0	0,4	11,6	11,0	0	5,4
25,25	56	60	11,7	451,9	444,1	0	0,3	11,6	10,8	0	3,7	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 26 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 25°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 26. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material PLA com ângulo de ataque de 25°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	26,8	27	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	26,8	27	20	3,6	87,8	84,9	0	0,4	11,2	10,6	0	4,6
	26,8	27	25	4,5	145,6	140,2	0	0,4	11,2	10,6	0	4,8
	26,8	27	30	5,6	186,3	193,2	0	0,4	11,2	10,6	0	4,9
	26,8	27	35	6,6	246,3	240,8	0	0,4	11,2	10,6	0	5,0
	26,8	27	40	7,7	286,1	278,2	0	0,4	11,2	10,6	0	4,7
	26,8	27	45	8,7	333,9	328,5	0	0,4	11,2	10,6	0	5,2
	26,8	27	50	9,8	376,8	366,7	0	0,4	11,2	10,6	0	5,1
	26,8	27	55	10,7	411,7	403,1	0	0,4	11,2	10,6	0	5,1
26,8	27	60	11,7	463,7	449,7	0	0,4	11,2	10,6	0	5,1	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 27 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 25°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 27. Valores médios das pás eólicas no formato reta no material Tritan com ângulo de ataque de 25°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	27,15	48,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	27,15	48,5	20	3,6	31,1	30,4	0	0,2	5,8	5,8	0	1,3
	27,15	48,5	25	4,5	108,8	104,5	0	0,3	11,7	11,7	0	4,4
	27,15	48,5	30	5,6	158,9	151,2	0	0,3	11,7	11,7	0	4,4
	27,15	48,5	35	6,6	198,2	189,3	0	0,4	11,7	11,7	0	4,7
	27,15	48,5	40	7,7	232,5	227,8	0	0,4	11,7	11,7	0	5,4
	27,15	48,5	45	8,7	264,6	259,3	0	0,4	11,7	11,7	0	4,8
	27,15	48,5	50	9,8	314,9	292,8	0	0,3	11,7	11,7	0	4,2
	27,15	48,5	55	10,7	335,7	323,7	0	0,3	11,7	11,7	0	4,0
27,15	48,5	60	11,7	385,4	368,0	0	0,3	11,7	11,7	0	4,1	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 28 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 5°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 28. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato curvada e ângulo de ataque de 5°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	26,55	40	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	26,55	40	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	26,55	40	25	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	26,55	40	30	5,6	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	26,55	40	35	6,6	118,1	109,8	0	0,5	11,3	10,6	0	5,3
	26,55	40	40	7,7	204,2	202,4	0	0,4	11,3	10,6	0	4,9
	26,55	40	45	8,7	285,9	282,8	0	0,4	11,3	10,6	0	5,0
	26,55	40	50	9,8	371,6	366,8	0	0,4	11,3	10,6	0	5,1
	26,55	40	55	10,7	449,2	446,1	0	0,4	11,3	10,6	0	4,9
26,55	40	60	11,7	533,0	528,1	0	0,4	11,3	10,6	0	5,2	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 29 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 10°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 29. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato curvada e ângulo de ataque de 10°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	27,15	26,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	27,15	26,5	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	27,15	26,5	25	4,5	88,2	84,7	0	0	11,3	10,6	0	4,8
	27,15	26,5	30	5,6	189,1	184,9	0	0	11,3	10,6	0	5,2
	27,15	26,5	35	6,6	280,0	280,8	0	0,4	11,3	10,6	0	5,0
	27,15	26,5	40	7,7	362,2	355,2	0	0,4	11,3	10,6	0	4,9
	27,15	26,5	45	8,7	445,0	437,6	0	0,4	11,3	10,6	0	5,0
	27,15	26,5	50	9,8	520,2	515,3	0	0,4	11,3	10,6	0	5,1
	27,15	26,5	55	10,7	599,3	592,8	0	0,4	11,3	10,6	0	5,2
27,15	26,5	60	11,7	666,6	648,1	0	0,4	11,3	10,7	0	5,2	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 30 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 10°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 30. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 1 e ângulo de ataque de 10°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	25,45	49,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,45	49,5	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,45	49,5	25	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	25,45	49,5	30	5,6	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	25,45	49,5	35	6,6	19,0	18,7	0	0,3	5,9	5,9	0	1,9
	25,45	49,5	40	7,7	74,3	73,0	0	0,5	11,9	11,8	0	6,4
	25,45	49,5	45	8,7	175,2	154,5	0	0,4	11,9	11,8	0	5,3
	25,45	49,5	50	9,8	185,1	181,6	0	0,4	11,9	11,8	0	5,3
	25,45	49,5	55	10,7	297,6	290,8	0	0,4	11,9	11,8	0	5,6
25,45	49,5	60	11,7	335,1	331,0	0	0,4	11,9	11,8	0	5,7	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 31 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 10°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 31. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 2 e ângulo de ataque de 10°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	25,5	35	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,5	35	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,5	35	25	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	25,5	35	30	5,6	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	25,5	35	35	6,6	63,7	56,0	0	0,3	11,9	11,9	0	4,4
	25,5	35	40	7,7	125,7	122,4	0	0,3	11,9	11,9	0	4,4
	25,5	35	45	8,7	195,5	193,1	0	0,4	11,9	11,9	0	5,3
	25,5	35	50	9,8	266,7	257,7	0	0,4	11,9	11,9	0	5,1
	25,5	35	55	10,7	347,0	331,3	0	0,3	11,9	11,9	0	4,6
25,5	35	60	11,7	396,7	386,7	0	0,3	11,9	11,9	0	4,5	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 32 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 15°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 32. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato curvada e ângulo de ataque de 15°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	27,2	27,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	27,2	27,5	20	3,6	39,6	33,5	0	0,4	11,2	10,5	0	5
	27,2	27,5	25	4,5	137,8	136,0	0	0,4	11,2	10,5	0	5,0
	27,2	27,5	30	5,6	223,8	215,6	0	0,4	11,2	10,6	0	5,1
	27,2	27,5	35	6,6	297,4	290,9	0	0,4	11,2	10,6	0	5,0
	27,2	27,5	40	7,7	366,1	360,5	0	0,5	11,3	10,6	0	5,2
	27,2	27,5	45	8,7	422,5	419,1	0	0,4	11,3	10,6	0	5,2
	27,2	27,5	50	9,8	498,1	488,1	0	0,4	11,2	10,6	0	5,0
	27,2	27,5	55	10,7	551,0	543,8	0	0,4	11,2	10,6	0	5,1
27,2	27,5	60	11,7	616,1	595,6	0	0,4	11,3	10,5	0	5,1	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 33 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 15°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 33. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 1 e ângulo de ataque de 15°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	25,45	49,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,45	49,5	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,45	49,5	25	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	25,45	49,5	30	5,6	53,0	51,1	0	0,4	11,9	11,8	0	5,4
	25,45	49,5	35	6,6	102,7	101,7	0	0,4	11,9	11,8	0	5,0
	25,45	49,5	40	7,7	162,5	156,9	0	0,4	11,9	11,8	0	4,9
	25,45	49,5	45	8,7	234,1	213,1	0	0,3	11,9	11,8	0	4,3
	25,45	49,5	50	9,8	286,5	246,0	0	0,4	11,9	11,8	0	5,6
	25,45	49,5	55	10,7	386,2	320,6	0	0,4	11,9	11,8	0	4,7
	25,45	49,5	60	11,7	413,1	372,4	0	0,4	11,9	11,8	0	5,2

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 34 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 15°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 34. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 2 e ângulo de ataque de 15°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	25,5	35	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,5	35	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,5	35	25	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	25,5	35	30	5,6	0	0	0	0	0	0	0	5,3
	25,5	35	35	6,6	63,7	56,0	0	0,3	11,9	11,9	0	5,6
	25,5	35	40	7,7	125,7	122,4	0	0,3	11,9	11,9	0	5,4
	25,5	35	45	8,7	195,5	193,1	0	0,4	11,9	11,9	0	5,2
	25,5	35	50	9,8	266,7	257,7	0	0,4	11,9	11,9	0	5,4
	25,5	35	55	10,7	347,0	331,3	0	0,3	11,9	11,9	0	6,9
25,5	35	60	11,7	396,7	386,7	0	0,3	11,9	11,9	0	7,3	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 35 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 20°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 35. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato curvada e ângulo de ataque de 20°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	27,1	33	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	27,1	33	20	3,6	84,3	77,6	0	0,4	11,2	11,0	0	5
	27,1	33	25	4,5	152,3	147,2	0	0,4	11,2	10,5	0	4,4
	27,1	33	30	5,6	216,6	218,5	0	0,4	11,2	10,5	0	4,8
	27,1	33	35	6,6	283,5	280,8	0	0,4	11,2	10,5	0	4,6
	27,1	33	40	7,7	339,7	336,4	0	0,4	11,2	10,5	0	4,9
	27,1	33	45	8,7	403,7	389,2	0	0,4	11,2	10,5	0	4,8
	27,1	33	50	9,8	460,0	447,2	0	0,4	11,2	10,5	0	4,8
	27,1	33	55	10,7	513,1	503,8	0	0,4	11,3	10,5	0	4,8
27,1	33	60	11,7	558,6	542,8	0	0,4	11,3	10,5	0	5,0	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 36 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 20°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 36. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 1 e ângulo de ataque de 20°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	26,05	45	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	26,05	45	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	26,05	45	25	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	26,05	45	30	5,6	30,6	30,2	0	0,3	5,9	5,9	0	1,5
	26,05	45	35	6,6	103,5	102,8	0	0,5	11,9	11,8	0	6,0
	26,05	45	40	7,7	156,3	150,9	0	0,5	11,9	11,8	0	6,0
	26,05	45	45	8,7	211,3	198,7	0	0,5	11,9	11,8	0	6,2
	26,05	45	50	9,8	238,7	194,2	0	0,5	11,9	11,8	0	6,1
	26,05	45	55	10,7	302,7	317,4	0	0,5	11,9	11,8	0	6,5
26,05	45	60	11,7	375,6	338,3	0	0,4	11,9	11,9	0	5,3	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 37 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 20°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 37. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 2 e ângulo de ataque de 20°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	24,2	78,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	24,2	78,5	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	24,2	78,5	25	4,5	74,3	72,4	0	0,6	12,0	11,9	0	7,4
	24,2	78,5	30	5,6	160,6	153,3	0	0,6	12,0	11,9	0	7,4
	24,2	78,5	35	6,6	232,4	226,4	0	0,6	12,0	11,9	0	7,1
	24,2	78,5	40	7,7	300,7	272,8	0	0,5	12,0	11,9	0	6,9
	24,2	78,5	45	8,7	377,1	370,8	0	0,5	12,0	11,9	0	6,6
	24,2	78,5	50	9,8	437,8	430,1	0	0,5	12,0	11,9	0	6,4
	24,2	78,5	55	10,7	498,2	488,6	0	0,5	12,0	11,9	0	6,2
24,2	78,5	60	11,7	547,7	541,1	0	0,5	12,0	11,9	0	5,9	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 38 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 25°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 38. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato curvada e ângulo de ataque de 25°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	27,15	48,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	27,15	48,5	20	3,6	74,9	70,1	0	0,4	11,2	10,6	0	5
	27,15	48,5	25	4,5	147,6	143,7	0	0,4	11,2	10,6	0	5,0
	27,15	48,5	30	5,6	219,4	214,3	0	0,4	11,2	10,6	0	5,2
	27,15	48,5	35	6,6	281,5	275,4	0	0,4	11,2	10,6	0	5,2
	27,15	48,5	40	7,7	342,3	326,6	0	0,4	11,2	10,5	0	4,8
	27,15	48,5	45	8,7	389,1	387,7	0	0,4	11,2	10,5	0	4,7
	27,15	48,5	50	9,8	456,1	450,6	0	0,4	11,2	10,6	0	4,8
	27,15	48,5	55	10,7	520,3	488,9	0	0,4	11,2	10,6	0	5,0
27,15	48,5	60	11,7	553,2	546,8	0	0,4	11,2	10,6	0	4,8	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 39 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 25°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 39. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 1 e ângulo de ataque de 25°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	25,7	56	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,7	56	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,7	56	25	4,5	31,8	30,1	0	0,2	5,9	5,9	0	1,7
	25,7	56	30	5,6	111,2	105,8	0	0,5	11,9	11,8	0	6,8
	25,7	56	35	6,6	133,1	130,5	0	0,5	11,9	11,8	0	6,6
	25,7	56	40	7,7	181,8	170,6	0	0,5	11,9	11,8	0	6,7
	25,7	56	45	8,7	219,9	206,8	0	0,5	11,9	11,8	0	6,8
	25,7	56	50	9,8	270,2	265,4	0	0,5	11,9	11,8	0	6,7
	25,7	56	55	10,7	304,6	287,0	0	0,5	11,9	11,8	0	6,5
25,7	56	60	11,7	375,3	322,6	0	0,5	11,9	11,8	0	6,4	

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 40 apresenta os valores médios obtidos durante os experimentos com as pás eólicas com angulação 25°, em uma simulação de condição climática real por meio do túnel de vento.

Tabela 40. Valores médios das pás eólicas no material Tritan com formato ponta curva 2 e ângulo de ataque de 25°

Wunderground			Ventilador	Velocidade linear do vento	Tacômetro (rpm)		Corrente de saída		Tensão de saída		Potência calculada (W)	
MÉDIA	Temperatura (°C)	Umidade (%)	(Hz)	v (m/s) (anemômetro)	rpm (rotação) vazio	rpm (rotação) com carga	(A) - vazio	(A) - com carga	(V) - vazio	(V) - com carga	P = U*I vazio	P = U*I com carga
	25,25	48,5	15	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,25	48,5	20	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	25,25	48,5	25	4,5	95,3	91,9	0	0,5	12,0	12,0	0	6,6
	25,25	48,5	30	5,6	163,7	161,1	0	0,5	12,0	12,0	0	6,7
	25,25	48,5	35	6,6	232,9	224,0	0	0,5	12,0	12,0	0	6,9
	25,25	48,5	40	7,7	286,0	282,1	0	0,5	12,0	12,0	0	6,8
	25,25	48,5	45	8,7	346,5	333,6	0	0,5	12,0	12,0	0	7,0
	25,25	48,5	50	9,8	392,2	381,5	0	0,5	12,0	12,0	0	6,7
	25,25	48,5	55	10,7	454,2	442,6	0	0,5	12,0	12,0	0	6,8
25,25	48,5	60	11,7	499,1	491,2	0	0,5	12,1	12,0	0	6,9	

Fonte: Autor (2023).

TRABALHOS DESENVOLVIDOS E APRESENTADOS DURANTE O MESTRADO

Participação e apresentação do artigo “ANÁLISE DO MATERIAL PETG, PARA FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS”, no XIV *Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmisson* – CLAGTEE 2022, no auditório do CEFET/RJ, na cidade do Rio de Janeiro, em dezembro de 2022.

Participação e apresentação do artigo “O PANORAMA ATUAL DOS AEROGERADORES DISPONÍVEIS NO MERCADO”, no XLIV *International Sodebras Congress* 2021, de forma online, em junho de 2021.

Participação e apresentação do artigo “ANÁLISE DO MATERIAL TRITAN PARA FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS”, no XLV *International Sodebras Congress* 2023, no auditório do Hotel Rockefeller by Slaviero Hotéis, na cidade do Curitiba, em maio de 2023.

Participação e apresentação de artigo “PROJETO E FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS COM MATERIAIS COMPÓSITOS EM IMPRESSORA 3D”, no V Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção – UNESP/FEG, de forma online, em novembro de 2021.

Participação e apresentação de artigo “MANUFATURA ADITIVA DE PÁS EÓLICAS COM MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS”, no VI Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção, UNESP, no auditório do INOVE, na cidade de Guaratinguetá, em dezembro de 2022.

Artigos publicados em Anais de Eventos e Periódicos.

JESUS, N. M. R. de *et al.* Análise do material PETG, para fabricação de pás eólicas. **Even3 Publicações** - Book of Abstracts and Proceedings of 14th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission: CLAGTEE 2022, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/#!/eventos/clagtee/book-of-abstracts-and-full-papers/>. Acesso em: 11 out. 2023.

JESUS, N. M. R. de *et al.* O panorama atual dos aerogeradores disponíveis no mercado. **Revista SODEBRAS**, *Web Conference*, v. 17, n. 193, p. 149–156, 2022. Disponível em: <http://doi.org/10.29367/issn.1809-3957.18.2023.211.73>. Acesso em: 10 out. 2023

JESUS, N. M. R. de *et al.* Análise do material Tritan para fabricação de pás eólicas. **Revista Sodebras**, Curitiba, v. 18, n. 211, p. 73–81, 2023. Disponível em: <http://sodebras.com.br/edicoes/N211.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

JESUS, N. M. R. de *et al.* Projeto e fabricação de pás eólicas com materiais compósitos em impressora 3d. **V Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção (V-WSP)**, Guaratinguetá: Anais de evento, 2021. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/#!/eventos/v-workshop-de-engenharia-mecanica-e-de-producao-v-wsp/anais-do-evento/>. Acesso em: 10 out. 2023.

JESUS, N. M. R. de *et al.* Manufatura aditiva de pás eólicas com materiais compósitos poliméricos. **VI Workshop da Pós-Graduação em Engenharia 2022**, Guaratinguetá: Anais

de evento, 2023. Disponível em:
<https://www.feg.unesp.br/Home/Eventos/viiworkshopdeengenhariamecanicaedeproducao/anais-vi-w-pg-2022---completo-com-ficha-isbn.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

SOLICITAÇÃO DE PATENTE

Está em elaboração a solicitação de patente: Concepção e Design de pás eólicas para pequenas potencias utilizando materiais poliméricos de diversos formatos com impressão 3D.

É proposto o projeto e fabricação das pás eólicas com diversos perfis aerodinâmicos para aerogeradores de pequeno porte. Os modelos projetados foram de formato reta, curvada e ponta curva para o Tritan e formato reta para os demais materiais. Após a impressão, estas pás eólicas foram submetidas a testes de desempenho utilizando um aerogerador acoplado de um alternador constituído por uma turbina tripás.

Os conjuntos das pás eólicas foram submetidas a experimentos nos quais foram modificados o material de construção, o formato e o ângulo de ataque em função da velocidade linear do vento. Os dados obtidos foram comparados para determinar quais as melhores combinações de material, formato e ângulo de ataque.