

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS LAGES
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA**

VITOR ORTIZ FAÉ

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE HÉLICE PRODUZIDA POR
ENGENHARIA REVERSA E MANUFATURA ADITIVA**

LAGES, 2023.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CAMPUS LAGES
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA**

VITOR ORTIZ FAÉ

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE HÉLICE PRODUZIDA POR
ENGENHARIA REVERSA E MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para aprovação na unidade curricular de Trabalho de Conclusão de Curso II.

Professores:
Prof. Natalia Madalena Boelter.

LAGES, 2023.

Vitor Ortiz Faé

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE HÉLICE PRODUZIDA POR ENGENHARIA
REVERSA E MANUFATURA ADITIVA**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Mecânica

Lages, 14 de dezembro de 2023.

Prof^a. Ma. Natalia Madalena Boelter.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof^a. Ma. Natalia Madalena Boelter.
Orientadora
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Me Anderson Luís Garcia Correia
Avaliador
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Rafael Gustavo Schreiber
Avaliador
Instituto Federal de Santa Catarina

Aos meus pais, Paulo Faé e Ednilce Ortiz, minha namorada Christine Casa, aos meus amigos e colegas, em especial ao Alysson Rudek e Bianca Reyes e a minha orientadora Natalia Boelter, que tiveram participação direta e foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Dedico.

RESUMO

O aumento da busca por energias renováveis é uma tendência que vem avançando ao longo dos últimos anos e com ele se buscam novos meios para otimizar essa tecnologia tão recente. Para isso se faz necessário um *framework* que seja confiável e este trabalho propõe que a união da impressão 3D com a Engenharia Reversa é capaz de reproduzir hélices e posteriormente gerar novas hélices modificadas para o estudo de diferentes parâmetros na produção da energia eólica. Para isso se faz necessário realizar o teste dessa junção de tecnologias para fabricar uma hélice capaz de reproduzir o desempenho da hélice de controle que é tida como base para o presente trabalho. Neste trabalho foi realizada a impressão 3D de uma hélice, onde primeiro foram coletadas as dimensões da hélice original, em seguida algumas medidas críticas são alteradas no processo de modelagem via CAD (*Computer-Aided Design*), visando as limitações impostas pela manufatura por FDM (*Fused Deposition Modeling*) e posteriormente, com as peças impressas, ocorreu a montagem. Com a hélice montada partiu-se para os testes medindo peso, tensão, corrente e rotação máxima que ambas hélices geram no túnel de vento. Os resultados médios obtidos nos testes da hélice original foram de 17 V de tensão, 0,25 A de corrente e 5961,5 rpm aos noventa segundos de rotação máxima, já para a hélice impressa obteve-se 13,75 V de tensão, 0,275 A de corrente e 5010,5 rpm de rotação máxima. Com esses dados foi feita uma análise estatística para validar os dados e as hipóteses levantadas. Após todos os passos foi observado a diferença no peso, tensão e rotação máxima entre as hélices, levantando diversas hipóteses sobre qual a causa da diferença. A principal conclusão é de que o método de engenharia reversa não teve o resultado desejado devido a complexidade geométrica da hélice, além dos limites impostos pela manufatura aditiva pedirem por mudanças dimensionais significativas na hélice. No entanto, a manufatura e os testes foram bem-sucedidos, não apresentando problemas estruturais na hélice impressa. O teste comparativo estabeleceu um padrão para futuras pesquisas, indicando a necessidade de explorar novos métodos de engenharia reversa para reduzir as diferenças entre as hélices.

Palavras-chave: Engenharia Reversa, Manufatura Aditiva, Análise Comparativa, Túnel de vento

ABSTRACT

The increase in the search for renewable energy is a trend that has been advancing over the last few years and with it new means are being sought to optimize this very recent technology. For this, a framework that is reliable is necessary and this work proposes that the union of 3D printing with Reverse Engineering is capable of reproducing propellers and subsequently generating new modified propellers for the study of different parameters in the production of wind energy. To do this, it is necessary to test this combination of technologies to manufacture a propeller capable of reproducing the performance of the control propeller that is used as the basis for this work. In this work, 3D printing of a propeller was carried out, where first the dimensions of the original propeller were collected, then some critical measurements were changed in the modeling process via CAD (Computer-Aided Design), aiming at the limitations imposed by manufacturing by FDM (Fused Deposition Modeling) and later, with the printed parts, assembly took place. With the propeller assembled, we started testing, measuring weight, tension, current and maximum rotation that both propellers generate in the wind tunnel. The average results obtained in the original propeller tests were 17 V voltage, 0.25 A current and 5961.5 rpm at ninety seconds of maximum rotation, while for the printed propeller 13.75 V voltage, 0.275 Current and 5010.5 rpm maximum rotation. With this data, a statistical analysis was carried out to validate the data and the hypotheses raised. After all the steps, the difference in weight, tension and maximum rotation between the propellers was observed, raising several hypotheses about the cause of the difference. The main conclusion is that the reverse engineering method did not have the desired result due to the geometric complexity of the helix, in addition to the limits imposed by additive manufacturing requiring significant dimensional changes in the helix. However, manufacturing and testing were successful, with no structural problems in the printed propeller. The comparative test set a standard for future research, indicating the need to explore new reverse engineering methods to reduce differences between propellers.

Keywords: Reverse Engineering, Additive Manufacturing, Comparative Analysis, Wind Tunnel

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE TABELAS.....	5
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	7
LISTA DE SÍMBOLOS.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Justificativa.....	11
1.2 Definição do Problema.....	12
1.3 Objetivo Geral.....	12
1.4 Objetivos Específicos.....	13
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1 Engenharia Reversa.....	14
2.1.1 História da Engenharia Reversa.....	14
2.1.2 Aplicações e vantagens da engenharia reversa.....	16
2.1.3 Processo de Engenharia Reversa.....	17
2.2 Manufatura aditiva.....	25
2.2.1 História da AM.....	26
2.2.2 Vantagens e desvantagens envolvendo a AM.....	26
2.2.3 Processo Generalista da AM.....	27
2.2.4 FDM - Modelagem por Deposição de Material Fundido.....	32
2.3 Túnel Aerodinâmico.....	35
2.3.1 História dos túneis aerodinâmicos.....	36
2.3.2 Tipos de túneis aerodinâmicos.....	37
2.4 Energia eólica e turbinas eólicas.....	39
2.4.1 História da energia eólica.....	41
2.4.2 Tipos de turbinas eólicas.....	42
2.4.3 Conversão de energia nas turbinas.....	43
3 METODOLOGIA.....	46
3.1 Aplicação da engenharia reversa na peça.....	46
3.2 Modelagem 3D da hélice.....	51
3.3 Manufatura da hélice.....	54
3.4 Testes comparativos entre as hélices.....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
5 CONCLUSÃO.....	69
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	71
7 REFERÊNCIAS.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação do B-29 (a) com o Tupolev Tu-4 (b).....	13
Figura 2 - Movimento de voo dos pássaros (a) e o planador dos irmãos Wrights (b).....	14
Figura 3 - Engenharia Reversa - O processo genérico.....	16
Figura 4: Máquina de medição por coordenadas da Thome Praezision.....	17
Figura 5 - Diferença entre sonda vertical e digitalização por faixa de laser.....	19
Figura 6 - Esquemático da lei de senos.....	19
Figura 7 - Digitalização por luz estruturada.....	20
Figura 8 - Medição por fotogrametria na NASA.....	20
Figura 9 - Conversão da nuvem de pontos para Superfície triangularizada.....	22
Figura 10 - Algumas das principais variações da nomenclatura da área de AM.....	23
Figura 11: Fluxograma do processo de AM.....	26
Figura 12 - Regra da mão direita para orientação do vetor normal.....	27
Figura 13 - Definição do comprimento de corda.....	28
Figura 14 - Princípios do processo de FDM da Stratasys Ltd.....	30
Figura 15: Túnel de vento vertical na Alemanha.....	33
Figura 16: Braço giratório utilizado por Benjamin Robin.....	34
Figura 17: Túnel de vento dos irmãos Wright em 1901.....	35
Figura 18: Túnel de vento de circuito aberto.....	36
Figura 19: Túnel de vento de circuito fechado.....	36
Figura 20: Composição de uma turbina eólica moderna.....	38
Figura 21: Evolução no dimensionamento das turbinas eólicas nos últimos 40 anos.....	38
Figura 22: Foto de um modelo de moinho de vento persa no Deutsche Museum.....	39
Figura 23: Ilustração do moinho de Blyth.....	40
Figura 24: Turbina de eixo horizontal.....	41
Figura 25- Exemplo de turbinas de eixo vertical.....	41
Figura 26: Princípio da conversão de energia cinética em energia elétrica.....	42
Figura 27: Painel de exibição dos valores de corrente e tensão gerados pela turbina.....	43
Figura 28: Hélice Original.....	44
Figura 29: Interface do Kscan3D.....	45
Figura 30 Antes (a) e depois (b) da remoção dos pontos indesejados.....	45
Figura 31: Problemas na orientação e alinhamento durante a geração da malha STL.....	46
Figura 32: Ferramenta de edição do software Polycam antes (a) e depois (b).....	47
Figura 33: Ferramenta airfoil plotter do site Airfoil Tools.....	48
Figura 34: Ferramenta “importar pontos” do Inventor.....	49
Figura 35: Perfil importado como spline.....	49
Figura 36: Componentes adicionais (batentes) da pá.....	50
Figura 37: Cotas críticas do cubo.....	50
Figura 38: Alteração da espessura do aro.....	51

Figura 39: Junta entre o aro e as pás.....	51
Figura 40: Vista explodida da montagem.....	52
Figura 41: Fatiamento da pá da hélice.....	53
Figura 42: Fatiamento do cubo da hélice.....	54
Figura 43: Fatiamento do aro da hélice.....	54
Figura 44: Conjunto cubo-pá montado.....	55
Figura 45: Hélice com o aro fixado.....	55
Figura 46: Túnel aerodinâmico DL WIND-B utilizado no projeto.....	56
Figura 47: Medição da velocidade do ar no ponto de fixação das hélices no gerador.....	56
Figura 48: Setup para medição da rotação das hélices.....	57
Figura 49: Falha no detalhamento do sólido 3D escaneado.....	58
Figura 50: Modelagem da Hélice na versão final.....	59
Figura 51: Aro com defeito de impressão.....	60
Figura 52: Hélice Montada.....	60
Figura 53: Massa da Hélice Impressa.....	61
Figura 54: Massa da hélice de controle.....	61
Figura 55: Gráfico boxplot do comportamento de tensão por cada tipo de hélice.....	62
Figura 56: Gráfico boxplot do comportamento de rotação máxima por cada tipo de hélice....	63
Figura 57: Gráfico boxplot do comportamento de corrente por cada tipo de hélice.....	63
Figura 58: Acabamento superficial da hélice.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do ABS.	30
Tabela 2 - Propriedades do PLA.	31
Tabela 3 - Tipos de túneis de vento pela velocidade.	38
Tabela 4: Parâmetros de impressão para todos os componentes.	54
Tabela 5: Medições dos parâmetros para cada hélice analisada.	65
Tabela 6: Teste de Levene para Tensão, Corrente e Rotação Máxima.	67
Tabela 7: Testes de T de Welch e T de Student para análise das médias entre os grupos.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM – Manufatura Aditiva.

ER – Engenharia Reversa.

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina.

2D - Bidimensional.

3D - Tridimensional.

CAD - *Computer-Aided Design* (Projeto Assistido por Computador).

CAM- *Computer-Aided Manufacturing* (Manufatura Assistida por Computador).

FDM - *Fused Deposition Modeling* (Modelagem por Fusão).

STL - *Stereolithography tessellation language* (Linguagem de tesselação estereolitográfico).

MMC - Máquinas de medição por coordenadas.

TOF - *Time-of-Flight* (Tempo de Voo).

RGB - *Red, Green and Blue* (Vermelho, verde e azul).

ISO - *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Padronização).

PR - Prototipagem Rápida.

SL - Estereolitografia.

SGC - Cura Sólida na Base.

SLS - Sinterização Seletiva a Laser.

LOM - Manufatura de Objetos em Lâminas.

3DP - Impressão 3D.

MIT - *Massachusetts Institute of Technology* (Instituto de Tecnologia de Massachusetts).

PLA - Ácido polilático.

ABS - Acrilonitrila butadieno estireno.

CFD - *Computational Fluids Dynamics* (Dinâmica de Fluidos Computacional).

HAWT - *Horizontal axis wind turbine* (Turbina eólica de eixo horizontal).

VAWT - *Vertical axis wind turbine* (Turbina eólica de eixo vertical).

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve um crescimento exponencial na produção de energia eólica tanto no Brasil quanto no mundo. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (Abeeólica) o Brasil terá 44,78 GW(de capacidade desse tipo de energia instalada, dados que hoje já são 13,2% da matriz energética do país e 20% da geração de energia que o Brasil necessita (AGÊNCIA BRASIL, 2023). E mundialmente, nas últimas quatro décadas o número de Megawatts produzidos por turbinas eólicas aumentou em 380 vezes.

A história da energia eólica remonta a milênios atrás, sendo uma das formas mais antigas de aproveitamento energético utilizadas pela humanidade. Desde os tempos antigos, as pessoas têm reconhecido a força dos ventos como uma fonte de energia natural. No entanto, foi somente a partir do final do século XIX que as turbinas eólicas modernas começaram a ser desenvolvidas e utilizadas para gerar eletricidade (PINTO, 2012). A contribuição de inventores pioneiros, como James Blyth e Poul la Cour, que constatou que turbinas com menos pás são mais eficientes, impulsionou o avanço tecnológico e o surgimento dos primeiros aerogeradores.

Segundo Vian (2021), o insumo da energia eólica é o vento que, em comparação a outros meios de produção energética como o diesel ou carvão, tem seus benefícios. Sua disponibilidade infinita, sua contribuição para a diminuição da emissão de efeitos estufas e sua legislação estatal, a fazem um meio de produção amigável ao meio ambiente e economicamente viável. Contudo também há pontos negativos, como a variação da intensidade e direção dos ventos, a necessidade de áreas com ventos constantes e a questão da integração da energia eólica na rede elétrica, o que requer soluções técnicas e estratégias eficientes para garantir a estabilidade e confiabilidade do sistema.

Para fazer testes de novas tecnologias de turbinas, seria impossível depender somente de condições climáticas, para isso se faz necessário um equipamento que padronize as variáveis que fazem parte da geração de energia eólica. Como solução para esse problema existem os túneis aerodinâmicos, capazes de simular condições reais dentro de um laboratório, onde se faz possível testar diversas configurações de hélices, eficiências de geradores e tecnologias que auxiliem no controle da produção de energia no campo .

Buscando um meio de melhorar um presente conceito de hélice, existem duas tecnologias que combinam bem entre si e possibilitam o teste rápido e eficaz de ramificações

de produtos já existentes com confiabilidade e possíveis customizações e melhorias de projeto. São elas a engenharia reversa, responsável por obter um modelo computacional 3D (Tridimensional) do equipamento a ser testado, e a manufatura aditiva, que visa facilitar a fabricação do componente para testes e estudos devido ao seu baixo custo e alta personalização (ABREU, 2015).

1.1 Justificativa

O problema da viabilidade ao utilizar a engenharia reversa e manufatura aditiva na criação de uma peça para substituir uma peça concebida pelos meios convencionais de usinagem é um desafio atual na engenharia mecânica e em sua democratização. Esta questão se deve ao fato de que a engenharia reversa ter sido utilizada em alguns casos como ferramenta de aquisição de tecnologia patenteadas, ferindo assim a propriedade intelectual estabelecida por lei, mesmo a engenharia reversa sendo uma técnica cada vez mais comum e necessária na indústria. Bem como a manufatura aditiva ainda tendo um amplo espaço para pesquisa e melhora, podendo não ser adequada para todas as peças mecânicas. No entanto, a combinação da engenharia reversa e manufatura aditiva pode ser uma solução viável para a produção de peças que não são mais fabricadas ou para melhorar a eficiência de projetos existentes.

Tendo em vista a evolução socioeconômica, com empresas e produtos nascendo, maturando e findando, vários projetos e peças acabam sendo descontinuados. Contudo os usuários desses produtos continuam os utilizando e eventualmente necessitam de suas reposição para continuar com suas operações. Logo um trabalho que aplique a engenharia reversa para recuperar o projeto das peças e a manufatura aditiva apresentam uma solução para quem se encontra com o mesmo problema.

A realização de uma pesquisa no tema é justificada por diversos motivos. Primeiramente, a engenharia reversa tem se mostrado uma técnica eficiente na obtenção de informações importantes sobre um produto, permitindo o desenvolvimento de peças que são compatíveis com as especificações e dimensões originais. Além disso, a manufatura aditiva tem ganhado espaço no setor industrial, permitindo a produção de peças de forma rápida e com menor custo em relação aos meios de fabricação mais comuns usinagem, fundição e conformação. Dessa forma, o estudo sobre a aplicação da engenharia reversa e manufatura

aditiva na criação de peças pode trazer contribuições importantes para o avanço da tecnologia de produção de peças de reposição e para a otimização de processos de manufatura.

Efetuada a pesquisa será obtido diversos resultados que podem indicar pontos positivos e negativos na utilização deste método para repor peças que deixaram de ser produzidas. Existe a possibilidade dos resultados serem negativos, demonstrando que o método escolhido para a engenharia reversa não é o ideal, ou então que a manufatura aditiva não produz um produto resistente o suficiente para uma aplicação específica. Outro resultado possível seria o êxito na replicação de um produto que suporta as demandas exigidas, demonstrando que a engenharia reserva é uma alternativa na reposição de peças obsoletas, e que a manufatura aditiva é capaz de diminuir o custo e agilizar a produção dessas peças. Contudo independente do resultado, espera-se que este trabalho sirva como uma fonte de conhecimento sobre os temas para que estes campos de pesquisa se desenvolvam cada vez mais.

1.2 Definição do Problema

Para se estudar o desempenho de hélices na geração de energia eólica em túneis aerodinâmicos, atualmente se encontra uma falta de maleabilidade visto que somente a hélice original do fabricante está disponível. Para mudar esse cenário e aumentar os meios de estudo dessa ciência, levanta-se a hipótese de fabricar uma hélice por meio de engenharia reversa e manufatura aditiva com o intuito de provar que é viável utilizar os métodos de ER (Engenharia Reversa) e MA (Manufatura Aditiva) na substituição da hélice original, mantendo sua funcionalidade e desempenho.

1.3 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo analisar o desempenho eólico da hélice fabricada por impressão 3D, comparando os resultados de uma hélice fabricada por injeção, em um túnel de vento.

1.4 Objetivos Específicos

Para realizar o objetivo geral temos os seguintes objetivos específicos:

- a) Criar um projeto CAD da hélice utilizando o método de engenharia reversa.
- b) Fazer a Manufatura da hélice utilizando o método de FDM como manufatura aditiva.
- c) Realizar os testes de desempenho tanto da hélice fabricada por manufatura aditiva quanto o desempenho da hélice original.
- d) Analisar os resultados e evidenciar se há ou não diferença.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo trata de todos os assuntos que serão necessários para o entendimento e realização da pesquisa, primeiro a engenharia reversa (Seção 3.1) para a obtenção do modelo de hélice 3D, manufatura aditiva (Seção 3.2) para obter a hélice necessária na realização dos testes. Túneis aerodinâmicos (Seção 3.3) para descrever o funcionamento da máquina onde serão realizados os testes e, por último, energia eólica e turbina eólica em uma só seção (Seção 3.4).

2.1 Engenharia Reversa

Segundo Vinesh (2008) a engenharia reversa (ER) consiste no processo de replicar uma peça, montagem ou produto sem os dados necessários, seja documentação, desenhos ou modelo computadorizado. Também cabe definir a engenharia reversa como a obtenção de um modelo geométrico CAD através de escaneamento e digitalização das partes já existentes de um produto.

Porém duplicar identicamente uma peça exatamente com a sua original é tecnicamente impossível. Logo o objetivo primário da ER seria reinventar uma peça de forma, encaixe e função equivalente a peça original na qual foi baseada uma análise (WANG, 2010).

2.1.1 História da Engenharia Reversa

A ER impacta a indústria de diversas maneiras, não somente produzindo produtos mais baratos ou promovendo mais competição entre empresas, mas também participando ativamente na promoção da evolução industrial. Antigamente a substituição de um produto demorava muito anos e tanto a indústria quanto a sociedade aceitavam esse ritmo lento. No entanto, nas invenções modernas, o ciclo de vida médio é muito mais curto. Para acompanhar essa rápida taxa de reinvenção de máquinas e instrumentos modernos, a engenharia reversa fornece uma ferramenta de alta tecnologia para acelerar o processo de reinvenção e impulsionar a evolução industrial futura (WANG, 2010).

Segundo Wang (2010) o papel desempenhado pela ER na indústria da aviação foi primordial para chegar ao estágio de tecnologia visto hoje. Essa aplicação foi motivada por três motivos principais: a maturidade da indústria, o avanço das tecnologias modernas e as demandas cada vez mais pujantes do mercado. Desde os primórdios da indústria da aviação

no início dos anos 1900 até sua maturação por volta dos anos 1950, a indústria da aviação revolucionou os modos de transporte graças à análise e compreensão detalhada das tecnologias existentes, bem como a aceleração do processo de inovação oriundas da ER.

Em épocas de guerra, era muito comum que países utilizassem equipamentos capturados de seus inimigos, e através da ER, reprojeter o objeto roubado para fazer uso e tirar proveito das tecnologias desenvolvidas pelos adversários de guerra. Um exemplo muito citado da utilização da ER no departamento militar é o Tupolev Tu-4. Durante a 2ª guerra mundial, três bombardeiros B-29 caíram em águas soviéticas, podendo servir de modelo para a criação do bombardeiro da antiga URSS (Figura 1).

Figura 1 - Comparação do B-29 (a) com o Tupolev Tu-4 (b).



(a)

(b)

Fonte: WANG, 2010.

A ER também é peça fundamental para os engenheiros e cientistas que tentam desconstruir a natureza para obter mais informações de como certas coisas funcionam. Como exemplo temos os irmãos Wright que tentaram reinventar um pássaro feito pelo homem (Figura 2), e mesmo após sua invenção, ainda estamos muito distantes de sermos capazes de produzir uma máquina com as capacidades de manobra da maioria das aves. Os morcegos são capazes de girar 180° e mudar de direção em menos da metade de sua envergadura e diversos insetos conseguem voar com acelerações e desacelerações que só são possíveis em sonhos dos engenheiros aeroespaciais de hoje (WANG, 2010).

Figura 2 - Movimento de voo dos pássaros (a) e o planador dos irmãos Wrights (b).



(a)



(b)

Fonte: WANG, 2010.

2.1.2 Aplicações e vantagens da engenharia reversa

A engenharia reversa tornou-se uma prática amplamente utilizada em várias áreas, incluindo manufatura, design industrial e reprodução de jóias. Suas aplicações são diversas, desde desmontar carros recém-lançados para compreender sua construção e funcionalidade, até analisar e modificar o código-fonte na engenharia de software. Em setores como o design automotivo, os designers utilizam materiais como argila, gesso, madeira ou espuma de borracha para moldar suas ideias, mas um modelo CAD é essencial para a produção real. Seja recriando componentes comerciais valiosos para obter lucro nos negócios ou restaurando peças obsoletas para fins históricos, a engenharia reversa se mostra inestimável (VINESH RAJA; FERNANDES, 2008).

Para realizar essas empreitadas com sucesso, os engenheiros devem possuir um profundo conhecimento da funcionalidade da peça original e ter as habilidades necessárias para replicar seus detalhes complexos. Embora a engenharia reversa tenha suas raízes na

antiguidade, os avanços recentes a colocaram na vanguarda de várias indústrias, incluindo aeroespacial, automotiva, eletrônicos de consumo, dispositivos médicos, equipamentos esportivos, brinquedos e jóias. Além disso, ela encontra aplicações em ciências forenses e investigações de acidentes, contribuindo para a compreensão de incidentes complexos e auxiliando na busca por justiça (WANG, 2010).

Segundo Raja e Fernandes (2008) existem diversas razões em que a engenharia reversa se faz necessária, como as seguintes:

- O fabricante original da peça não existe, ou parou de fabricar o produto;
- A documentação original do produto não existe ou foi perdida;
- Remoção de características do produto;
- Análise de características positivas e negativas do produto do competidor;
- Criar um modelo 3D para jogos ou filmes;
- Inspeção e controle de qualidade comparando a peça fabricada com o seu modelo padrão do CAD.

2.1.3 Processo de Engenharia Reversa

Segundo Várady (1997) o começo do processo de engenharia reversa se dá pela medição de um objeto pré-existente para então realizar a dedução de uma superfície ou modelo sólido com o intuito explorar as vantagens dos softwares CAD/CAM (*Computer-Aided Manufacturing*). Nesses tipos de softwares a customização das peças fica a critério do usuário, oferecendo inúmeras possibilidades de mudanças e melhorias na peça.

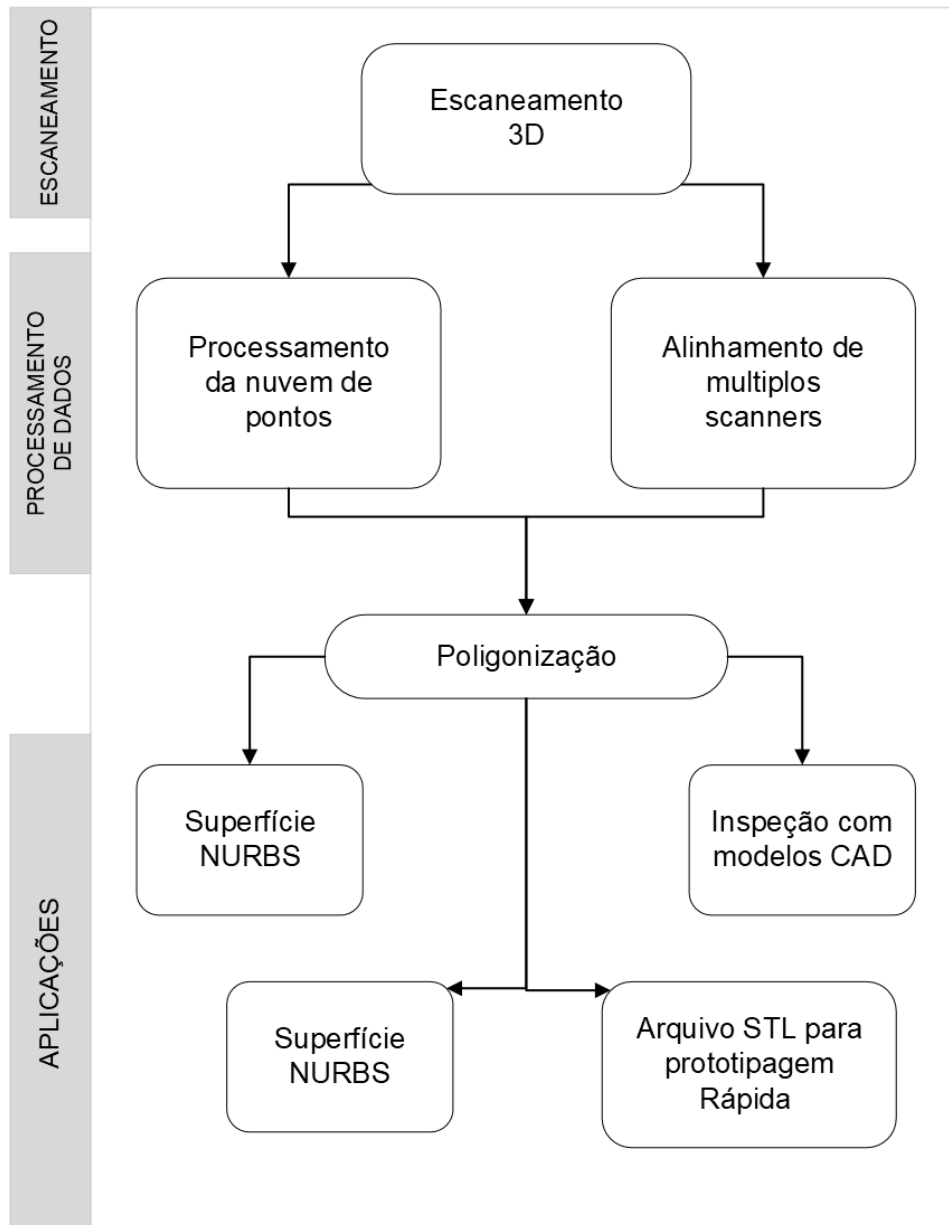
O processo de reconstrução da superfície e de um modelo sólido pode ser resumido em 4 etapas: Aquisição de dados, Poligonização, Refinamento e Geração do Modelo. A qualidade do modelo final obtido dependerá principalmente dos dados coletados, métodos matemáticos para captura do modelo, além da aplicação desejada (WANG, 2010).

Já para Vinesh (2008) as etapas da ER podem ser resumidas de forma genérica em três partes (Figura 3), primeiro é realizado o escaneamento do objeto a ser reconstruído, com os dados já adquiridos vem em seguida o processamento de pontos para gerar a malha da superfície sólida para, por fim, o desenvolvimento de um modelo geométrico.

As divisões do processo de engenharia reversa geralmente são bem similares, olhando genericamente é possível ordenar nos seguintes passos:

- Obtenção dos dados e criação da malha STL;
- Refinamento da malha para corrigir imperfeições e discontinuidades;
- Obtenção do modelo 3D da peça no CAD.

Figura 3 - Engenharia Reversa - O processo genérico.



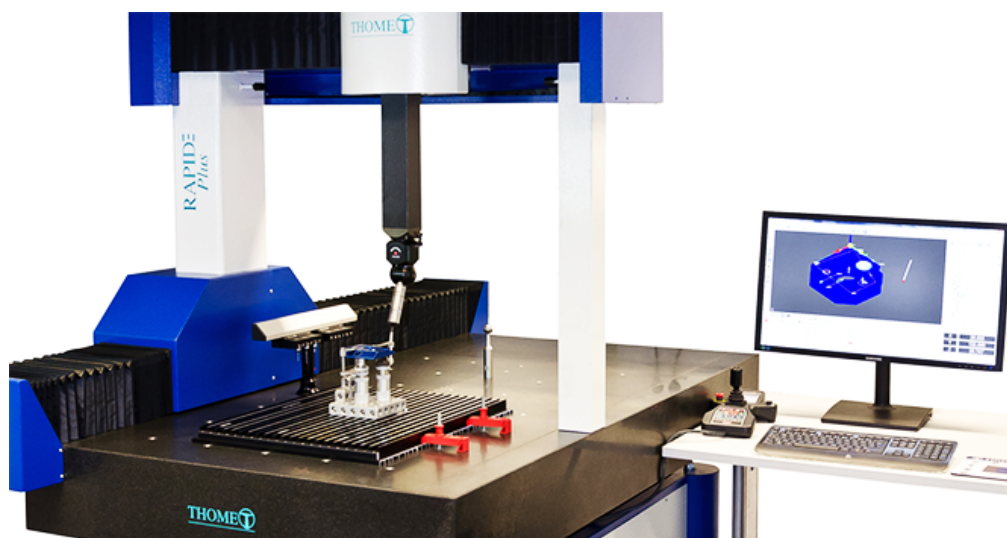
Fonte: Adaptação de Raja e Fernandes, 2008.

2.1.3.1 Sistema de aquisição de dados tridimensionais

Durante a fase de aquisição de dados do processo de engenharia reversa, a reconstrução de uma peça mecânica pode apresentar desafios significativos. A obtenção de dados precisos e completos sobre a geometria, estrutura e funcionamento da peça requer métodos e tecnologias adequadas. A complexidade da peça, a presença de superfícies curvas ou intrincadas, e a existência de componentes internos de difícil acesso podem dificultar a captura de informações detalhadas (WANG, 2010). Além disso, a presença de desgastes, deformações ou danos na peça original pode afetar a qualidade dos dados adquiridos, exigindo técnicas adicionais para compensar essas imperfeições. Segundo Wang (2010) e Raja e Fernandes (2008) existem dois tipos de métodos para a aquisição de dados: com contato e sem contato.

Os métodos de aquisição com contato envolvem o uso de dispositivos físicos que entram em contato direto com a peça a ser analisada. Isso pode incluir sondas de medição, como MMC (Máquinas de medição por coordenadas) (Figura 4), que registram as coordenadas 3D da superfície da peça. Também podem ser utilizados sensores táteis, que fornecem informações sobre a textura e a forma da superfície. Esses métodos com contato trabalham com tolerância na faixa de 0,01 mm a 0,02 mm e fornecem dados detalhados, mas podem ser limitados por restrições de acesso a áreas de difícil alcance ou por possíveis danos causados pelo contato físico (VINESH RAJA; FERNANDES, 2008).

Figura 4: Máquina de medição por coordenadas da Thome Präzision.



Fonte: THOME Präzision, 2023

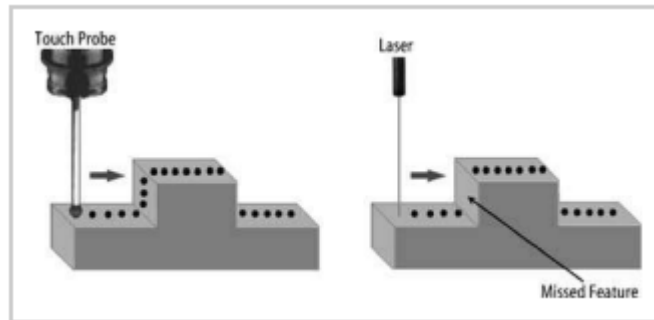
Segundo Simão (2021) existem duas técnicas para a aquisição de dados com contato físico: ponto a ponto e varredura. A primeira consiste em um trabalho de encostar a sonda na superfície da peça e movê-la em direções diferentes até que se obtenha uma malha satisfatória. É um processo complexo e trabalhoso quando utilizado em uma peça de superfície complexa. Na varredura a sonda não deixa de sair de contato com a peça e se move ao longo da superfície da peça conforme o setup definido pelo usuário. Essa técnica produz mais pontos de forma mais rápida em relação a técnica ponto a ponto (AVIZ apud SIMÃO, 2021).

Já **os métodos de aquisição sem contato** não requerem contato físico com a peça e utilizam tecnologias como digitalização a laser, digitalização por luz estruturada, fotogrametria. Esses métodos capturam a geometria da peça por meio de sensores ópticos ou de luz, registrando informações em forma de nuvem de pontos ou imagens. Isso permite a análise de características superficiais, detalhes geométricos e até mesmo a captura de cores. Esses métodos sem contato são ideais para peças sensíveis ou de difícil acesso, mas podem ser menos precisos em comparação aos métodos com contato, especialmente em termos de medições detalhadas. As tecnologias de aquisição sem contato são detalhadas na sequência.

a) Digitalização por faixa de laser

Na digitalização por faixa de laser são utilizados cabeçotes de digitalização que utilizam um feixe de laser no lugar das sondas convencionais nas MMC. Esses cabeçotes projetam um feixe de laser perpendicular à peça estudada, obtendo as informações da superfície por meio de uma câmera. Eles utilizam técnicas de triangulação ou TOF (*time-of-flight*) na obtenção dos dados sobre a peça estudada. Essa tecnologia oferece uma alternativa avançada e eficiente para a medição dimensional em processos industriais porém sofre com superfícies complexas e cavidades presentes na peça, visto que sua cobertura é feita em somente um plano da peça (SIMÃO, 2021).

Figura 5 - Diferença entre sonda vertical e digitalização por faixa de laser.

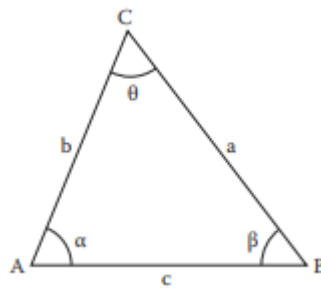


Fonte: VINESH RAJA; FERNANDES, 2008.

Segundo Raja e Fernandes (2008) os métodos de TOF operam de forma similar ao radar, onde o sistema mede o tempo necessário para um pulso de laser viajar até um objeto e retornar. Já as técnicas de luz estruturada calculam a profundidade por meio de triangulação geométrica utilizando a lei dos senos presente na equação (3.1) (Figura 6). A câmera, o objeto e a fonte de luz formam a geometria de triangulação. Abaixo segue a representação da técnica de luz estruturada na figura 5.

$$\frac{a}{\text{sen}(\alpha)} = \frac{b}{\text{sen}(\beta)} = \frac{c}{\text{sen}(\theta)} \quad (3.1)$$

Figura 6 - Esquemático da lei de senos.

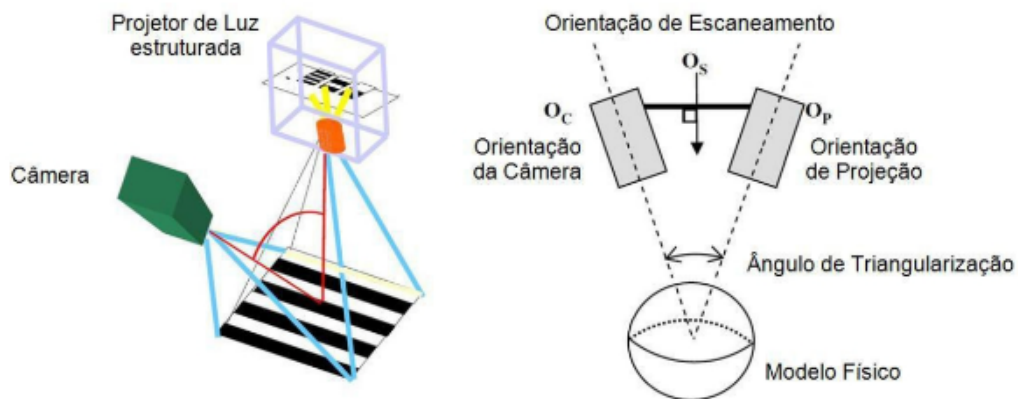


Fonte: WANG, 2010.

b) Digitalização por luz estruturada

Esse método consiste em um projetor de luz estruturada e uma câmera que capta essa luz (Figura 7), o ângulo formado pelos dois elementos é constante ao longo do processo. O projetor emite uma faixa de luz sobre o componente que será medido, em seguida a câmera coleta as coordenadas utilizando a triangulação. Consiste em um processo rápido e bastante difundido no meio (SIMÃO, 2021).

Figura 7 - Digitalização por luz estruturada.



Fonte: SIMÃO, 2021.

c) Fotogrametria

A fotogrametria é uma tecnologia de medição tridimensional que utiliza fotografias como meio principal. Ela é amplamente utilizada na engenharia reversa para determinar as características geométricas de um objeto e reconstruí-lo no formato 3D. A técnica fundamental da fotogrametria é a triangulação, mas também são aplicados conceitos de óptica. Ao capturar fotografias de duas localizações diferentes, pontos comuns são identificados em cada imagem. A partir da posição da câmera até o ponto no objeto, é possível obter as coordenadas tridimensionais do ponto de interesse usando a triangulação. Essa técnica também utiliza a lei dos senos (3.1) para calcular as coordenadas e a distância de um ponto desconhecido formando um triângulo com ele e dois pontos de referência conhecidos.

Figura 8 - Medição por fotogrametria na NASA.



Fonte: RAJA E FERNANDES, 2008.

O sensor Kinect é composto por um emissor de laser infravermelho, uma câmera infravermelha e uma câmera RGB (*Red, Green and Blue*). A medição de profundidade é descrita pelos inventores como um processo de triangulação. O feixe de laser emitido é dividido em vários feixes por uma grade de difração, criando um padrão constante de pontos projetados na cena. Esse padrão é capturado pela câmera infravermelha e correlacionado com um padrão de referência. O padrão de referência é obtido capturando-se um plano a uma distância conhecida do sensor e armazenado na memória do sensor. Quando um ponto é projetado em um objeto cuja distância para o sensor é menor ou maior do que a do plano de referência, a posição desse ponto na imagem infravermelha será deslocada na direção da linha de base entre o projetor de laser e o centro perspectivo da câmera infravermelha. Esses deslocamentos são medidos para todos os pontos através de um procedimento simples de correlação de imagens, semelhante ao processo de fotogrametria, o que resulta em uma imagem de disparidade. (Khoshelham, 2012).

Todos os sistemas de aquisição de dados tem como objetivo principal a obtenção de uma malha de pontos que posteriormente se transforma em uma superfície sólida para a aplicação desejada. Essa malha produzida raramente vem completa e sem defeitos, seja devido às sombras presentes na hora do escaneamento, ou por eventuais defeitos e desgastes apresentados na própria peça. Por esses motivos se faz necessário a calibração dos equipamentos e o processamento desses dados.

2.1.3.2 Tratamento dos dados

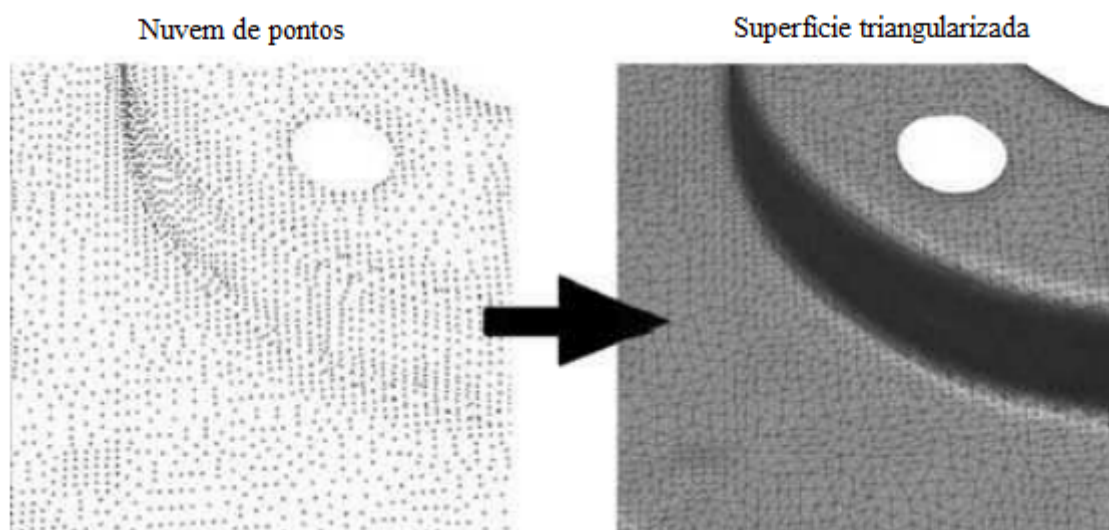
Na engenharia reversa, o refinamento é usado para aprimorar uma superfície poligonizada de forma grosseira com imperfeições. Se o centro de um triângulo estiver muito distante da superfície, o triângulo pode ser dividido em dois ou três novos triângulos em seu centro, para trazer os centros dos novos triângulos mais próximos à superfície, com isso suavizando a curva da superfície e se aproximando cada vez mais da superfície ideal. Da mesma forma, um triângulo pode ser dividido ao longo de suas arestas se a divergência entre as normais da superfície nos vértices do triângulo estiver muito distante. A formação final da malha é controlada por vários parâmetros, porém o principal é a distância máxima entre dois pontos de referência (WANG, 2010).

Segundo Wang (2010) o grau de poligonização depende da complexidade da superfície de interesse. Um grau maior de poligonização é necessário para uma superfície de

maior curvatura, a fim de representar melhor seus detalhes. Alguns softwares de engenharia reversa utilizam o parâmetro de distância máxima como fator primário em sua operação de conexão de pontos.

As principais tecnologias para transformar um conjunto de dados de nuvem de pontos obtidos por escaneamento em um modelo CAD baseiam-se na formação de uma malha poliédrica triangular ou em segmentos que se encaixam no modelo (Figura 9). O método de malha poliédrica triangular consiste em construir inicialmente uma malha triangular para capturar as características topológicas da peça com base nos dados da nuvem de pontos. Geralmente, o arquivo de software para a triangulação é escrito na *stereolithography tessellation language* (STL) (WANG, 2010).

Figura 9 - Conversão da nuvem de pontos para Superfície triangularizada.



Fonte: Adaptado de Raja e Fernandes, 2008.

O formato de arquivo STL (*Stereolithography tessellation language*) foi inicialmente criado pela empresa 3D Systems para aplicação em estereolitografia. Ele descreve a geometria de um objeto tridimensional por meio de superfícies triangulares. Cada um desses triângulos é definido pelas coordenadas cartesianas dos três vértices e pelo vetor normal à superfície. Arquivos STL descrevem apenas a geometria da superfície do objeto, sem especificações de cor, textura ou outros atributos comuns de modelos CAD. O formato STL é amplamente suportado por muitos pacotes de software e é usado extensivamente em prototipagem rápida, fabricação assistida por computador (CAM) e também é um formato muito disseminado em processamento de nuvem de pontos para tarefas de engenharia reversa (WANG, 2010).

Esse formato de arquivo é o *output* necessário para dar sequência com a prototipação da peça alvo de engenharia reversa, com ele é possível orientar, posicionar e corrigir a escala para realizar a fabricação do projeto.

2.2 Manufatura aditiva

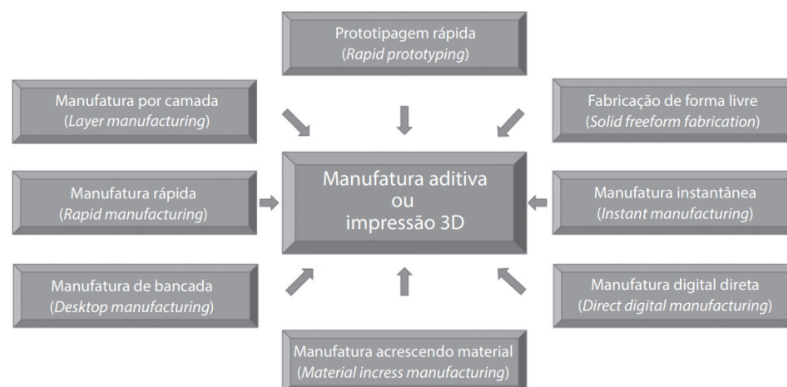
Segundo Volpato (2017) pode-se definir a AM (Manufatura aditiva) como sendo um processo de fabricação que adiciona camadas de material sucessivamente com dados recebidos de uma representação geométrica computacional 3D de uma parte.

O princípio básico da manufatura aditiva é realizar a fabricação de um modelo 3D obtido previamente sem a necessidade do planejamento dos processos de usinagem convencional, poupando tempo e dinheiro. O modelo necessita ser fatiado em camadas finitas que impactam diretamente na qualidade e aproximação do modelo com seu original (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2016).

Apesar de existirem nomenclaturas diversas para se referir a manufatura aditiva, a denominação mais utilizada até recentemente havia sido prototipagem rápida. Surgindo principalmente por ser uma tecnologia aplicada a criação de protótipos físicos de maneira veloz, contudo as tecnologias que envolviam a AM foram evoluindo e, com isso, também aumentaram os números de aplicações, expandindo o horizonte para além de protótipos, chegando a ser usada para fabricação de peças como produto final (Figura 10).

Visto isso, o termo mais bem aceito pela academia e por boa parte da indústria é o de manufatura aditiva, contudo vale ressaltar a discussão na norma ISO (*International Organization for Standardization*) 52900:2015 onde a denominação impressão 3D vem sendo utilizada para se referir aos equipamentos de valor agregado baixo.

Figura 10 - Algumas das principais variações da nomenclatura da área de AM.



Fonte: VOLPATO, 2017.

2.2.1 História da AM

Segundo Volpato (2017), foi somente no final da década de 1980 que começou-se a utilizar o princípio de adição de material nos processos de fabricação, contudo as ideias de utilizar ferramentas de máquinas automáticas controladas por computador para fabricação datam ao final da década de 1960 com o professor Herbert Voelcker. Foi graças a várias tecnologias que se pode chegar na AM, entre elas existem os circuitos integrados, computadores, em especial a expressão gráfico por computador e o projeto assistido por computador, a impressão a laser e outras tecnologias de impressão além dos sistemas precisos de posicionamento também tiveram sua influência nas tecnologias de AM e PR (Prototipagem Rápida) (GROOVER, 2017).

Segundo GROOVER (2017) a patente de Charles Hull foi fundamental para o desenvolvimento comercial da SL (estereolitografia), que utiliza um feixe de laser para endurecer fotopolímeros líquidos em camadas sobrepostas. Outros métodos patenteados nessa época incluíam a Cura Sólida na Base (SGC), a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e a Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM), que foram introduzidos no mercado por empresas como Cubital, DTM e Helisys.

Em 1989, a Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) foi patenteada e a empresa Stratasys foi formada para comercializar essa tecnologia, que utiliza extrusão para adicionar camadas de material em uma estrutura existente. No mesmo ano, a Impressão 3D (3DP) foi patenteada por pesquisadores do MIT, que licenciaram a tecnologia para desenvolvimento por outras empresas. Ao longo dos anos, esses processos foram refinados e se tornaram a base das tecnologias de prototipagem rápida e manufatura aditiva utilizadas atualmente em todo o mundo (GROOVER, 2017).

2.2.2 Vantagens e desvantagens envolvendo a AM

Segundo Abreu (2015), a AM está se tornando cada vez mais importante no desenvolvimento de projetos e produtos, desempenhando um papel ímpar na fase conceitual do projeto, tornando-o mais barato e viável em um menor espaço de tempo. Com essa ferramenta a indústria em geral consegue ter vantagem em diversos pontos, tais como:

- Menor tempo investido na fase de projeto;
- Diminuição nos desvios de produção, diminuindo gastos;
- Possibilitação de diversos tipos de testes;

- Flexibilidade nas características do produto;
- Aumento do número de protótipos do produto;
- Decréscimo no tempo de entrega e comercialização.

Porém é óbvio que também existem limitações a este tipo de tecnologia. Os maiores obstáculos encontrados atualmente são relacionados a dimensão do produto, pois se produz modelos de pequena e média dimensão na maioria esmagadora dos exemplos (ABREU, 2015). No entanto, ainda pode-se mencionar outras desvantagens como:

- Processo de pós-processamento obrigatório para projetos com acabamento superficial relevante;
- Baixas propriedades mecânicas em relação aos demais meios de fabricação;
- Velocidade de produção limitada, sendo gargalo para produtos com necessidade comercial de grande escoamento;
- Pequena variabilidade de materiais, sendo sua grande maioria a base de polímeros.

Contudo, vale ressaltar que boa parte das desvantagens citadas são devido ao fato da tecnologia datar de um período recente. Como várias outras tecnologias amplamente difundidas nos dias de hoje, todas precisam do seu tempo de maturação, onde ocorreu diversas pesquisas e descobertas que influenciaram na sua adoção em massa. Com o devido tempo e pesquisas desenvolvidas nos meios acadêmicos, tanto o número de empresas utilizando o método, quanto os materiais disponíveis para a fabricação, irão crescer de maneira a acompanhar as demandas sociais apresentadas.

2.2.3 Processo Generalista da AM

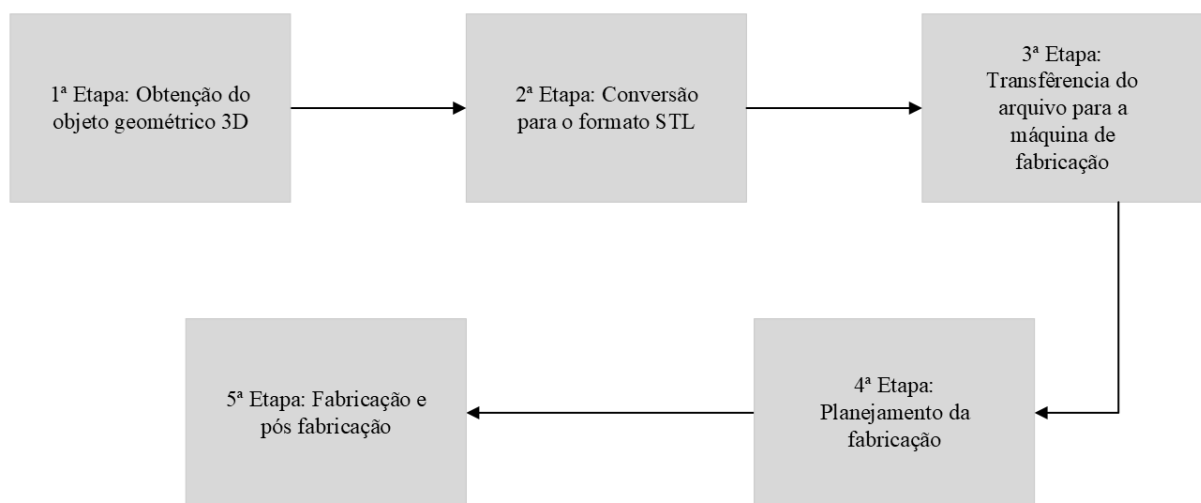
Groover (2017) divide o processo de AM em três etapas: (1) Modelagem geométrica, que consiste em criar um modelo CAD geométrico 3D dando ênfase na distinção da parte interna para a parte externa, recurso já presente em uma modelagem sólida. Em seguida vem a (2) tesselação do modelo geométrico, que nada mais seria do que transformar o modelo CAD em um modelo STL para partir para o último passo que consiste em (3) cortar o modelo em camadas horizontais paralelas e pouco espaçadas.

Contudo Volpato (2017) já considera o processo de AM de maneira mais detalhista e completa considerando a parte de fabricação e acabamento, sendo dividida nas

seguintes partes: O desenvolvimento do modelo CAD é onde se dá início a AM, em seguida é a transformação do arquivo para um formato poligonal STL por exemplo. Na terceira etapa tem-se o planejamento do processo de fabricação, onde é abrangido desde a orientação e posicionamento do objeto, fatiamento do mesmo e trajetória ou geometria de contorno/preenchimento a ser escolhida. A quarta etapa é compreendida como a fabricação do objeto na máquina de AM, onde o processo se torna mais assistido sem muita interferência do usuário. Por último é elencado o pós processamento que consiste na limpeza da peça, retirada de excesso do material e remoção das estruturas de suporte, por exemplo.

Gibson (2016) compreende que a AM tem oito etapas, porém de pouco difere da interpretação de Volpato, adicionando apenas o setup de máquina, remoção do objeto da máquina de impressão, e aplicação da peça. Em suma o processo abrange os mesmos fundamentos independentemente do autor, facilitando o entendimento do procedimento que deverá ser realizado. Visto isso optou por separar a explicação de cada etapa da seguinte forma (Figura 11).

Figura 11: Fluxograma do processo de AM.



Fonte: Autor.

- Etapa 1: Obtenção do objeto geométrico 3D

Segundo Abreu (2015) existem dois meios para se obter um produto de superfície sólida 3D, o primeiro deles é criando o objeto 3D nos softwares CAD, ou então utilizando um modelo já pronto obtido através da digitalização prévia, podendo ela ser com contato ou sem contato. Todas as peças geradas pelo processo de AM devem começar com um modelo sólido

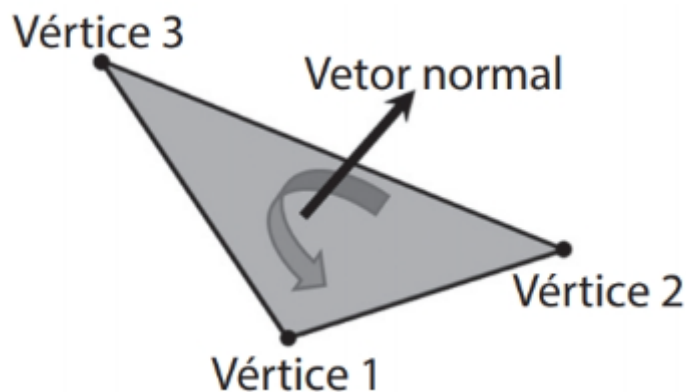
3D ou uma representação sólida, podendo ser utilizado qualquer tipo de software disponível. Métodos de engenharia reversa também podem ser utilizados para cumprir essa tarefa (GIBSON: ROSEN: STUCKER, 2016)

- Etapa 2: Conversão para o formato STL

Praticamente toda máquina de fabricação por AM aceita o formato STL, por isso a importância de obter um arquivo com essa especificação, além disso praticamente todos os softwares CAD conseguem exportar esse formato, nessa etapa é possível corrigir o tamanho, posição e orientação da peça caso desejado (GIBSON: ROSEN: STUCKER, 2016).

Volpato (2017) cita duas regras importantes no momento de conversão para uma malha STL: A primeira consiste na regra da mão direita, onde a sequência de vértices (1, 2 e 3) de cada triângulo deve ser de tal forma que utilizando a regra da mão direita (Figura 12), seja possível definir o interior e exterior da superfície. A segunda regra é que dois triângulos vizinhos só podem compartilhar dois vértices entre si e nada mais, caso essa regra seja descumprida ocorrerá uma degeneração da malha, tornando-a inválida.

Figura 12 - Regra da mão direita para orientação do vetor normal.



Fonte: VOLPATO, 2017.

É interessante ressaltar que quanto menor forem os triângulos, melhor será a aproximação obtida, contudo a relação é inversamente proporcional quando se trata de desempenho exigido pelo computador para realizar os cálculos (ABREU, 2015).

- Etapa 3: Transferência do arquivo para a máquina de fabricação

Essa etapa consiste em utilizar de vários parâmetros disponíveis para manipular a malha gerada, segundo Volpato (2017) os mais utilizados são o comprimento de corda (Figura 13) ou flecha e o ângulo de controle. O primeiro determina a distância máxima entre a superfície do triângulo e a superfície da peça, ou seja, quanto menor for a distância máxima, menor será o triângulo, gerando uma malha mais homogênea e precisa. Já o ângulo de controle segue a equação (3.2) para manter a qualidade mesmo em curvas com pequenas dimensões e raios especificando uma tolerância.

Figura 13 - Definição do comprimento de corda.



Fonte: VOLPATO, 2017.

$$C_e = [r/(D/10)]^\alpha * C \quad (3.2)$$

Onde:

C_e = comprimento efetivo da corda a ser aplicado nos pequenos detalhes;

r = raio do menor detalhe do modelo;

D = maior diagonal do paralelepípedo que envolve completamente o modelo;

α = ângulo de controle;

C = comprimento da corda

- Etapa 4: Planejamento da fabricação

No planejamento da fabricação, um programa de pré-processamento permite ao usuário ajustar diversos parâmetros como posição, tamanho ou escala e orientação do modelo. É uma fase de extrema importância visto que a impressão ao longo do eixo z sempre terá propriedades mecânicas menores em comparação ao plano $x-y$, além da precisão também ser menor. Além disso, quanto menor for a altura do objeto, maior será a velocidade de impressão, pois diminuirá o número de camadas depositadas (ABREU, 2015).

Em processos de AM, algumas tecnologias exigem a adição de material extra além do volume da peça para fins de suporte e ancoragem. A base desempenha funções essenciais, como fixar a peça na plataforma de construção, prevenir deformações por contração do material, proteger a peça durante a remoção e compensar irregularidades da superfície da plataforma. As estruturas de suporte são criadas quando há regiões suspensas, desconectadas temporariamente do corpo da peça ou que possuam superfícies negativas com inclinação menor que o ângulo de auto suporte. Esse ângulo varia em cada tecnologia de AM e material utilizado. Por exemplo, na tecnologia PolyJet, todas as superfícies negativas necessitam de suporte, enquanto na tecnologia FDM com ABS (acrilonitrila butadieno estireno), o suporte é configurado apenas para paredes negativas com ângulos menores que 45°. Sem essas estruturas de suporte, certas regiões da peça não poderiam ser construídas adequadamente (VOLPATO, 2017).

Segundo Volpato (2017) outra parte importante do planejamento de processo é o fatiamento em camadas do objeto, que pode ocorrer de forma direta ou indireta. Primeiro é necessário definir a espessura de camada, optando por fatiamento uniforme com espessura constante, ou fatiamento adaptativo com espessura variável. Em seguida se calcula a interseção plano/malha para montar contornos fechados denominados de polígonos e finalmente determinar o sentido dos contornos, seja horário ou anti horário.

- Etapa 5: Fabricação e pós fabricação

O processo de fabricação começa com a primeira camada e segue sucessivamente até o objeto estar completo (ABREU, 2015). A fabricação é majoritariamente automatizada, onde a máquina consegue trabalhar sem supervisão, necessitando apenas de intervenção no início do processo, onde é necessário adicionar material para impressão e realizar a limpeza da plataforma (VOLPATO, 2017). O monitoramento ao longo do tempo pode ser superficial e em grandes intervalos de tempo, sempre se certificando de não haver falta de material (GIBSON, 2015).

A pós fabricação consiste em cuidados necessários após a peça ter sido fabricada, seja a atividade de cura em alguns casos, remoção da peça da máquina, limpeza e retirada de material em excesso ou a remoção dos suportes utilizados para a fabricação. É importante ter paciência e o cuidado na hora de manipular a peça nesse estágio a fim de evitar danos permanentes na peça.

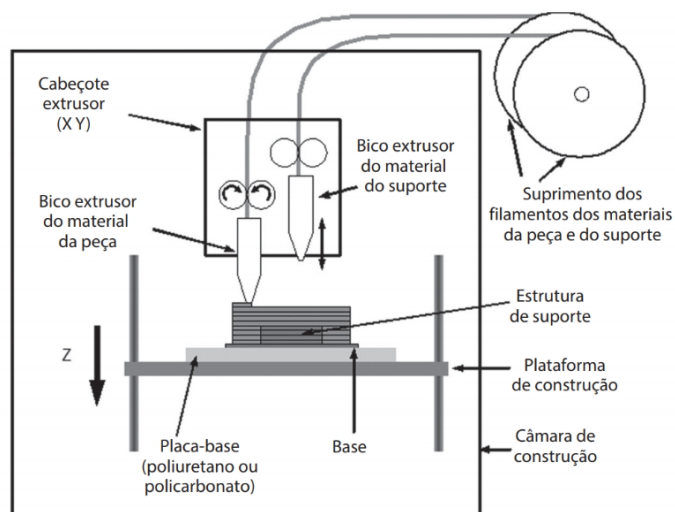
2.2.4 FDM - Modelagem por Deposição de Material Fundido

Segundo Gibson (2015) há mais máquinas de FDM do que qualquer outro processo de AM no mundo. A modelagem por deposição de material fundido é quando um filamento de polímero termoplástico é extrudado por um cabeçote onde o material é aquecido até 0,5 °C além de sua temperatura de fusão. O cabeçote se move no plano $x-y$ enquanto percorre o contorno e ao longo do eixo z para realizar a troca de camadas. O material extrudado se solidifica em uma superfície mais fria da peça. No caso de estruturas de suporte, é possível utilizar um segundo cabeçote que depositara um material diferente para que a separação posterior seja facilitada.

A peça é fabricada da base para cima, camada após camada, tendo como desvantagem sua baixa velocidade de produção, visto que o cabeçote tem que operar a uma velocidade baixa, e além disso o formato do bocal é circular, dificultando a criação de cantos vivos para a peça (GROOVER, 2017).

A máquina FDM genérica (Figura 14) é composta por um cabeçote extrusor, onde ficam dois bicos responsáveis por expelir o material da peça e também do suporte da peça que são alimentados por um rolo que comporta os filamentos que servem de matéria prima para manufatura. Além dos seguintes componentes tem-se a placa-base e a base em si, que ficam sobre a plataforma de construção podendo ser confinadas em uma câmara de construção para manter a temperatura durante o processo e evitar interferências do ambiente externo.

Figura 14 - Princípios do processo de FDM da Stratasys Ltd.



Fonte: VOLPATO, 2017.

Na teoria, praticamente qualquer material que possa ser fundido até se encontrar com consistência pastosa e depois endurecido de forma química ou física pode ser utilizado nesse processo. O principal é que o fenômeno de solidificação ao sair do bico extrusor seja rápido para que o material mantenha a estrutura desejada, mas não tão rápida a ponto de prejudicar a adição aos filamentos já depositados nas camadas anteriores e na camada atual (VOLPATO, 2017).

2.2.4.1 Materiais utilizados no FMD

O PLA (ácido polilático) é um material de deposição de material fundido amplamente utilizado na AM. É um polímero produzido a partir dos ácidos α -hidróxi, que incluem o ácido poliglicólico ou o ácido polimandélico (ABREU, 2015). O PLA possui uma temperatura de fusão mais baixa (185°C) em comparação com outros materiais, o que o torna adequado para impressoras 3D de baixo custo. Ele é conhecido por sua facilidade de impressão, baixa emissão de odores e alta resistência à deformação. O PLA é ideal para aplicações não funcionais, como protótipos, modelos conceituais e objetos decorativos. No entanto, o PLA é menos resistente a altas temperaturas em comparação com outros materiais e pode sofrer deformação em ambientes aquecidos.

O ABS é outro material popular de deposição de material fundido usado na manufatura aditiva. É um polímero termoplástico durável e resistente a impactos. O ABS possui uma boa resistência mecânica, é mais resistente a altas temperaturas e possui melhor aderência entre as camadas impressas. Além disso, o ABS é adequado para aplicações funcionais, como peças de engenharia, protótipos funcionais e componentes industriais. No entanto, o ABS requer uma impressora 3D com uma plataforma aquecida devido à sua maior taxa de contração durante o resfriamento, o que pode levar a problemas de deformação e warping. Além disso, o ABS pode emitir odores e vapores durante a impressão, exigindo uma ventilação adequada.

Tanto o PLA quanto o ABS possuem vantagens e desvantagens distintas. O PLA é mais amigável ao meio ambiente, fácil de imprimir e adequado para aplicações não funcionais. No entanto, ele é menos resistente a altas temperaturas. Por outro lado, o ABS é mais resistente, durável e adequado para aplicações funcionais. No entanto, requer uma impressora 3D com plataforma aquecida, tem maior taxa de contração e pode emitir odores

durante a impressão. A escolha entre PLA e ABS dependerá das necessidades específicas do projeto, como resistência, temperatura de operação e requisitos funcionais.

Tabela 1 - Propriedades do ABS.

Propriedade	Valor (Unidade)
Tensão máxima à Tração	42,5 – 44,8 MPa
Tensão de rotura à Tração	33 – 41 MPa
Módulo de Young	1100 – 2900 MPa
Tensão máxima à Flexão	60,6 – 73,1 MPa
Módulo sob Flexão	2250 – 2300 MPa
Dureza	103 - 112 <i>Rockwell R</i>
Massa volúmica	1,01 – 1,21 g/cm ³
Temperatura de extrusão	215 – 250 °C
Temperatura da cama	90 – 103 °C

Fonte: ABREU, 2015.

Tabela 2 - Propriedades do PLA.

Propriedade	Método	Valor (Unidade)
Tensão máxima à Tração	ISO 527-2	16 – 72 MPa
Tensão de rotura à Tração	ISO 527-2	14 – 70 MPa
Módulo de <i>Young</i>	ISO 527-2	310 – 5620 MPa
Extensão máxima à Tração	ISO 527-2	1 – 8,5%
Extensão na rotura à Tração	ISO 527-2	1 – 12%
Tensão máxima à Flexão	ISO 178	9 – 111 MPa
Módulo sob Flexão	ISO 178	305 – 9515 MPa
Resistência ao impacto, entalhe <i>Charpy</i>	ISO 179	1,4 – 5,5 kJ/m ²
Dureza		82 – 88 <i>Rockwell R</i>
Massa volúmica	ISO 1183	1,24 – 1,26 g/cm ³
Temperatura de extrusão		195 – 220 °C
Temperatura da cama		Ambiente a 60 °C

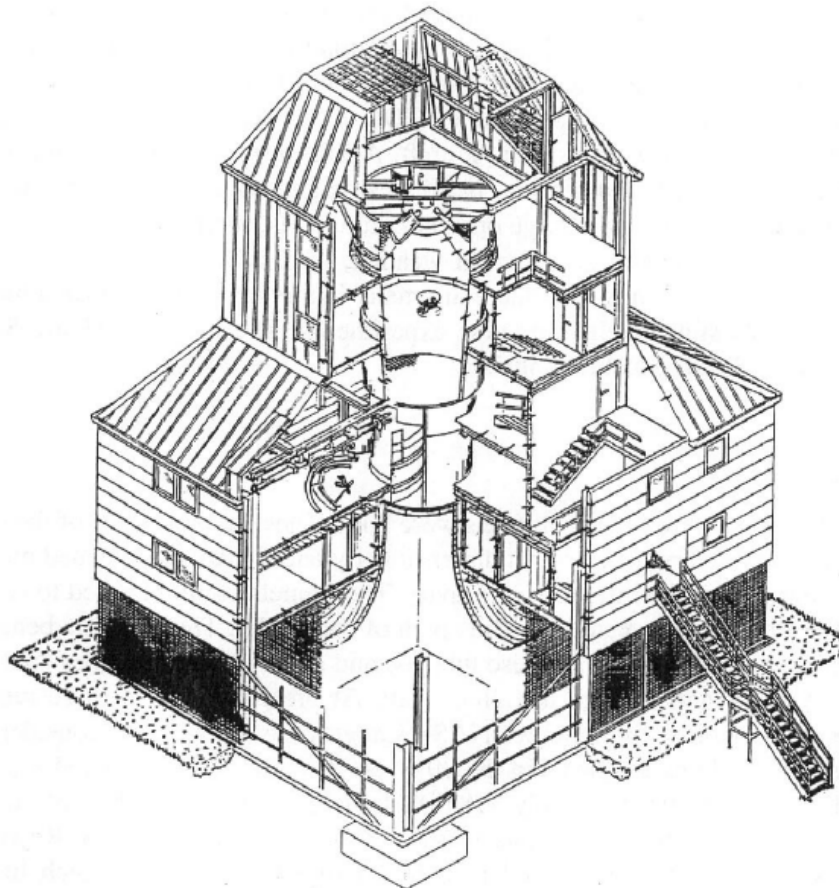
Fonte: ABREU, 2015.

2.3 Túnel Aerodinâmico

O túnel aerodinâmico tem como objetivo o estudo dos efeitos do escoamento do ar em relação a um objeto maciço, além das forças agindo no objeto e suas interações aerodinâmicas. Desde sua criação os túneis de vento foram utilizados, principalmente, para testar teorias aerodinâmicas e ajudar no design de aeronaves, contudo atualmente eles vêm sendo utilizados nos mais diversos campos de estudo como na arquitetura, meio ambiente, educação e nas indústrias automotivas (AHMED, 2014).

Segundo Barlow (2015) basicamente todo túnel de vento com mais de 61 cm (2 ft) de seção de teste é único, contudo é possível classificá-los conforme suas aplicações, como túneis aeronáuticos, ou túneis mais fechados como os verticais (Figura 15) , utilizados para testar a recuperação de estol¹ de uma aeronave.

Figura 15: Túnel de vento vertical na Alemanha.



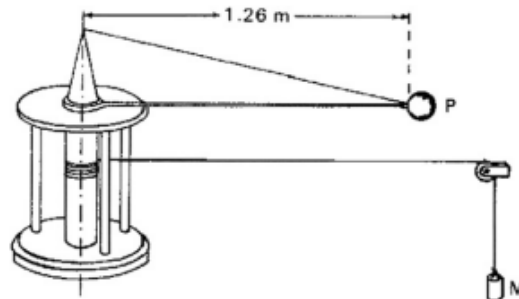
Fonte: BARLOW et al., 2015.

¹ Estol é quando a asa de uma aeronave acaba perdendo sua força de sustentação devido a variação do ângulo de ataque acima do limite crítico projetado para o perfil da asa.(RODRIGUES, 2014).

2.3.1 História dos túneis aerodinâmicos

Em 1746 Benjamin Robin foi capaz de determinar o arrasto de uma bala de mosquete utilizando sua invenção que pode ser considerada o predecessor do túnel de vento. O arrasto foi determinado pelo peso enquanto a velocidade do objeto do teste foi medida cronometrando o número de revoluções do braço que conectava a bala com o centro da máquina chamada de *whirling arm apparatus* (Figura 16). Com esse experimento ele obteve dados mais relevantes sobre o arrasto em uma variedade de formatos de bala, porém com uma baixa velocidade (GREEN; QUEST, 2011).

Figura 16: Braço giratório utilizado por Benjamin Robin.



Fonte: GREEN; QUEST, 2011.

Entre os anos de 1866 e 1889, Otto Lilienthal criou diversos tipos de braços giratórios de tamanho diferentes para calcular as forças de sustentação e arrasto de diversos tipos de aerofólios. Também foram feitos outros experimentos com aerofólios estáticos em relação ao vento, e devido ao fato do braço giratório criar um movimento turbulento de ar ao seu redor, Otto questionava a validade dos dados adquiridos pelo aparelho (ANDERSON, 2017).

Francis Wenham teve os mesmos problemas que Otto, e após alguns experimentos falhos com o aparelho de Benjamin Robin, Francis convenceu a sociedade britânica de aeronáutica a levantar fundos suficientes para ele construir o primeiro túnel de vento do mundo, com 3,65 metros (12 ft) de comprimento e um corte transversal de 45,72 por 45,75 cm (18 in x 18 in), movido por um motor a vapor. Ele tinha uma péssima qualidade de fluxo de ar, mas serviu de inspiração para outros túneis de vento como o de Phillips, até na próxima geração de túneis de vento criada pelos Wrights, (Figura 17). (GREEN; QUEST, 2011).

Figura 17: Túnel de vento dos irmãos Wright em 1901.



Fonte: GREEN; QUEST, 2011.

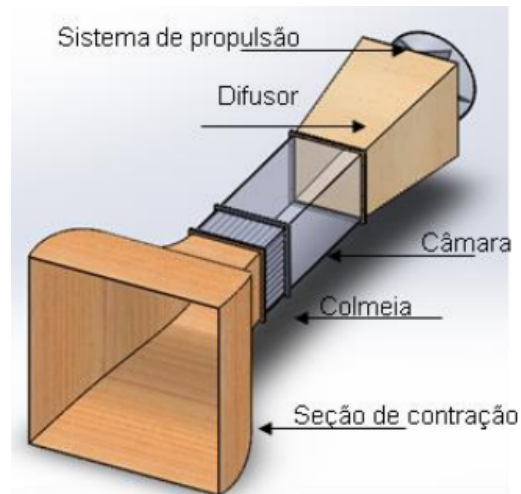
Mesmo com a evolução dos métodos de análise de dados, com softwares CFD (*Computational Fluids Dynamics*) de alto desempenho como o ANSYS Fluent ou Autodesk CFD, diversas indústrias ainda necessitam de testes práticos em túneis de vento para tomar decisões em problemas que apenas a simulação não consegue resolver (BARLOW et al., 2015).

2.3.2 Tipos de túneis aerodinâmicos

Segundo Cardoso (2020), os túneis aerodinâmicos são feitos para realizar um escoamento de ar artificialmente, devem ter velocidade constante ao longo do tempo e por toda extensão da seção de testes. O princípio básico de funcionamento do túnel é a ideia de que um objeto estacionário tem ar se movendo a sua volta, e para isso cada projeto pode escolher entre um túnel aerodinâmico de circuito aberto (a) ou fechado (b).

Os túneis aerodinâmicos de circuito aberto (Figura 18) são mais baratos, simples e não sofrem com a variação de temperatura. Não possuem curvas e o ar sai diretamente no local onde o equipamento se encontra e após circular pelo ambiente é succionado de volta. O ciclo do ar começa no bocal de contração, passando pela seção de testes onde o objeto a ser estudado está posicionado de maneira estática, e por fim saindo pelo bocal divergente. É importante salientar que a qualidade do ar no circuito aberto é proporcional à qualidade do ar no ambiente em que o túnel se encontra (TIBURCIO; JÚNIOR, 2021).

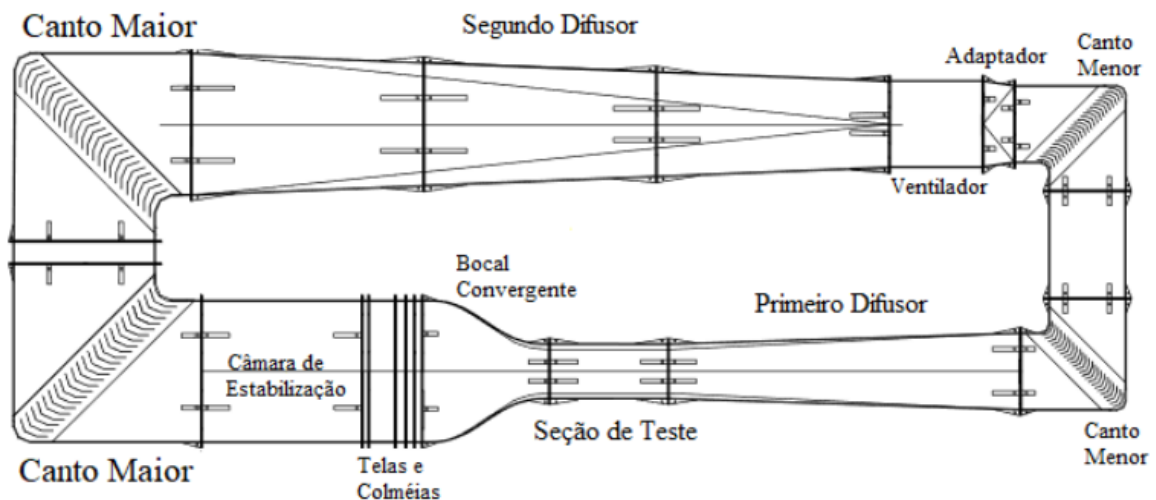
Figura 18: Túnel de vento de circuito aberto.



Fonte: SARTORI; SOEIRO; DOURADO, 2017.

No circuito fechado o fluido acaba recirculando ao longo do equipamento, economizando energia uma vez que o ventilador aproveita o escoamento restante. Devido a todo o sistema de instalação e seu porte, o túnel de vento de circuito fechado (Figura 19) acaba sendo mais caro em relação ao circuito aberto, e a fim de manter a qualidade de ar também se faz necessário um sistema de descontaminação do fluido (SINGH; SINGH; KUMAR, 2013).

Figura 19: Túnel de vento de circuito fechado.



Fonte: TIBURCIO; JÚNIOR, 2021.

Ainda do tipo de circuito de vento, também se pode classificar os túneis aerodinâmicos conforme a velocidade de escoamento alcançada em quatro grupos, os subsônicos, ou túneis de vento de baixa velocidade, em seguida os transônicos, mais comuns

na indústria aeronáutica comercial, em terceiro os supersônicos, utilizados para analisar o comportamento de motores a jato e alguns componentes da aeronáutica militar, até os hipersônicos com aplicações voltadas a foguetes e veículos espaciais no geral.

Tabela 3 - Tipos de túneis de vento pela velocidade.

	Range de velocidades	Aplicações
Túneis subsônicos	~ 100 m/s	Educacional, Indústria automotiva
Túneis transônicos	100 ~ 413 m/s	Indústria aeronáutica comercial
Túneis supersônicos	413 ~ 1720 m/s	Motores a jato, aeronáutica militar
Túneis hipersônicos	1720 ~ 5160 m/s	Foguetes, veículos espaciais

Fonte: Autor.

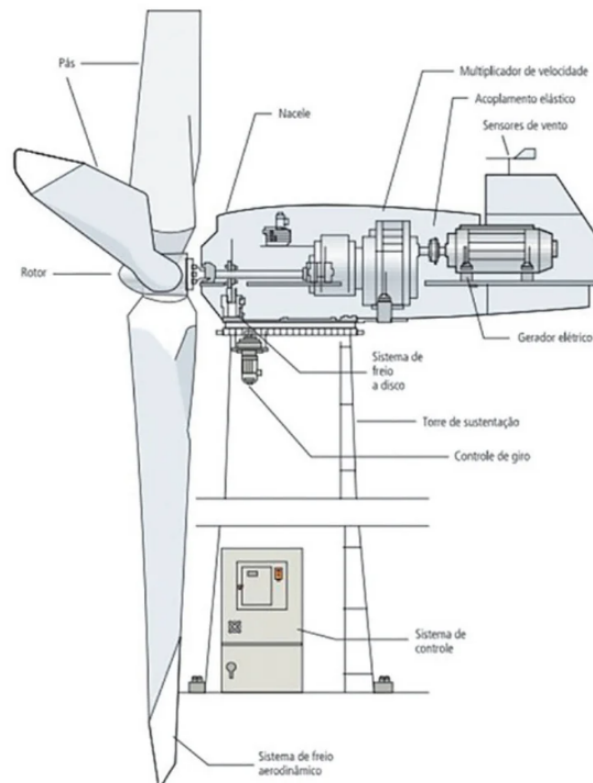
2.4 Energia eólica e turbinas eólicas

Segunda Vian (2021) energia eólica é toda a energia contida nos ventos, já Pinto (2012) diz que toda a energia cinética gerada pelo movimento do ar é considerada como energia eólica. Tem como principais características a disponibilidade infinita, custo zero nos insumos, baixo custo de geração além de ser uma fonte que não produz gases de efeito estufa, tornando-a mais atrativa do que outros meios de produção energética.

A turbina eólica por sua vez é o equipamento responsável por capturar parte dessa energia cinética disponível no ar, convertendo-a para energia elétrica através de um gerador elétrico acoplado na sua nacele² (PINTO, 2012). Após diversos anos de pesquisa, erros e acertos na produção de turbinas eólicas, chegou-se em um consenso da turbina eólica moderna (Figura 20). Com esse acordo na composição e formato ótimo da turbina, foi possível escalar uma produção de 25 MW para 9.500 MW nas últimas 4 décadas (Figura 21) (VIAN, 2021).

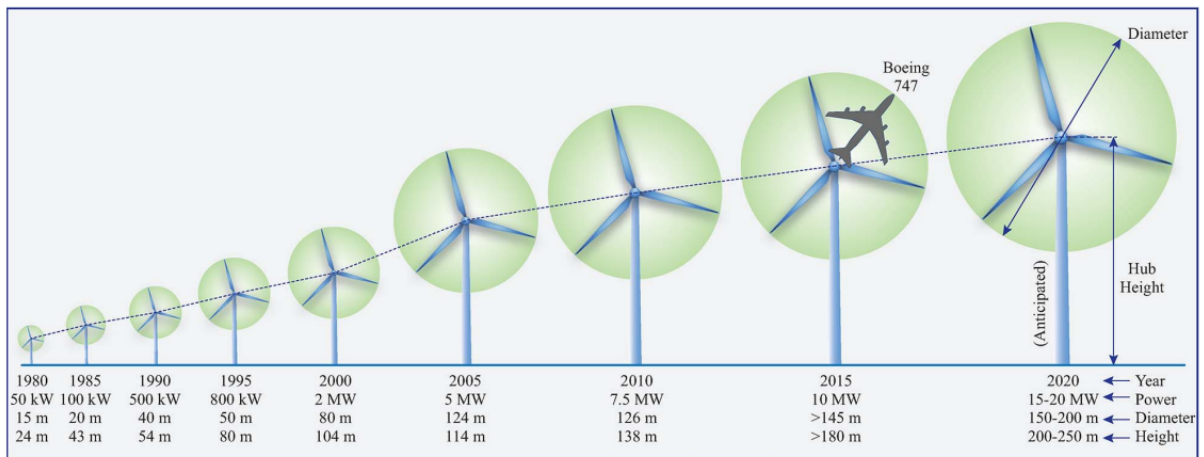
² Nacele é a parte da turbina eólica que envolve a caixa de engrenagens e o gerador elétrico, geralmente o transformador também é encontrado no interior da nacele (VIAN, 2021).

Figura 20: Composição de uma turbina eólica moderna.



Fonte: VIAN, 2021.

Figura 21: Evolução no dimensionamento das turbinas eólicas nos últimos 40 anos.



Fonte: YARAMASU et al, 2015.

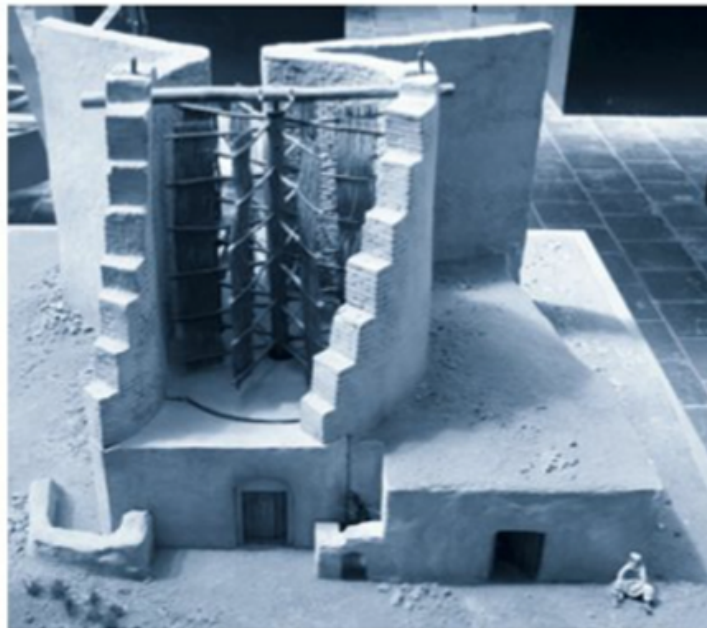
Como o insumo energético das turbinas eólicas e fonte da energia eólica é o vento, se trata de um recurso incontrolável e sem capacidade de armazenamento, diferentemente de outros insumos energéticos como a água nas usinas hidrelétricas ou o carvão nas usinas termelétricas. O vento também apresenta propriedades aleatórias como direção e velocidade, que estão relacionadas a geografia, clima e altura onde a turbina será utilizada (VIAN, 2021).

Visto esses desafios, o túnel aerodinâmico se torna o equipamento ideal para o estudo do desempenho de turbinas tendo em vista que nele é possível controlar velocidade, direção e escoamento do fluxo de ar.

2.4.1 História da energia eólica

Segundo Pinto (2012) não é clara a data de origem dos primeiros equipamentos eólicos utilizados na história. As primeiras menções da utilização da energia cinética do vento vem originalmente da Índia, Tibete, Afeganistão e Irã, contudo existem autores que descobriram, o que eles entenderam ser um moinho de vento próximo a Alexandria datando de supostamente 3000 anos atrás. A primeira prova de um moinho de vento que realmente foi utilizado para realizar trabalho é oriunda da Pérsia do séc. VII e alguns desses modelos sobrevivem até hoje (Figura 22).

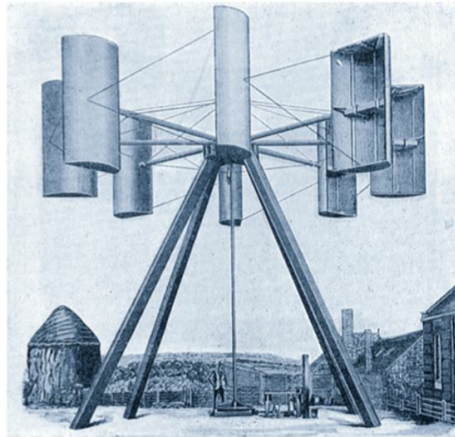
Figura 22: Foto de um modelo de moinho de vento persa no Deutsche Museum.



Fonte: PINTO, 2012..

Contudo foi somente em 1887, em Glasgow, na Escócia, que o engenheiro eletricitista James Blyth construiu o primeiro moinho (Figura 23) capaz de gerar eletricidade. A máquina possuía aproximadamente 10 metros de altura, do tipo vertical, e era capaz de alimentar a iluminação de sua casa, sendo esta a primeira casa a ter eletricidade proveniente da energia eólica. Em 1891 Blyth adquiriu a patente do equipamento na Inglaterra (MORAES, 2018).

Figura 23: Ilustração do moinho de Blyth.



Fonte: Pinto, 2012.

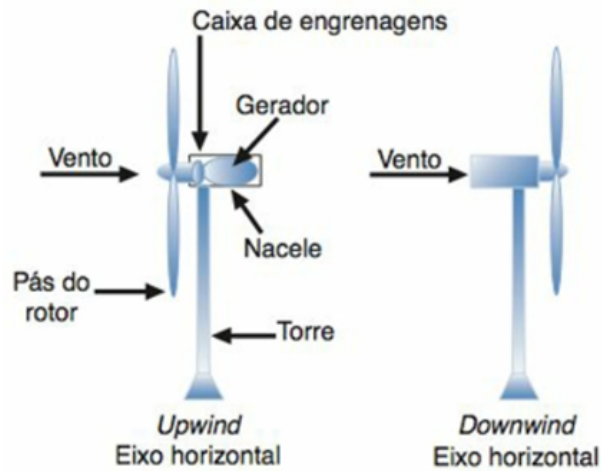
O uso da energia eólica só começou a ser utilizado em escala comercial nos anos 1980, auxiliada por pesquisas intensas de desenvolvimento na área, pelo baixo custo, aumentando a competitividade em relação aos outros meios de geração, e pelas legislações estatais que promovem sua utilização como fonte de energia sustentável. O nível de potência alcançado chegou na faixa dos megawatts, ocasionando no crescimento dos parques eólicos (PINTO, 2012).

2.4.2 Tipos de turbinas eólicas

Um meio muito comum para a classificação de turbinas eólicas é utilizando o eixo ao redor das pás da turbina, tendo as turbinas de eixo horizontal (HAWT - *Horizontal axis wind turbine*) e as turbinas de eixo vertical (VAWT - *Vertical axis wind turbine*).

As HAWT (Figura 24) são muito mais comuns no mercado devido a uma série de fatores, desde a velocidade do rotor e saída de potência controladas pelo controle de ângulo das pás, provendo segurança contra o excesso de velocidade que ocasiona danos ao gerador, até a possível otimização do formato das pás do rotor, que pode ser otimizado a fim de buscar maior eficiência da turbina (PINTO, 2012).

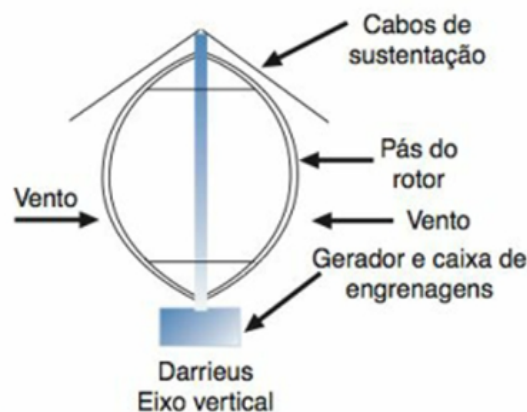
Figura 24: Turbina de eixo horizontal



Fonte: Adaptação do PINTO, 2012

Já as turbinas de eixo vertical (Figura 25) foram mais utilizadas no começo devido a menor complexidade para construí-las e erguê-las. Outras vantagens das VAWT é que não é preciso nenhum tipo de controle para manter a turbina na mesma direção que o vento está, além de todo o maquinário presente na nacelle poder ser levado ao solo, facilitando a manutenção desses equipamentos. Contudo sua eficiência é muito baixa em relação às HAWT devido a suas pás estarem muito próximas do solo, onde a velocidade do vento é menor e o escoamento é turbulento (VIAN, 2021).

Figura 25- Exemplo de turbinas de eixo vertical.



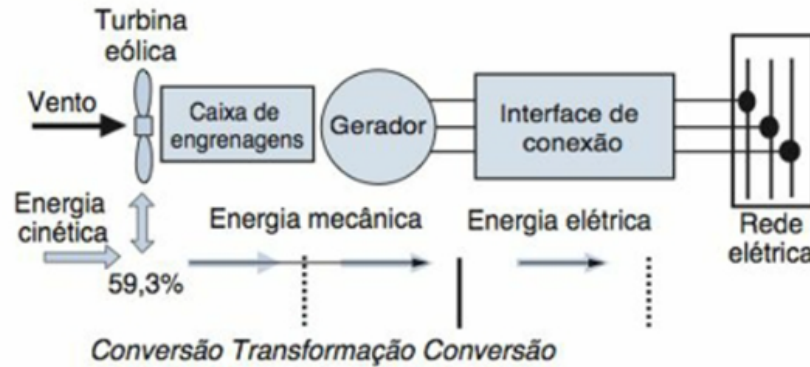
Fonte: Adaptação do PINTO, 2012

2.4.3 Conversão de energia nas turbinas

Segundo Pinto (2012) o processo de conversão de energia eólica (Figura 26), proveniente do vento, em energia elétrica ocorre em duas etapas. Primeiro na turbina, onde o

rotor remove uma parte da energia cinética disponível sofrendo torque do vento em suas pás, transformando-a em energia mecânica. Essa energia mecânica é transmitida ao longo do eixo da nacela chegando até o gerador, que a transforma em energia elétrica. Dependendo da tecnologia aplicada na turbina, a energia mecânica segue por uma caixa de engrenagens a fim de aumentar a rotação do eixo, produzindo mais energia.

Figura 26: Princípio da conversão de energia cinética em energia elétrica.



Fonte: PINTO, 2012.

Segundo Vian o processo de conversão energética vento-eletricidade no eixo da turbina até os enrolamentos do estator pode ser simplificado nas seguintes etapas:

- Movimento relativo entre o rotor do gerador e seu estator;
- Produção de fluxo magnético pelo rotor;
- Tensão induzida no estator do gerador;
- Injeção da corrente elétrica na rede por meio de conversores ou conexão direta.

Conforme Clemente e Junior (2020) dizem, a eficiência energética de uma turbina eólica em um túnel de vento se dá através da equação (3.3).

$$\eta = \frac{P_g}{P_t} \quad (3.3)$$

Sendo

η = Eficiência energética [-];

P_g = Potência gerada pela turbina [W];

P_t = Potência teórica da turbina [W].

Para calcular a potência gerada pela turbina (P_g) é necessário coletar os dados de corrente (I) e tensão (V) resultantes do experimento com o túnel de vento (Figura 27). Com os dados coletados, basta seguir a fórmula (3.4) para obter a potência gerada para uma velocidade de escoamento constante.

$$P_g = iV \quad (3.4)$$

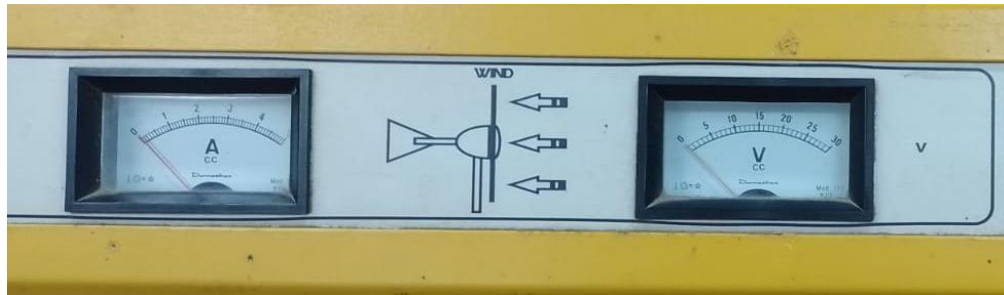
Sendo:

P_g = Potência gerada [W];

i = corrente produzida pela turbina [A];

V = Tensão produzida pela turbina [V].

Figura 27: Painel de exibição dos valores de corrente e tensão gerados pela turbina.



Fonte: Autor.

Já o cálculo da potência teórica (P_t) da turbina é calculado pela equação(3.5).

$$P_t = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_3) (v_1^2 - v_3^2) \quad (3.5)$$

Sendo:

ρ = massa específica do ar no local [kg/m^3];

A = seção transversal da área [m^2];

v_1 = velocidade do ar antes de atravessar a turbina [m/s];

v_3 = velocidade do ar depois de atravessar a turbina [m/s];

P_t = potência teórica extraída pela turbina [W].

3 METODOLOGIA

O trabalho possui como finalidade analisar a diferença de performance entre a hélice de um gerador de energia eólico em um túnel de vento com uma hélice obtida por engenharia reversa e manufatura aditiva, assim confirmando se o conjunto reproduzido é capaz de realizar as mesmas funções mantendo os mesmos parâmetros.

Como trata-se de uma pesquisa comparativa, houveram diversos testes entre a hélice de controle (Figura 28) e a hélice concebida pelo FDM e através da análise dos resultados, tirou-se conclusões de como foi o desempenho da peça produzida em relação à original. Os dados obtidos foram quantitativos em sua grande maioria, como tensão, corrente, rotação máxima e peso das hélices.

Figura 28: Hélice Original.

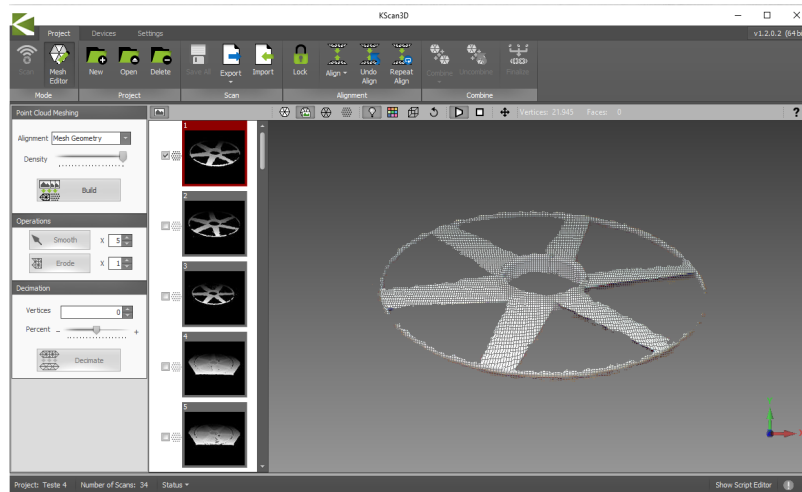


Fonte: Autor.

3.1 Aplicação da engenharia reversa na peça

Primeiramente foi aplicada a metodologia de engenharia reversa para obter a malha STL modelo 3D da peça utilizando o KINECT 360, para que fosse possível utilizar o KINECT com o computador se fez necessário a instalação de diversos drivers que permitissem a comunicação do aparelho com o desktop. O software escolhido em primeira instância foi o Kscan3D (Figura 29) devido a sua simplicidade e fácil manuseio.

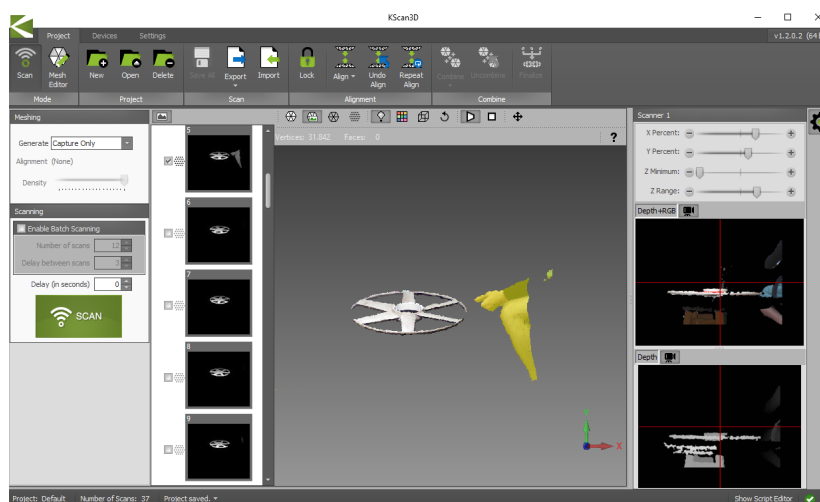
Figura 29: Interface do Kscan3D.



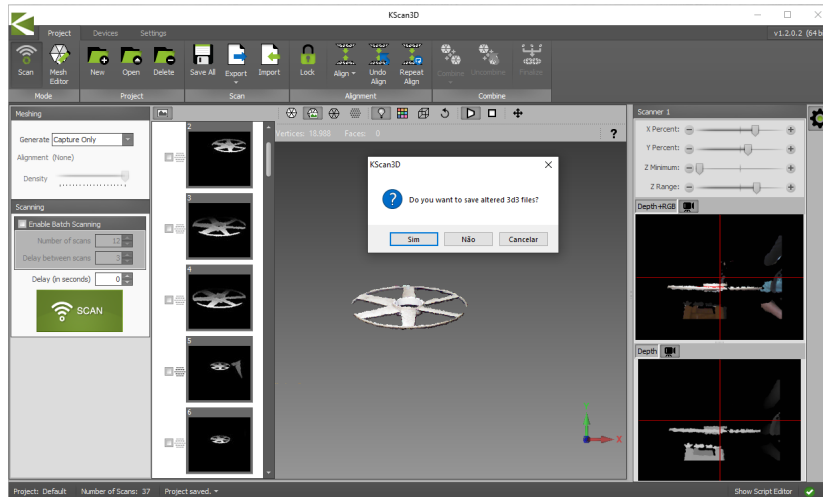
Fonte: Autor.

Para ter uma melhor qualidade no scan foi necessário fazer capturas em diferentes ângulos a fim de contemplar cada detalhe da geometria complexa presente na peça, para isso foram feitas diversas baterias de capturas buscando o melhor *setup* possível. Com o *setup* ideal encontrado, obteve-se as nuvens de pontos que melhor representavam a peça, contudo ainda era necessário realizar o refinamento da nuvem de pontos a fim de ter uma qualidade aceitável, para isso os pontos indesejados serão removidos (Figura 30). Por fim, utiliza-se a função “*Mesh Editor*” seguida pela função “*Combine*” que mesclam as nuvens capturadas para formar uma malha STL editável.

Figura 30 Antes (a) e depois (b) da remoção dos pontos indesejados.



(a)

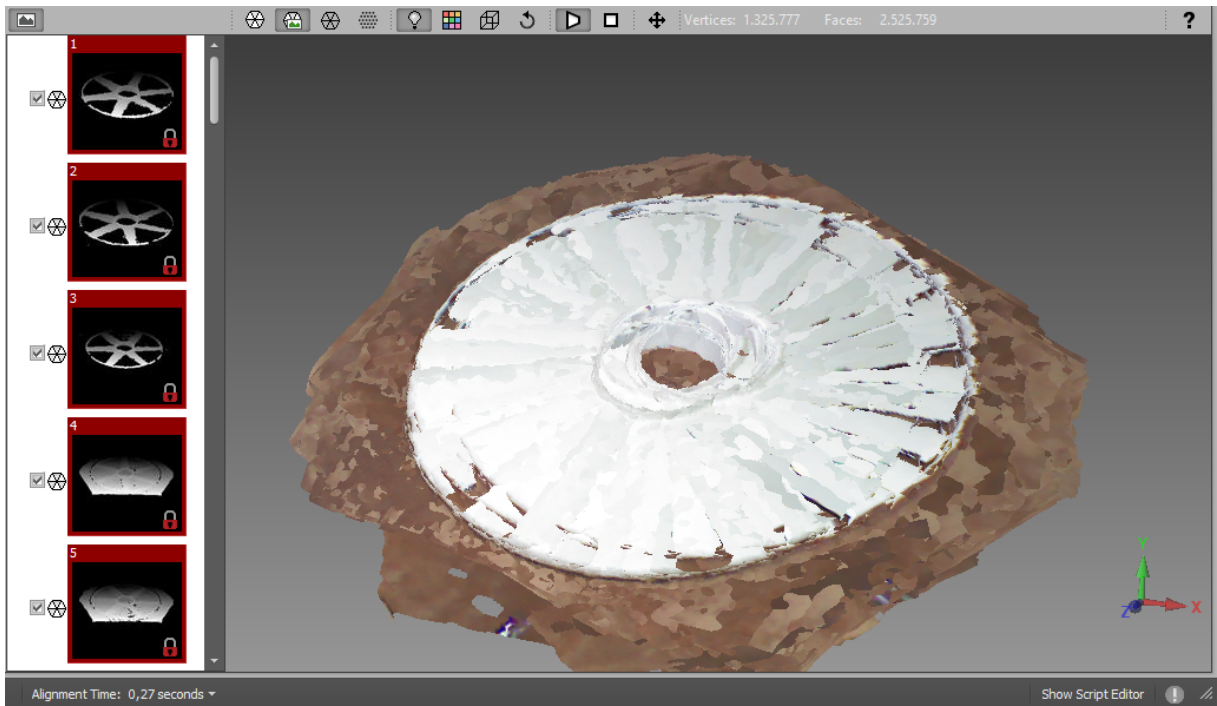


(b)

Fonte: Autor.

O problema enfrentado com essa metodologia é que nas duas funções citadas anteriormente, o *output* acabou apresentando problemas de alinhamento durante a geração e refinamento na malha, fazendo com que o arquivo STL tenha diversas descontinuidades, falha na criação da malha e resultados incondizentes com a geometria do modelo original (Figura 31), incapacitando o resultado final de ser utilizado para impressão.

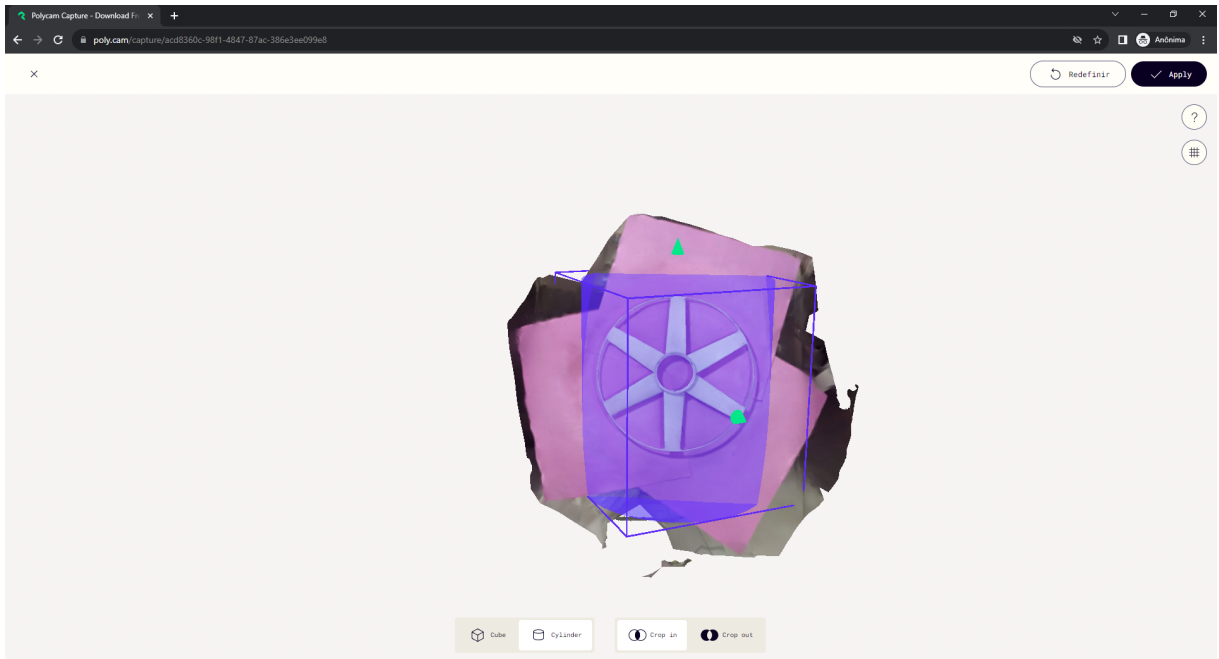
Figura 31: Problemas na orientação e alinhamento durante a geração da malha STL.



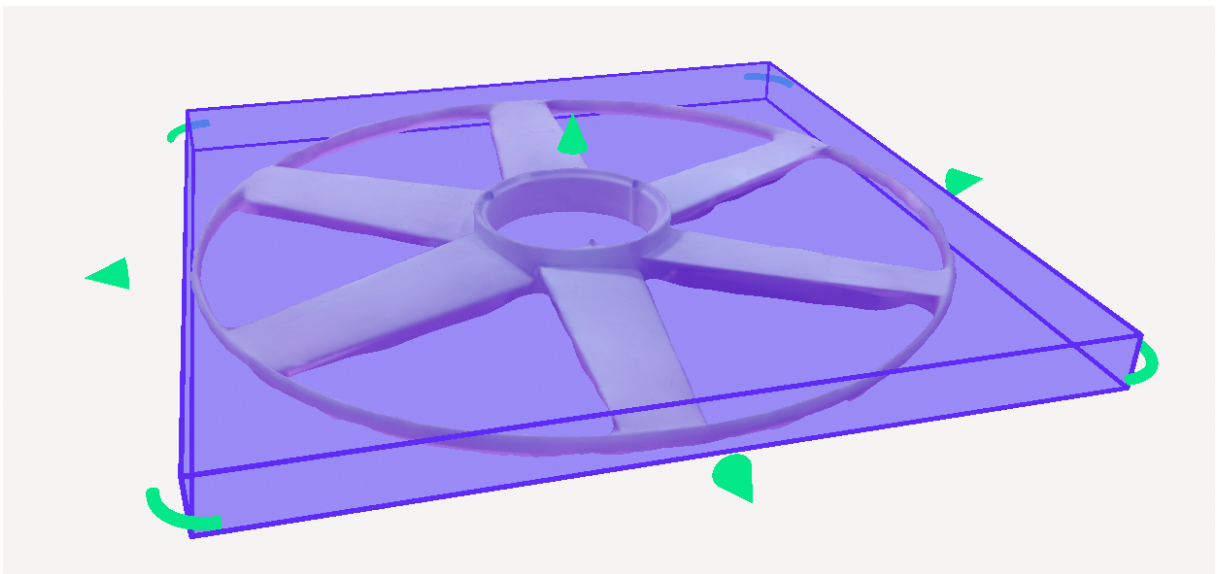
Fonte: Autor.

Na tentativa de sanar esses problemas optou-se pela utilização do software de captura Polycam, disponível nas lojas de aplicativos de smartphones. Nele a captura se dá de maneira bem parecida com o Kscan3D, contudo não é possível editar as capturas individuais, mas a função de edição do modelo final é robusta o suficiente para permitir alterações (Figura 32) no arquivo, tornando uma melhor opção mediante ao software anteriormente utilizado.

Figura 32: Ferramenta de edição do software Polycam antes (a) e depois (b).



(a)



(b)

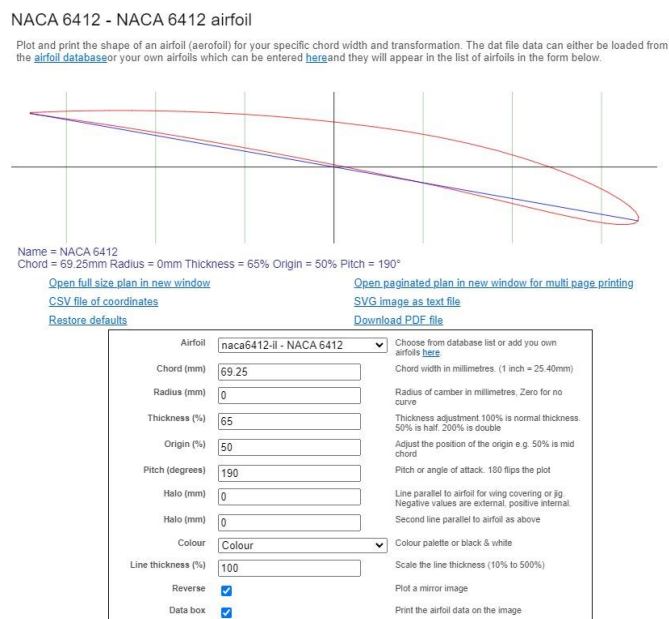
Fonte: Autor.

Mesmo com um modelo mais fidedigno aos obtidos anteriormente, a qualidade do perfil de hélice na parte inferior da pá não o tornava aceitável para a utilização no próximo passo, que seria a modelagem 3D no software Autodesk Inventor. Visto que nenhuma das alternativas de escaneamento estava apresentando os resultados desejados, optou-se pela engenharia reversa tradicional, através da medição manual da peça, utilizando um paquímetro de 150mm para a medição da grande maioria das cotas necessárias, e também foi utilizado outro paquímetro de 600mm de faixa para medir o aro externo da hélice.

A maior dificuldade imposta pela geometria da peça foi o perfil das pás visto que tratava-se de um modelo assimétrico. Para chegar em um modelo aceitável e similar ao encontrado na peça original, utilizou-se o método de coletar diversos pontos no perímetro do perfil da pá e plotar esses pontos em um plano cartesiano. Além disso, obteve-se o tamanho da corda com o intuito de ter um modelo como base para, em seguida, buscar um perfil que se assemelhe ao original.

Após realizar as medições e plotar o gráfico no excel obteve-se o perfil NACA 6412 (figura 33). em seguida utilizou-se a ferramenta “*airfoil plotter*” do site *Airfoil Tools* para buscar um perfil que se assemelha-se e que seria usado na modelagem 3D. Com os dados preenchidos a aplicação entrega a possibilidade de exportar o perfil em coordenadas cartesianas em um arquivo .csv. Com este arquivo em mãos é possível realizar a modelagem 3D da peça que será impressa.

Figura 33: Ferramenta airfoil plotter do site Airfoil Tools.

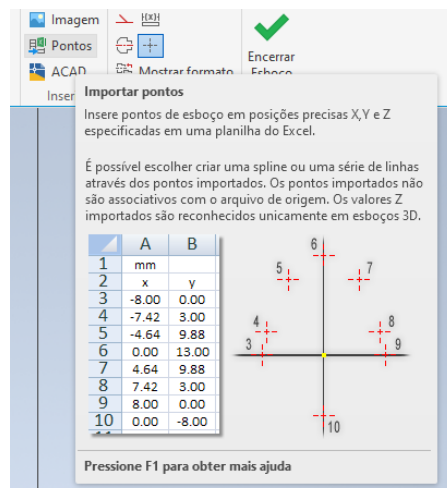


Fonte: Autor.

3.2 Modelagem 3D da hélice

Para realizar a modelagem da peça foi utilizado o software Autodesk Inventor 2024 visto que este se destaca por ter a licença estudantil e possuir todos os recursos necessários para a realização do projeto. Além disso, também se fez o uso do *Google Sheets* para importar o perfil da pá para o Inventor utilizando a ferramenta “importar pontos” (Figura 34), que lê um arquivo .csv e importa os dados como esboço 2D (Bidimensional.).

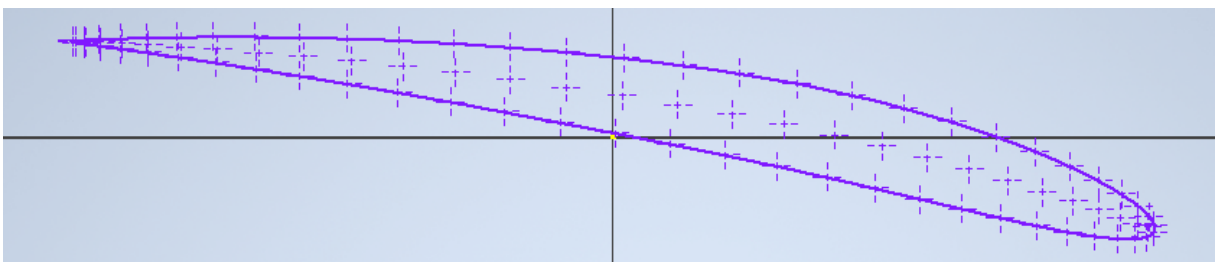
Figura 34: Ferramenta “importar pontos” do Inventor.



Fonte: Autor.

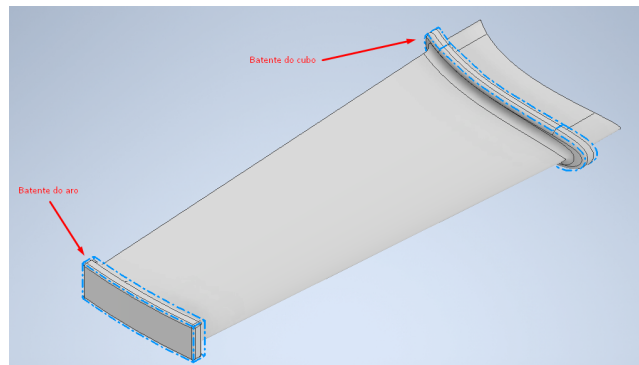
Com o esboço do perfil importado já no formato *spline* (Figura 35), foi utilizada a opção de transição de uma ponta a outra da pá. Também foram adicionados dois componentes na pá da hélice visando ajudar na montagem após a impressão da peça, são eles o batente do cubo e do aro (Figura 36). A ideia foi aumentar a superfície de contato durante a montagem no momento de colar os componentes com as demais partes da hélice.

Figura 35: Perfil importado como spline.



Fonte: Autor.

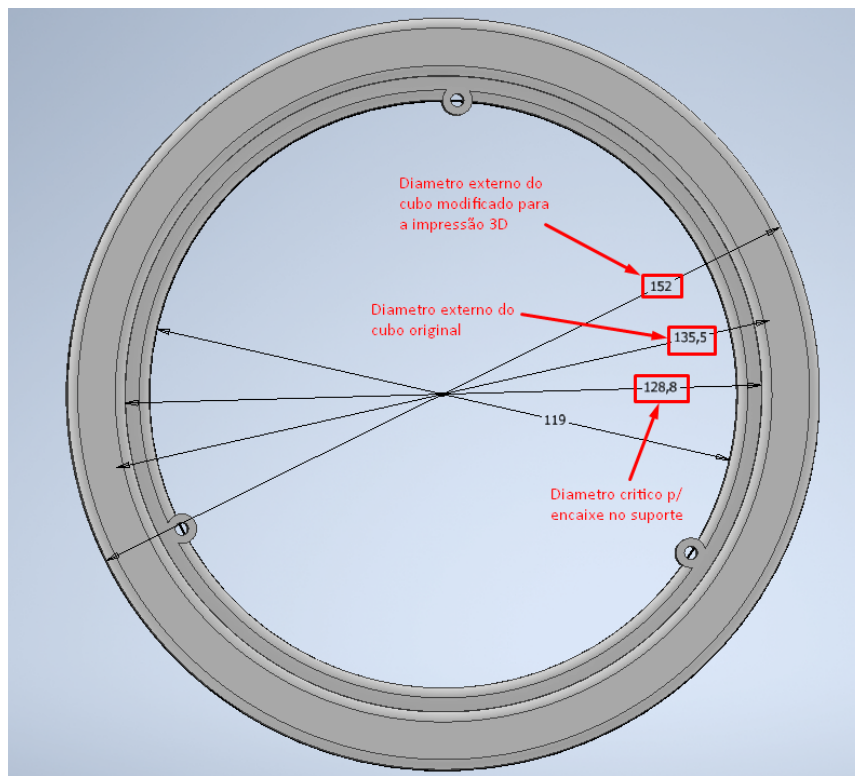
Figura 36: Componentes adicionais (batentes) da pá.



Fonte: Autor

Já para o desenho do cubo, atentou-se às cotas de encaixe entre o cubo e o suporte do túnel de vento que conecta o gerador à hélice. Sua composição e desenho são relativamente simples, a diferença principal em relação a hélice original foi o aumento do raio externo (Figura 37) por razão da baixa fidelidade dimensional oriunda do processo de manufatura aditiva (VOLPATO, 2017) além da possível fragilidade presente com uma espessura fina.

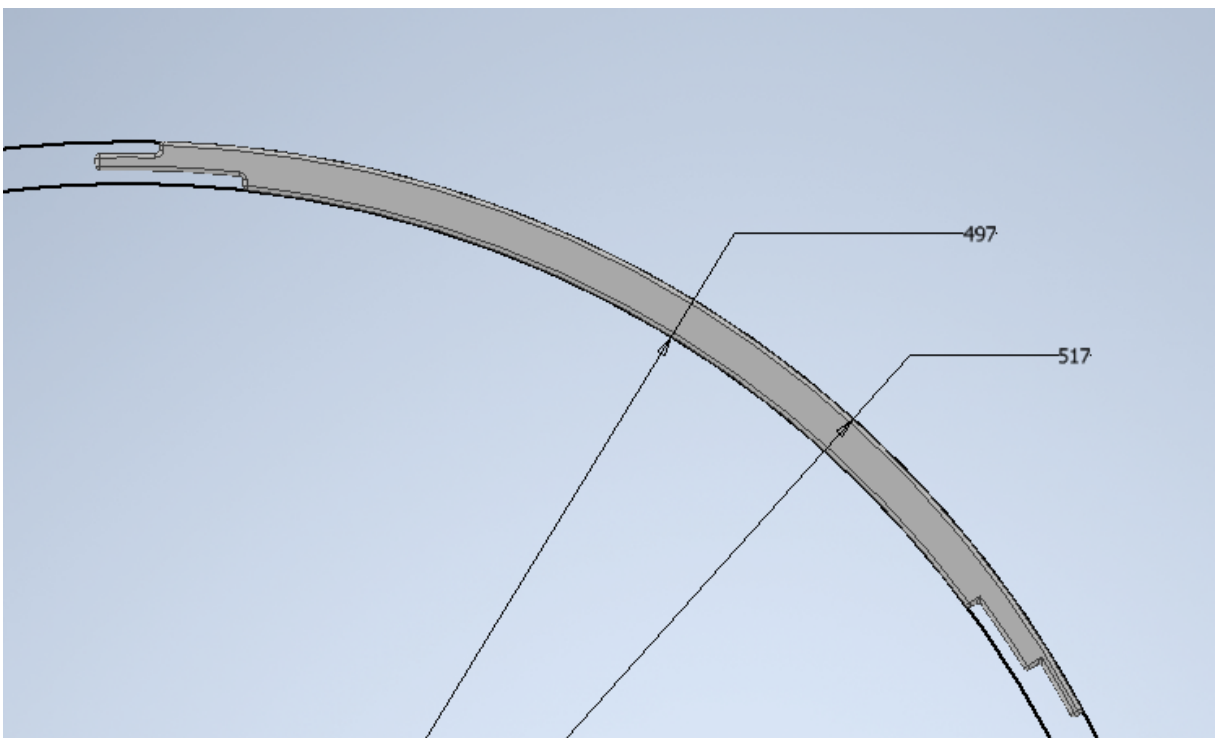
Figura 37: Cotas críticas do cubo.



Fonte: Autor

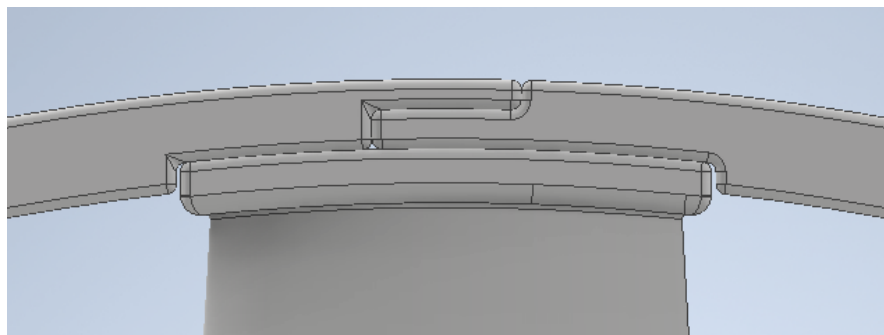
O último componente a ser modelado foi o aro, onde semelhantemente ao cubo, foi alterada a sua espessura (Figura 38) com o intuito de fortalecer a parte e evitar problemas na montagem e teste. Contudo, as dimensões do aro inviabilizaram sua impressão como um componente só devido às dimensões da mesa de impressão, necessitando seccionar o componente em seis partes para a manufatura. Além disso também foi elaborado um encaixe (Figura 39) que não exigisse tanta precisão dimensional para facilitar a junção de todos os componentes, na intenção de tornar a montagem o mais simples possível, evitando assim possíveis problemas catastróficos que levariam ao reprojeito de um ou mais componentes.

Figura 38: Alteração da espessura do aro.



Fonte: Autor.

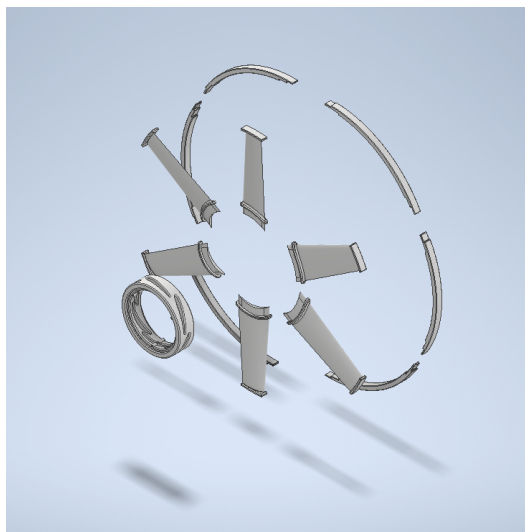
Figura 39: Junta entre o aro e as pás.



Fonte: Autor.

Com essas etapas de modelagem concluídas obteve-se a montagem do conjunto das peças formando a hélice (Figura 40). Vale ressaltar que todos os componentes sofreram arredondamentos em suas arestas, exceto onde o cubo é fixado no suporte. Isso se dá pela dificuldade do método FDM em reproduzir cantos vivos, além de estes se tornarem concentradores de tensão (SHIGLEY, 2016).

Figura 40: Vista explodida da montagem.



Fonte: Autor

3.3 Manufatura da hélice

Para a manufatura da hélice pelo método FDM, utilizou-se 2 impressoras da marca Creality, sendo elas a Ender-3 e a Ender-5, com o objetivo de diminuir o tempo de impressão, visto que o parâmetro de densidade precisa ser moderada a fim de aumentar a resistência à tração da peça (FERNANDEZ-VICENTE et al., 2016) e devido a isto o tempo de impressão aumenta proporcionalmente ao nível do *infill*³ da peça. O filamento escolhido foi o PLA. Já o software de fatiamento, suporte e parametrização de impressão utilizado foi o Ultimaker Cura 5.5.

Na impressão das pás da hélice foram utilizadas as seguintes configurações (Tabela 4) no Cura, resultando em um tempo de impressão de 10 horas e 34 minutos e 8 horas e 7 minutos para cada pá impressa na Ender-3 e na Ender-5 (Figura 41), respectivamente. Foi utilizado os valores padrões para os demais parâmetros presentes no Cura. Fabricou-se seis

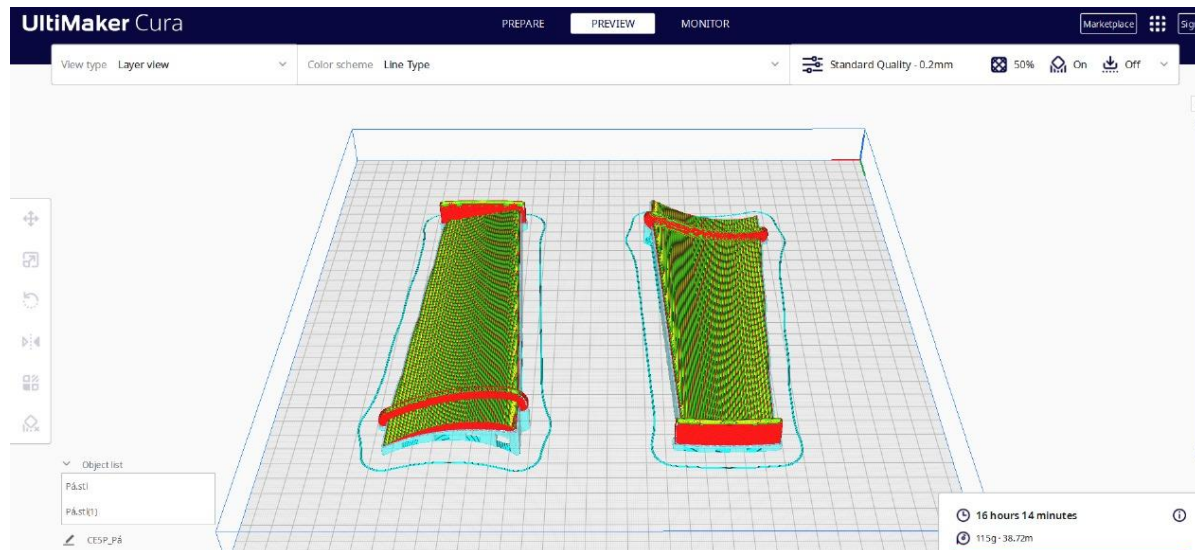
³ Infill: Expressão utilizada para se referir ao preenchimento do objeto a ser impresso por manufatura aditiva. Também pode ser entendido como densidade do objeto.

pás no total, durante o processo de impressão optou-se por alterar a densidade do suporte de 5% para 10% a fim de melhorar alguns detalhes na superfície que estava em contato com o mesmo.

Tabela 4: Parâmetros de impressão para todos os componentes.

	Ender 3	Ender 5
Altura de Camada	0,28mm	0,28mm
Contagem de parede	3	3
Camadas superiores e inferiores	4	4
Densidade de preenchimento	50%	50%
Padrão de preenchimento	Gyroid	Gyroid
Temperatura do bico de impressão	215°C	215°C
Temperatura da mesa	60°C	60°C
Velocidade	25mm/s	35mm/s
Densidade do Suporte	10%	10%

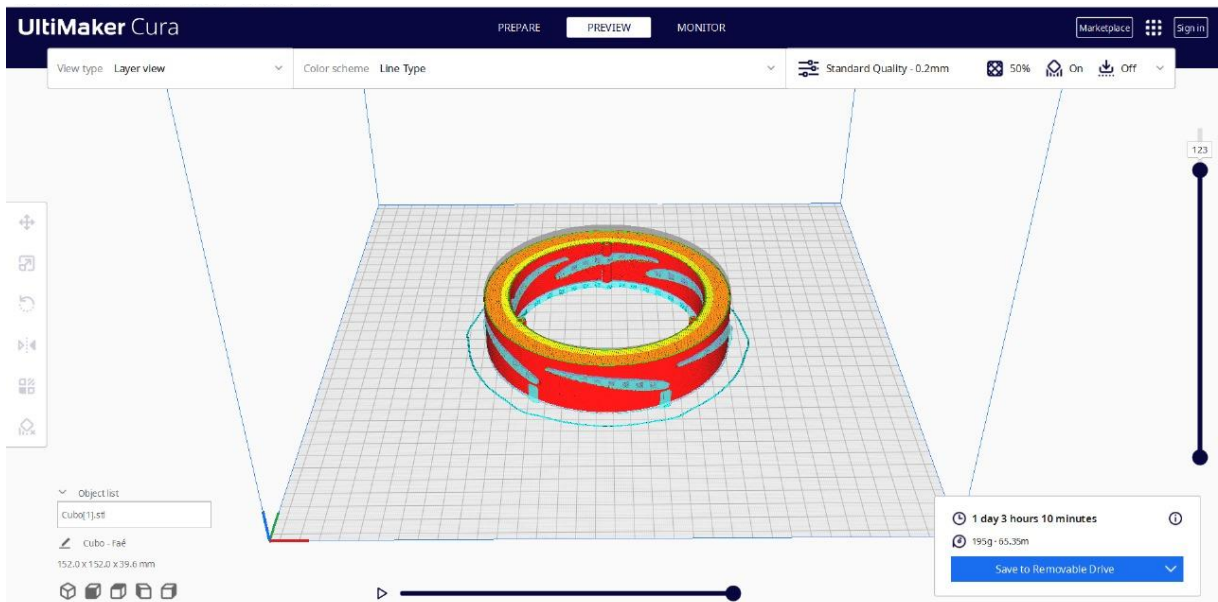
Figura 41: Fatiamento da pá da hélice.



Fonte: Autor.

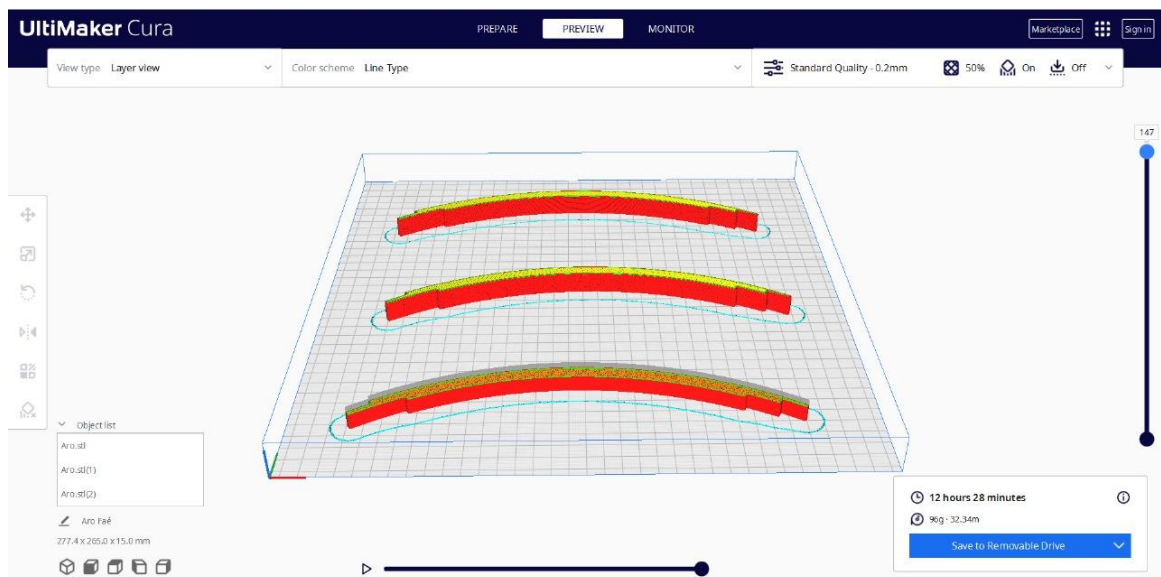
Para o cubo (Figura 42) e aro (Figura 43) foram seguidos os mesmos parâmetros de impressão da tabela 3.1. O tempo de impressão para cada componente foi de 27 horas e 10 minutos e 4 horas e 9 minutos, respectivamente. Vale ressaltar que a retirada dos suportes presentes nas peças é um fator que deve ser considerado visto sua natureza manual e trabalhosa.

Figura 42: Fatiamento do cubo da hélice.



Fonte: Autor.

Figura 43: Fatiamento do aro da hélice.

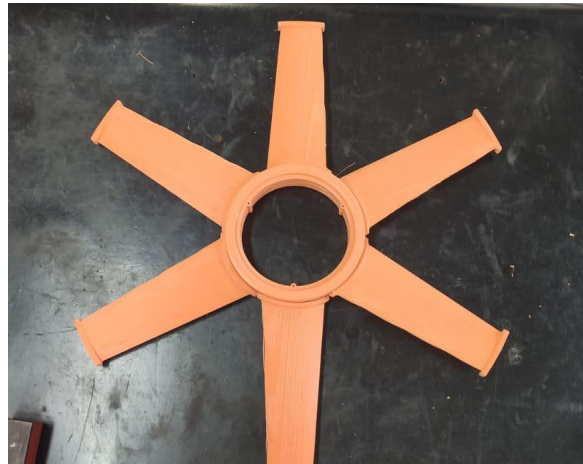


Fonte: Autor.

Após o conjunto de peças ter sido impresso se deu a montagem da hélice. Na primeira etapa da montagem uniu-se o cubo com as pás, uma vez definida a posição e checado o encaixe foi adicionado cianoacrilato fixando o conjunto cubo-pá (Figura 44). A última etapa da montagem consistiu em unir os aros com as pás para enfim completar a hélice, neste passo foi fixado o aro com o auxílio de abraçadeiras de nylon. Com o aro fixado (Figura 45) em seu devido lugar foi posto um parafuso de rosca soberba 3x10mm em cada junção do aros com a

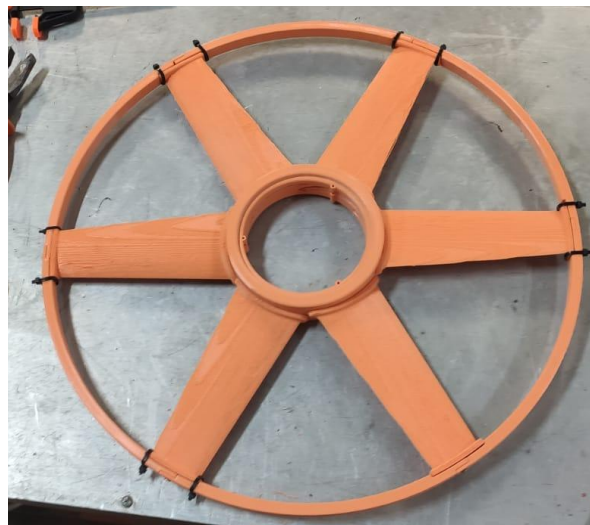
pá para garantir maior aderência entre as peças diminuindo o risco de quebras ou falhas catastróficas ao longo da bateria de testes. Antes de apertar totalmente o parafuso foi aplicado mais cianoacrilato entre as superfícies de contato na junta dos aros e também das pás.

Figura 44: Conjunto cubo-pá montado.



Fonte: Autor

Figura 45: Hélice com o aro fixado.



Fonte: Autor.

3.4 Testes comparativos entre as hélices

O objetivo é estudar o comportamento da hélice feita pela MA e ER para confirmar que sua aplicação para o fim de produção de energia eólica no túnel de vento é tão viável quanto utilizando hélices fornecidas pelo fabricante. Para a realização dos testes comparativos no túnel aerodinâmico DL WIND-B (Figura 46) foram utilizadas as duas

hélices objetos principais deste trabalho, a original e a proposta pela engenharia reversa e manufatura aditiva. Além das hélice foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Balança de Precisão Knwaagen com resolução de 0,001 g a 0,1 g;
- Tacômetro Testo 460 com resolução de 1 rpm e faixa de 100 rpm a 30000 rpm;
- Anemômetro Akron KR500 com resolução de 0,1m/s.

Figura 46: Túnel aerodinâmico DL WIND-B utilizado no projeto.



Fonte: Autor.

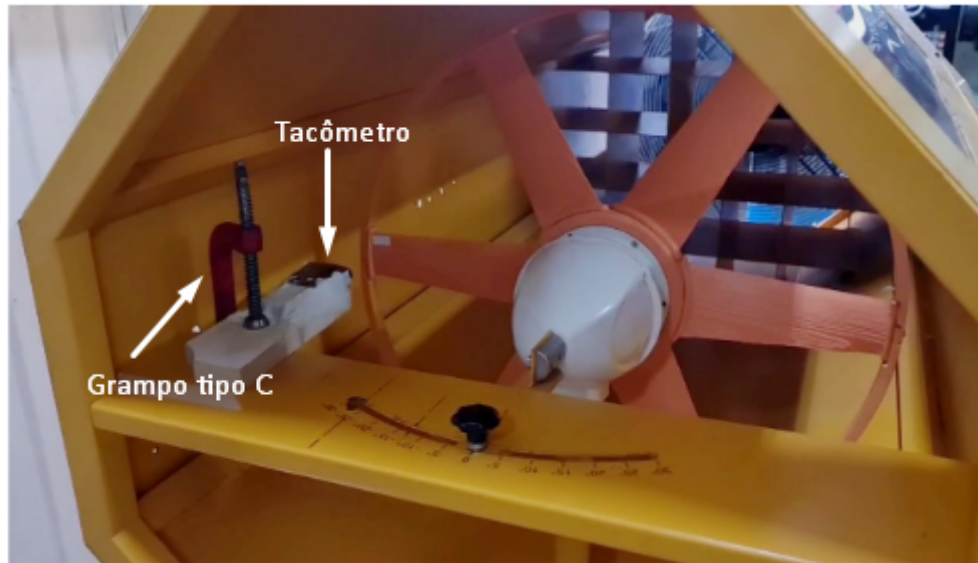
Em todos os testes realizados a velocidade do ar e o tempo de teste foram parâmetros fixos, sendo eles 7,3 m/s (Figura 47), velocidade medida no local de fixação da hélice à 100% de potência do ventilador, e 90 segundos de duração para cada um dos ensaios. O setup do experimento consistia na fixação do tacômetro em uma superfície e para garantir que não haveria deslocamento utilizou-se um Grampo Sargento Tipo C (Figura 48) para garantir que a instalação não sofreria variação alguma.

Figura 47: Medição da velocidade do ar no ponto de fixação das hélices no gerador.



Fonte: Autor.

Figura 48: Setup para medição da rotação das hélices.



Fonte: Autor.

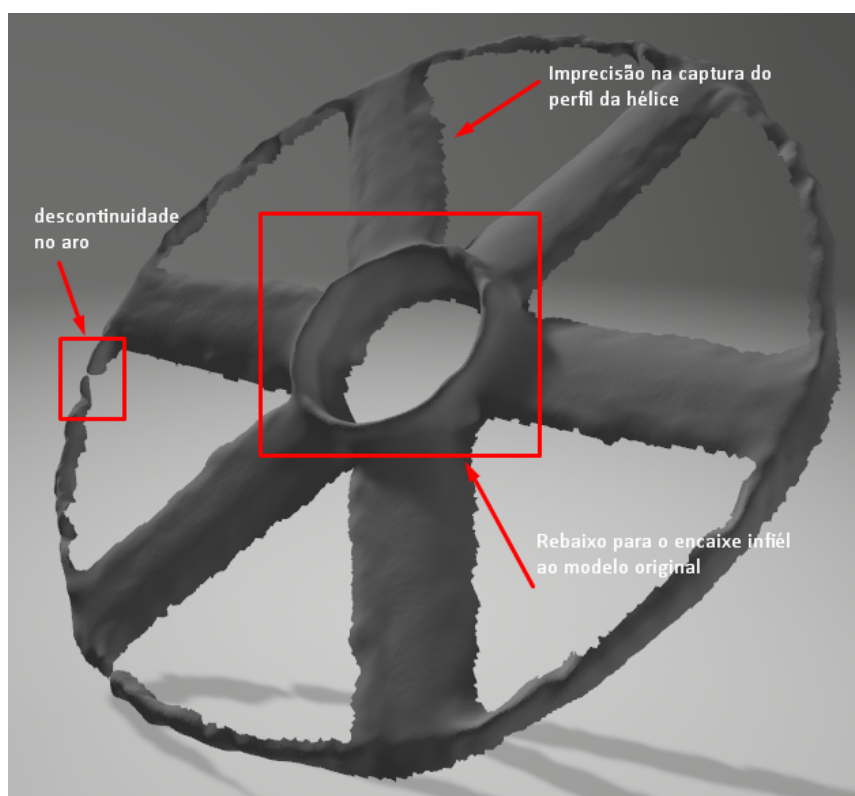
Os parâmetros a serem analisados foram escolhidos com base na facilidade da leitura e relevância funcional. Dito isso, a cada teste foi medido a tensão e corrente produzidas além da rotação máxima alcançada no final dos 90 segundos. É interessante ressaltar que como se trata de um teste comparativo, a calibração dos equipamentos não é de suma importância visto que os testes foram realizados no mesmo dia sob as mesmas circunstâncias, aplicando qualquer interferência igualmente em qualquer uma dos resultados obtidos. Além disso, o peso das hélices também foi um parâmetro comparativo no teste.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos aplicando a metodologia descrita no capítulo 3 deste trabalho é refletir sobre os percalços enfrentados e as soluções propostas. O intuito é mostrar o resultado de cada uma das etapas estarão presentes no seu respectivo tópico e inferir uma dedução lógica sobre aquilo que foi analisado.

Com base nas pesquisas feitas na revisão da literatura, o método definido para realizar a engenharia reversa havia sido o escaneamento digital pelo Kinect 360 devido ao seu baixo custo e possibilidade de capturar detalhes em geometrias relativamente complexas. Contudo os maiores desafios encontrados nesta etapa foram tanto a captura ideal do perfil de pá da hélice como os detalhes mais minuciosos como rebaixos no cubo e a fina geometria do aro externo (Figura 49). Nem mesmo a mudança de software do Kscan3D, que utiliza o kinect como ferramenta de captura, para o Polycam, que utiliza a câmera do smartphone, foram suficientes para resolver estes problemas de forma aceitável.

Figura 49: Falha no detalhamento do sólido 3D escaneado.



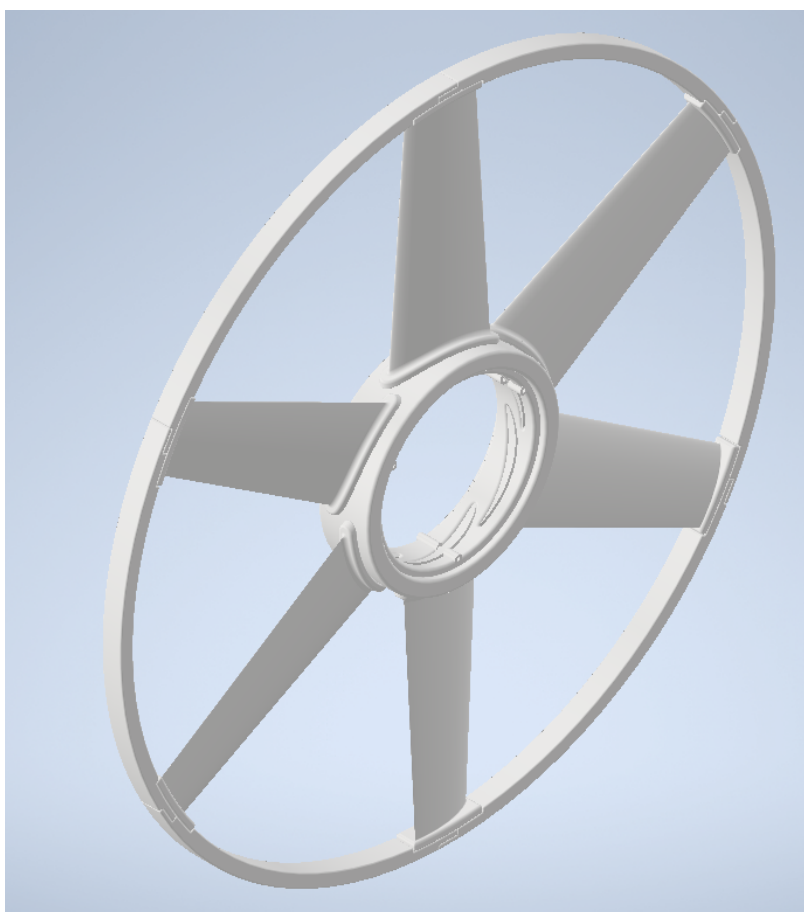
Fonte: Autor.

Acredita-se que mesmo que estes erros foram ocasionados pela má qualidade de luz e posicionamento da peça, pela baixa resolução disponível do Kinect e também pelo

sistema de alinhamento e pós processamento feitos pelos softwares citados. Contudo é difícil definir a causa principal devido ao elevado número de fatores envolvidos no processo.

A saída para manter o desenvolvimento do projeto foi utilizar outro método para realizar a engenharia reversa, visto que as outras opções que envolveram o escaneamento não entregaram o resultado desejado. Para isso optou-se pela medição manual das cotas da hélice e o auxílio de sites para buscar o perfil aerodinâmico ideal da pá. Com essa metodologia aplicada, o resultado da modelagem obtida no Inventor foi condizente com o esperado, a hélice (Figura 50) devidamente modificada para contemplar as limitações de montagem e fabricação do processo de manufatura aditiva por FDM.

Figura 50: Modelagem da Hélice na versão final.



Fonte: Autor

Ao fim do processo de modelagem, foi possível evoluir o projeto para a montagem do protótipo que serviu para os testes comparativos. Durante a impressão das peças, um dos aros teve um leve defeito de impressão em uma de suas extremidades (figura 51), que a princípio gerou preocupação no fator de balanceamento da hélice, contudo, através de testes manuais após a montagem, aferiu-se que a hélice não estava desbalanceada.

Figura 51: Aro com defeito de impressão.



Fonte: Autor.

Como resultado da etapa de impressão, obteve-se a hélice montada (Figura 52) e pronta para a realização dos testes. Para os resultados dos experimentos realizados com a hélice já impressa e montada, o primeiro teste foi a pesagem de ambas as hélices (Figura 53 e Figura 54), obtendo-se o valor de 597,2g para a hélice impressa e 655g para a hélice de controle.

Figura 52: Hélice Montada.



Fonte: Autor.

Figura 53: Massa da Hélice Impressa.



Fonte: Autor.

Figura 54: Massa da hélice de controle.



Fonte: Autor

Após a medição da massa de cada uma das hélices, dava-se início ao processo de testes no túnel de vento. Houve um teste piloto a fim de garantir que o desvio padrão gerado nos experimentos não iria afetar o resultado, nele foram feitas baterias de 10 testes em cada hélice. Uma vez constatado que os coeficientes de variação (Equação 4.1) dos parâmetros de tensão, corrente e rotação máxima eram todos menores que 15%, confirmou-se a homogeneidade dos dados.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} * 100 \quad (4.1)$$

Sendo:

s = desvio padrão;

\bar{x} = média dos dados;

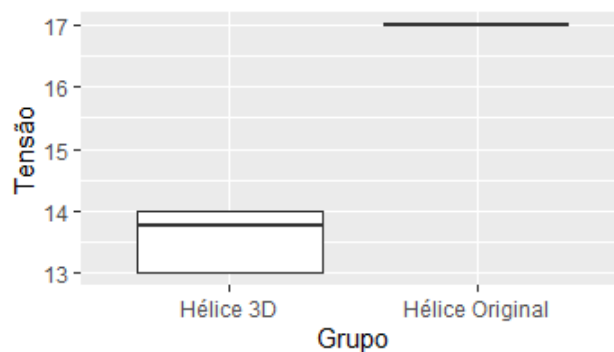
CV = coeficiente de variação [%];

Com essa confirmação, foram realizados os experimentos entre as duas hélices, sendo realizados 10 testes para cada um dos grupos, sendo eles o grupo original, referindo-se à hélice de controle, e o grupo 3D, referindo-se a hélice impressa. Após a bateria de testes obteve-se os seguintes resultados para cada um dos parâmetros analisados (Tabela 5 e Figura 55, 56 e 57).

Tabela 5: Medições dos parâmetros para cada hélice analisada.

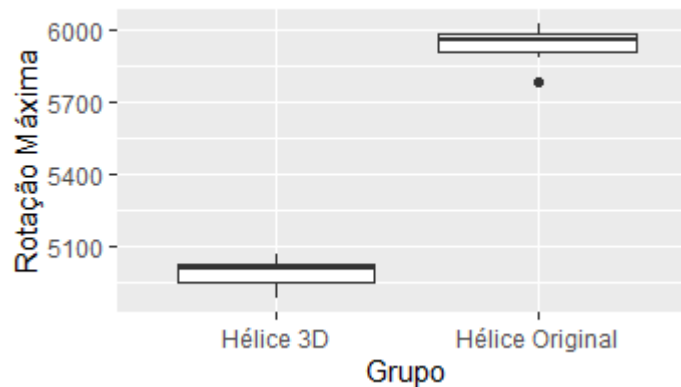
Tensão (V)			Corrente (A)			Rotação Máxima(RPM)		
n	Original	Impressa	n	Original	Impressa	n	Original	Impressa
1	17	13	1	0,25	0,2	1	5961	4882
2	17	13	2	0,25	0,25	2	6025	5005
3	17	13	3	0,25	0,25	3	5784	4937
4	17	13	4	0,25	0,25	4	5962	4931
5	17	13,5	5	0,25	0,25	5	5980	5026
6	17	14	6	0,25	0,3	6	5920	5001
7	17	14	7	0,25	0,3	7	6012	5032
8	17	14	8	0,25	0,3	8	5886	5021
9	17	14	9	0,25	0,3	9	5977	5064
10	17	14	10	0,25	0,3	10	5907	5016
Média	17	13,75	Média	0,25	0,275	Média	5961,5	5010,5

Figura 55: Gráfico boxplot do comportamento de tensão por cada tipo de hélice.



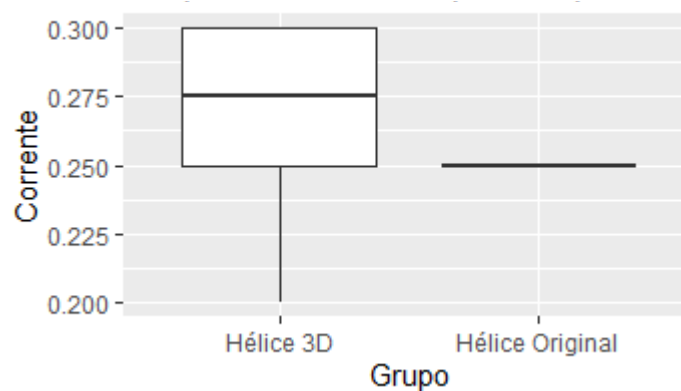
Fonte: Autor.

Figura 56: Gráfico boxplot do comportamento de rotação máxima por cada tipo de hélice.



Fonte: Autor.

Figura 57: Gráfico boxplot do comportamento de corrente por cada tipo de hélice.



Fonte: Autor.

Com a análise preliminar dos resultados já foi possível ver a diferença entre as médias dos valores de tensão e rotação máxima aos 90 segundos de operação. Contudo optou-se por utilizar o software Rstudio com o propósito de fazer testes estatísticos com esses dados para comparar as médias de forma relevante e embasada.

Foi realizada uma análise estatística dos dados experimentais obtidos a partir de testes com as duas hélices. O objetivo era comparar as performances das duas hélices em termos de Tensão, Corrente e Rotação Máxima alcançados. Para isso, foram utilizados o Teste de Levene, o Teste t de Student e o Teste t de Welch.

Inicialmente, o Teste de Levene foi aplicado para verificar a homogeneidade das variâncias entre os grupos. Este teste é uma pré-condição para a aplicação do Teste t de Student ou o Teste t de Welch, visto que se a hipótese nula de homogeneidade for aceita, deve-se fazer o t de Student, e caso contrário recomenda-se fazer o t de Welch. O Teste de

Levene foi realizado para cada um dos parâmetros analisados (Tensão, Corrente e Rotação Máxima). Os resultados indicaram que as variâncias eram iguais para o parâmetro Rotação Máxima, mas não para Tensão e Corrente (Tabela 6).

Tabela 6: Teste de Levene para Tensão, Corrente e Rotação Máxima.

	Tensão	Corrente	Rotação Máxima
Tipo =	Teste de Levene	Teste de Levene	Teste de Levene
Grau de Liberdade =	1/18	1/18	1/18
valor f do teste =	30,375	36	0,2026
Valor p do teste =	3,11E-05	1,13E-05	0,658

O grau de liberdade encontrado foi 1 para o grupo e 18 graus de liberdade para o erro. O valor F do teste sugere que as variâncias são diferentes, ou seja, quanto maior o valor, maior a diferença das variâncias. Já o valor P é o utilizado para decidir se deve rejeitar a hipótese nula uma vez que o valor for menor que o nível de significância comum de 0,05, o que ocorre no caso da tensão e corrente. Com esta análise é possível aferir que tanto a tensão quanto a corrente serão alvos do Teste t de Welch devido a baixa homogeneidade das variâncias, já a rotação máxima será objeto de estudo através do Teste t de Student.

O Teste t de Student (Tabela 7) para Rotação Máxima revelou uma diferença significativa entre as médias dos dois grupos. Isso sugere que a hélice original e a hélice impressa em 3D têm desempenhos diferentes em termos de Rotação Máxima. Os Testes t de Welch (Tabela 7) para Tensão também revelaram diferenças significativas entre as médias dos dois grupos (quando p-value for menor que 0,05). Isso indica que a hélice original e a hélice impressa em 3D têm desempenhos diferentes em termos de tensão. Contudo para a corrente gerada, o Teste t de Welch apontou que não há diferença significativa (quando p-value é maior que 0,05) entre as médias dos dois grupos de hélice, sendo este o único parâmetro em que a hipótese nula foi aceita.

Além disso, vale ressaltar que durante os testes, a hélice reproduzida aparentou um batimento significativo, fato que pode ocasionar na alteração do ângulo em que as pás se encontram com o vento e criando mais resistência ao vento (SOLTANI; MARZABADI, 2007).

Tabela 7: Testes de T de Welch e T de Student para análise das médias entre os grupos.

	Tensão	Corrente	Rotação Máxima
Tipo =	T de Welch	T de Welch	T de Student
t =	-21,942	1,8091	33,245
Grau de Liberdade =	9	9	18
p-value(>0,05) =	4,00E-09	0,1039	2,20E-16
Hipótese nula =	rejeitada	aceita	rejeitada

Analisando os resultados dos testes, elenca-se algumas possibilidades para sanar a dúvida de o porque a hélice impressa não alcançou o resultado da hélice de controle:

- Perfil aerodinâmico das pás: Devido às limitações enfrentadas referente ao método de engenharia reversa, não foi possível capturar com exatidão o perfil da pá, havendo diferença entre as duas hélices, fazendo com que o seu escoamento sofra alteração.
- Alteração para a fabricação: Se fez necessário que a hélice fosse seccionada, e por isso algumas geometrias foram alteradas para garantir as propriedades mecânicas ou devido às dificuldades impostas no momento da impressão. A espessura do aro ou o diâmetro do cubo, dimensões originalmente pequenas que muito provavelmente apresentariam falhas durante a impressão, foram alteradas, tornando o aro mais espesso e o diâmetro externo do cubo maior. Com isso, o cubo foi aumentado mas o diâmetro interno do aro foi mantido o mesmo, levando a diminuição da superfície de contato da hélice com o vento e diminuindo sua captura de energia, e a maior espessura do aro aumentou o arrasto produzido pela hélice, diminuindo sua rotação.
- Altas tolerâncias: Como o processo de fabricação por FDM tende a não possuir uma precisão boa no dimensionamento de seus produtos finais, exige-se que as tolerâncias sejam maiores durante o processo de modelagem, a fim de evitar interferência indesejada nos encaixes durante a montagem. Contudo isso também pode gerar folgas que ocasionam em diferença na rigidez estrutural entre as hélices. Essa hipótese fica aparente no momento que o batimento na hélice impressa foi detectado. Para sanar esse problema seria necessário novos meios de montagem ou uma impressão do conjunto inteiro, sem seccionar em partes diferentes.
- Acabamento superficial precário (Figura 58): Uma das limitações do processo de manufatura aditiva é a qualidade do acabamento superficial, principalmente em superfícies que sofrem a ação da gravidade. Toda propriedade mecânica ao longo do

eixo z é inferior ao plano x-y devido a natureza do processo (VOLPATO, 2017). Além disso, a superfície áspera aumenta o arrasto aerodinâmico e diminui a sustentação, o que resulta em uma diminuição na eficiência da turbina eólica (MASOUD DARBANDI et al., 2014).

Figura 58: Acabamento superficial da hélice.



Fonte: Autor.

- A relevância do fator peso na análise: Quanto mais leve é uma hélice, mais rápido ela tende a sair da inércia, contudo, a hélice mais leve nesse experimento foi a que alcançou a menor rotação máxima, levando a crer que o fator peso não influenciou o suficiente em comparação ao acabamento superficial, alteração do perfil aerodinâmico e dimensões alteradas em relação a hélice de controle.
- Ângulo de ataque da pá: O ângulo de ataque exato da hélice original é desconhecido, logo para definir o ângulo da hélice impressa na modelagem 3D foi necessário realizar uma análise visual a fim de obter uma angulação semelhante à original. Contudo sua semelhança não tem um nível de precisão ideal.

5 CONCLUSÃO

Ao longo do processo de desenvolvimento deste trabalho, ficou claro alguns percalços envolvidos. Contudo o embasamento proveniente da revisão da literatura ajudou em momentos chaves para a sequência do trabalho, bem como no cumprimento dos objetivos estabelecidos. Esses fatores fazem deste trabalho uma fonte relevante de informação para futuros projetos envolvendo as tecnologias de engenharia reversa, manufatura aditiva e até mesmo na modelagem de hélices para a geração de energia eólica.

O objetivo geral do trabalho consiste em analisar o desempenho eólico da hélice reproduzida através dos métodos de engenharia reversa e manufatura aditiva, além de comparar os resultados de desempenho com a hélice original em um túnel de vento. Dito isso, o trabalho acabou cumprindo este requisito uma vez que os testes foram realizados e a análise estatística mostrou dados relevantes para fomentar as discussões a seguir.

Para chegar na realização do objetivo geral, foi necessário o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- Criação de um projeto CAD da hélice utilizando o método de engenharia reversa.
- Produzir a hélice utilizando o método FDM como manufatura aditiva.
- Realizar os testes de desempenho tanto da hélice impressa quanto da original.
- Analisar o resultado e evidenciar se houve ou não diferença nos resultados

Analisando todos os itens que compõem a lista de objetivos secundários, fica evidente que todos os requisitos foram cumpridos. Como produto desse cumprimento, foram obtidos os resultados do trabalho, evidenciados no capítulo anterior.

A hipótese levantada ao início do projeto era de que o desempenho de ambas hélices seriam semelhantes, provando que o *framework* de engenharia reversa e manufatura aditiva é viável para realizar novos testes que visam otimizar o desempenho das hélices nos parâmetros analisados. Contudo para essa hipótese ser confirmada, a diferença nos parâmetros analisados não poderia ter significância estatística, fato esse que foi refutado pelas análises feitas no Rstudio. Com isso, fica claro que houve complicadores que inviabilizaram a hélice reproduzida de performar no mesmo nível da hélice original e rejeitaram a hipótese inicial.

As hipóteses levantadas no capítulo 4 em relação a diferença no desempenho das hélices tem origem na diferença dimensional entre elas. Essa diferença tem duas causas que foram observadas no trabalho. A primeira delas foi a imprecisão dos métodos de engenharia reversa utilizados, tanto o primeiro método, de escaneamento 3D, quanto o segundo, da

engenharia reversa convencional, não apresentaram os resultados esperados. A segunda é a dificuldade imposta pela manufatura aditiva. No processo de manufatura aditiva, a tolerância dimensional, precisão de pequenos detalhes e adaptações para montagem são grandes limitadores para peças com geometrias complexas como a hélice estudada.

Contudo, as etapas de manufatura da hélice e testes comparativos tiveram êxito no que se propunham. A hélice impressa pela manufatura aditiva não apresentou problemas estruturais que poderiam causar uma falha catastrófica, grande preocupação ao longo do processo de modelagem, e ao longo dos testes ela não apresentou nenhum dano aparente a sua estrutura. No teste comparativo, o setup utilizado e os parâmetros de medição escolhidos demonstraram onde ocorre a diferença de desempenho entre as hélices, formando assim um padrão de testes que pode ser utilizado em trabalhos futuros. As hipóteses que foram apresentadas também têm relevância no sentido de incentivar novas pesquisas para diferentes métodos de engenharia reversa, diminuindo as diferenças entre ambas as hélices. Os parâmetros de impressão também se provaram como uma boa escolha visto que, mesmo com a adição de mais material na hélice impressa, a hélice original estava mais pesada em relação a outra.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, algumas sugestões foram elaboradas a seguir:

- Utilizar outras ferramentas de engenharia reversa para a captura do modelo de maneira satisfatória e analisar o desempenho da hélice gerada;
- Modificar a modelagem 3D buscando otimizar a aerodinâmica da hélice e analisar seus efeitos no desempenho apresentado;
- Analisar com mais profundidade os parâmetros que afetam o desempenho de uma hélice na geração de energia eólica no túnel de vento DL WIND-B.
- Realizar a análise dimensional diminuindo a escala da hélice, a fim de manufaturar uma hélice por 3DP (Impressão 3D) inteira, sem dividi-la em partes.
- Realizar testes com cada uma das alterações dimensionais feitas neste trabalho a fim de identificar qual mudança tem mais influência nos resultados dos testes.

7 REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO/ASTM 52900:2018** - Manufatura Aditiva Princípios Gerais Terminologia. - ABNT/CEE-261 Manufatura Aditiva, Rio de Janeiro RJ, Brasil, 2018.

ABREU, S. **Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo**. Dissertação de Mestrado—Universidade de Porto, 2015.

AHMED, N. A. **Wind tunnel - designs and their diverse engineering applications**. Rijeka, Croatia: Intech, 2014.

ANDERSON, J. **Fundamentals of Aerodynamics**. 6 e d. ed. 2 Penn Plaza, New York, NY 10121: McGraw-Hil, 2017. p. 1130.

BARLOW, J. B. et al. **Low-Speed Wind Tunnel Testing**. [s.l: s.n.].

BUDYNAS, Richard; NISBETT, J K. **Elementos de máquinas de Shigley**. Grupo A, 2016. E-book. ISBN 9788580555554. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555554/>. Acesso em: 25 nov. 2023.

Capacidade de geração de energia eólica deve bater recorde neste ano. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-04/capacidade-de-geracao-de-energia-eolica-deve-bater-recorde-neste-ano#:~:text=De%20acordo%20com%20a%20Associa%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 8 jun. 2023.

CARDOSO, F. **Caracterização experimental de túneis de vento para a análise de potencial eólico**. Dissertação—Universidade Federal de Goiás: [s.n.].

CLEMENTE, G.; JUNIOR, L. **CÁLCULO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL EM TÚNEL DE VENTO COM AEROGERADOR**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 3, n. 12, p. 132–142, 3 out. 2020.

FERNANDEZ-VICENTE, M. et al. **Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing**. 3D Printing and Additive Manufacturing, v. 3, n. 3, p. 183–192, set. 2016.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. New York: Springer, 2016.

GREEN, J.; QUEST, J. **A short history of the European Transonic Wind Tunnel ETW**. Progress in Aerospace Sciences, v. 47, n. 5, p. 319–368, jul. 2011.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentos da Moderna Manufatura - Vol. 2**, 5ª edição. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2017. E-book. ISBN 9788521634102. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634102/>. Acesso em: 17 mai. 2023

KHOSHELHAM, K., & ELBERINK, S. O. (2012). **Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications**. Sensors, 12(2), 1437–1454.

MASOUD DARBANDI et al. **Evaluating the effect of blade surface roughness in megawatt wind turbine performance using analytical and numerical approaches**. 1 jan. 2014.

MORAES, A. **ANÁLISE DE AUMENTO DE DESEMPENHO AERODINÂMICO DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL POR MEIO DE GUIA DE BOCAIS CONVERGENTES OMNIDIRECIONAL**. Dissertação — Instituto Federal do Espírito Santo, 2018

PINTO, Milton. **Fundamentos de Energia Eólica**. Grupo GEN, 2012. E-book. ISBN 978-85-216-2193-5. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2193-5/>. Acesso em: 06 jun. 2023.

RODRIGUES, L. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho**, 2014.

SINGH, M.; SINGH, N.; KUMAR, S. **Review of Design and Construction of an Open Circuit Low Speed Wind Tunnel**. v. 13, n. 5, 2 jul. 2013.

SIMÃO, Isabelle T. **Engenharia reversa e prototipagem**. Editora Saraiva, 2021. E-book. ISBN 9786589965398. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786589965398/>. Acesso em: 16 jun. 2023.

SOLTANI, M. R.; MARZABADI, F. R. **Effect of plunging amplitude on the performance of a wind turbine blade section.** *The Aeronautical Journal*, v. 111, n. 1123, p. 571–587, set. 2007.

TIBURCIO, J. JÚNIOR, M. **TÚNEL DE VENTO: PROJETO, CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO.** Dissertação—INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO: [s.n.].

VÁRADY, T., MARTIN, R. R., & Cox, J. (1997). **Reverse engineering of geometric models—an introduction.** *Computer-Aided Design*, 29(4), 255–268.

VIAN, Ângelo. **Energia Eólica Fundamentos Tecnologia e Aplicações.** Editora Blucher, 2021. E-book. ISBN 9786555500585. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555500585/>. Acesso em: 06 jun. 2023.

VINESH RAJA; FERNANDES, K. J. **Reverse engineering: an industrial perspective.** London: Springer, 2008.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva; Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D.** Editora Blucher, 2017. E-book. ISBN 9788521211518. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211518/>. Acesso em: 15 mai. 2023.

WANG, W. **Reverse Engineering.** [s.l.] CRC Press, 2010.

YARAMASU, V. et al. **High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies.** *Proceedings of the IEEE*, v. 103, n. 5, p. 740–788, maio 2015.