



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Pedro Teixeira Brito

**PFC - Desenvolvimento de um sistema de inspeção geométrica tridimensional  
de baixo custo**

Florianópolis  
2024

Pedro Teixeira Brito

**PFC - Desenvolvimento de um sistema de inspeção geométrica tridimensional  
de baixo custo**

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Adriano Fagali de Souza, Dr.

Florianópolis

2024

### Ficha de identificação da obra

A ficha de identificação é elaborada pelo próprio autor.

Orientações em:

<http://portalbu.ufsc.br/ficha>

Pedro Teixeira Brito

**PFC - Desenvolvimento de um sistema de inspeção geométrica tridimensional  
de baixo custo**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 19 de julho de 2024.

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira , Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente

Adriano Fagali de Souza

Data: 19/07/2024 13:59:34-0300

CPF: \*\*\*.740.228-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Adriano Fagali de Souza, Dr.  
Orientador/Supervisor  
UFSC/CTC/EMC/GPCAM

Prof. João Paulo Zomer Machado, Me.  
Avaliador  
UFSC/LIAE

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.  
Presidente da Banca  
UFSC/CTC/DAS

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em todas as fases da minha vida.

À minha namorada, pelo amor e pelo incentivo constante durante toda a graduação.

Ao meu grupo de amigos, o AZCD, pela amizade e pelas risadas ao longo desses anos.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho só foi possível graças ao apoio e contribuição de muitas pessoas e instituições, às quais expresso minha sincera gratidão.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Adriano Fagali de Souza, pela orientação, paciência e oportunidade de realizar o projeto. Também agradeço aos colegas do grupo de pesquisa GPCAM pelo suporte e discussões técnicas.

Minha gratidão à UFSC pela oportunidade e pelos recursos disponibilizados, essenciais para a realização deste projeto. Agradeço ao corpo docente do curso de Engenharia de Controle e Automação pelas aulas e orientações ao longo da minha formação. Aos colegas do curso, obrigado pela colaboração e pelas trocas de conhecimento.

Aos meus familiares e amigos, meu profundo agradecimento pelo apoio emocional, compreensão e encorajamento durante todos esses anos. Sem vocês, não teria superado os desafios e concluído esta etapa.

Um agradecimento especial à minha namorada, que me acompanhou durante toda a graduação, e ao meu grupo de amigos próximos, o AZCD.

A todos vocês, muito obrigado.

## DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 19 de julho de 2024.

Na condição de representante do GPCAM - Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador na qual o presente trabalho foi realizado, declaro não haver ressalvas quanto ao aspecto de sigilo ou propriedade intelectual sobre as informações contidas neste documento, que impeçam a sua publicação por parte da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para acesso pelo público em geral, incluindo a sua disponibilização *online* no Repositório Institucional da Biblioteca Universitária da UFSC. Além disso, declaro ciência de que o autor, na condição de estudante da UFSC, é obrigado a depositar este documento, por se tratar de um Trabalho de Conclusão de Curso, no referido Repositório Institucional, em atendimento à Resolução Normativa n° 126/2019/CUn.

Por estar de acordo com esses termos, subscrevo-me abaixo.



Documento assinado digitalmente  
**Adriano Fagali de Souza**  
Data: 19/07/2024 13:58:41-0300  
CPF: \*\*\*.740.228-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Adriano Fagali de Souza, Dr.

GPCAM - Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador

## RESUMO

A manufatura moderna enfrenta desafios significativos relacionados à inspeção de peças complexas. Este trabalho expõe o desenvolvimento de um sistema de inspeção de geometrias tridimensionais utilizando técnicas de fotogrametria para capturar, processar e analisar modelos tridimensionais de peças manufaturadas, com foco em componentes de turbinas. A metodologia inclui a partir da captura de imagens com uma câmera, o processamento dessas imagens no software Meshroom para gerar nuvens de pontos e malhas 3D, e a inspeção final utilizando o software CAD. Uma aplicação na linguagem C# foi desenvolvida para gerenciar os modelos tridimensionais, facilitando o upload, armazenamento e visualização na nuvem através da infraestrutura do Google Cloud. O sistema demonstrou ser eficaz na detecção de variações dimensionais mínimas, assegurando que as peças atendam aos rigorosos padrões de qualidade exigidos na indústria. Os resultados obtidos indicam que o sistema proposto pode contribuir significativamente para a área de inspeção de manufatura, oferecendo uma solução e precisa para a garantia da qualidade de peças complexa.

**Palavras-chave:** Inspeção de Manufatura. Fotogrametria. Reconstrução 3D.

## ABSTRACT

Modern manufacturing faces significant challenges related to the inspection of complex parts. This work presents the development of a three-dimensional geometry inspection system using photogrammetry techniques to capture, process, and analyze 3D models of manufactured parts, focusing on turbine components. The methodology includes image capture with a camera, processing these images in Meshroom software to generate point clouds and 3D meshes, and final inspection using CAD software. An application in C was developed to manage the 3D models, facilitating upload, storage, and visualization in the cloud through Google Cloud infrastructure. The system proved effective in detecting minimal dimensional variations, ensuring that the parts meet the stringent quality standards required in the industry. The results indicate that the proposed system can significantly contribute to the field of manufacturing inspection, offering a robust and precise solution for ensuring the quality of complex parts.

**Keywords:** Manufacturing Inspection. Photogrammetry. 3D Reconstruction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Possíveis fontes de erro no processo de fabricação. . . . .	20
Figura 2 – Fluxo de Reconstrução tridimensional(Fotogrametria). . . . .	22
Figura 3 – Fatores de reconstrução. . . . .	23
Figura 4 – Triangulação de Multi-Imagens. . . . .	24
Figura 5 – Sistema de visão estéreo típico. . . . .	25
Figura 6 – Princípio básico da triangulação ativa. . . . .	28
Figura 7 – Arquitetura MVVM. . . . .	32
Figura 8 – Diagrama conceitual da arquitetura. . . . .	36
Figura 9 – Referencia e Escala. . . . .	42
Figura 10 – Primeiros testes de captura. . . . .	43
Figura 11 – Desenvolvimento do Repositório de modelos tridimensionais. Modelo tridimensional azul exposto: Tampa de combustível do carro Volkswagen Polo. . . . .	47
Figura 12 – Diagrama de Fluxo de dados. . . . .	50
Figura 13 – Diagrama de Classes (UML). . . . .	50
Figura 14 – Diagrama de Sequência: Upload (UML). . . . .	52
Figura 15 – Diagrama de Sequência: Visualização e Download (UML). . . . .	54
Figura 16 – Diagrama de Implantação (UML) . . . . .	56
Figura 17 – Segmento de palheta de turbina. . . . .	59
Figura 18 – Dimensões gerais da peça. . . . .	60
Figura 19 – Captura com 40 cm vertical da peça. . . . .	62
Figura 20 – Peça com revestimento e posicionada. . . . .	63
Figura 21 – Importação das imagens no Meshroom. . . . .	63
Figura 22 – Inicialização da câmera no Meshroom. . . . .	64
Figura 23 – Extração e correspondência de características (conjunto de seta e círculos vermelhos). Duas imagens de perspectivas diferentes. . . . .	64
Figura 24 – Structure from Motion (SfM). . . . .	65
Figura 25 – Densificação da nuvem de pontos. . . . .	65
Figura 26 – Criação da malha 3D (Visualização no Meshlab). . . . .	66
Figura 27 – Texturização do modelo 3D. (Visualização no Meshlab) . . . . .	66
Figura 28 – Ajuste de dimensionamento no Meshlab. . . . .	67
Figura 29 – Ajuste de orientação no Meshlab. . . . .	68
Figura 30 – Peça isolada no Meshlab com os filtros de correção aplicados. . . . .	69
Figura 31 – Envio do Modelo 3D para o Google Cloud Bucket . . . . .	71
Figura 32 – Visualização do Modelo 3D no Repositório . . . . .	71
Figura 33 – Conversão do Arquivo OBJ para STL . . . . .	72
Figura 34 – Importação no Software CAD NX para comparação . . . . .	73

Figura 35 – Corpo de fronteira no modelo reconstruído . . . . .	74
Figura 36 – <i>Compare Body</i> - Bloco Padrão 1# . . . . .	76
Figura 37 – <i>Compare Body</i> - Bloco Padrão 1#, Desvios Maiores que 0.200 mm .	77
Figura 38 – <i>Compare Body</i> - Bloco Padrão 2# . . . . .	78
Figura 39 – <i>Compare Body</i> entre o modelo reconstruído do capítulo de implanta- ção e o modelo CAD . . . . .	78
Figura 40 – <i>Compare Body</i> - Maiores erros de reconstrução na peça de seg- mento de palheta de turbina . . . . .	79
Figura 41 – Diagrama de Gantt do desenvolvimento proposto e executado . . .	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos Funcionais do Sistema . . . . .	38
Tabela 2 – Requisitos Não Funcionais do Sistema . . . . .	39
Tabela 3 – Tabela de Usuários . . . . .	49
Tabela 4 – Configurações da Câmera para Diferentes Distâncias Verticais . . .	61

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	GRUPO DE PESQUISA GPCAM/LMP	14
1.2	PROCESSO	15
1.3	OBJETIVO GERAL	16
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.5	CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO</b>	<b>19</b>
2.1	MANUFATURA - CNC	19
<b>2.1.1</b>	<b>Problemas de Manufatura</b>	<b>20</b>
2.2	METROLOGIA E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	21
2.3	TÉCNICAS ÓPTICAS DE RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES	22
<b>2.3.1</b>	<b>Aquisição Passiva</b>	<b>23</b>
2.3.1.1	Fotogrametria	24
2.3.1.2	Visão Estereoscópica	25
2.3.1.3	Luz Estrutural	26
<b>2.3.2</b>	<b>Aquisição Ativa</b>	<b>27</b>
2.3.2.1	Triangulação a Laser - Laser Scanner 3D	27
2.3.2.2	Radar	29
<b>2.3.3</b>	<b>Sistemas de Coordenada - Nuvem de Pontos</b>	<b>30</b>
2.3.3.1	Processamento de Nuvens de Pontos	30
2.4	PADRÃO MVVM	31
2.5	ARMAZENAMENTO EM NUVEM	33
<b>2.5.1</b>	<b>Conceito de <i>Buckets</i></b>	<b>33</b>
2.5.1.1	Benefícios dos <i>Buckets</i> no Google Cloud Storage	33
2.6	BANCO DE DADOS MYSQL	34
<b>2.6.1</b>	<b>Softwares CAD</b>	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E ARQUITETURA DO SISTEMA</b>	<b>36</b>
3.1	DESCRIÇÃO CONCEITUAL	36
<b>3.1.1</b>	<b>Visão Geral do Sistema</b>	<b>36</b>
3.2	REQUISITOS FUNCIONAIS	38
3.3	REQUISITOS NÃO FUNCIONAIS	39
3.4	PROGRAMAÇÃO/FERRAMENTAS	40
<b>3.4.1</b>	<b>Aquisição de Imagem</b>	<b>40</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Condicionamento e Padronização</b>	<b>41</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Processamento - Meshroom</b>	<b>44</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Pos-processamento - Meshlab</b>	<b>45</b>

<b>3.4.5</b>	<b>Ferramenta de Integração</b>	<b>46</b>
3.4.5.1	Desenvolvimento do Código	48
3.4.5.2	Base de Dados	48
3.4.5.3	Fluxo de Dados e Materiais	49
3.4.5.4	Diagrama de Classes	50
3.4.5.5	Diagrama de Sequência: Upload	52
3.4.5.6	Diagrama de Sequência: Visualização e Download	54
3.4.5.7	Diagrama de Implantação	56
<b>3.4.6</b>	<b>Inspeção</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>IMPLANTAÇÃO</b>	<b>58</b>
4.1	PREPARAÇÃO DO AMBIENTE	58
4.2	METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO	59
<b>4.2.1</b>	<b>Posicionamento da Peça em Análise</b>	<b>60</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Captura de Imagens</b>	<b>61</b>
4.3	AQUISIÇÃO DA NUVEM DE PONTOS	62
<b>4.3.1</b>	<b>Criação do Projeto no Meshroom</b>	<b>62</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Ajustes de Pós-processamento</b>	<b>67</b>
4.4	ENVIO PARA A APLICAÇÃO EM NUVEM	70
4.5	IMPORTAÇÃO DO MODELO PARA O SOFTWARE CAD NX	72
<b>4.5.1</b>	<b>Conversão do Arquivo OBJ para STL</b>	<b>72</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Importação e Comparação no NX</b>	<b>72</b>
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO E RESULTADOS</b>	<b>75</b>
5.1	RESULTADOS OBTIDOS NA INSPEÇÃO	75
<b>5.1.1</b>	<b>Bloco padrão 1#</b>	<b>76</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Bloco padrão 2#</b>	<b>77</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Peça Reconstruída do Capítulo de Implantação</b>	<b>78</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Comparação entre Resultados</b>	<b>79</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Influência da Metodologia de Captura</b>	<b>80</b>
5.2	RESOLUÇÃO DO SISTEMA	81
<b>5.2.1</b>	<b>Requisitos Funcionais</b>	<b>81</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Requisitos Não Funcionais</b>	<b>82</b>
5.3	AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO	83
5.4	APLICAÇÃO EM AMBIENTE DE MANUFATURA	85
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>88</b>
	<b>APÊNDICE A – RECURSOS UTILIZADOS</b>	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A manufatura moderna tem evoluído rapidamente com a integração de tecnologias avançadas, permitindo a produção de peças com alta precisão e complexidade. No entanto, juntamente com esses avanços, surgem desafios significativos relacionados à inspeção e controle de qualidade. A capacidade de detectar variações mínimas nas dimensões das peças produzidas é crucial para assegurar que elas atendam aos padrões rigorosos de qualidade e funcionem conforme esperado em suas aplicações finais.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de inspeção de manufatura que utilize técnicas de fotogrametria para capturar, processar e analisar modelos tridimensionais de peças manufaturadas. O foco principal é a inspeção de componentes de turbinas, onde a precisão dimensional é de extrema importância.

A fotogrametria é uma técnica que permite a reconstrução de objetos tridimensionais a partir de um conjunto de imagens bidimensionais. Este método é amplamente utilizado em diversas áreas, como topografia, arquitetura e engenharia, devido à sua capacidade de gerar modelos 3D precisos e detalhados. No entanto, sua aplicação na inspeção de manufatura requer uma abordagem meticulosa, envolvendo a captura de imagens de alta qualidade, processamento de dados robusto e integração com ferramentas de software CAD (Computer-Aided Design).

O sistema desenvolvido neste trabalho consiste em várias etapas interligadas, desde a captura de imagens utilizando uma câmera, passando pelo processamento dessas imagens no software Meshroom para gerar nuvens de pontos e malhas tridimensionais, até a inspeção final dos modelos gerados utilizando o software CAD NX. Além disso, foi desenvolvida uma aplicação em C# para gerenciar os modelos tridimensionais, facilitando o upload, armazenamento e visualização dos mesmos na nuvem, utilizando a infraestrutura do Google Cloud.

### 1.1 GRUPO DE PESQUISA GPCAM/LMP

O GPCAM é uma unidade de pesquisa vinculada a UFSC. Fundado com o propósito de promover avanços na área de manufatura, o GPCAM foca na aplicação de tecnologias de automação e controle para melhorar processos industriais.

O GPCAM conta com uma equipe multidisciplinar de pesquisadores e estudantes, proporcionando um ambiente colaborativo e inovador.

Entre as principais linhas de pesquisa do GPCAM estão a manufatura aditiva, inspeção de manufatura, integração de sistemas de automação, e desenvolvimento de metodologias para a Indústria 4.0. A atuação do grupo não se limita apenas à pesquisa acadêmica; ele também estabelece parcerias com a indústria para a aplicação prática

de suas inovações, contribuindo assim para o avanço tecnológico e econômico do setor.

Mais informações sobre o GPCAM, site [GPCAM.ufsc.br](http://GPCAM.ufsc.br) (GPCAM, 2024).

## 1.2 PROCESSO

O projeto de inspeção de manufatura realizado no GPCAM seguiu um conjunto estruturado de processos para assegurar a integração eficiente entre os diferentes componentes do sistema de inspeção. Inicialmente, foi definida a arquitetura de integração do projeto, que envolveu o planejamento e estabelecimento da infraestrutura necessária para a integração entre a base de dados, armazenamento em nuvem e a ferramenta de inspeção CAD. Este passo foi essencial para garantir a conectividade e funcionalidade dos diversos elementos do sistema.

Em seguida, foi conduzido um estudo detalhado e testes de aquisição de nuvem de pontos, utilizando a técnica de fotogrametria. Esta fase envolveu a pesquisa e experimentação com métodos de aquisição de dados que permitissem gerar nuvens de pontos precisas e de alta qualidade. A fotogrametria foi escolhida por sua capacidade de capturar detalhes finos e produzir modelos tridimensionais detalhados a partir de imagens.

Após a aquisição dos dados, a próxima etapa foi a geração de modelos de nuvem de pontos. Ferramentas como Meshroom e Meshlab foram utilizadas para o processamento inicial e pós-processamento das nuvens de pontos. O Meshroom automatizou o fluxo de trabalho de fotogrametria, desde a captura de imagens até a criação dos modelos 3D, enquanto o Meshlab foi empregado para a limpeza e ajuste fino dos modelos gerados, assegurando a precisão e qualidade dos modelos finais.

O desenvolvimento de um sistema de interação entre a aquisição de nuvem de pontos e a ferramenta de inspeção CAD foi um passo crucial. Uma interface foi criada para permitir a transferência e manipulação dos modelos de nuvem de pontos dentro da ferramenta de inspeção NX. Este desenvolvimento garantiu a compatibilidade e funcionalidade entre os sistemas, permitindo uma integração suave e eficiente.

Por fim, a implementação de um caso de uso prático demonstrou a eficácia do sistema desenvolvido. Em um cenário real, o sistema integrado foi aplicado para realizar a inspeção de manufatura, utilizando os modelos de nuvem de pontos gerados. Esta etapa final não apenas comprovou a viabilidade técnica do projeto, mas também evidenciou a precisão e utilidade da inspeção de manufatura assistida por computador, contribuindo para a inovação e otimização de processos industriais no GPCAM.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto é desenvolver um sistema integrado de inspeção de manufatura que utilize técnicas avançadas de fotogrametria e ferramentas CAD para identificar desvios geométricos durante o processo de fabricação, eliminando o processo convencional, o qual a peça é avaliada após a etapa de fabricação, em outro equipamento (muitas vezes outro local). Neste caso, havendo desvios a peça deverá ser retornada à máquina para retrabalho. Esta movimentação é onerosa para o processo. Assim, o atual projeto tem o objetivo de avaliar a peça antes de retirá-la da máquina de fabricação. Este sistema visa proporcionar uma solução robusta para a aquisição, processamento e análise de dados tridimensionais, facilitando a validação de modelos CAD com base em nuvens de pontos geradas a partir de imagens capturadas.

Através da criação deste sistema, espera-se melhorar a qualidade do controle de manufatura, reduzir erros e retrabalhos, e otimizar os processos de produção. O desenvolvimento do sistema deve garantir uma interface intuitiva e funcional, permitindo que os usuários realizem inspeções detalhadas e comparações precisas entre os modelos teóricos e os modelos reais produzidos. Além disso, a integração com plataformas de armazenamento em nuvem busca assegurar a acessibilidade e a gestão eficiente dos dados, contribuindo para a implementação de práticas da Indústria 4.0 no ambiente de manufatura.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- **Definir a arquitetura de integração do sistema de inspeção:** Planejar e estabelecer a infraestrutura necessária para a integração entre a base de dados, armazenamento em nuvem e a ferramenta de inspeção CAD.
- **Realizar estudos e testes de aquisição de nuvem de pontos:** Pesquisar e experimentar com métodos de aquisição de dados por fotogrametria para gerar nuvens de pontos precisas e de alta qualidade.
- **Gerar modelos de nuvem de pontos:** Utilizar ferramentas como Meshroom e Meshlab para o processamento inicial e pós-processamento das nuvens de pontos, criando modelos 3D detalhados e precisos.
- **Desenvolver uma arquitetura de interação e integração com armazenamento em nuvem:** Criar uma interface que permita a transferência e manipulação dos modelos de nuvem de pontos dentro da ferramenta de inspeção NX, garantindo compatibilidade e funcionalidade entre os sistemas. Além disso, desenvolver

ferramentas em C# para facilitar o upload, download e a conectividade dos dados com as APIs da Google Cloud, promovendo a acessibilidade e eficiência na gestão dos modelos 3D.

- **Implementar um caso de uso prático do sistema:** Aplicar o sistema desenvolvido em um cenário real de manufatura, demonstrando a eficácia da integração e a precisão da inspeção utilizando os modelos de nuvem de pontos gerados.
- **Avaliar e ajustar o sistema desenvolvido:** Realizar avaliações críticas e ajustes no sistema com base nos resultados obtidos e no feedback dos usuários, assegurando a melhoria contínua e a eficácia da solução proposta.

## 1.5 CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR

A contribuição do autor neste projeto de inspeção de manufatura envolve diversas etapas cruciais do desenvolvimento e implementação do sistema. Desde a concepção inicial até a aplicação prática, o autor desempenhou um papel central na definição da arquitetura de integração, seleção e teste das técnicas de aquisição de dados, e desenvolvimento das interfaces de usuário e ferramentas de interação.

Especificamente, o autor foi responsável por:

- **Definição da arquitetura do sistema:** Planejamento e estabelecimento da infraestrutura necessária para a integração dos diferentes componentes do sistema, incluindo a base de dados, armazenamento em nuvem e ferramentas CAD.
- **Pesquisa e testes de fotogrametria:** Condução de estudos detalhados e experimentos com técnicas de fotogrametria para garantir a precisão e qualidade das nuvens de pontos geradas.
- **Desenvolvimento de modelos 3D:** Utilização de ferramentas como Meshroom e Meshlab para a criação e pós-processamento de modelos tridimensionais a partir de nuvens de pontos, assegurando a fidelidade e detalhamento necessários para a inspeção de manufatura.
- **Desenvolvimento de uma arquitetura de interação e integração com armazenamento em nuvem:** Criar uma interface que permita a transferência e manipulação dos modelos de nuvem de pontos dentro da ferramenta de inspeção NX, garantindo compatibilidade e funcionalidade entre os sistemas. Além disso, desenvolver ferramentas em C# para facilitar o upload, download e a conectividade dos dados com as APIs da Google Cloud, promovendo a acessibilidade e eficiência na gestão dos modelos 3D.

- **Aplicação prática e avaliação do sistema:** Implementação do sistema em um cenário real de manufatura, conduzindo avaliações críticas e ajustando o sistema com base no feedback dos usuários para garantir a eficácia e melhoria contínua da solução proposta.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO

Neste capítulo, apresentamos os conceitos fundamentais que embasam o desenvolvimento deste projeto. Inicialmente, abordamos a manufatura assistida por CNC, que é essencial para a automação precisa de processos de fabricação. Em seguida, discutimos a importância da metrologia e dos instrumentos de medição na garantia da precisão e exatidão das medições, com ênfase na reconstrução tridimensional. Exploramos também as técnicas ópticas de reconstrução tridimensional de superfícies, destacando métodos de aquisição ativa e passiva, como fotogrametria. Por fim, detalhamos o padrão de design Model-View-ViewModel (MVVM), que será utilizado no desenvolvimento do sistema de integração. Esta fundamentação teórica é crucial para compreender os princípios e tecnologias subjacentes ao projeto, garantindo a qualidade e a precisão dos processos envolvidos.

### 2.1 MANUFATURA - CNC

A manufatura assistida por CNC é uma tecnologia fundamental na indústria moderna, permitindo a automação precisa de processos de fabricação. A programação CNC envolve a criação de instruções codificadas que são processadas pelo sistema de controle da máquina para usinar peças com mínima intervenção humana. As instruções são compostas por combinações de letras, dígitos e símbolos, e seguem uma estrutura lógica específica, conhecida como programa de peça. Este programa detalha todas as ações necessárias da máquina, incluindo controle de movimento, velocidade do fuso, taxas de avanço e funções de refrigeração.

Um aspecto crucial da programação CNC é a compreensão da geometria coordenada das máquinas-ferramenta. O sistema de coordenadas mais comumente utilizado é o sistema de coordenadas retangulares ou Cartesianas, que define a localização de um ponto no 3D através de três eixos: X, Y e Z. Este sistema permite que o programador CNC especifique com precisão os movimentos e operações da ferramenta de corte, garantindo que o trabalho seja realizado de acordo com as especificações do desenho técnico.

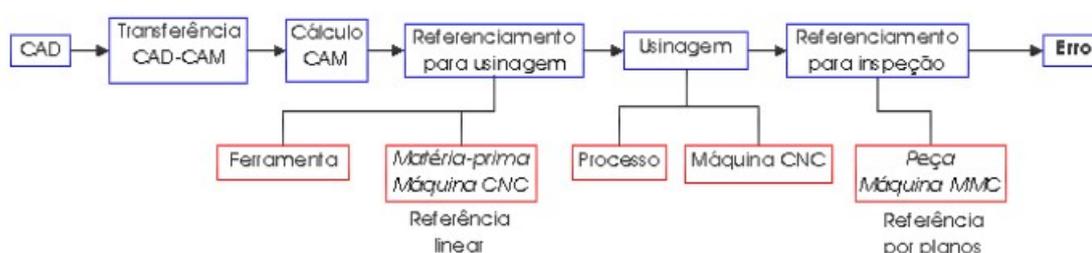
O desenvolvimento de um programa CNC começa com a análise do desenho de engenharia e do material a ser usinado. O programador define a sequência das operações de usinagem, seleciona as ferramentas de corte apropriadas e determina os parâmetros tecnológicos, como velocidades e taxas de avanço. A programação pode ser realizada de forma manual, onde cada instrução é escrita separadamente, ou através de software de programação assistida por computador (CAM), que automatiza grande parte do processo, reduzindo erros e economizando tempo. Com a finalização do programa, ele é transferido para a unidade de controle CNC, onde é testado e ajustado conforme necessário para garantir a precisão e eficiência do processo de

fabricação.(OBERG *et al.*, 2016)

### 2.1.1 Problemas de Manufatura

A manufatura assistida por CNC enfrenta uma série de desafios que podem comprometer a qualidade e a precisão dos produtos fabricados. Estes problemas podem ser categorizados em áreas principais e ocorrem em várias etapas do processo de fabricação, conforme ilustrado no diagrama fornecido por (SOUZA, 2004), na Figura 1.

Figura 1 – Possíveis fontes de erro no processo de fabricação.



Fonte: (SOUZA, 2004).

- **Erros Mecânicos:** Relacionados à ferramenta, podem surgir devido a medições imprecisas, desgaste da ferramenta ou configurações incorretas. A falta de rigidez na máquina-ferramenta ou na fixação da peça pode causar vibrações indesejadas, enquanto falhas na máquina-ferramenta (mecânicas ou eletrônicas) podem resultar em interrupções no processo de manufatura.
- **Erros Computacionais:** Incluem programação CNC incorreta ou dados CAD incorretos, resultando em movimentos imprecisos da ferramenta e erros na geração das trajetórias de corte.
- **Erros na Geometria da Ferramenta:** Ferramentas de corte com geometria incorreta podem resultar em cortes imprecisos e superfícies de baixa qualidade.
- **Erros de Processo:** Podem ocorrer devido a parâmetros de corte inadequados, vibrações indesejadas e inconsistências nas condições de usinagem. Fixação inadequada da peça também pode causar movimentos indesejados, resultando em cortes imprecisos e peças fora de especificação (EL-HAKIM; BERARDIN; BLAIS, 1995).

- **Máquina CNC:** Falhas mecânicas, imprecisões nos sistemas de medição e controle, e problemas de manutenção na máquina CNC podem ocorrer durante a usinagem, resultando em peças com geometrias incorretas.
- **Peça / Máquina MMC:** Na etapa de referenciamento para inspeção, a peça e a Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) devem ser corretamente referenciadas. Erros podem surgir se a peça não estiver posicionada adequadamente ou se houver inconsistências no sistema de medição da MMC.

## 2.2 METROLOGIA E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

A metrologia é uma ciência fundamental no campo da manufatura e engenharia, responsável por garantir a precisão e exatidão das medições. No contexto da reconstrução tridimensional, a metrologia desempenha um papel crucial ao fornecer as ferramentas e métodos necessários para medir com precisão as características geométricas de objetos. A reconstrução tridimensional refere-se ao processo de capturar a forma tridimensional de um objeto ou ambiente a partir de imagens bidimensionais, uma técnica amplamente utilizada em diversas aplicações industriais e científicas.

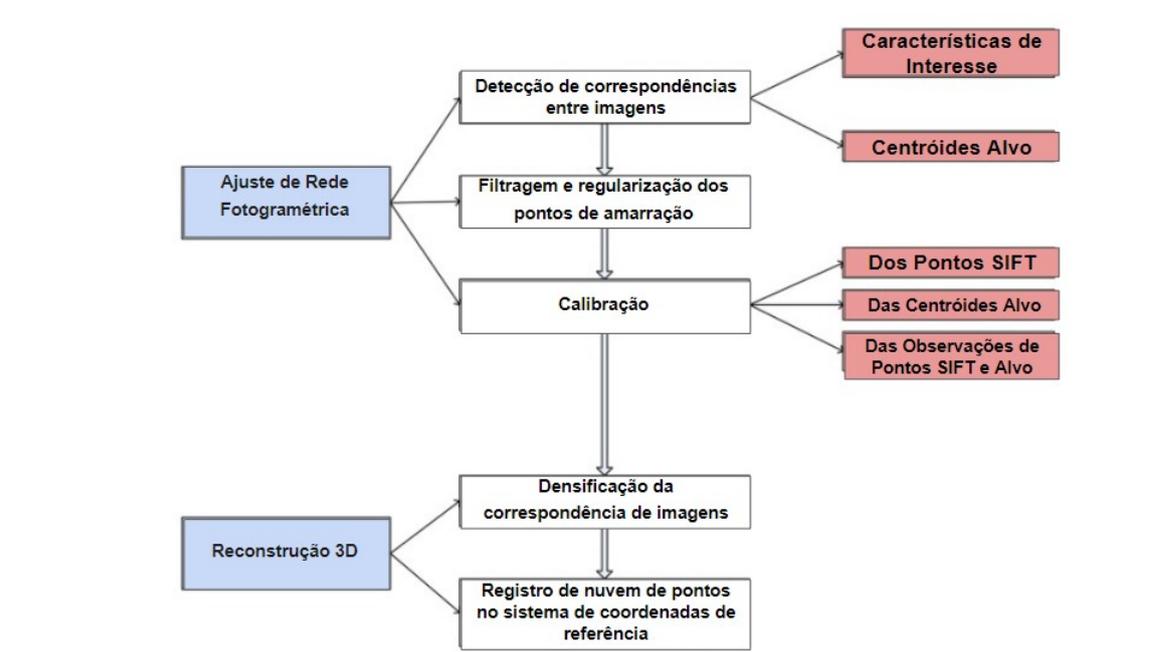
A metrologia oferece um conjunto de normas e procedimentos para garantir que as medições realizadas durante a reconstrução 3D sejam precisas e repetíveis. Isso inclui o uso de equipamentos de alta precisão, como câmeras calibradas, sistemas de coordenadas bem definidos e métodos de análise estatística para avaliar a qualidade dos dados obtidos. A precisão das medições é essencial para aplicações que exigem alta confiabilidade, como inspeção de peças manufaturadas, análise estrutural e preservação de patrimônio cultural (TOSCHI *et al.*, 2015).

Existem vários métodos de reconstrução tridimensional, sendo a fotogrametria um dos mais utilizados. A fotogrametria utiliza múltiplas imagens de um objeto, capturadas de diferentes ângulos, para calcular suas coordenadas tridimensionais. Este método pode ser dividido em dois enfoques principais: a metrologia visual (VM), que visa obter coordenadas tridimensionais precisas de pontos esparsos em um objeto, e a correspondência de imagens densas (DIM), que gera nuvens de pontos densas para representações detalhadas da superfície (TOSCHI *et al.*, 2015).

A metrologia visual é aplicada para garantir que as imagens utilizadas na fotogrametria estejam corretamente calibradas e orientadas. Isso inclui a medição precisa de alvos codificados e a utilização de padrões de referência conhecidos para validar a precisão das reconstruções tridimensionais. Por exemplo, o uso de objetos de teste métricos, como esferas calibradas e barras de escala, permite avaliar a qualidade das imagens e ajustar os parâmetros do sistema para obter resultados mais precisos.

Um dos principais desafios na metrologia aplicada à reconstrução tridimensional é a necessidade de alta precisão em ambientes com texturas pobres e formas

Figura 2 – Fluxo de Reconstrução tridimensional(Fotogrametria).



Fonte: Diagrama adaptado de (TOSCHI *et al.*, 2015).

complexas. Para abordar esse desafio, técnicas avançadas de correspondência de imagens, como o uso de pontos SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) e ajustes de rede fotogramétrica auto-calibrados, são empregadas. Esses métodos ajudam a melhorar a precisão dos pontos correspondentes e a reduzir os erros nas medições finais (TOSCHI *et al.*, 2015).

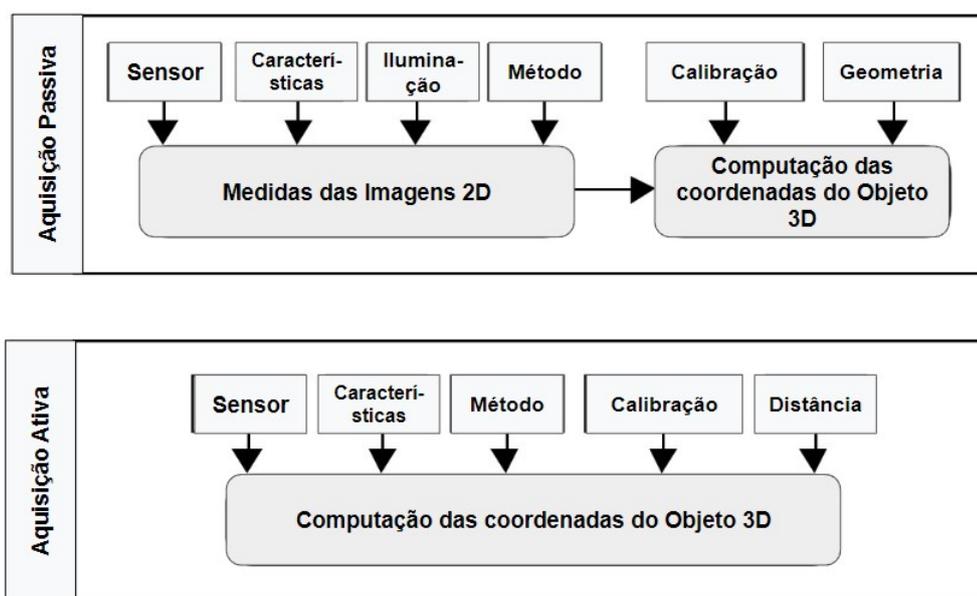
O avanço contínuo das tecnologias de medição e análise de imagens promete melhorar ainda mais a precisão e a eficiência dos métodos de reconstrução tridimensional. Novas abordagens que combinam metrologia visual e correspondência de imagens densas estão sendo desenvolvidas para atender às exigências de aplicações industriais e científicas. A integração dessas técnicas com algoritmos de visão computacional e processamento de grandes volumes de dados abrirá novas possibilidades para a metrologia e a reconstrução 3D no futuro (TOSCHI *et al.*, 2015).

### 2.3 TÉCNICAS ÓPTICAS DE RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES

A reconstrução tridimensional de superfícies é essencial no contexto da manufatura avançada, onde a precisão e a qualidade dos componentes são cruciais. Este processo envolve a criação de modelos digitais tridimensionais a partir de dados coletados por diversos tipos de sensores, permitindo a inspeção detalhada e a validação de peças manufaturadas contra modelos CAD.

As técnicas ópticas de reconstrução 3D são geralmente classificadas em dois grupos principais: métodos de aquisição ativa e passiva. Ambos possuem características distintas que os tornam mais adequados para diferentes tipos de aplicações e condições ambientais.

Figura 3 – Fatores de reconstrução.



Fonte: Diagrama adaptado de (EL-HAKIM; BERARDIN; BLAIS, 1995).

Nesta seção, exploraremos em detalhes as principais técnicas de reconstrução tridimensional de superfícies, divididas entre métodos de aquisição ativa e passiva, discutindo suas aplicações, vantagens e limitações no contexto da manufatura e inspeção de peças. Este conhecimento é fundamental para a seleção e implementação de sistemas de inspeção eficientes e precisos, que garantam a qualidade e a conformidade dos produtos manufaturados com os modelos CAD especificados.

### 2.3.1 Aquisição Passiva

Os sistemas de visão passiva, como a fotogrametria e a visão estereoscópica, dependem exclusivamente da luz ambiente e das texturas naturais do objeto para calcular a geometria tridimensional. Esses sistemas obtêm coordenadas dos objetos a partir das informações contidas nas imagens de intensidade, capturadas por câmeras CCD comerciais. As técnicas passivas são especialmente eficazes na medição de características bem definidas, como alvos e bordas de alto contraste. No entanto, elas podem enfrentar dificuldades em medir superfícies sem marcações ou em ambientes não estruturados, onde a luz ambiente varia significativamente (EL-HAKIM; BERARDIN; BLAIS, 1995).

### 2.3.1.1 Fotogrametria

A fotogrametria é uma técnica precisa e versátil, amplamente utilizada em aplicações industriais para medições 3D de alta precisão. Envolve a captura de imagens de um objeto a partir de múltiplos ângulos e a utilização dessas imagens para reconstruir o objeto em três dimensões. Esta técnica é particularmente valiosa em situações onde a medição sem contato é essencial, oferecendo várias vantagens sobre os métodos tradicionais.

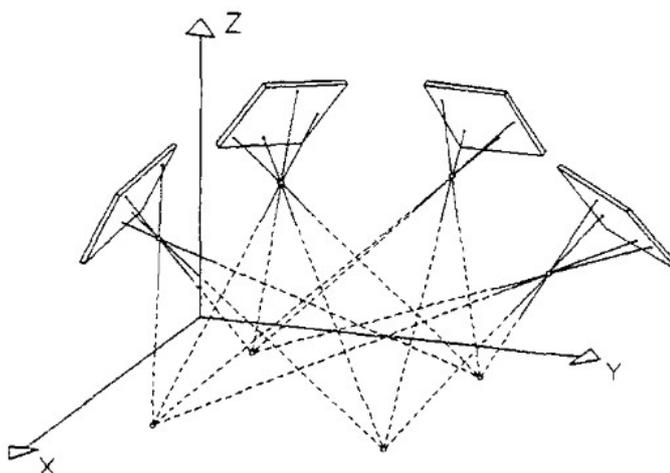
- **Vantagens:**

- Alta precisão e versatilidade.
- Adequada para a medição de grandes áreas.
- Não requer contato físico com o objeto.

- **Desvantagens:**

- Dependência das condições de iluminação ambiente.
- Pode ser afetada por superfícies sem textura.
- Requer processamento intensivo para gerar modelos 3D.

Figura 4 – Triangulação de Multi-Imagens.



Fonte: (UFFENKAMP, 1993).

Na fotogrametria, a triangulação multi-imagem é um processo fundamental que depende de pares de imagens estereoscópicas. A fotogrametria moderna de curta distância utiliza múltiplas imagens tiradas de várias perspectivas. Esta abordagem garante uma geometria robusta de raios que se cruzam, permitindo uma reconstrução

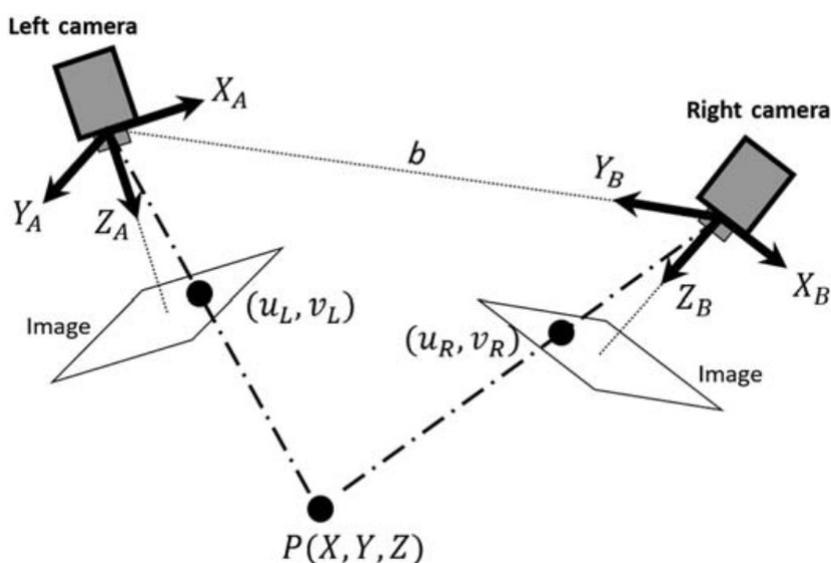
3D precisa. O processo envolve o ajuste simultâneo dos parâmetros de orientação e das coordenadas do objeto através do método de ajuste de feixe. Esta técnica aproveita informações puramente fotogramétricas e distâncias conhecidas ou pontos de controle adicionais para obter medições precisas (UFFENKAMP, 1993).

A precisão de um sistema fotogramétrico depende fortemente do sistema de registro de imagens, que inclui o sistema de lentes, o corpo da câmera e o sensor de imagem. São utilizados tanto sistemas fotográficos com filme quanto sistemas digitais com sensores CCD. Os sistemas digitais são particularmente vantajosos, pois fornecem resultados no local, eliminando a necessidade de processamento off-line. A resolução e a estabilidade desses sistemas são fatores críticos na determinação da precisão da medição. Aplicações industriais de alta precisão frequentemente exigem precisões relativas de 1/100.000 ou melhores, que podem ser alcançadas com sensores digitais de alta resolução (UFFENKAMP, 1993).

### 2.3.1.2 Visão Estereoscópica

A visão estereoscópica é uma técnica de medição tridimensional que utiliza duas câmeras posicionadas paralelamente. As câmeras devem ter a mesma distância focal e seus eixos X devem estar alinhados com a linha de base. A técnica é amplamente utilizada devido à sua capacidade de fornecer medições detalhadas e precisas em tempo real.

Figura 5 – Sistema de visão estéreo típico.



Fonte: (GUL *et al.*, 2021).

O sistema de visão estéreo funciona projetando um ponto real no espaço em

duas imagens diferentes, capturadas por câmeras separadas por uma distância conhecida (linha de base). As projeções dos pontos no mundo real em cada imagem são usadas para calcular a disparidade, que é a diferença entre as coordenadas horizontais dos pontos correspondentes nas duas imagens. A distância do ponto ao sistema de câmeras pode ser determinada a partir da disparidade, utilizando a fórmula:

$$d = u_L - u_R = f\left(\frac{b}{Z_A}\right) \quad (1)$$

onde  $b$  é a linha de base,  $f$  é a distância focal da câmera,  $Z_A$  é o eixo óptico da câmera,  $u_L$  e  $u_R$  são as projeções do ponto real  $P$  nas imagens adquiridas pelas câmeras esquerda e direita, respectivamente. Devido ao tempo de processamento necessário, este sistema é geralmente utilizado para escaneamento 3D de objetos estáticos ou escaneamentos realizados em baixas frequências (GUL *et al.*, 2021).

O sistema de câmera estéreo descrito no artigo de (SHUNYI *et al.*, 2008) utiliza três câmeras fixadas por hastes articuladas. Esse sistema é capaz de capturar três imagens simultaneamente, que são processadas utilizando métodos fotogramétricos digitais para produzir uma nuvem de pontos local. Os dados de textura podem ser extraídos da imagem central e um modelo de superfície 3D texturizado pode ser construído.

- **Vantagens:**

- Capacidade de fornecer medições em tempo real.
- Baixo custo comparado a scanners a laser.
- Facilidade em capturar texturas das imagens originais.

- **Desvantagens:**

- Dependência das condições de iluminação ambiente.
- Dificuldade em lidar com objetos com pouca textura.
- Necessidade de calibração precisa das câmeras.

### 2.3.1.3 Luz Estrutural

A técnica de luz estruturada envolve a projeção de um padrão de luz conhecido sobre um objeto, que é então capturado por uma câmera. As distorções no padrão projetado, causadas pela geometria do objeto, são analisadas para reconstruir a forma tridimensional.

- **Vantagens:**

- Alta precisão na captura de detalhes finos.

- Menor dependência das condições de iluminação ambiente.
- Capacidade de escanear superfícies complexas.

- **Desvantagens:**

- Requer equipamento especializado (projetor e câmera).
- Pode ser afetada por superfícies reflexivas ou translúcidas.
- Necessidade de calibração precisa do sistema.

No sistema de luz estruturada, um projetor emite um padrão de luz, como códigos de Gray, sobre a superfície do objeto. A câmera captura a deformação desse padrão. A diferença entre a posição original do padrão e sua posição capturada permite calcular a profundidade dos pontos da superfície do objeto. Esse processo é repetido com diferentes padrões para obter uma nuvem de pontos detalhada que representa a geometria do objeto.

A calibração do sistema de câmera e projetor é essencial para garantir a precisão das medições. Isso inclui a calibração intrínseca da câmera e do projetor (distâncias focais, pontos principais, etc.) e a calibração extrínseca (posição e orientação relativas entre a câmera e o projetor).

Um exemplo prático dessa técnica pode ser encontrado no projeto (ARMS-TRONG, 2020). Este projeto usa um projetor e uma câmera para escanear uma cena e criar um modelo 3D. O padrão de luz estruturada é projetado na cena e capturado pela câmera, permitindo a reconstrução de correspondências densas. O projeto inclui código para calibrar o setup de câmera-projetor e reconstruir a cena 3D baseada em técnicas robustas de classificação de pixels.

### 2.3.2 Aquisição Ativa

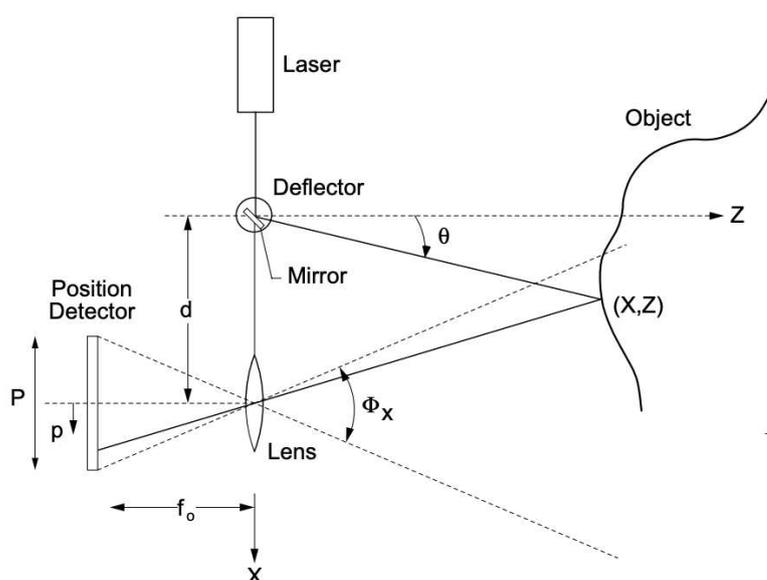
Em contraste, os sistemas de visão ativa, como os scanners a laser e os sistemas de luz estruturada, utilizam fontes de iluminação controladas para projetar padrões na superfície do objeto. Esses padrões, ao serem deformados pela topografia da superfície, são capturados por sensores que calculam as coordenadas tridimensionais com base em informações externas, como o ângulo de varredura ou o tempo de voo. Sistemas ativos são menos afetados pelas condições de iluminação ambiente, tornando-os mais versáteis para a medição de superfícies complexas e variadas. No entanto, eles podem apresentar desafios ao lidar com superfícies com acabamentos variáveis ou descontinuidades acentuadas (EL-HAKIM; BERARDIN; BLAIS, 1995).

#### 2.3.2.1 Triangulação a Laser - Laser Scanner 3D

A triangulação a laser é uma técnica que se baseia na projeção de um feixe de laser sobre a superfície do objeto e na detecção do ponto iluminado através de

um sensor de posição. O princípio geométrico básico da triangulação ótica é ilustrado por El-Hakim et al., onde o feixe de luz gerado pelo laser é defletido por um espelho e escaneado sobre o objeto. A câmera, composta por uma lente e um fotodetector de posição sensível, mede a localização da imagem do ponto iluminado no objeto. A partir de cálculos trigonométricos, as coordenadas X e Z do ponto iluminado são determinadas (EL-HAKIM; BERARDIN; BLAIS, 1995).

Figura 6 – Princípio básico da triangulação ativa.



Fonte: (EL-HAKIM; BERARDIN; BLAIS, 1995).

• **Vantagens:**

- Alta precisão e resolução.
- Menor influência das condições de iluminação ambiente.
- Adequada para uma variedade de superfícies e texturas.

• **Desvantagens:**

- Equipamento especializado e geralmente caro.
- Pode ser afetado por superfícies reflexivas ou transparentes.
- Necessidade de calibração precisa do sistema.

O artigo de Gerbino et al. discute a influência de vários fatores no processo de escaneamento a laser 3D. A orientação relativa do scanner ao objeto e a iluminação ambiente são fatores importantes que afetam a precisão do processo de medição. Utilizando um scanner comercial de triangulação a laser 3D, VI 9i da Konica Minolta,

os autores analisaram esses fatores através de um design de experimentos (DoE), definindo o erro quadrático médio (RMSE) como função de resposta. Os resultados indicam que a orientação do scanner em relação ao objeto e sua posição no campo de visão do dispositivo de medição são os principais fatores que influenciam a precisão das aquisições de superfície 3D (GERBINO *et al.*, 2016).

#### 2.3.2.2 Radar

O radar é um sensor de detecção ativa que utiliza ondas de rádio para determinar a distância, velocidade e características de objetos. No contexto da reconstrução tridimensional de ambientes externos, o radar se destaca por sua robustez em condições atmosféricas adversas e sua capacidade de detectar profundidade com precisão constante ao longo da distância.

- **Vantagens:**

- Robusto em condições atmosféricas adversas.
- Capacidade de medir distâncias longas com precisão constante.
- Menos afetado por condições de iluminação ambiente.

- **Desvantagens:**

- Resolução limitada comparada a outras técnicas ópticas.
- Equipamento especializado e geralmente caro.
- Menos eficaz para medições de alta precisão em curtas distâncias.

O radar de ondas milimétricas (MMW) utilizado para reconstrução 3D realiza aquisições panorâmicas através de uma antena rotativa que varre 360° em intervalos de 1° por segundo. O princípio de funcionamento é baseado no Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW), onde a diferença de frequência (frequência de batimento) entre o sinal transmitido e o sinal refletido por um alvo é proporcional à distância até o alvo. Esse método permite a medição precisa da distância e do ângulo azimutal dos alvos detectados (NATOUR *et al.*, 2015).

Cada tipo de sistema tem suas próprias vantagens e limitações. Enquanto os sistemas passivos oferecem alta precisão para características bem definidas em condições controladas, os sistemas ativos proporcionam maior flexibilidade em diversas condições ambientais. Em muitos casos, a combinação de ambas as abordagens pode ser benéfica, pois elas se complementam: os pontos fortes de um sistema podem mitigar as fraquezas do outro.

### 2.3.3 Sistemas de Coordenada - Nuvem de Pontos

A representação de nuvens de pontos são conjuntos de pontos no espaço tridimensional, onde cada ponto representa uma coordenada X, Y, e Z, capturando a geometria da superfície de um objeto ou de uma cena. Essa técnica é amplamente utilizada em aplicações como a engenharia reversa, inspeção de manufatura e mapeamento geoespacial.

No contexto da inspeção de manufatura, a nuvem de pontos é utilizada para capturar com precisão a geometria de peças e componentes. A precisão e a resolução das nuvens de pontos são cruciais para garantir que as peças atendam às especificações de projeto e para identificar quaisquer desvios ou defeitos. A aquisição de dados pode ser feita através de várias tecnologias descritas nas seções anteriores. O processo envolve a coleta de um grande número de pontos na superfície do objeto, que são então processados para criar um modelo digital detalhado.

Um dos principais desafios na utilização de nuvens de pontos é a gestão e processamento dos dados, que podem ser extremamente volumosos. Técnicas de filtragem e registro são aplicadas para reduzir o ruído e alinhar diferentes conjuntos de dados, respectivamente. O registro de nuvens de pontos é um passo crítico, especialmente quando se utilizam múltiplos scanners ou quando se precisa combinar dados de diferentes vistas para formar um modelo completo e coeso (LINSEN, 2001).

Além disso, a representação da nuvem de pontos deve ser precisa o suficiente para capturar todos os detalhes relevantes da superfície do objeto. Isto implica em uma alta densidade de pontos, especialmente em áreas de interesse crítico. A densidade de pontos e a precisão dos dados dependem da resolução do sensor utilizado e da técnica de aquisição empregada. Em muitos casos, técnicas avançadas de processamento de imagem e algoritmos de reconstrução são utilizados para melhorar a qualidade e a precisão da nuvem de pontos (LINSEN, 2001).

#### 2.3.3.1 Processamento de Nuvens de Pontos

O processamento de nuvens de pontos envolve várias etapas que garantem a precisão, a qualidade e a usabilidade dos dados de nuvens de pontos. A ferramenta AliceVision Meshroom, acessível no repositório no GitHub, é um exemplo de software que facilita esse processamento através de um pipeline robusto e personalizável.

O pipeline de reconstrução 3D no Meshroom começa com a extração de características (features) das imagens de entrada, usando métodos como SIFT, DSP-SIFT e AKAZE. Esses pontos de características são fundamentais para encontrar a pose relativa das câmeras no espaço, descrevendo propriedades que são invariantes a escala, rotação e iluminação. Após a extração, os pontos são comparados e correspondidos entre pares de imagens para determinar uma estrutura 3D a partir das posições 2D

correspondentes (GRIWODZ *et al.*, 2021).

Uma vez identificadas as correspondências, a etapa de Estrutura a partir do Movimento (Structure from Motion - SfM) usa essas informações para gerar uma representação 3D esparsa da cena. Isso é feito através de uma abordagem incremental, onde novas câmeras são adicionadas a partir de uma solução inicial. O resultado desta etapa inclui estatísticas de erro de reprojeção e a quantidade de pontos 3D reconstruídos, que são essenciais para avaliar a precisão da reconstrução (GRIWODZ *et al.*, 2021).

Depois de construir a estrutura esparsa, o próximo passo é a estimativa de mapas de profundidade (depth maps), que tenta estimar um valor de profundidade para cada pixel de entrada. O AliceVision Meshroom utiliza uma abordagem de Correspondência Semi-Global (Semi-Global Matching - SGM) para esta tarefa, que é escalável e baseada em computação GPU. Este método calcula um escore global de similaridade sobre múltiplas imagens para cada célula de uma grade voxel, otimizando o volume de custo e refinando os resultados para alinhar descontinuidades de profundidade com variações de cor (GRIWODZ *et al.*, 2021).

A etapa de mesclagem (meshing) combina todos os mapas de profundidade em uma única nuvem de pontos densa e, em seguida, extrai uma superfície a partir dela. Utilizando uma triangulação de Delaunay 3D, os pontos 3D são fundidos e uma estratégia de votação é aplicada para etiquetar cada tetraedro como cheio ou vazio. A superfície da malha resultante é então suavizada e filtrada para remover artefatos locais (GRIWODZ *et al.*, 2021).

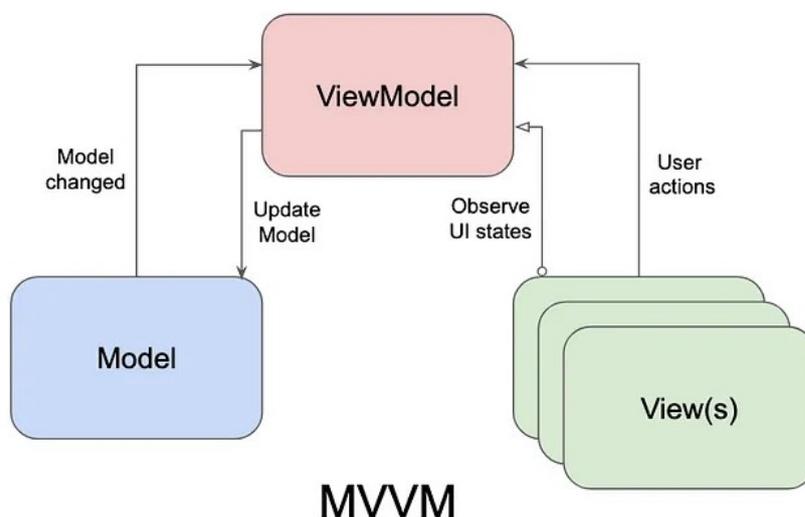
Finalmente, a etapa de texturização projeta texturas sobre a malha gerada, utilizando uma abordagem de mapeamento UV. Esta etapa assegura a coerência de cor global, mantendo a precisão dos detalhes da textura. A fusão de texturas utiliza uma mesclagem de múltiplas bandas para garantir transições suaves e cores consistentes entre as imagens (GRIWODZ *et al.*, 2021).

## 2.4 PADRÃO MVVM

MVVM é um padrão de design de software criado por John Gossman em 2005, inicialmente para a arquitetura WPF e Silverlight da Microsoft. Este padrão promove a separação de preocupações, facilitando o desenvolvimento independente da interface de usuário e da lógica de negócios. A MVVM divide a aplicação em três componentes principais: Model, View e ViewModel. Cada um desses componentes desempenha um papel crucial no desenvolvimento de aplicações robustas e escaláveis (MOORE, 2010).

O padrão MVVM Figura 7 é uma abordagem arquitetural que promove a separação de preocupações no desenvolvimento de software, dividindo a aplicação em três componentes principais:

Figura 7 – Arquitetura MVVM.



Fonte: <https://medium.com/@dheerubhadoria/android-mvvm-how-to-use-mvvm-in-android-example-7dec84a1fb73>

- **Model:** Representa a lógica de negócios e os dados da aplicação. Ele é responsável por acessar serviços, bancos de dados ou outras fontes de dados. No contexto de uma aplicação MVVM, o Model não deve conter qualquer lógica de apresentação ou conhecimento sobre a interface de usuário. Isso garante que a lógica de negócios possa ser testada e mantida de forma independente.
- **View:** Responsável por definir a interface de usuário e a aparência da aplicação. Em MVVM, a View deve ser o mais declarativa possível, utilizando técnicas como data binding para se conectar ao ViewModel. A View não deve conter lógica de negócios; ao invés disso, ela deve ser uma representação passiva que reage às mudanças de estado e comandos expostos pelo ViewModel.
- **ViewModel:** Serve como intermediário entre o Model e a View. Ele expõe propriedades e comandos que a View pode ligar através do data binding. O ViewModel é responsável por implementar a interface `INotifyPropertyChanged`, permitindo que a View seja automaticamente atualizada quando os dados mudam. Além disso, o ViewModel pode conter lógica de apresentação, manipulação de dados e validação, tornando a View mais limpa e focada na apresentação.

## 2.5 ARMAZENAMENTO EM NUVEM

O armazenamento em nuvem é uma tecnologia que permite o armazenamento, gerenciamento e acesso a dados através da internet, utilizando servidores remotos hospedados em data centers gerenciados por provedores de serviços em nuvem. No projeto descrito será utilizado o Google Cloud Platform (GCP), um dos proeminentes provedor de serviços em nuvem, oferecendo uma variedade de soluções para armazenamento, computação e análise de dados (GOOGLE. . . , 2024).

O GCP fornece uma infraestrutura escalável e segura para empresas armazenarem e processarem grandes volumes de dados. A GCP oferece diversos serviços de armazenamento em nuvem, incluindo Google Cloud Storage, Google Cloud SQL, e Google BigQuery, cada um otimizado para diferentes tipos de dados e casos de uso

### 2.5.1 Conceito de *Buckets*

No Google Cloud Storage, os dados são organizados em containers chamados de *buckets*. Um *bucket* é o contêiner básico que armazena seus dados. Tudo o que você armazena no Cloud Storage deve estar contido em um *bucket*.

- **Nomeação de *Buckets*:** Cada *bucket* deve ter um nome único globalmente e seguir regras específicas de formatação.
- **Localização de *Buckets*:** Ao criar um *bucket*, você deve especificar a localização onde os dados serão armazenados, como multi-regional, regional, *nearline* e *coldline*.
- **Classes de Armazenamento:** Os *buckets* podem ser configurados com diferentes classes de armazenamento, como *Standard*, *Nearline*, *Coldline* e *Archive*, cada uma adequada para diferentes necessidades de acesso e custo.
- **Controle de Acesso:** Oferece várias opções de controle de acesso usando *Identity and Access Management* (IAM) e listas de controle de acesso (ACLs).
- **Versionamento de Objetos:** Suporta o versionamento de objetos, permitindo manter várias versões de um objeto no mesmo *bucket*.
- **Regras de Ciclo de Vida:** Permite definir regras de ciclo de vida para gerenciar automaticamente os dados no seu *bucket*.

#### 2.5.1.1 Benefícios dos *Buckets* no Google Cloud Storage

- **Escalabilidade e Durabilidade:** Projetados para escalar automaticamente e proporcionar durabilidade de 99,999999999% ao longo de um ano.

- **Segurança:** Inclui criptografia de dados em repouso e em trânsito por padrão.
- **Flexibilidade de Acesso:** Dados podem ser acessados de qualquer lugar do mundo com uma conexão à internet.

## 2.6 BANCO DE DADOS MYSQL

O MySQL é um sistema de gerenciamento de banco de dados relacional de código aberto. Ele suporta uma ampla gama de operações de banco de dados, incluindo a criação, manutenção e consulta de bancos de dados (MYSQL. . . , 2024).

- **Tabelas:** Estruturas fundamentais que armazenam dados em linhas e colunas. Cada tabela possui um esquema que define a estrutura dos dados.
- **Consultas SQL:** Linguagem de consulta estruturada usada para interagir com o banco de dados. Comandos comuns incluem SELECT, INSERT, UPDATE e DELETE.
- **Índices:** Estruturas que melhoram a velocidade das operações de consulta ao permitir acesso rápido aos dados.
- **Procedimentos Armazenados:** Conjuntos de comandos SQL que podem ser armazenados no servidor e executados como uma única unidade.
- **Triggers:** Mecanismos que executam automaticamente ações definidas quando certos eventos ocorrem em uma tabela.

### 2.6.1 Softwares CAD

Os softwares CAD são ferramentas críticas na engenharia e manufatura, permitindo a criação, modificação, análise e otimização de projetos com alta precisão e eficiência. No projeto em questão, utilizamos o NX, um software integrado de CAD, CAM e CAE, desenvolvido pela Siemens PLM Software (NX. . . , 2024).

Os softwares CAD facilitam a criação de modelos tridimensionais detalhados, simulações e análises complexas, além de gerar documentação técnica necessária para a fabricação. Eles permitem uma melhor visualização e manipulação dos projetos, promovendo a identificação de erros e a melhoria contínua dos produtos.

- **Modelagem 3D:** Criação de modelos tridimensionais precisos que representam a geometria do produto.
- **Simulação e Análise:** Realização de testes de desempenho e validação estrutural dos modelos sob diversas condições operacionais.
- **Documentação Técnica:** Geração de desenhos técnicos detalhados, especificações e relatórios necessários para a fabricação.

- **Integração com CAM:** Programação de máquinas CNC, permitindo a fabricação direta a partir dos modelos CAD criados.

### 3 DESENVOLVIMENTO E ARQUITETURA DO SISTEMA

Neste capítulo apresenta uma visão detalhada do desenvolvimento e da arquitetura do sistema proposto, abrangendo desde o método de reconstrução tridimensional e ferramentas de programação utilizadas até os requisitos gerais e funcionais, a arquitetura do sistema, o banco de dados, a aquisição de imagens, o fluxo de dados e os diagramas de sequência. O objetivo é fornecer uma compreensão abrangente dos componentes e processos envolvidos na criação da arquitetura de inspeção de manufatura.

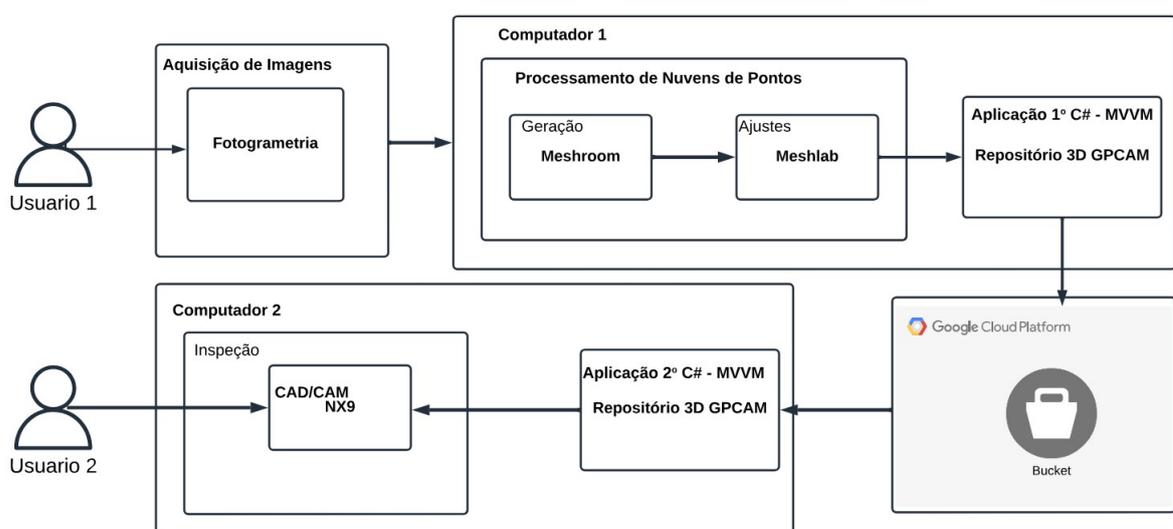
#### 3.1 DESCRIÇÃO CONCEITUAL

A descrição conceitual do sistema de inspeção de manufatura aborda a comunicação e interação entre os componentes principais do sistema. O objetivo é fornecer uma visão clara e concisa de como os diferentes módulos trabalham juntos para garantir uma inspeção precisa e eficiente das peças manufaturadas.

##### 3.1.1 Visão Geral do Sistema

O sistema de inspeção de manufatura é projetado para capturar, processar e analisar modelos tridimensionais de peças utilizando técnicas de fotogrametria e software CAD. O fluxo de trabalho do sistema é ilustrado na Figura 8, que mostra a interação entre os diversos componentes do sistema.

Figura 8 – Diagrama conceitual da arquitetura.



Fonte: Autor.

O sistema é composto pelos seguintes componentes principais:

- **Aquisição de Imagens (Usuário 1):** O usuário captura imagens das peças utilizando uma câmera Nikon D5100 equipada com uma lente Nikon Nikkor AF-S 18-55mm f/3.5-5.6G ED II DX.
- **Computador 1 - Processamento de Nuvens de Pontos:**
  - **Meshroom:** Utilizado para gerar a nuvem de pontos a partir das imagens capturadas.
  - **Meshlab:** Realiza ajustes na nuvem de pontos para melhorar a precisão e a qualidade do modelo 3D.
- **Aplicação C# - MVVM (Repositório GPCAM):** Desenvolvida para gerenciar os modelos tridimensionais. Utiliza a API do Google Cloud para armazenar e gerenciar os arquivos no bucket.
- **Google Cloud Platform (Bucket):** Armazena os modelos tridimensionais, proporcionando um repositório acessível e escalável.
- **Computador 2 - Inspeção:**
  - **NX:** O software CAD utilizado para comparar os modelos gerados com os modelos CAD de referência, utilizando a ferramenta *Compare Body*.
- **Inspeção (Usuário 2):** O segundo usuário realiza a análise e inspeção dos modelos 3D utilizando o NX.

### 3.2 REQUISITOS FUNCIONAIS

Os requisitos funcionais estabelecem as bases fundamentais para o desenvolvimento do sistema de inspeção de manufatura. Esses requisitos abrangem aspectos essenciais como precisão, compatibilidade, segurança e usabilidade, que são cruciais para garantir que o sistema atenda às expectativas e necessidades dos usuários. Ao definir esses requisitos, buscou-se assegurar que o sistema seja robusto, escalável e fácil de integrar com outras ferramentas e tecnologias. A seguir, detalharemos os principais requisitos funcionais que guiaram o desenvolvimento deste projeto.

Tabela 1 – Requisitos Funcionais do Sistema

<b>Requisito</b>	<b>Descrição</b>
<b>Precisão da Reconstrução 3D</b>	A reconstrução tridimensional deve ter uma precisão suficiente para detectar variações de até 0,1 mm nas dimensões das peças comparadas com o modelo CAD de referência.
<b>Compatibilidade de Ferramentas</b>	As ferramentas de software utilizadas (Meshroom, Meshlab, NX) devem ser compatíveis com os formatos de imagem e modelos tridimensionais comuns (JPEG, PNG, OBJ, STL).
<b>Escalabilidade do Sistema</b>	O sistema deve ser capaz de processar e armazenar um grande número de modelos tridimensionais sem perda de desempenho, aproveitando a infraestrutura de armazenamento em nuvem.
<b>Automação do Processo</b>	Embora a automação completa não seja implementada neste projeto, o sistema deve ser desenhado com a capacidade de ser facilmente integrado em um ambiente automatizado no futuro.
<b>Segurança dos Dados</b>	Os dados armazenados devem ser protegidos contra acessos não autorizados, utilizando métodos de autenticação e criptografia.
<b>Interoperabilidade</b>	O sistema deve permitir a fácil troca de dados e integração entre diferentes ferramentas e plataformas utilizadas no processo (câmera, software de fotogrametria, software de CAD).
<b>Usabilidade</b>	O sistema deve ser fácil de usar, com interfaces intuitivas e processos bem documentados para que os usuários possam capturar imagens, processar modelos e realizar inspeções sem dificuldades.
<b>Reprodutibilidade</b>	O sistema deve garantir que o processo de captura e processamento de imagens possa ser repetido de maneira consistente, garantindo a reprodutibilidade dos resultados.
<b>Flexibilidade na Aquisição de Imagens</b>	O sistema deve permitir a captura de imagens em diferentes condições de iluminação e ambientes, utilizando recursos como o Tecido Oxfordine Preto e a iluminação controlada com anel luminoso.

### 3.3 REQUISITOS NÃO FUNCIONAIS

Os requisitos não funcionais descrevem as propriedades e qualidades desejadas do sistema que não estão diretamente relacionadas às funcionalidades específicas, mas que são essenciais para garantir seu desempenho, segurança, usabilidade e manutenção. Estes requisitos garantem que o sistema opere de maneira eficiente e confiável em diferentes ambientes e sob diversas condições de uso. A seguir, detalharemos os principais requisitos não funcionais que guiaram o desenvolvimento deste projeto.

Tabela 2 – Requisitos Não Funcionais do Sistema

<b>Requisito</b>	<b>Descrição</b>
<b>Performance</b>	O sistema deve ser capaz de processar modelos 3D em tempo hábil, garantindo que as operações de captura, processamento e inspeção não excedam um tempo total de 1 hora por peça.
<b>Confiabilidade</b>	O sistema deve ter uma disponibilidade de 99,5%, minimizando o tempo de inatividade e garantindo que os usuários possam acessar e utilizar o sistema conforme necessário.
<b>Escalabilidade</b>	O sistema deve ser escalável para lidar com um aumento no número de usuários e no volume de dados sem degradação de desempenho, aproveitando a infraestrutura de nuvem do Google Cloud.
<b>Segurança</b>	Os dados devem ser protegidos contra acessos não autorizados através de autenticação e criptografia, garantindo a integridade e confidencialidade das informações armazenadas e processadas.
<b>Usabilidade</b>	A interface do usuário deve ser intuitiva e fácil de usar, permitindo que usuários com diferentes níveis de habilidade técnica possam operar o sistema eficientemente.
<b>Manutenibilidade</b>	O sistema deve ser fácil de manter e atualizar, com código modular e bem documentado, facilitando futuras modificações e expansões.
<b>Portabilidade</b>	O sistema deve ser compatível com diferentes plataformas de hardware e software, permitindo a instalação e execução em diversos ambientes sem necessidade de grandes adaptações.
<b>Compatibilidade</b>	O sistema deve ser compatível com os padrões e protocolos existentes para garantir a interoperabilidade com outras ferramentas e sistemas utilizados no processo de manufatura.

### 3.4 PROGRAMAÇÃO/FERRAMENTAS

O desenvolvimento de um sistema complexo e integrado como o proposto neste projeto requer o uso de diversas ferramentas de software que suportam diferentes aspectos do ciclo de vida do produto, desde a aquisição de dados até a análise e inspeção final. Esta seção aborda as principais ferramentas utilizadas no desenvolvimento do sistema, destacando como cada uma delas contribui para o processo geral e como foram integradas para formar uma solução coesa.

#### 3.4.1 Aquisição de Imagem

Para a aquisição dos tridimensionais de alta qualidade, foi utilizado a câmera Nikon D5100, equipada com uma lente Nikon Nikkor AF-S 18-55mm f/3.5-5.6G ED II DX e um Tripé com multiplas regulagens de altura. A combinação destes equipamentos garante a captura de imagens detalhadas e precisas para o processamento e análise subsequente.

- **Câmera Nikon D5100**

A Nikon D5100 é uma câmera DSLR com um sensor CMOS de formato DX (NIKON CORPORATION, 2011). Suas principais especificações incluem:

- **Resolução:** 16.2 megapixels.
- **Tipo de Sensor:** CMOS
- **Sensibilidade ISO:** 100-6400 (expansível até 25600).
- **Sistema de Foco:** 11 pontos de foco automático.
- **Velocidade do Obturador:** 1/4000 a 30 segundos.

- **Lente Nikon Nikkor AF-S 18-55mm f/3.5-5.6G ED II DX**

Foi utilizado a lente Nikon Nikkor AF-S 18-55mm f/3.5-5.6G ED II DX (NIKKOR. . . , 2007). Suas principais características são:

- **Comprimento Focal:** 18-55mm (equivalente a 27-82.5mm no formato 35mm).
- **Abertura Máxima:** f/3.5-5.6.
- **Abertura Mínima:** f/22-38.
- **Construção da Lente:** 7 elementos em 5 grupos, incluindo um elemento de vidro ED.
- **Distância Focal Mínima:** 0.9 pés (aproximadamente 27 cm).
- **Tamanho do Filtro:** 52mm.
- **Peso:** Aproximadamente 7.2 onças (aproximadamente 204 gramas).

### 3.4.2 Condicionamento e Padronização

Afim de Padronizar e garantir uma boa captura de imagens para o processamento de reconstrução tridimensional, foi utilizado as seguintes ferramentas.

- **Arduino e Motor de Passo** Para agilizar e padronizar o processo de captura de imagens, foi utilizado um Arduino junto com um motor de passo 28BYJ-48 5V DC e um driver ULN2003 como uma solução simples e efetiva para este problema. Esse conjunto permite a rotação precisa da peça a ser analisada, facilitando a captura de imagens para fotogrametria.

O motor de passo 28BYJ-48 é controlado pelo Arduino através do driver ULN2003, que permite a rotação da peça em incrementos de 9 graus a cada clique de um botão. Esse controle preciso garante que a peça seja capturada de todos os ângulos necessários para uma reconstrução tridimensional precisa.

- **Arduino:** Utilizado para controlar o motor de passo e gerenciar a lógica de operação.
- **Motor de Passo 28BYJ-48:** Proporciona rotações precisas, essenciais para a padronização das capturas de imagem.
- **Driver ULN2003:** Facilita o controle do motor de passo pelo Arduino, garantindo operações suaves e precisas.

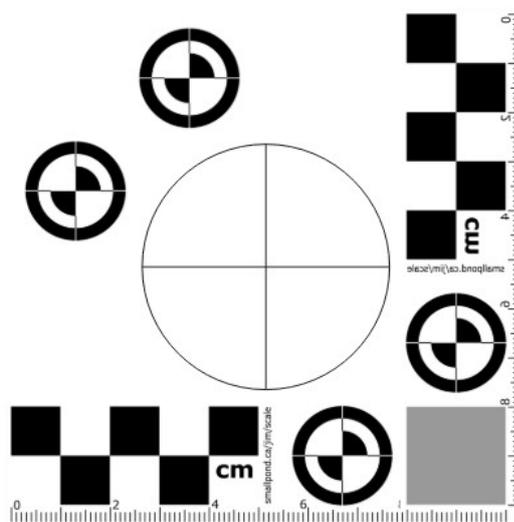
- **Referência**

No processo de fotogrametria, a utilização de referências é crucial para garantir a precisão e a padronização das capturas de imagens, bem como para definir a escala correta dos modelos tridimensionais gerados. Referências são objetos ou marcas conhecidas colocadas ao lado ou em torno do objeto de interesse, fornecendo pontos de comparação e medidas absolutas que auxiliam na calibração das imagens e na reconstrução 3D.

A imagem na figura 9 que inclui escalas métricas e padrões de calibração, desempenha vários papéis importantes no processo de fotogrametria:

- **Definição de Escala:** A escala métrica presente na imagem de referência permite definir a escala do modelo 3D reconstruído. Isso assegura que as dimensões do modelo sejam precisas e proporcionais ao objeto real.
- **Pontos de Controle:** As marcas de referência fornecem pontos de controle que são usados para alinhar e combinar múltiplas imagens. Esses pontos são identificados em diferentes imagens e utilizados para calcular a posição relativa da câmera, essencial para a reconstrução 3D.

Figura 9 – Referência e Escala.



Fonte: Modelo adaptado de (SMALL, 2024).

- **Padronização da Captura:** A utilização de referências padroniza o processo de captura de imagens, garantindo que cada conjunto de imagens siga o mesmo procedimento e condições de captura. Isso melhora a consistência dos dados coletados e a qualidade do modelo final.

#### • Tecido Preto

No processo de fotogrametria, é fundamental minimizar as interferências visuais e garantir que as imagens capturadas sejam focadas exclusivamente no objeto de interesse. Para isso, utilizamos um Tecido Oxfordine Preto como fundo e na base rotatório para as capturas de imagem como exposto na figura 10.

Fatores do uso do Tecido:

- **Redução de Interferências Visuais:** O Tecido Oxfordine Preto serviu para eliminar qualquer interferência visual do ambiente circundante, proporcionando um fundo homogêneo e sem distrações. Isso facilita a identificação das bordas e características do objeto de interesse nas imagens.
- **Melhoria na Qualidade da Imagem:** Ao absorver a luz, o tecido reduz reflexos e brilhos que poderiam distorcer a captura da imagem. Isso resulta em fotografias mais nítidas e com melhor contraste, essenciais para a precisão da fotogrametria.
- **Isolamento do Objeto:** O fundo preto cria um contraste claro entre o objeto e o ambiente, destacando o objeto e facilitando a segmentação e o proces-

Figura 10 – Primeiros testes de captura.



Fonte: Autor.

samento das imagens. Isso é particularmente útil na fase de extração de características no Meshroom.

- **Padronização das Capturas:** Usar um fundo uniforme ajuda a padronizar as condições de captura de imagem, independentemente do ambiente onde a peça está sendo fotografada. Isso contribui para a consistência e a repetibilidade do processo.

#### • Iluminação

Para garantir uma iluminação uniforme e minimizar reflexos indesejados (*glare*) na superfície da peça, utilizamos um *anel luminoso* com cobertura difusa oferecendo:

- **Iluminação Uniforme:** O anel luminoso fornece uma iluminação homogênea ao redor da peça, eliminando sombras duras e garantindo que todos os detalhes da superfície sejam visíveis nas imagens capturadas.
- **Minimização de Reflexos (*Glare*):** A cobertura difusa do anel luminoso ajuda a dispersar a luz de maneira suave, reduzindo reflexos brilhantes na superfície da peça, importante para capturar imagens de alta qualidade sem áreas saturadas ou obscurecidas por brilho excessivo.
- **Melhoria na Precisão da Fotogrametria:** Uma iluminação bem controlada melhora a precisão dos algoritmos de fotogrametria, pois fornece imagens

com contraste adequado e detalhes nítidos. Isso facilita a extração de características e a correspondência de pontos durante o processamento no Meshroom.

- **Revestimento e Cobertura**

Para a análise de peças metálicas ou com pinturas/superfícies reflexivas, foi implementada uma solução de álcool 92,8% com talco. Esta mistura foi utilizada para reduzir a reflexibilidade do material e criar uma superfície não uniforme na peça. Esta abordagem serve como uma alternativa mais acessível ao líquido revelador industrial, como o SKD-S2 Spray.

- **Redução de Reflexibilidade:** A aplicação da solução de álcool com talco reduz os reflexos na superfície da peça, permitindo uma captura de imagem mais uniforme e menos distorcida.
- **Superfície Não Uniforme:** A mistura cria uma camada leve e não uniforme sobre a superfície da peça, melhorando a capacidade dos algoritmos de fotogrametria de detectar características e pontos de correspondência.
- **Acessibilidade e Custo-Efetividade:** Esta solução caseira é uma alternativa econômica ao uso de sprays industriais, mantendo a eficácia necessária para o processo de fotogrametria.

### 3.4.3 Processamento - Meshroom

O Meshroom é uma ferramenta de fotogrametria de código aberto que permite a reconstrução tridimensional de objetos a partir de imagens. Este software utiliza algoritmos avançados para processar um conjunto de fotografias e criar modelos 3D precisos e detalhados. No contexto deste projeto, o Meshroom desempenha o processamento das imagens capturadas, transformando-as em modelos tridimensionais utilizáveis para a inspeção de manufatura.

A seguir, descrevemos o fluxo de trabalho específico e os principais componentes do Meshroom utilizados no projeto:

- **Carregamento de Imagens:** As imagens capturadas com a câmera Nikon D5100 são carregadas no Meshroom. A qualidade e a resolução das imagens são fundamentais para o sucesso da reconstrução 3D.
- **Inicialização da Camera (*Cameralnit*):** O Meshroom extrai as informações da câmera, como parâmetros de calibração e metadados das imagens capturadas.
- **Feature Extraction e Matching:** O Meshroom identifica características distintas em cada imagem (como cantos e bordas) e encontra correspondências entre

elas em diferentes imagens. Este processo é vital para calcular a posição relativa das câmeras e criar uma estrutura básica do objeto.

- **Structure from Motion (SfM):** Utilizando as correspondências de características, o Meshroom calcula a posição da câmera para cada imagem e gera uma nuvem de pontos inicial. Esta nuvem de pontos representa a estrutura tridimensional do objeto.
- **Densificação da Nuvem de Pontos:** Após a geração da nuvem de pontos inicial, o Meshroom realiza a densificação, adicionando mais pontos para aumentar o nível de detalhe e a precisão do modelo 3D.
- **Criação da Malha 3D:** A partir da nuvem de pontos densificada, o Meshroom constrói uma malha tridimensional que define a superfície do objeto
- **Texturização:** Por fim, as imagens originais são projetadas sobre a malha 3D para adicionar textura e cor, resultando em um modelo 3D visualmente realista e detalhado.

#### 3.4.4 Pos-processamento - Meshlab

O Meshlab é uma ferramenta de código aberto utilizada para o processamento e edição de malhas tridimensionais. No contexto deste projeto, o Meshlab é utilizado para o pós-processamento dos modelos 3D gerados pelo Meshroom para a análise e inspeção final.

As principais funcionalidades do Meshlab utilizadas no projeto incluem:

- **Dimensionamento:**
  - Utilizar a ferramenta *Point to Point Measure* para obter a medida  $M_x$  utilizando a escala de referência.
  - Calcular a relação de escala dividindo a medida real da escala ( $M_r$ ) pela medida encontrada no Meshlab ( $M_x$ ).
  - Uso do menu de filtros e utilizar a ferramenta de transformação de escala na seção de *Normais, Curvaturas e Orientações*.
  - Aplicar o valor da relação  $M_r/M_x$  no eixo X para ajustar a escala do modelo.
- **Orientação:**
  - Utilizar o pincel de seleção para selecionar as superfícies que estão em um plano.
  - Aplicar a função *rotate to fit a plane* no menu de filtros, na seção de *Normais, Curvaturas e Orientações*, para alinhar corretamente a peça.

- **Isolamento da Peça**

- Utilizar a função *Selection from an Area* para selecionar a área de interesse.
- Deletar a área externa à área selecionada.
- Repetir o processo conforme necessário para remover áreas indesejadas adicionais.
- Utilizar a função *Remove Isolated pieces* para remover pontos ou partes flutuantes indesejadas.

- **Reparos/Ajustes Finais:**

Para garantir a integridade e a qualidade da malha, são implementadas as seguintes funções de reparo no menu de filtros do Meshlab:

- Remove duplicate faces: Remove faces duplicadas na malha.
- Remove duplicate vertices: Remove vértices duplicados.
- Remove unreferenced vertices: Remove vértices que não são referenciados por nenhuma face.
- Remove zero area faces: Remove faces com área zero.
- Repair non-manifold edges: Repara arestas que não são múltiplas, corrigindo problemas na topologia da malha.

O uso dessas funcionalidades no Meshlab assegura que os modelos 3D estejam devidamente dimensionados, orientados e limpos, prontos para a fase de inspeção final. Os ajustes e reparos a malha garante que os modelos sejam uma representação fiel das peças manufaturadas, facilitando a análise detalhada e a validação contra os modelos CAD.

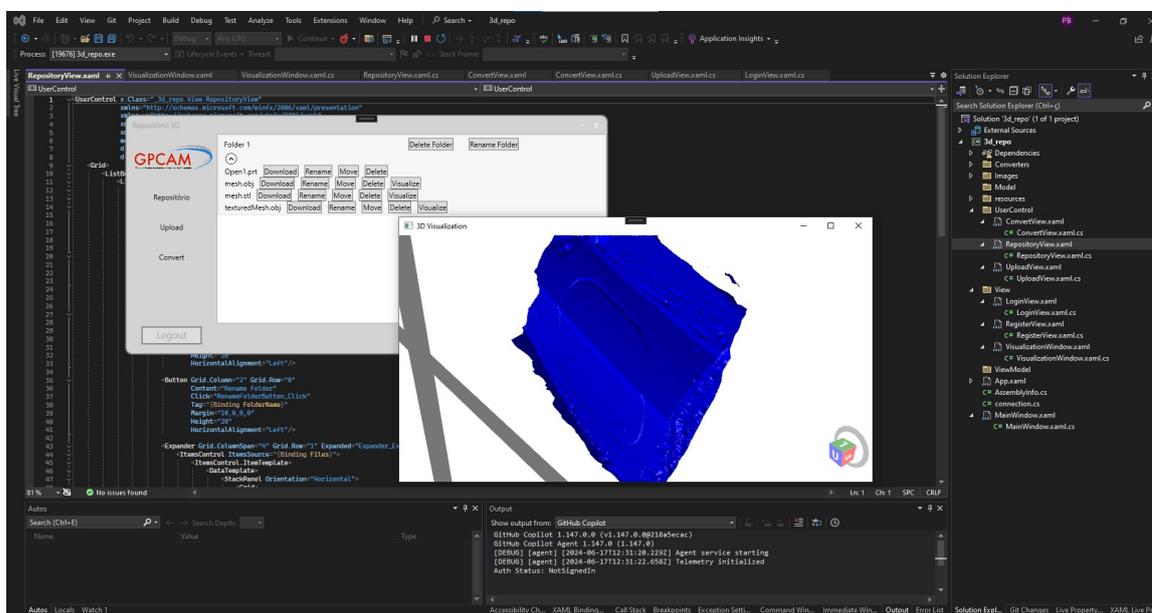
### 3.4.5 Ferramenta de Integração

A proposta inicial do projeto era utilizar a ferramenta NXOpen do software CAD NX para realizar as integrações, utilizando a linguagem C# e o framework de desenvolvimento de aplicações disponibilizado pela Siemens. Nessa abordagem, seria utilizada a API do Google Cloud para disponibilizar os arquivos dos modelos tridimensionais e importá-los diretamente para o software CAD. Entretanto, isso não foi possível sem uma licença de autor disponibilizada pela Siemens, necessária para integrar bibliotecas externas e comunicações JSON/XML em aplicações executadas pelo NXOpen.

Para contornar este problema, foi mantido a utilização da linguagem C# e foi elaborado um aplicativo Windows, exposto na Figura 11, seguindo o modelo MVVM, descrito na Seção 2.4, para ser um repositório de modelos tridimensionais.

Para isso, utilizamos as seguintes ferramentas:

Figura 11 – Desenvolvimento do Repositório de modelos tridimensionais. Modelo tridimensional azul exposto: Tampa de combustível do carro Volkswagen Polo.



Fonte: Autor.

- **XAMPP:** Um pacote de software que inclui o servidor Apache, o sistema de gerenciamento de banco de dados MySQL e intérpretes para scripts escritos em PHP e Perl. Foi utilizado para o desenvolvimento local do banco de dados MySQL, permitindo a gestão eficiente dos dados de usuários e modelos. A administração do banco de dados foi realizada por meio do phpMyAdmin, uma ferramenta de software livre escrita em PHP, destinada a lidar com a administração do MySQL na Web.
- **Visual Studio 2022:** Uma plataforma de desenvolvimento integrada (IDE) da Microsoft, que fornece um conjunto abrangente de ferramentas para o desenvolvimento de aplicativos. Visual Studio 2022 foi utilizado para desenvolver o aplicativo, aproveitando os frameworks e ferramentas disponíveis para implementar o modelo MVVM.
- **Google Cloud:** Foi utilizada a API de conexão do Google Cloud para operações como upload, download, exclusão, alteração e renomeação de arquivos diretamente nos buckets, facilitando a gestão dos modelos tridimensionais armazenados na nuvem.
- **HelixToolkit:** Um package para WPF que fornece interfaces para visualização de modelos tridimensionais e conversão de arquivos, incorporando visualizações 3D no aplicativo.

- **WPF (Windows Presentation Foundation):** Um subsistema de interface gráfica para a criação de aplicativos de interface de usuário ricos para Windows. Foi utilizado para desenvolver a interface do usuário do aplicativo, aproveitando seus recursos avançados de layout e design.
- **Material Design:** Um package utilizado para a elaboração dos menus da aplicação, fornecendo componentes e estilos para criar interfaces modernas e atraentes, seguindo os princípios do Material Design.

#### 3.4.5.1 Desenvolvimento do Código

O desenvolvimento do sistema focou em criar um repositório de modelos tridimensionais acessível e escalável, integrando diversas ferramentas e APIs para permitir uma gestão eficiente dos arquivos. As imagens capturadas em formato .png são processadas no Meshroom e ajustadas no MeshLab, resultando em arquivos .obj. Esses arquivos são então enviados ao repositório, onde podem ser convertidos em STL para importação futura em projetos CAD e análise.

As principais views e controladores utilizados no projeto são:

- **LoginView.xaml e LoginView.xaml.cs:** Gerencia a interface de login dos usuários.
- **RegisterView.xaml e RegisterView.xaml.cs:** Controla a interface de registro de novos usuários.
- **MainWindow.xaml e MainWindow.xaml.cs:** A janela principal do aplicativo, onde os usuários interagem com as funcionalidades principais.
- **RepositoryView.xaml e RepositoryView.xaml.cs:** Interface para visualização e gestão dos modelos tridimensionais armazenados.
- **ConvertView.xaml e ConvertView.xaml.cs:** Permite a conversão de arquivos .obj em STL.
- **UploadView.xaml e UploadView.xaml.cs:** Interface para upload de novos modelos tridimensionais para o repositório.
- **VisualizationWindow.xaml e VisualizationWindow.xaml.cs:** Permite a visualização dos modelos tridimensionais utilizando HelixToolkit.

#### 3.4.5.2 Base de Dados

O XAMPP foi utilizado para desenvolver localmente um banco de dados MySQL simples, que ministra o login de usuários. A tabela de usuários contém os seguintes campos:

Tabela 3 – Tabela de Usuários

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Nulo</b>	<b>Chave</b>	<b>Padrão</b>	<b>Extra</b>
id	int(11)	NÃO	Primária	NULO	auto_incremental
username	varchar(255)	NÃO		NULO	
email	varchar(255)	NÃO		NULO	
senha	varchar(255)	NÃO		NULO	
tempKey	varchar(255)	SIM		NULO	

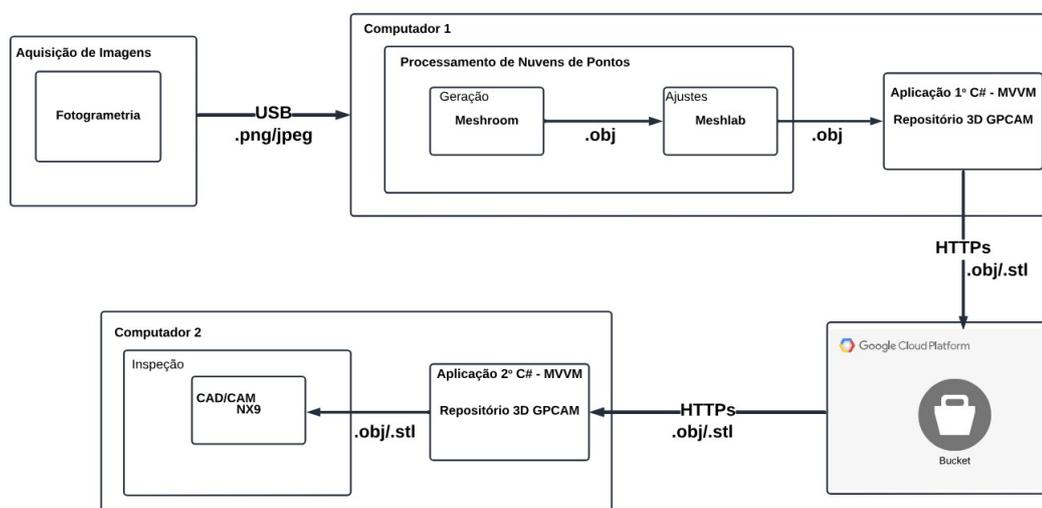
O processo de registro de usuário no sistema envolve a inserção de dados como nome de usuário, email e senha, que é encriptada antes de ser armazenada. O código responsável por essa operação verifica se todos os campos foram preenchidos corretamente e se as senhas coincidem. Em seguida, a senha é encriptada utilizando SHA-256 e os dados são inseridos na tabela de usuários do banco de dados.

Durante o login, os dados fornecidos pelo usuário são comparados com os registros no banco de dados. A aplicação realiza uma consulta SQL para obter o hash da senha armazenada e compara com o hash da senha fornecida. Se os hashes coincidem, o usuário é autenticado com sucesso e redirecionado para a janela principal da aplicação.

#### 3.4.5.3 Fluxo de Dados e Materiais

O fluxo de dados no sistema de inspeção de manufatura envolve a captura, processamento, armazenamento e análise de modelos tridimensionais. Inicialmente, as imagens são capturadas usando a câmera Nikon D5100 e salvas no formato PNG ou JPEG. Essas imagens são transferidas via USB para o computador 1, onde são carregadas no Meshroom para gerar uma nuvem de pontos. A nuvem de pontos é então ajustada no Meshlab e convertida em um arquivo OBJ. Em seguida, os arquivos OBJ são enviados para o repositório no Google Cloud utilizando a API de conexão por meio de HTTPs. A aplicação C# desenvolvida com MVVM gerencia o repositório de modelos tridimensionais. Os arquivos OBJ podem ser convertidos para STL utilizando a API do HelixToolkit. A visualização dos modelos tridimensionais é feita através do HelixToolkit no WPF. Finalmente, os modelos STL são importados para o software CAD NX para comparação com os modelos CAD de referência, e a análise é realizada utilizando a ferramenta *Compare Body* no NX. Os dados transferidos entre os diferentes componentes do sistema seguem protocolos específicos de segurança e integridade para garantir a confidencialidade e a precisão das informações manipuladas. Durante a transferência para o Google Cloud, são utilizados métodos de autenticação e criptografia para proteger os dados armazenados no repositório.

Figura 12 – Diagrama de Fluxo de dados.

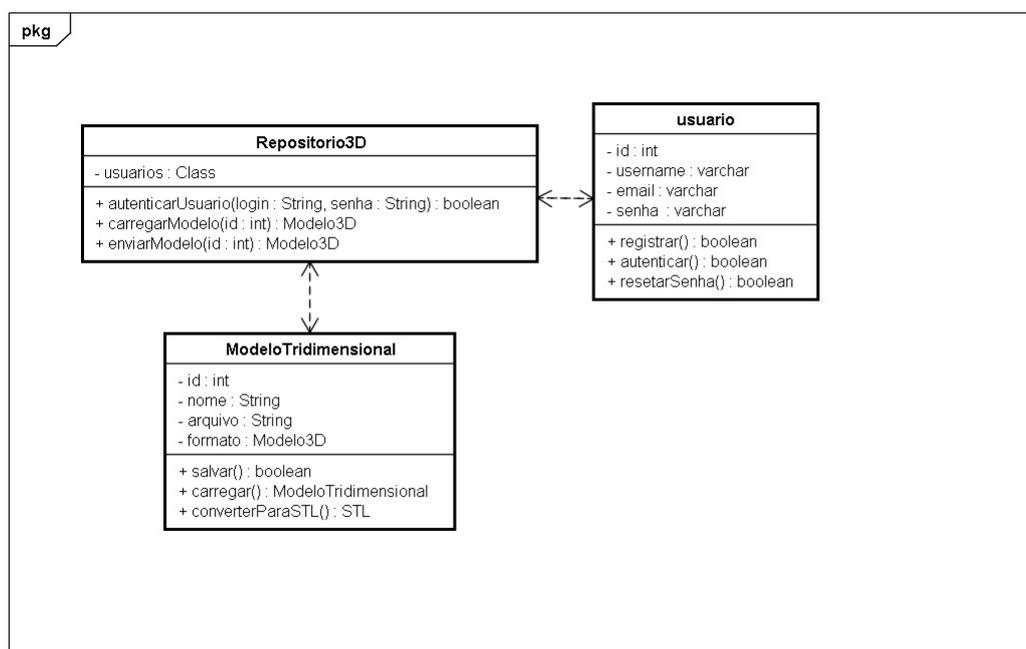


Fonte: Autor.

#### 3.4.5.4 Diagrama de Classes

O diagrama de classes na Figura 13 apresenta a estrutura estática do sistema, mostrando as classes principais, seus atributos, métodos e os relacionamentos entre elas.

Figura 13 – Diagrama de Classes (UML).



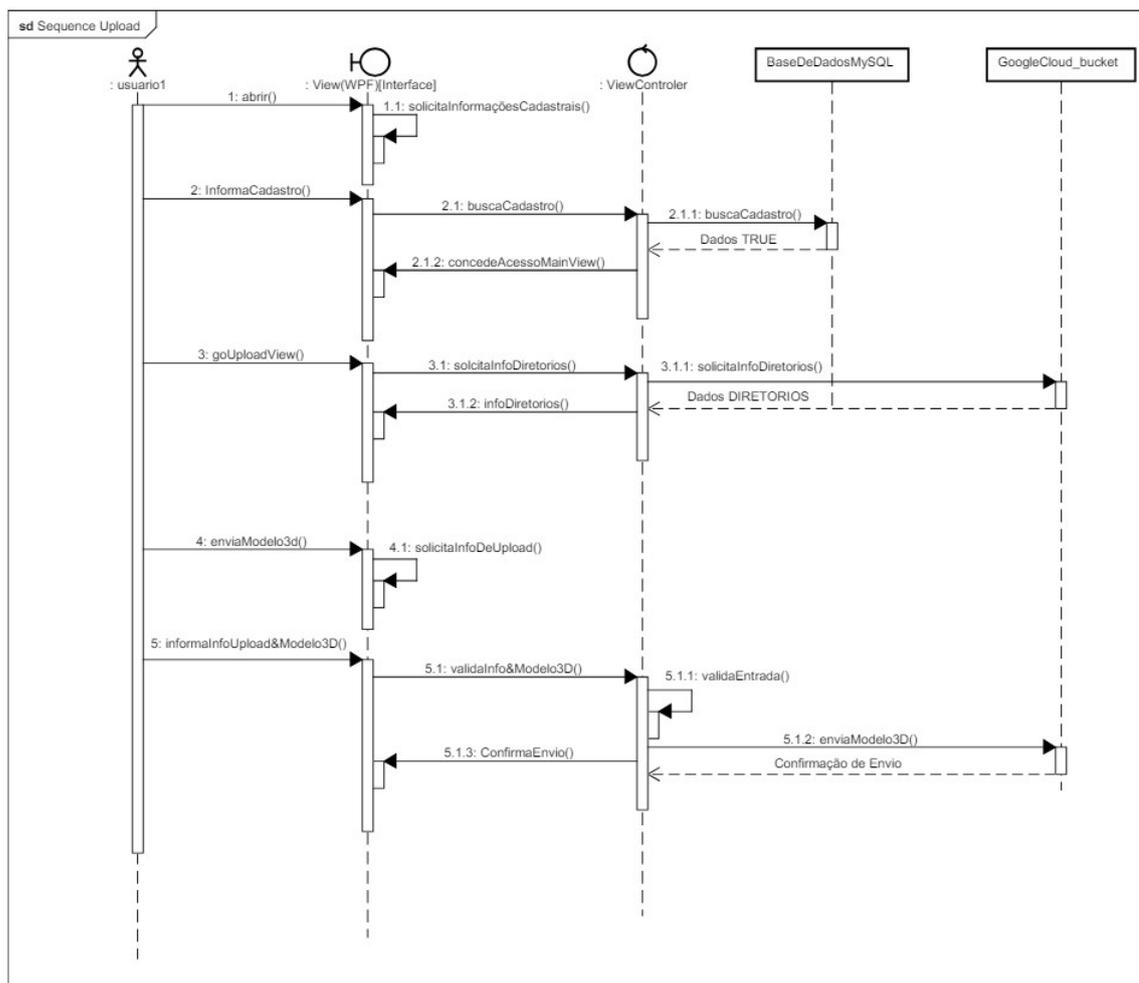
Fonte: Autor.

A estrutura estática do sistema, destaca três classes principais: usuario, Repositorio3D e ModeloTridimensional. A classe usuario possui atributos como id, username, email e senha, e métodos para registrar, autenticar e resetar senhas. A classe Repositorio3D gerencia os modelos tridimensionais e autentica usuários, contendo métodos para autenticar usuários, carregar e enviar modelos 3D. A classe ModeloTridimensional representa os modelos 3D, com atributos como id, nome, arquivo e formato, e métodos para salvar, carregar e converter modelos para o formato STL. As associações indicam que múltiplos usuários podem estar associados a um único repositório, e o repositório interage com os modelos tridimensionais através de seus métodos.

### 3.4.5.5 Diagrama de Sequência: Upload

A Figura 14 ilustra o processo detalhado do upload de um modelo tridimensional, destacando a interação entre os diferentes componentes do sistema: o usuário, a interface WPF, o controlador da aplicação, o banco de dados MySQL e o Google Cloud Bucket.

Figura 14 – Diagrama de Sequência: Upload (UML).



Fonte: Autor.

O diagrama é dividido em várias etapas principais, conforme descrito abaixo:

#### 1. Abertura da Interface:

- O processo inicia quando o usuário abre a aplicação método (abrir()).
- A interface solicita informações cadastrais ao controlador (solicitaInformaçõesCadastrais()).

#### 2. Autenticação do Usuário:

- O usuário informa os dados de cadastro  
(informaCadastro()).
- O controlador busca os dados de cadastro no banco de dados MySQL  
(buscaCadastro()).
- Se os dados estiverem corretos, o acesso à `MainView` é concedido  
(concedeAcessoMainView()).

### 3. Navegação para a Tela de Upload:

- O usuário navega para a tela de upload  
(goUploadView()).
- A interface solicita informações sobre os diretórios disponíveis  
(solicitaInfoDiretorios()).
- O controlador busca essas informações e as retorna para a interface  
(infoDiretorios()).

### 4. Envio do Modelo 3D:

- O usuário seleciona o modelo 3D a ser enviado  
(enviaModelo3d()).
- A interface solicita ao controlador as informações de upload  
(solicitaInfoDeUpload()).
- O controlador valida as informações de entrada  
(validaEntrada()).
- Após a validação, o controlador envia o modelo 3D para o Google Cloud Bucket  
(enviaModelo3D()).

### 5. Confirmação do Upload:

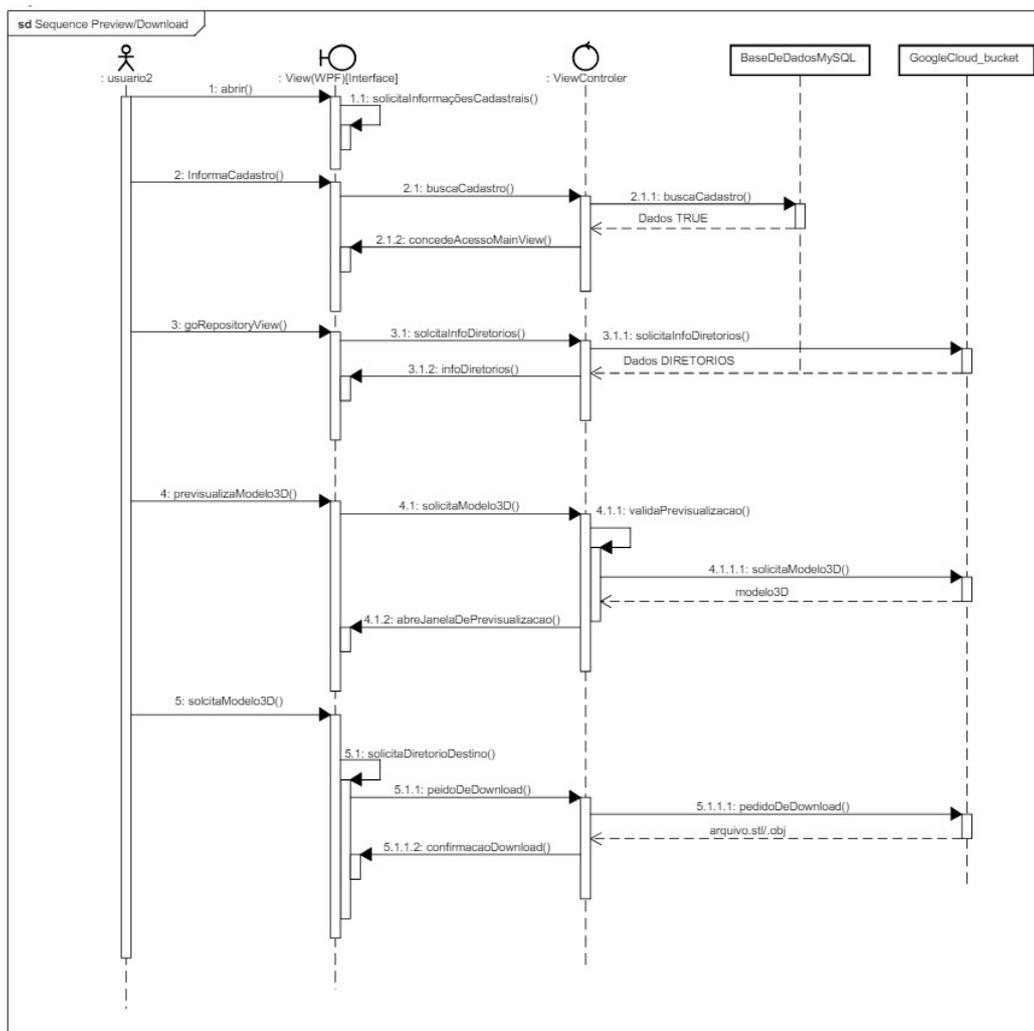
- A interface informa o usuário sobre o sucesso do upload, incluindo as informações do modelo 3D enviado  
(informaInfoUpload&Modelo3D()).
- O Google Cloud Bucket confirma o envio do modelo 3D  
(ConfirmaEnvio()).

Esta sequência de eventos assegura que o processo de upload de um modelo 3D seja realizado de maneira ordenada e segura, envolvendo verificações de autenticação, solicitação de informações necessárias e a validação dos dados antes do envio final para o Google Cloud Bucket.

### 3.4.5.6 Diagrama de Sequência: Visualização e Download

A Figura 15 ilustra o processo detalhado de visualização e download de um modelo tridimensional, destacando a interação entre os diferentes componentes do sistema: o usuário, a interface WPF, o controlador da aplicação, o banco de dados MySQL e o Google Cloud Bucket.

Figura 15 – Diagrama de Sequência: Visualização e Download (UML).



Fonte: Autor.

O diagrama é dividido em várias etapas principais, conforme descrito abaixo:

#### 1. Abertura da Interface:

- O processo inicia quando o usuário abre a aplicação no método `abrir()`.
- A interface solicita informações cadastrais ao controlador (`solicitaInformaçõesCadastrais()`).

## 2. Autenticação do Usuário:

- O usuário informa os dados de cadastro (`informaCadastro()`).
- O controlador busca os dados de cadastro no banco de dados MySQL (`buscaCadastro()`).
- Se os dados estiverem corretos, o acesso à `MainView` é concedido (`concedeAcessoMainView()`).

## 3. Navegação para a Tela de Repositório:

- O usuário navega para a tela de repositório (`goRepositoryView()`).
- A interface solicita informações sobre os diretórios disponíveis (`solicitaInfoDiretorios()`).
- O controlador busca essas informações e as retorna para a interface (`infoDiretorios()`).

## 4. Pré-visualização do Modelo 3D:

- O usuário solicita a pré-visualização de um modelo 3D (`previsualizaModelo3D()`).
- A interface solicita ao controlador as informações do modelo (`solicitaModelo3D()`).
- O controlador valida a solicitação de pré-visualização (`validaPrevisualizacao()`).
- O controlador solicita o modelo 3D ao Google Cloud Bucket (`solicitaModelo3D()`).
- O Google Cloud Bucket retorna o modelo 3D para a interface, que abre a janela de pré-visualização (`abreJanelaDePrevisualizacao()`).

## 5. Download do Modelo 3D:

- O usuário solicita o download do modelo 3D (`solicitaModelo3D()`).
- A interface solicita ao controlador o diretório de destino para o download (`solicitaDiretorioDestino()`).
- O controlador envia o pedido de download ao Google Cloud Bucket (`pedidoDeDownload()`).

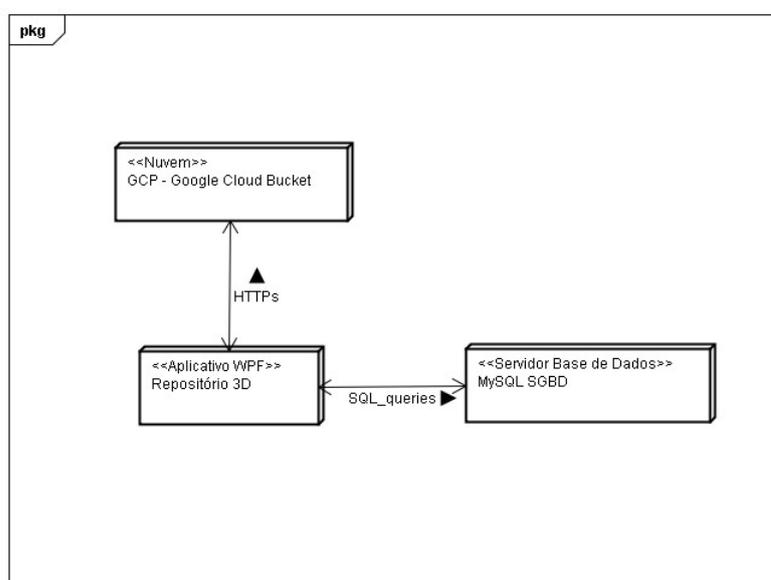
- O Google Cloud Bucket envia o arquivo STL ou OBJ para o diretório de destino  
(pedidoDeDownload()).
- A interface confirma o download ao usuário  
(confirmaDownload()).

Esta sequência de eventos assegura que o processo de visualização e download de um modelo 3D seja realizado de maneira ordenada e segura, envolvendo verificações de autenticação, solicitação de informações necessárias e a validação dos dados antes do download final do Google Cloud Bucket.

### 3.4.5.7 Diagrama de Implantação

O diagrama de implantação, apresentado na Figura 16, ilustra a arquitetura física do sistema, mostrando como os componentes de software e hardware interagem entre si. Ele apresenta três principais nós: o Aplicativo WPF, o Servidor de Base de Dados MySQL e o Google Cloud Bucket.

Figura 16 – Diagrama de Implantação (UML)



Fonte: Autor.

O **Aplicativo WPF (Repositório 3D)** representa o software desenvolvido em C# e WPF que gerencia os modelos tridimensionais. Este aplicativo permite aos usuários realizar operações como upload, download, visualização e conversão de modelos 3D.

O **Servidor de Base de Dados MySQL** é hospedado localmente para o desenvolvimento usando XAMPP e gerencia os dados dos usuários, incluindo informações de login e detalhes dos modelos armazenados. As comunicações entre o Aplicativo

WPF e o Servidor de Base de Dados são realizadas por meio de consultas SQL (*SQL queries*).

O **Google Cloud Bucket** é utilizado para o armazenamento escalável e seguro dos modelos tridimensionais na nuvem. O Aplicativo WPF interage com o Google Cloud Bucket para operações de armazenamento e recuperação de arquivos usando protocolos HTTPS, garantindo segurança e integridade dos dados transferidos.

As setas no diagrama indicam a direção da comunicação entre os componentes, destacando o uso de HTTPS para comunicação segura com a nuvem e consultas SQL para interação com o banco de dados. Este diagrama ajuda a visualizar a distribuição dos componentes do sistema e suas interações, garantindo uma compreensão clara da infraestrutura necessária para o funcionamento do sistema de inspeção de manufatura.

### 3.4.6 Inspeção

Para a inspeção dos modelos tridimensionais, foi utilizado o software CAD NX. Este software oferece diversas ferramentas de inspeção que permitem a comparação precisa entre os modelos gerados e os modelos CAD de referência. Entre essas ferramentas, destacamos a *Compare Body*.

A ferramenta *Compare Body* no NX é utilizada para comparar dois corpos 3D. O processo consiste em importar o modelo tridimensional gerado pelo processo de fotogrametria e o modelo CAD de referência no NX. Em seguida, foi configurada a ferramenta para definir os parâmetros de tolerância e os critérios de aceitação. A ferramenta então executa a comparação, identificando discrepâncias entre os dois modelos e gerando um relatório detalhado das diferenças encontradas.

## 4 IMPLANTAÇÃO

Neste capítulo, é descrito o processo de implantação do sistema de inspeção de manufatura, exemplificando um caso de uso completo. Isso inclui a metodologia de captura de imagens, o processamento e ajustes dos modelos tridimensionais, até o upload e inspeção final no software CAD. O objetivo é fornecer uma visão clara e prática de como o sistema funciona e como ele pode ser implantado em um ambiente de produção.

### 4.1 PREPARAÇÃO DO AMBIENTE

Para a implantação do sistema de inspeção de manufatura, é essencial preparar o ambiente adequado. Esta preparação inclui a configuração dos equipamentos de hardware, instalação dos softwares necessários e ajustes iniciais do sistema operacional.

Os hardware utilizados na aplicação do sistema para este relatório seguem:

- **Câmera Nikon D5100** equipada com uma lente Nikon Nikkor AF-S 18-55mm f/3.5-5.6G ED II DX e tripé com múltiplas regulagens de altura, conforme descrito na seção 3.4.1 no capítulo de desenvolvimento.
- **Condicionamento e Padronização do Ambiente:** Para assegurar a qualidade e a consistência das capturas de imagem como citado na seção 3.4.2.
- **Computadores para Processamento e Inspeção CAD:** O Computador utilizado para processamento de nuvens de pontos e inspeção CAD, conforme descrito nas seções 3.4.3. O hardware utilizado inclui:

- **Computador para Processamento de Nuvens de Pontos:**

- \* **Processador:** AMD Ryzen 5 3600 6-Core Processor 3.59 GHz
- \* **RAM instalada:** 16,0 GB
- \* **Placa de Vídeo:** ASUS GeForce RTX 2060 Overclocked 6G GDDR6 Dual-Fan EVO Edition VR
- \* **Sistema Operacional:** Windows 10 Pro, 64 bits

A configuração robusta deste computador, especialmente a presença da placa de vídeo ASUS GeForce RTX 2060, é essencial para o processamento eficiente de nuvens de pontos no Meshroom. O Meshroom utiliza intensivamente os CUDA cores da GPU para acelerar o processamento de imagens e a reconstrução 3D, reduzindo significativamente o tempo necessário para essas operações.

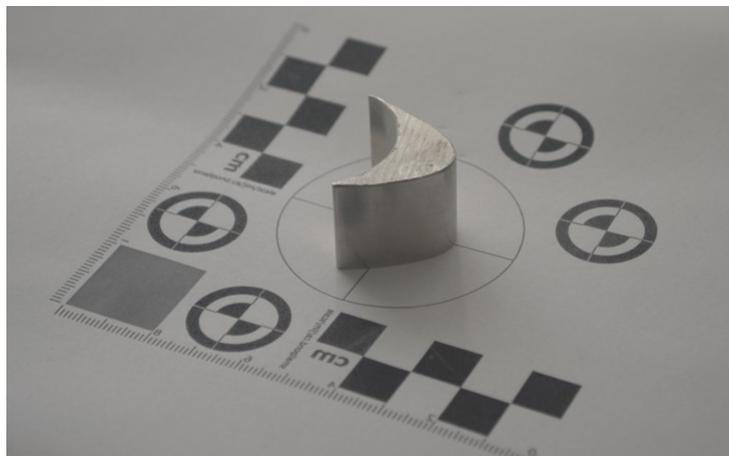
- **Computador para Inspeção CAD:**

- \* Para aplicação deste relatório foi utilizado o mesmo computador de processamento.
- **Ferramentas de Software:** As principais ferramentas de software utilizadas incluem Meshroom para processamento de imagens, Meshlab para pós-processamento, e o aplicativo desenvolvido em C# para gerenciamento de modelos tridimensionais, conforme detalhado nas seções correspondentes do capítulo de desenvolvimento.

## 4.2 METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO

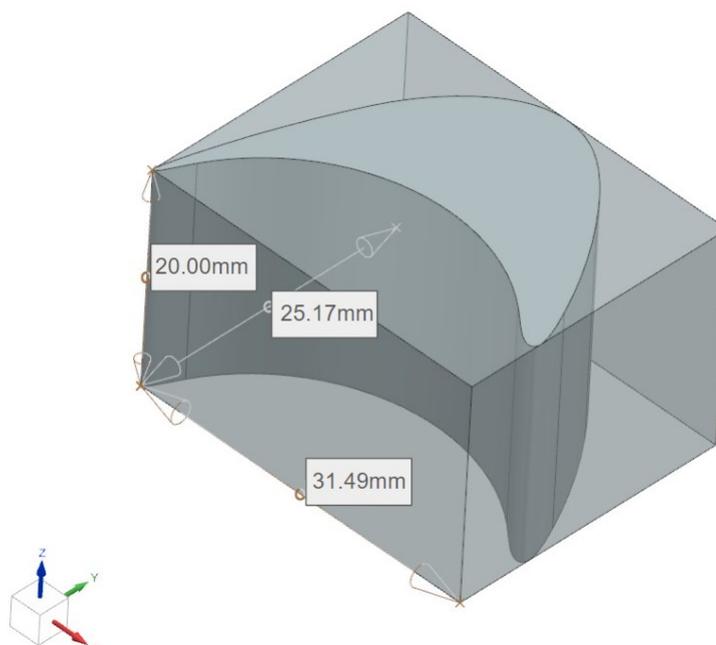
A metodologia de aquisição de imagens para fotogrametria envolve um processo cuidadoso de posicionamento e captura com a configuração final exposta na Figura 19, utilizando diversos equipamentos para garantir a precisão e qualidade das imagens. A seguir, detalha-se cada etapa do processo para a aquisição de um segmento de palheta de turbina com dimensões gerais da peça de 31.48mm X 25.18mm X 20.00mm, visto na Figura 18.

Figura 17 – Segmento de palheta de turbina.



Fonte: Autor.

Figura 18 – Dimensões gerais da peça.



Fonte: Autor.

#### 4.2.1 Posicionamento da Peça em Análise

- **Base Rotatória e Referência Visual:**

- A peça em análise é colocada sobre a referência visual, posicionada dentro do círculo central na base rotatória equipada com um motor de passo, controlado por um Arduino com alimentação externa.

- **Ambiente Controlado:**

- O conjunto de peça e base rotatória é colocado dentro de uma caixa coberta com tecido Oxfordine preto.
- A caixa é configurada para permitir a entrada de luz apenas por um ângulo específico, minimizando reflexos indesejados e interferências visuais.

- **Iluminação:**

- Um anel luminoso é posicionado em frente à abertura da caixa para fornecer iluminação uniforme.

- **Posicionamento e Configuração da Câmera:**

- A câmera, equipada com a lente Nikon Nikkor AF-S 18-55mm f/3.5-5.6G ED II DX, é posicionada em um tripé logo atrás do anel luminoso para capturar as imagens da peça.

- A distância horizontal da câmera para a peça é fixada em aproximadamente 30 cm.
- A câmera é configurada com parâmetros de exposição, ISO 1600 e foco manual para garantir padronização das imagens.
- A resolução de captura foi configurada para gerar as imagens com as dimensões 4928x3264 (pixels) a fim de garantir o máximo de qualidade e detalhamento nas imagens que variavam de 2.5MB a 3.8MB de tamanho.
- A velocidade do obturador é configurada para 1/60 segundos para minimizar borrões de movimento.
- As distâncias verticais e configurações de f/stop são ajustadas conforme a Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Configurações da Câmera para Diferentes Distâncias Verticais

<b>Distância Vertical (cm)</b>	<b>Abertura (f/stop)</b>	<b>Configuração do Obturador (s)</b>
15	F/5.6	1/60
30	F/7.1	1/60
40	F/8.0	1/60

- Para completar o dataset de fotos, são realizadas capturas em macro de detalhes da escala.
- Capturas adicionais são feitas de ângulos superiores e de perfil para garantir que todos os detalhes da peça sejam registrados.

#### 4.2.2 Captura de Imagens

- **Rotação da Peça:**

- Utilizando o motor de passo controlado pelo Arduino, a peça é rotacionada em incrementos de 9 graus. Em aplicações práticas do projeto em ambiente fabril, esse processo pode ser replicado com um comando CNC para rotacionar a peça automaticamente.
- Em cada posição, uma imagem é capturada, garantindo uma cobertura completa da peça, garantindo em média 40 fotos por distância vertical, totalizando com as fotos adicionais em média de 130-140 fotos para reconstrução de modelos. Também é possível visualizar o layout de capturas e diferentes alturas na Figura 24.

- **Revestimento da Peça:**

Figura 19 – Captura com 40 cm vertical da peça.



Fonte: Autor.

- Para peças metálicas ou com superfícies reflexivas, uma solução de álcool 92,8% com talco é aplicada para reduzir reflexos e criar uma superfície distinta (Figura 20).

### 4.3 AQUISIÇÃO DA NUVEM DE PONTOS

A partir da metodologia exposta anteriormente, foi adquirido um dataset de 139 fotos do segmento de palheta de turbina. Com esse dataset, criou-se um novo projeto no Meshroom para o processamento das imagens. A seguir, detalha-se o processo de aquisição da nuvem de pontos, ilustrando cada etapa com imagens.

#### 4.3.1 Criação do Projeto no Meshroom

Primeiramente, um novo projeto foi criado no Meshroom. As etapas específicas do processamento incluem:

- **Importação das Imagens:**

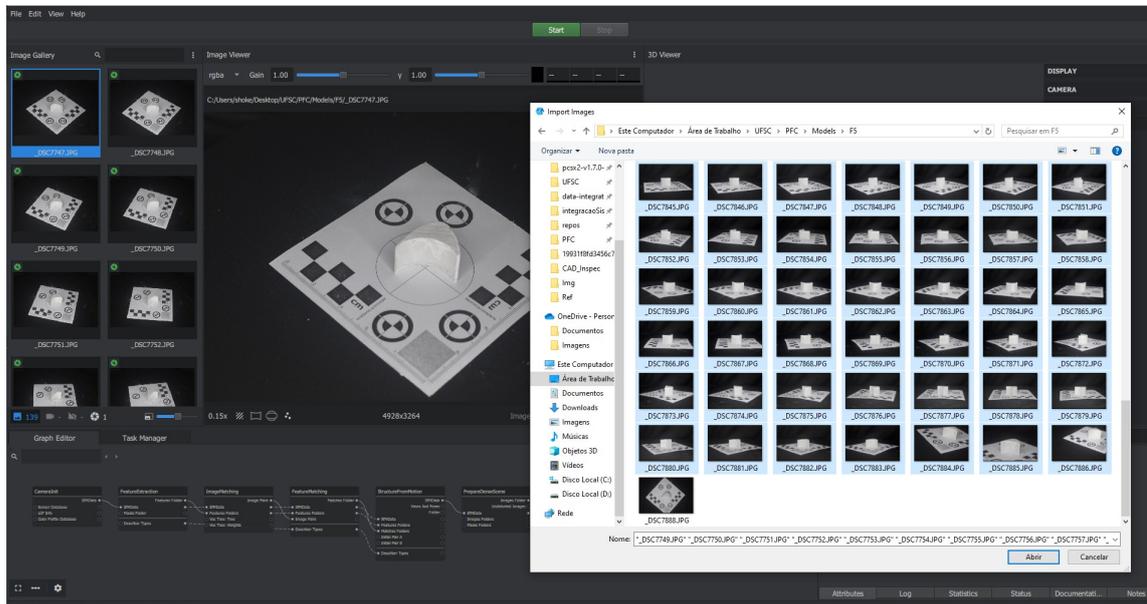
- As 139 imagens capturadas foram importadas para o Meshroom.
- As imagens foram organizadas em sequência para facilitar o processamento.

Figura 20 – Peça com revestimento e posicionada.



Fonte: Autor.

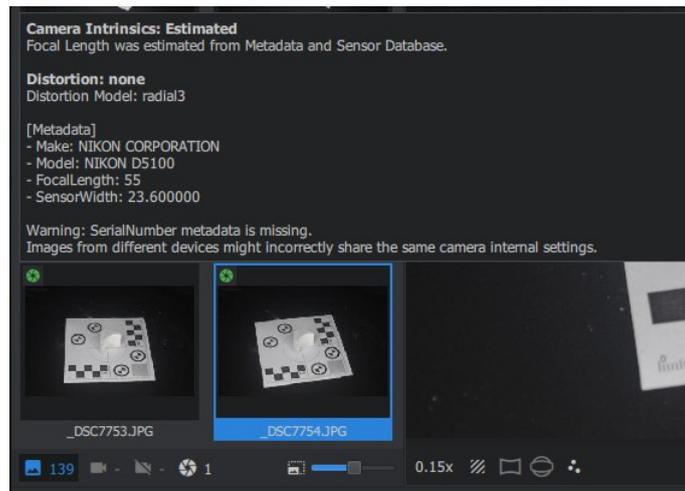
Figura 21 – Importação das imagens no Meshroom.



Fonte: Autor.

- **Inicialização da Câmera (Camerainit):**
  - O Meshroom extrai as informações da câmera, como parâmetros de calibração e metadados das imagens capturadas.
- **Extração e Correspondência de Características (Feature Extraction e Fea-**

Figura 22 – Inicialização da câmera no Meshroom.



Fonte: Autor.

**ture Matching):**

- O software identificou características distintas em cada imagem (como cantos e bordas).
- Correspondências entre essas características em diferentes imagens foram encontradas para calcular a posição relativa das câmeras, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Extração e correspondência de características (conjunto de seta e círculos vermelhos). Duas imagens de perspectivas diferentes.

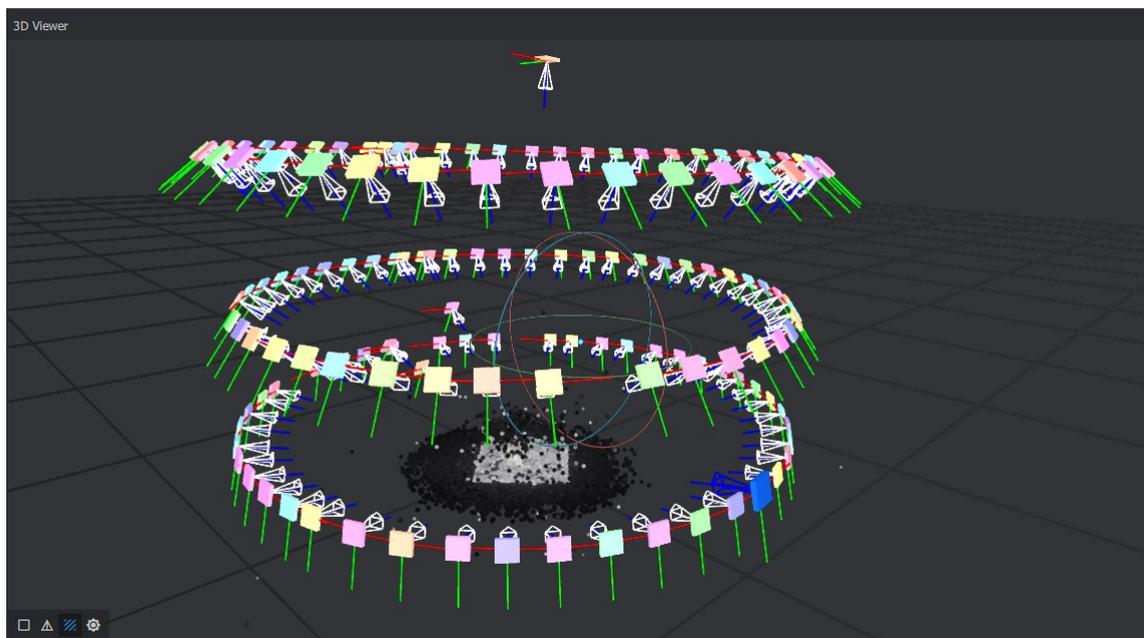


Fonte: Autor.

**• Structure from Motion (SfM):**

- Utilizando as correspondências de características, o Meshroom calculou a posição da câmera para cada imagem e gerou uma nuvem de pontos inicial, representando a estrutura tridimensional do objeto.

Figura 24 – Structure from Motion (SfM).



Fonte: Autor.

- **Densificação da Nuvem de Pontos:**

- Após a geração da nuvem de pontos inicial, foi realizada a densificação, adicionando mais pontos para aumentar o nível de detalhe e a precisão do modelo 3D.

Figura 25 – Densificação da nuvem de pontos.

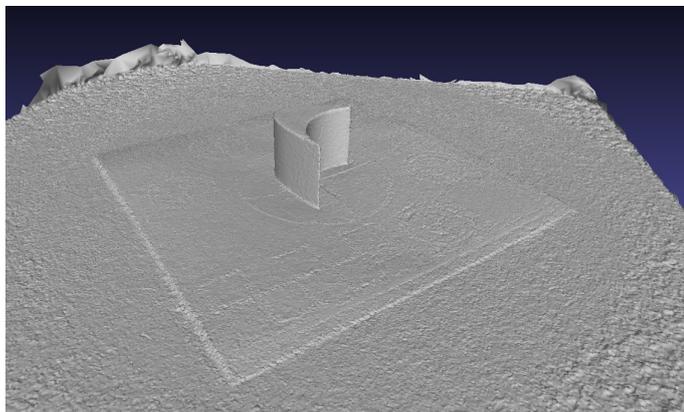


Fonte: Autor.

- **Criação da Malha 3D (Mesh):**

- A partir da nuvem de pontos densificada, o Meshroom construiu uma malha tridimensional que define a superfície do objeto.

Figura 26 – Criação da malha 3D (Visualização no Meshlab).

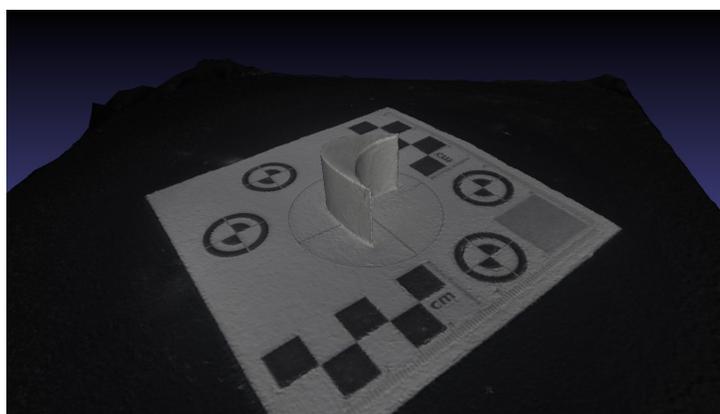


Fonte: Autor.

#### • Texturização e Filtragem da Malha:

- Após a criação da Malha, a malha é filtrada para remover artefatos e melhorar a qualidade do modelo 3D.
- Ferramentas de filtragem são usadas para suavizar a malha, reduzir ruídos e eliminar pontos isolados ou redundantes.
- O Meshroom aplica filtros específicos para garantir que a malha final seja limpa e pronta para uso em inspeção ou outras aplicações.
- As imagens originais foram projetadas sobre a malha 3D com os filtros para adicionar textura e cor, resultando em um modelo 3D visualmente realista e detalhado.

Figura 27 – Texturização do modelo 3D. (Visualização no Meshlab)



Fonte: Autor.

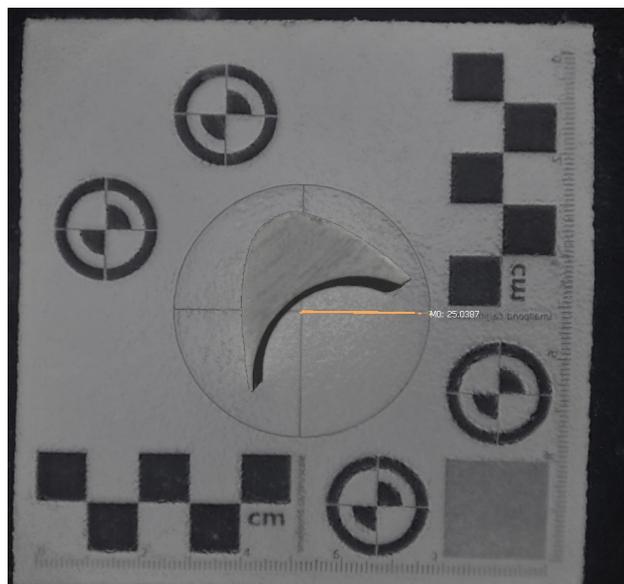
### 4.3.2 Ajustes de Pós-processamento

Após a aquisição inicial da nuvem de pontos e a reconstrução do modelo 3D no Meshroom, o arquivo é exportado no formato OBJ e importado no software Meshlab para realizar ajustes de pós-processamento. Este processo é crucial para garantir a precisão e a qualidade do modelo tridimensional final. A seguir, são detalhados os principais passos de pós-processamento realizados no Meshlab:

- **Dimensionamento:**

- Utilizando a ferramenta *Point to Point Measure*, obteve-se a medida  $M_x$  de 0,0148957 mm utilizando a escala de referência.
- Foi calculada a relação de escala dividindo a medida real da escala ( $M_r$ ) de 50 mm pela medida encontrada no Meshlab ( $M_x$ ), resultando em um fator de reescala de 335,6673402391294.
- Foi utilizada a ferramenta de transformação de escala no menu de filtros, na seção de *Normais, Curvaturas e Orientações*, aplicando o valor da relação  $M_r/M_x$  no eixo X para ajustar a escala do modelo com uma variação de 0.05 mm na medição do raio de círculo de referência que possui 25 mm, apresentando uma medida de 25.0337 mm.

Figura 28 – Ajuste de dimensionamento no Meshlab.

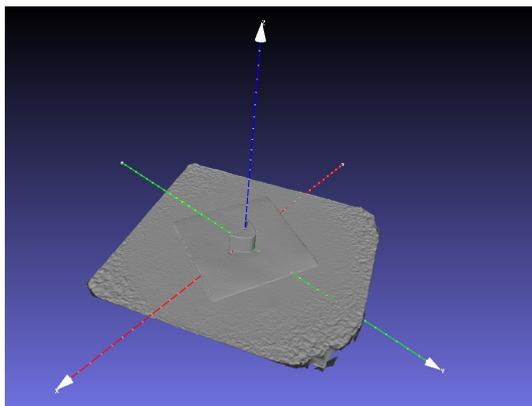


Fonte: Autor.

- **Orientação:**

- Utilizando o pincel de seleção, selecionaram-se as superfícies que estão em um plano.
- Aplicou-se a função *rotate to fit a plane* no menu de filtros, na seção de *Normais, Curvaturas e Orientações*, para alinhar corretamente a peça.

Figura 29 – Ajuste de orientação no Meshlab.



Fonte: Autor.

- **Isolamento da Peça:**

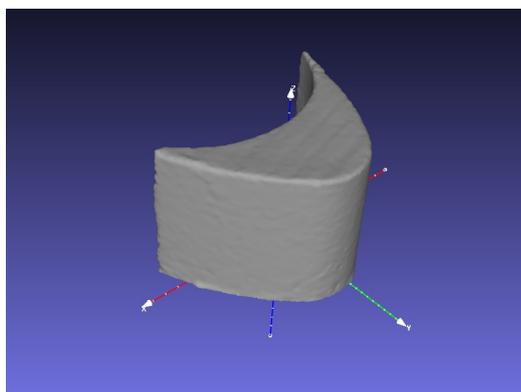
- Foi utilizada a função *Selection from an Area* para selecionar a área de interesse e deletou-se a área externa à área selecionada.
- O processo foi repetido conforme necessário para remover áreas indesejadas adicionais.
- A função *Remove Isolated pieces* foi utilizada para remover pontos ou partes flutuantes indesejadas.

- **Reparos e Ajustes Finais:**

- Para garantir a integridade e a qualidade da malha, foram aplicadas as seguintes funções de reparo no menu de filtros do Meshlab:

- \* *Remove duplicate faces*: Remove faces duplicadas na malha.
- \* *Remove duplicate vertices*: Remove vértices duplicados.
- \* *Remove unreferenced vertices*: Remove vértices que não são referenciados por nenhuma face.
- \* *Remove zero area faces*: Remove faces com área zero.
- \* *Repair non-manifold edges*: Repara arestas que não são múltiplas, corrigindo problemas na topologia da malha.

Figura 30 – Peça isolada no Meshlab com os filtros de correção aplicados.



Fonte: Autor.

#### 4.4 ENVIO PARA A APLICAÇÃO EM NUVEM

Com o modelo processado, pode-se executar a aplicação do repositório de modelos 3D. O processo envolve os seguintes passos:

##### 1. Login ou Cadastro:

- Ao iniciar a aplicação, realizar o login com as credenciais.
- Caso não possua uma conta, utilizar a opção de cadastro para criar um novo usuário.

##### 2. Seleção de Arquivo para Upload:

- Navegar até a página de upload dentro da aplicação.
- Selecionar o arquivo `.obj` correspondente ao modelo processado. Esse arquivo geralmente é encontrado na pasta `Texturing` ou `MeshFiltering` gerada pelo projeto do Meshroom.

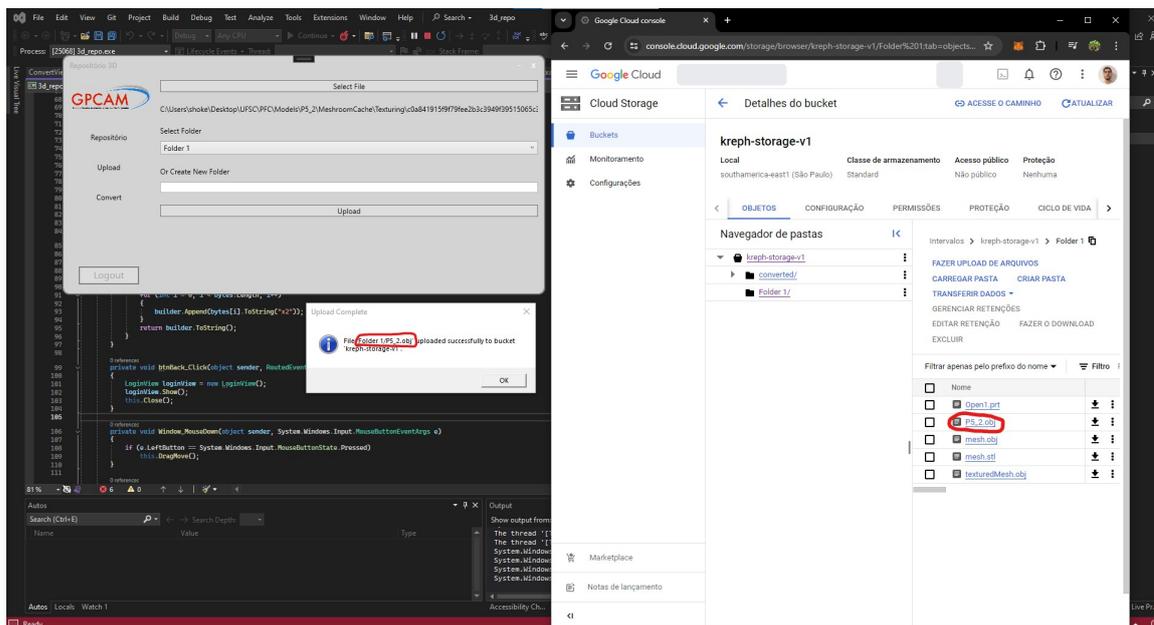
##### 3. Escolha da Pasta de Destino:

- Selecionar a pasta de destino no repositório onde o arquivo será armazenado.

##### 4. Execução do Upload:

- Clicar no botão de upload para enviar o arquivo selecionado para o Google Cloud Bucket.
- Aguardar a confirmação de que o upload foi concluído com sucesso.

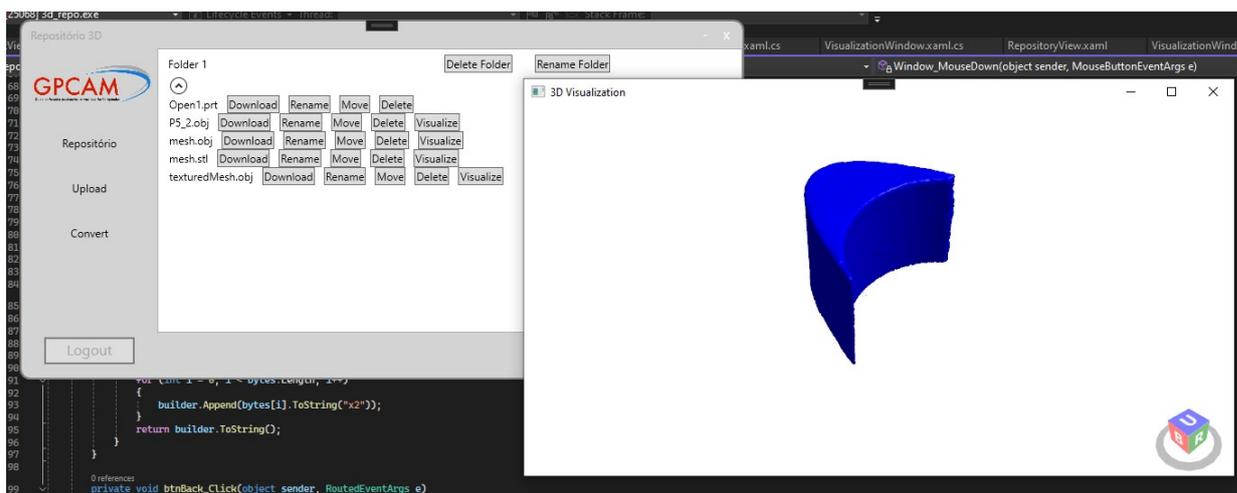
Figura 31 – Envio do Modelo 3D para o Google Cloud Bucket



Fonte: Autor.

Com o modelo já disponível no bucket da nuvem, pode-se seguir para a pasta onde foi disponibilizado na aba de Repositório e pré-visualizar o modelo. A Figura 32:

Figura 32 – Visualização do Modelo 3D no Repositório



Fonte: Autor.

Este processo garante que o modelo tridimensional processado esteja disponível na nuvem, permitindo sua visualização, download e futuras análises através da aplicação em qualquer computador com acesso ao repositório.

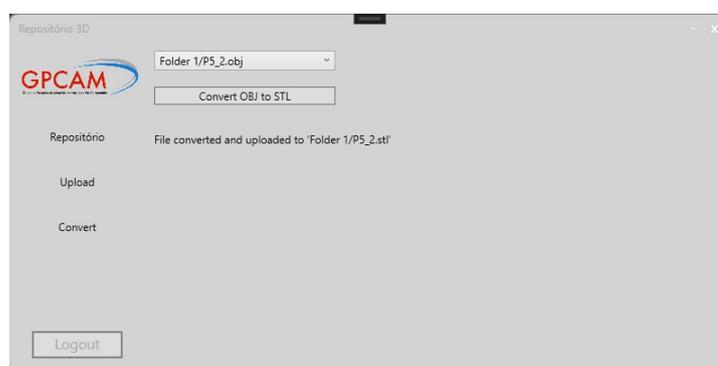
## 4.5 IMPORTAÇÃO DO MODELO PARA O SOFTWARE CAD NX

Após a conversão do arquivo OBJ para STL utilizando o aplicativo de repositório 3D, o modelo está pronto para ser importado no software CAD NX para a inspeção final. Este processo envolve a conversão do arquivo e a importação no ambiente CAD, onde pode ser comparado com o modelo CAD de referência.

### 4.5.1 Conversão do Arquivo OBJ para STL

O arquivo OBJ gerado no Meshroom é convertido para o formato STL utilizando a funcionalidade de conversão no aplicativo de repositório 3D. A Figura 33 mostra a tela de confirmação da conversão bem-sucedida do arquivo.

Figura 33 – Conversão do Arquivo OBJ para STL



Fonte: Autor.

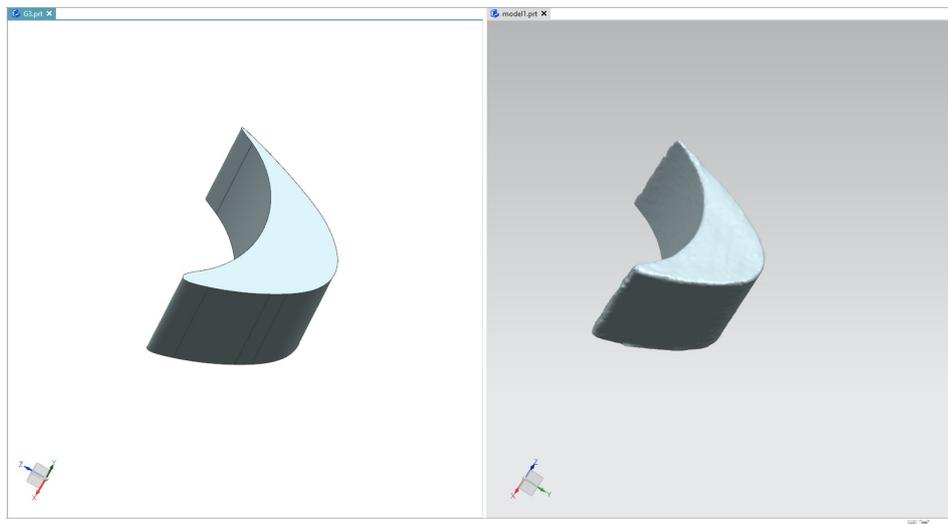
### 4.5.2 Importação e Comparação no NX

Com o arquivo STL pronto, ele é importado no software CAD NX. A Figura 34 mostra os dois modelos importados no NX, com o modelo gerado pelo processo de fotogrametria à direita e o modelo CAD de referência à esquerda.

No ambiente do NX, é possível utilizar ferramentas de comparação, como o *Compare Body*, para avaliar as discrepâncias entre os modelos. Isso permite uma análise detalhada da precisão do modelo gerado pelo processo de fotogrametria em relação ao modelo CAD de referência. Para isso, ainda é necessário realizar alguns ajustes para poder realizar essa inspeção.

Após a importação, é necessário transformar o arquivo importado em um corpo (body), pois o arquivo é apenas uma casca (shell). Para isso, é realizada uma limpeza na base do modelo com o comando *Trim Body*, removendo 0.01mm da base para nivelá-la. Com isso, pode-se utilizar o comando *Fill Body*, selecionando o corpo da

Figura 34 – Importação no Software CAD NX para comparação



Fonte: Autor.

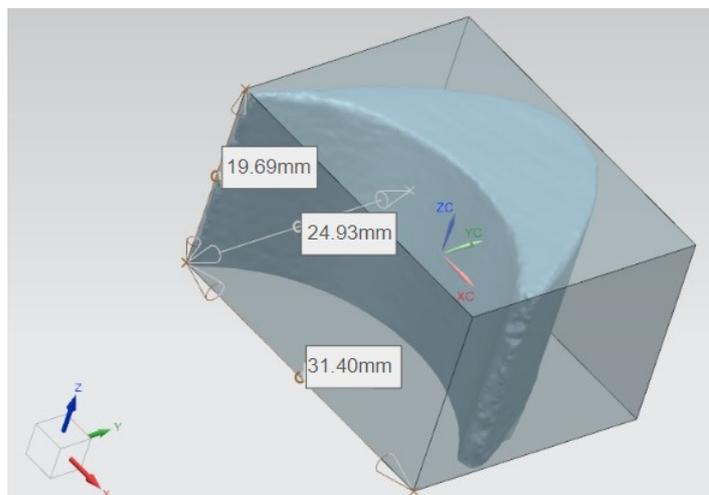
casca e o contorno da base, transformando o modelo importado em um modelo sólido no qual pode ser realizada a operação de comparação (*Compare Body*).

Ainda existem problemas de orientação do modelo reconstruído, pois ele é um modelo com medidas não bem definidas, característico de uma malha gerada a partir de uma nuvem de pontos. Isso causa vários problemas para orientar e alinhar o corpo com o modelo CAD de inspeção. Para solucionar esses problemas, pode-se criar um corpo de fronteira no objeto utilizando a operação *Boundary Body*, que facilita a visualização das dimensões gerais do modelo reconstruído, medindo 31.40mm x 24.93mm x 19.69mm, como ilustrado na Figura 35. Esta operação cria um corpo auxiliar que define os limites da geometria, facilitando o alinhamento e a orientação.

Com o corpo de fronteira, o ponto de centro de massa do corpo de fronteira é reorientado com a origem. Para o modelo CAD de inspeção, o mesmo processo pode ser realizado. Desta forma, os dois corpos estarão com seus centros de massa na origem, podendo ainda ser necessário realizar operações de rotação como ajuste fino para orientar o corpo corretamente. Com isso, pode-se selecionar o modelo CAD de inspeção como Corpo de Controle e o Modelo Reconstruído como amostra para a comparação.

Neste capítulo, foi detalhado o processo de aquisição de imagem até a inspeção no CAD. No próximo capítulo, serão discutidos os resultados do modelo reconstruído e utilizados blocos padrão (com alta precisão de fabricação, erro de 0.001mm) para validar as tolerâncias e comparar com o modelo adquirido.

Figura 35 – Corpo de fronteira no modelo reconstruído



Fonte: Autor.

## 5 AVALIAÇÃO E RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a implementação e testes do sistema de inspeção de manufatura desenvolvido. Inicialmente, são detalhados os resultados da comparação entre os modelos tridimensionais reconstruídos e os modelos CAD de referência, utilizando a ferramenta *Compare Body* do software CAD NX. Em seguida, são discutidos os resultados adicionais obtidos com blocos padrões de alta precisão, proporcionando uma visão mais abrangente da eficácia e precisão do sistema proposto.

Além disso, é realizada uma avaliação crítica do desenvolvimento do projeto, analisando o cronograma proposto em comparação com o cronograma executado, os desafios enfrentados ao longo do processo e as lições aprendidas. Esta análise fornece uma compreensão detalhada dos aspectos que funcionaram bem e das áreas que podem ser melhoradas em futuros desenvolvimentos.

O objetivo deste capítulo é fornecer uma análise completa e crítica dos resultados e do processo de desenvolvimento, destacando as contribuições do projeto para a área de inspeção de manufatura e identificando oportunidades para aprimoramentos futuros.

### 5.1 RESULTADOS OBTIDOS NA INSPEÇÃO

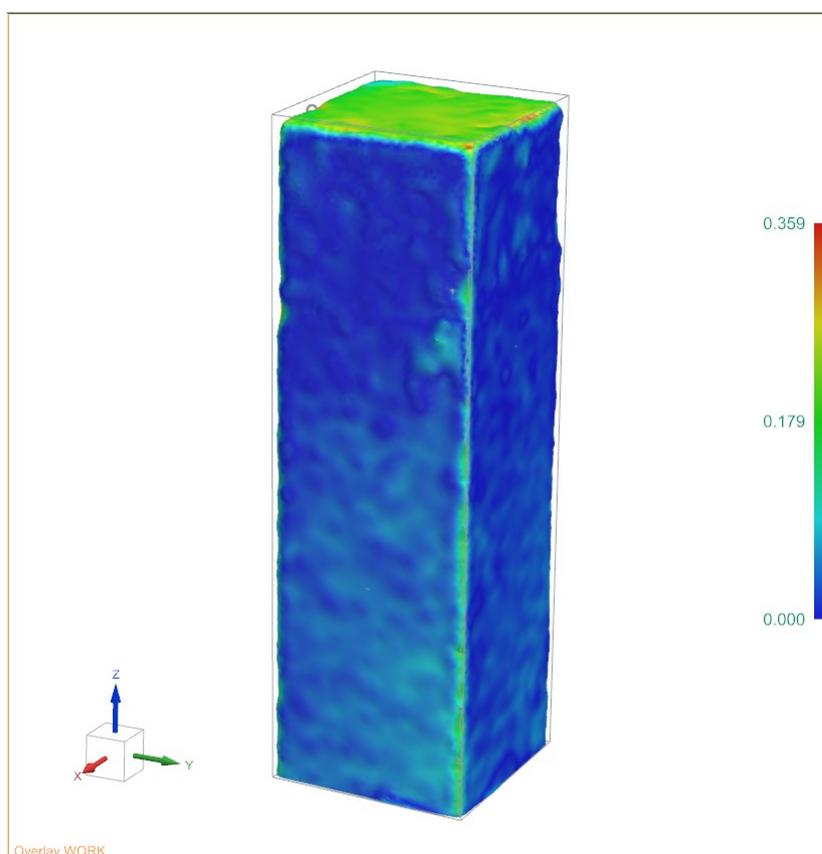
Para validar o método de aquisição a fim de visualizar os erros de medição, foi executado o mesmo processo abordado no capítulo de implantação para dois blocos padrões. Esses blocos são componentes de precisão fabricados com tolerâncias baixas, geralmente na ordem de 0.001 mm, amplamente utilizados em metrologia para calibração e verificação de instrumentos de medição. Repetindo os mesmos métodos, foram utilizados os seguintes blocos padrões:

### 5.1.1 Bloco padrão 1#

- Medidas: 9 mm x 9 mm x 35 mm  $\pm 0.001$  mm

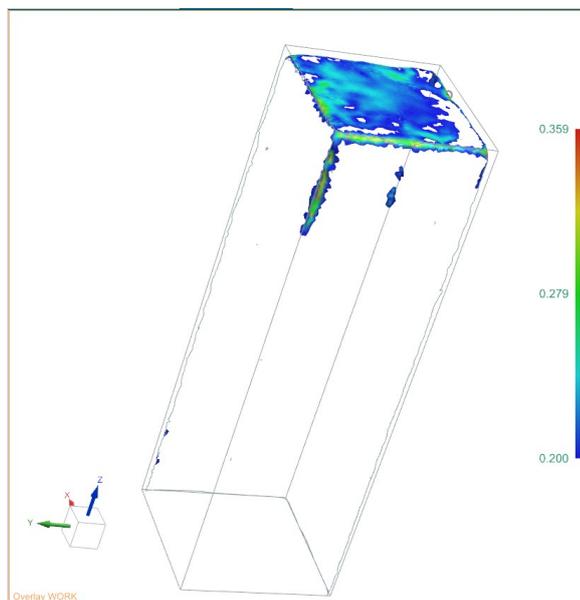
Para o Bloco padrão 1#, o intervalo de erro apresentado foi de [0.000, 0.359] mm. A maior parte do modelo apresentou desvios de erro abaixo de 0.200 mm, conforme pode ser visto na Figura 37. Os desvios maiores ocorreram nas extremidades do bloco, explicados pelo ângulo de captura das fotos, que não forneceram referências suficientes para gerar pontos relacionados. Deformações nas arestas das peças também foram observadas, indicando a necessidade de mais referências nítidas para definir corretamente essas áreas. Isso pode ser minimizado com referências adicionais na peça e capturas focadas nessas áreas, embora isso aumente o número de fotos e o tempo de processamento.

Figura 36 – *Compare Body* - Bloco Padrão 1#



Fonte: Autor.

A Figura 37 mostra que a maior parte dos erros se encontra nas arestas do bloco padrão 1#. Este fato ressalta a importância de um ângulo de captura adequado e da presença de referências visuais suficientes para minimizar as deformações durante o processamento.

Figura 37 – *Compare Body* - Bloco Padrão 1#, Desvios Maiores que 0.200 mm

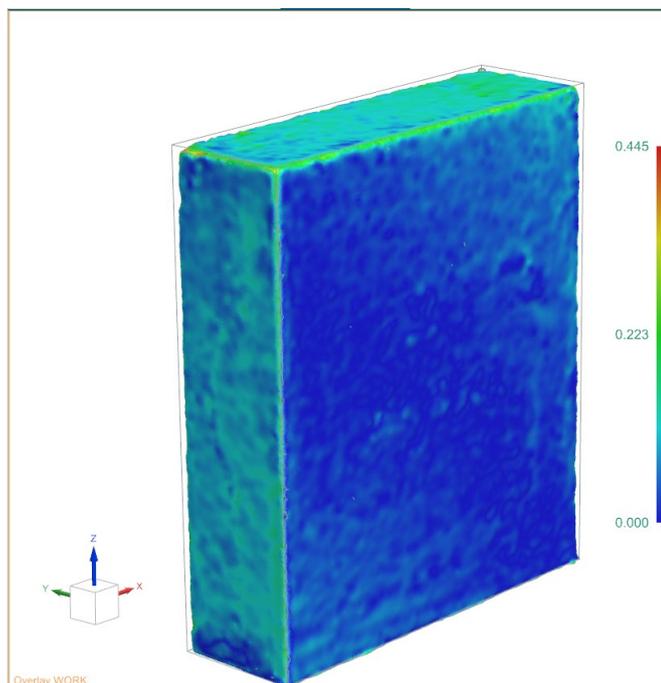
Fonte: Autor.

### 5.1.2 Bloco padrão 2#

- Medidas: 30 mm x 9 mm x 35 mm  $\pm 0.001$  mm

Para o Bloco padrão 2#, o intervalo de erro apresentado foi de [0.000, 0.445] mm. Assim como no Bloco Padrão 1#, as maiores deformações ocorreram nas extremidades e arestas do modelo. No entanto, as partes planas do bloco apresentaram desvios menores, indicando que o sistema de aquisição e reconstrução 3D é mais preciso para superfícies planas.

Figura 38 – Compare Body - Bloco Padrão 2#

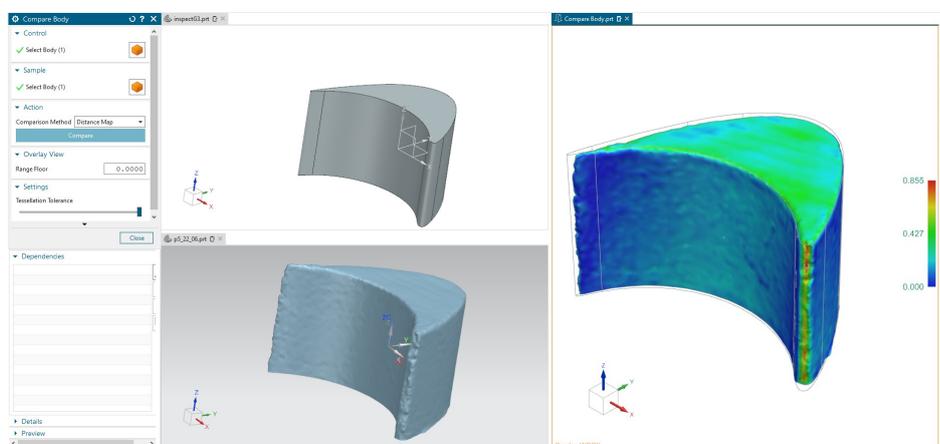


Fonte: Autor.

### 5.1.3 Peça Reconstruída do Capítulo de Implantação

Para a peça reconstruída no capítulo de implantação, foi utilizada a ferramenta *Compare Body*. Selecionou-se o modelo CAD como corpo de controle e o modelo reconstruído como modelo de amostra, obtendo os seguintes resultados:

Figura 39 – *Compare Body* entre o modelo reconstruído do capítulo de implantação e o modelo CAD



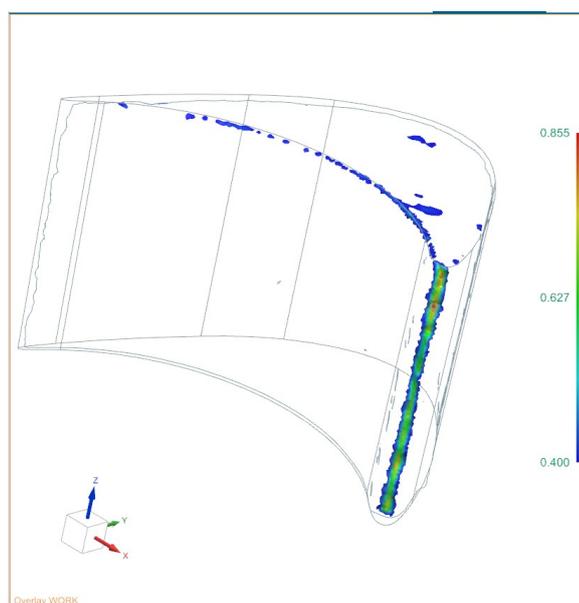
Fonte: Autor.

Como pode ser observado na Figura 39, o intervalo de erro foi de [0.000, 0.855]

mm, variando do menor desvio nas cores frias até cores mais quentes, com um desvio máximo de 0.855 mm, visível em deformações nas extremidades do modelo reconstruído.

Adicionalmente, a Figura 40 ilustra onde estão localizados os maiores erros de reconstrução de inspeção na peça de segmento de palheta de turbina, variando entre [0.400, 0.855] mm.

Figura 40 – *Compare Body* - Maiores erros de reconstrução na peça de segmento de palheta de turbina



Fonte: Autor.

Na análise detalhada, os maiores desvios concentram-se nas arestas e nas extremidades da peça. Esses desvios podem ser observados nas áreas destacadas na Figura 40, indicando onde a precisão do modelo reconstruído varia em relação ao modelo CAD de referência. A metodologia de captura utilizada, com pontos de referência visuais e ajustes nos parâmetros de captura e processamento, influencia diretamente esses resultados.

#### 5.1.4 Comparação entre Resultados

Os blocos padrão utilizados na validação do método de aquisição apresentaram resultados com baixos desvios. O Bloco Padrão 1# teve um intervalo de erro de [0.000, 0.359] mm, enquanto o Bloco Padrão 2# apresentou um intervalo de erro de [0.000, 0.445] mm. A maior parte dos erros nos blocos padrão foi observada nas arestas e extremidades, conforme ilustrado nas análises. A precisão dos blocos padrão, com erros inferiores a 0.445 mm, indica que a metodologia de captura e reconstrução é

adequada para geometrias simples e bem definidas, com erros mínimos de fabricação próximos de 0.001 mm.

Para o modelo de segmento de palheta de turbina, a análise revelou um intervalo de erro de [0.000, 0.855] mm, com os maiores desvios concentrados nas arestas e extremidades da peça. A comparação entre os resultados dos blocos padrão e do modelo de segmento de palheta de turbina permite identificar a diferença entre erros de fabricação e erros de reconstrução. Considerando que os blocos padrão têm um erro de fabricação mínimo ( $\pm 0.001$  mm), os desvios observados nos blocos padrão são majoritariamente atribuídos ao processo de reconstrução.

Os erros máximos encontrados nos blocos padrão (0.359 mm e 0.445 mm) estabelecem uma base para avaliar o erro de reconstrução. Quando essa base é aplicada ao modelo de segmento de palheta de turbina, com um desvio máximo de 0.855 mm, pode-se inferir que uma parcela significativa desse desvio é atribuída ao processo de reconstrução. No entanto, a diferença entre o desvio máximo do modelo de turbina (0.855 mm) e os desvios dos blocos padrão (até 0.445 mm) sugere que o modelo de turbina pode ter um erro de fabricação adicional.

Para uma avaliação mais precisa, subtrai-se o maior erro de reconstrução observado nos blocos padrão (0.445 mm) do desvio máximo do modelo de turbina (0.855 mm). O resultado é um erro de fabricação estimado de aproximadamente 0.410 mm para o modelo de segmento de palheta de turbina.

Os resultados indicam que, enquanto o sistema de fotogrametria e processamento 3D é eficaz para peças de geometria simples, apresentando erros de reconstrução menores que 0.445 mm, o mesmo enfrenta desafios ao lidar com geometrias complexas como o segmento de palheta de turbina, onde os erros de reconstrução são mais pronunciados. A diferença entre os desvios máximos dos blocos padrão e do modelo de turbina permite inferir um erro de fabricação adicional, estimado em 0.410 mm, para o modelo de segmento de palheta de turbina. Essa análise destaca a necessidade de otimizações na metodologia de captura e processamento para melhorar a precisão dos modelos reconstruídos em aplicações com geometrias complexas.

### **5.1.5 Influência da Metodologia de Captura**

A análise dos resultados destacou a importância da metodologia de captura de imagens. A orientação inadequada e a falta de referências visuais nítidas resultaram em desvios maiores, especialmente nas extremidades das peças. Para melhorar a precisão dos modelos reconstruídos, recomenda-se:

- Utilizar mais referências visuais na peça durante a captura, especialmente em áreas de arestas.
- Realizar capturas adicionais focadas nas áreas críticas da peça.

- Experimentar diferentes ângulos e distâncias de captura para cobrir todas as superfícies com maior precisão.

Além disso, é importante considerar o tempo de processamento. Realizando o processamento das malhas nas configurações do computador exposto na seção 3.1.1, a criação da malha levou entre 50-60 minutos para um dataset de imagens de referência variando entre 130-140 capturas. Este tempo de execução pode ser reduzido em cerca de 10 minutos caso se pule a etapa de texturização do modelo e se utilize outro método de dimensionamento e escala para a malha.

## 5.2 RESOLUÇÃO DO SISTEMA

A avaliação dos resultados obtidos incluiu a verificação dos requisitos funcionais e não funcionais estabelecidos para o sistema de inspeção de manufatura. A seguir, apresentamos uma análise detalhada de como cada requisito foi atendido:

### 5.2.1 Requisitos Funcionais

Os requisitos funcionais do sistema foram projetados para garantir que ele atendesse às necessidades e expectativas dos usuários em termos de precisão, compatibilidade, segurança e usabilidade. Abaixo, pode ser visto como cada um desses requisitos foi resolvido no desenvolvimento do projeto:

- **Precisão da Reconstrução 3D:** O sistema demonstrou uma precisão suficiente para detectar variações dimensionais mínimas, especialmente em testes com blocos padrões, onde os desvios máximos foram de 0.359 mm e 0.445 mm.
- **Compatibilidade de Ferramentas:** As ferramentas utilizadas (Meshroom, Meshlab, NX9) mostraram compatibilidade com formatos de imagem e modelos tridimensionais comuns (JPEG, PNG, OBJ, STL).
- **Escalabilidade do Sistema:** A utilização da infraestrutura do Google Cloud para armazenamento dos modelos tridimensionais demonstrou a escalabilidade necessária para processar e armazenar um grande número de modelos sem perda de desempenho.
- **Automação do Processo:** O sistema foi projetado para permitir a automação futura. Atualmente, processos como a captura e o upload dos modelos são manuais, mas a arquitetura suporta a integração em um ambiente automatizado.
- **Segurança dos Dados:** A segurança dos dados foi garantida por meio de métodos de autenticação e criptografia na interação com a infraestrutura do Google Cloud.

- **Interoperabilidade:** O sistema permitiu a troca de dados e integração eficiente entre diferentes ferramentas e plataformas utilizadas no processo, incluindo a comunicação entre a aplicação C# e o Google Cloud.
- **Usabilidade:** A interface do usuário da aplicação C# foi desenvolvida de forma intuitiva, facilitando a captura de imagens, processamento de modelos e realização de inspeções.
- **Reprodutibilidade:** O processo de captura e processamento de imagens foi padronizado, garantindo a reprodutibilidade dos resultados.
- **Flexibilidade na Aquisição de Imagens:** O sistema permitiu a captura de imagens em diferentes condições de iluminação e ambientes, utilizando recursos como o tecido Oxfordine preto e a iluminação controlada.

### 5.2.2 Requisitos Não Funcionais

Os requisitos não funcionais visam garantir que o sistema opere de maneira eficiente e confiável, além de ser seguro e fácil de usar. Abaixo, analisamos como esses requisitos foram resolvidos durante o desenvolvimento do projeto:

- **Performance:** O tempo de processamento dos modelos tridimensionais foi adequado, com a criação das malhas entre 50-60 minutos para um dataset de 130-140 imagens, o que está dentro dos parâmetros aceitáveis para o projeto.
- **Confiabilidade:** O sistema mostrou-se confiável, com a infraestrutura de armazenamento em nuvem assegurando uma alta disponibilidade e minimizando o tempo de inatividade.
- **Escalabilidade:** A utilização do Google Cloud provou ser escalável, lidando eficientemente com o aumento no volume de dados.
- **Segurança:** A segurança dos dados foi mantida por meio de autenticação e criptografia, protegendo a integridade e confidencialidade das informações.
- **Usabilidade:** A interface do usuário foi projetada de forma a ser fácil de usar, com processos bem documentados.
- **Manutenibilidade:** O código foi desenvolvido de forma modular e bem documentada, facilitando futuras modificações e expansões.
- **Portabilidade:** O sistema foi compatível com diferentes plataformas de hardware e software, permitindo a instalação e execução em diversos ambientes.

- **Compatibilidade:** O sistema foi compatível com os padrões e protocolos existentes, garantindo a interoperabilidade com outras ferramentas e sistemas utilizados no processo de manufatura.

### 5.3 AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do projeto passou por diversas fases e ajustes ao longo do tempo, resultando em algumas discrepâncias entre o cronograma proposto e o cronograma executado. Inicialmente, a definição do projeto se estendeu por algumas semanas além do planejado. Essa extensão ocorreu devido aos testes relacionados aos métodos de reconstrução de modelos tridimensionais, onde houve uma necessidade de decidir entre a visão estereoscópica passiva e a fotogrametria. A escolha pela fotogrametria foi feita com base na acessibilidade e aplicabilidade dessa técnica.

Após a decisão, os estudos das técnicas e fatores de fotogrametria seguiram conforme o esperado. Parâmetros foram definidos e os equipamentos necessários foram obtidos. Toda a configuração foi elaborada conforme descrito no capítulo de desenvolvimento. No entanto, a aquisição de imagens e o processamento de reconstrução de modelos, que inicialmente não deveriam exceder três semanas, se estenderam para nove semanas. Esse prolongamento ocorreu devido a extensivos testes de tentativa e erro, ajustes de luz, distância, foco, exposição, entre outros parâmetros de captura, além do tempo de processamento necessário para atingir resultados consistentes e reproduzíveis.

Durante esse período, surgiram imprevistos na elaboração da ferramenta de integração. Inicialmente, a proposta era utilizar a API NXOpen do Software CAD NX para integrar um repositório de modelos com um serviço de nuvem por meio de uma funcionalidade desenvolvida na linguagem C#. O tempo inicialmente alocado foi utilizado para tentar implementar essa solução. Contudo, a solução precisou ser alterada para uma aplicação em Windows devido ao bloqueio do uso de bibliotecas e comunicação externas em aplicações desenvolvidas no software CAD sem uma licença de desenvolvedor disponibilizada pela Siemens, proprietária do software.

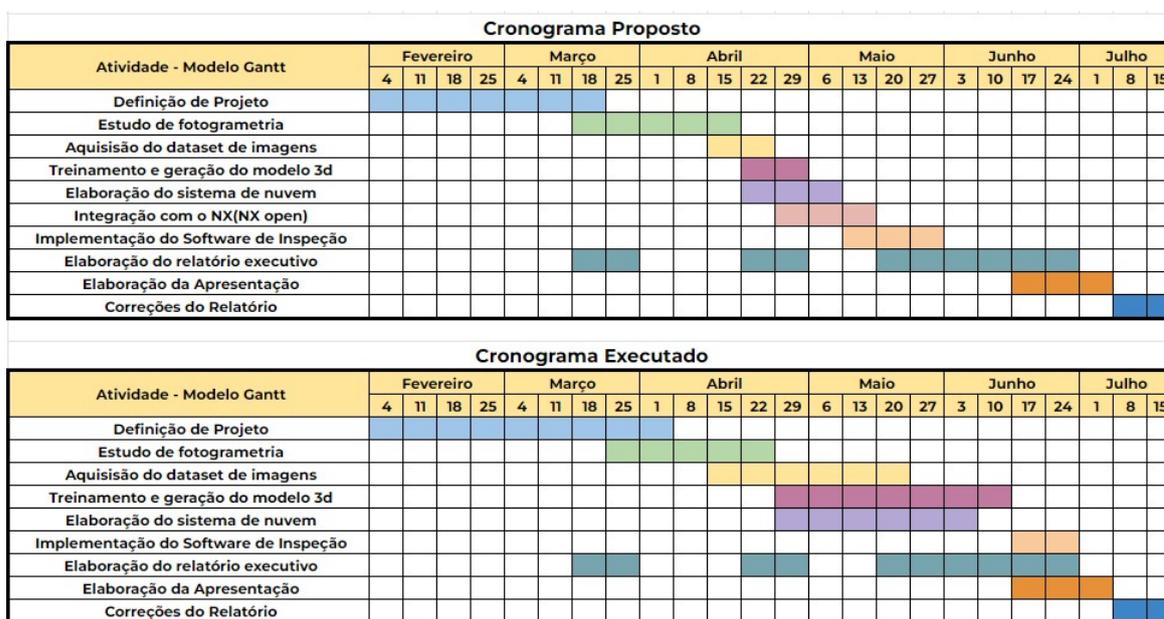
Para implementar essa nova solução, foi desenvolvida uma aplicação em Windows, o que resultou em mais três semanas de desenvolvimento. Esse tempo adicional foi necessário para aprender o modelo de aplicação MVVM e integrar as APIs necessárias para finalizar a aplicação. Com a aplicação feita e o modelo de reconstrução tridimensional satisfatório, restava elaborar uma forma de validar os modelos reconstruídos no CAD no software NX. A previsão inicial era de três semanas, mas essa etapa foi concluída em duas semanas ao se elaborar um bom método para alinhar modelos reconstruídos com geometria não tão bem definida, obtendo bons resultados com modelos CAD.

A seguir, a análise detalhada do cronograma proposto versus o cronograma

executado:

- **Definição do Projeto:** Extensão de algumas semanas além do previsto devido à escolha entre visão estereoscópica passiva e fotogrametria.
- **Estudo de Fotogrametria:** Conduzido conforme o esperado, com parâmetros definidos e equipamentos obtidos.
- **Aquisição de Imagens e Processamento de Reconstrução de Modelos:** Prolongamento significativo de três para nove semanas devido a testes de tentativa e erro e ajustes de parâmetros.
- **Elaboração da Ferramenta de Integração:** Alteração da solução inicial para uma aplicação em Windows devido a restrições de licença, resultando em três semanas adicionais de desenvolvimento.
- **Validação dos Modelos Reconstruídos no CAD NX:** Conclusão em duas semanas, uma semana a menos do que o previsto inicialmente, ao desenvolver um método eficaz de alinhamento de modelos.

Figura 41 – Diagrama de Gantt do desenvolvimento proposto e executado



Fonte: Autor.

## 5.4 APLICAÇÃO EM AMBIENTE DE MANUFATURA

O projeto foi desenvolvido com a perspectiva de futuras aplicações automatizadas em um ambiente fabril de manufatura. A escolha de um método passivo de aquisição de nuvem de pontos e a atenção meticulosa aos parâmetros de aquisição foram fundamentais para essa visão. Em futuras implementações, especialmente em máquinas de usinagem CNC, a metodologia proposta pode ser adaptada e aprimorada.

A seguir, foi detalhado como o sistema pode ser aplicado em um ambiente de manufatura automatizado:

Inicialmente, a rotação incremental de 9 graus, que foi simulada com o motor de passo controlado por Arduino no projeto, pode ser replicada utilizando comandos CNC. Isso permitiria uma rotação precisa e automatizada da peça em análise durante a captura das imagens. Além disso, uma rotina de limpeza da peça usinada poderia ser integrada ao processo para garantir que a superfície esteja livre de resíduos que possam interferir na qualidade das imagens.

O uso de um líquido revelador comercial, em substituição à solução de álcool com talco utilizada no projeto, pode melhorar ainda mais a qualidade das imagens capturadas. Esse líquido é especialmente formulado para reduzir reflexos e destacar características da superfície da peça, proporcionando uma captura de imagem mais clara e precisa.

Para a configuração de captura, a combinação de baixa exposição de luz no sensor de captura e uma iluminação adequada é essencial. Utilizando uma abertura focal apropriada na lente da câmera e pontos de referência bem definidos na peça usinada, a metodologia de aquisição proposta pode ser aplicada de forma eficaz. Esses pontos de referência são cruciais para garantir a precisão na reconstrução tridimensional, facilitando o alinhamento e a comparação dos modelos.

Com o acesso a computadores de maior capacidade de processamento, o tempo necessário para o processamento das malhas tridimensionais pode ser significativamente reduzido. Isso aumentaria a eficiência do sistema, tornando-o viável para uso em linha de produção, onde o tempo é um fator crítico. A tecnologia de GPU moderna e os avanços em algoritmos de fotogrametria também podem contribuir para essa otimização.

Embora o atual projeto tenha demonstrado a viabilidade e eficácia do sistema em um ambiente controlado, a implementação em um ambiente de manufatura automatizado requer considerações adicionais de robustez e integração com sistemas existentes. Futuras iterações do projeto podem explorar essas áreas, aproveitando os resultados positivos expostos neste relatório.

## 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi abordado a aplicação prática do sistema de inspeção de manufatura desenvolvido, discutindo desde a metodologia de aquisição de imagens até a validação dos modelos reconstruídos no software CAD NX. Os resultados obtidos indicaram que, embora a metodologia proposta tenha se mostrado eficaz na detecção de variações dimensionais mínimas, ainda há áreas que necessitam de melhorias para alcançar a precisão exigida pela indústria.

Os testes realizados com o modelo de segmento de palheta de turbina e os blocos padrões revelaram que a precisão do sistema é altamente dependente da qualidade das capturas de imagem e da configuração do ambiente de aquisição. A análise crítica destacou a importância de referências visuais nítidas e de uma iluminação adequada, além de enfatizar a necessidade de um processamento robusto para lidar com superfícies complexas e detalhadas.

A avaliação crítica do desenvolvimento evidenciou os desafios enfrentados ao longo do projeto, incluindo a escolha e otimização do método de fotogrametria, as dificuldades encontradas na integração da aplicação com o software CAD NX, e os ajustes necessários para a metodologia de captura de imagens. A extensão do cronograma, embora não planejada inicialmente, permitiu a realização de testes extensivos que foram cruciais para alcançar os resultados apresentados.

Além disso, a discussão sobre a aplicação em ambiente de manufatura automatizado mostrou que o sistema desenvolvido tem potencial para ser integrado em processos industriais, especialmente em linhas de produção que exigem inspeção rigorosa de peças usinadas. A adaptação da metodologia para máquinas CNC e a utilização de equipamentos de captura e processamento mais avançados podem aumentar significativamente a eficiência e a precisão do sistema.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu um sistema de inspeção 3D de baixo custo, capaz de operar em tempo hábil, utilizando recursos de nuvem e integração com software CAD. O sistema foi validado utilizando blocos padrão e, posteriormente, foi aplicado a uma peça real através de um estudo de caso. Os resultados demonstraram que o sistema possui uma confiabilidade na avaliação dimensional com um erro de 0,41 mm.

O sistema foi construído com equipamentos de baixo custo e demonstrou potencial para ser aplicado em inspeções durante o processo de usinagem em máquinas CNC. Essa abordagem possibilita uma solução acessível e eficaz para a indústria, destacando-se pela sua capacidade de detectar variações dimensionais mínimas e assegurar a qualidade dos produtos manufaturados.

Apesar dos resultados satisfatórios, há áreas que necessitam de aprimoramento para aumentar ainda mais a precisão e a confiabilidade do sistema. Para trabalhos futuros, é importante melhorar a precisão nas áreas de cantos, que ainda apresentam erros de inspeção, através de ajustes na metodologia de captura e processamento. Também é necessário avaliar a utilização de algoritmos comerciais mais precisos e com processamento mais rápido, a fim de otimizar a performance do sistema. Além disso, a implementação e teste do sistema em um ambiente fabril são essenciais para validar sua aplicação prática em condições reais de produção. Esses passos são fundamentais para elevar o nível de precisão e eficiência do sistema de inspeção 3D, tornando-o uma ferramenta ainda mais valiosa para a indústria de manufatura.

## REFERÊNCIAS

ARMSTRONG, Samuel. **Gray Code Structured Light**. [S.l.: s.n.], 2020.

<https://github.com/sjnarmstrong/gray-code-structured-light>. Acessado em 2024-06-10.

GERBINO, Salvatore; GIUDICE, Domenico Maria Del; STAIANO, Gabriele; LANZOTTI, Antonio; MARTORELLI, Massimo. On the influence of scanning factors on the laser scanner-based 3D inspection process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer-Verlag London, v. 84, n. 9-12, p. 1787–1799, 2016. DOI: 10.1007/s00170-015-7830-7. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7830-7>. Acesso em: 7 jun. 2024.

GOOGLE Cloud Platform - Visão Geral. [S.l.], 2024. Acesso em: 07 jun. 2024.

Disponível em: <https://cloud.google.com/docs/overview?hl=pt-br>. Acesso em: 7 jun. 2024.

GPCAM. **Apresentação do Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 29 mai. 2024. Disponível em:

<https://gpcam.ufsc.br/apresentacao/>.

GRIWODZ, Carsten; GASPARINI, Simone; CALVET, Lilian; GURDJOS, Pierre; CASTAN, Fabien; MAUJEAN, Benoit; LANTHONY, Yann; DE LILLO, Gregoire. AliceVision Meshroom: An open-source 3D reconstruction pipeline. *In*: ACM. PROCEEDINGS of the 12th ACM Multimedia Systems Conference. [S.l.: s.n.], 2021. P. 241–247.

GUL, Sercan *et al.* **Sustainable Materials for Oil and Gas Applications**. [S.l.]: Elsevier, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824510-0.00006-1>. Acesso em: 7 jun. 2024.

EL-HAKIM, S. F.; BERARDIN, J.-A.; BLAIS, F. A Comparative Evaluation of the Performance of Passive and Active 3-D Vision Systems. *In*: PROCEEDINGS of the St. Petersburg Conference on Digital Photogrammetry. St. Petersburg, Russia: SPIE, jun. 1995. Disponível em: [https://www.cs.cmu.edu/~motionplanning/papers/sbp\\_papers/integrated2/elhakim\\_3d\\_vision.pdf](https://www.cs.cmu.edu/~motionplanning/papers/sbp_papers/integrated2/elhakim_3d_vision.pdf). Acesso em: 7 jun. 2024.

LINSEN, Lars. Point Cloud Representation. **Computing**, p. 1–10, 2001.

- MOORE, Bill. MVVM: Model-View-ViewModel. *In*: FOUNDATION Expression Blend 4 with Silverlight. New York, NY, USA: Apress, 2010. cap. 15, p. 341–367. ISBN 978-1-4302-2973-5.
- MYSQL 8.0 Reference Manual. [S.l.], 2024. Acesso em: 07 jun. 2024. Disponível em: <https://dev.mysql.com/doc/>. Acesso em: 7 jun. 2024.
- NATOUR, Georges El; AIT AIDER, Omar; ROUVEURE, Rémi; BERRY, François; FAURE, Pierre. Radar and vision sensors calibration for outdoor 3D reconstruction. *In*: 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). [S.l.: s.n.], 2015. P. 2084–2089. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139544. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7139544>. Acesso em: 9 jun. 2024.
- NIKKOR AF-S DX 18-55mm f/3.5-5.6G ED II Lens Specifications. [S.l.], 2007. Acessado: 2024-05-07. Disponível em: [Lente\\_18-55mm\\_sell\\_sheet.pdf](#). Acesso em: 7 mai. 2024.
- NIKON CORPORATION. **Nikon D5100 Manual**. [S.l.], 2011. Acessado: 2024-05-07. Disponível em: <https://downloadcenter.nikonimglib.com/pt/products/23/D5100.html>. Acesso em: 7 mai. 2024.
- NX for Design - User Documentation. [S.l.], 2024. Acesso em: 07 jun. 2024. Disponível em: <https://docs.sw.siemens.com/pt-BR/documents/209349590/PL20190701150722612?start=0&filters%5Bcategories.all%5D%5B0%5D=NX%20for%20Design>. Acesso em: 7 jun. 2024.
- BERG, Erik; JONES, Franklin D.; HORTON, Holbrook L.; RYFFEL, Henry H. **Machinery's Handbook: A Reference Book for the Mechanical Engineer, Designer, Manufacturing Engineer, Draftsman, Toolmaker, and Machinist**. Edição: Senior Editor Christopher J. McCauley. 30th. [S.l.]: Industrial Press, 2016. Disponível em: <http://ebooks.industrialpress.com>. Acesso em: 31 mai. 2024.
- SHUNYI, Zheng; RUIRUI, Wang; CHANGJUN, Chen; ZUXUN, Zhang. 3D Measurement and Modeling Based on Stereo-Camera. *In*: B5. THE International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing: ISPRS, 2008. P. 57–62. Disponível em: <https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/beijing2008/proceedings/volume5/XXXVII-partB5.pdf>.

SMALL, Jim. **Printable Scale for Photogrammetry**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 18 maio 2024. Disponível em: <https://smallpond.ca/jim/scale/printing.html>. Acesso em: 18 mai. 2024.

SOUZA, Adriano Fagali de. **Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades**. Nov. 2004. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-11012005-152443/en.php>.

TOSCHI, Isabella; NOCERINO, Erica; HESS, Mona; MENNA, Fabio; SARGEANT, Ben; MACDONALD, Lindsay; REMONDINO, Fabio; ROBSON, Stuart. *Improving automated 3D reconstruction methods via vision metrology*, 2015. Acessado: 2024-06-11. Disponível em: <http://3dom.fbk.eu/>.

UFFENKAMP, V. *Estado da Arte da Fotogrametria Industrial de Alta Precisão*. In: INSTITUT für Photogrammetrie und Bildverarbeitung Technische Universität Braunschweig. [S.l.: s.n.], 1993.

## APÊNDICE A – RECURSOS UTILIZADOS

Acesso aos modelos e fotos utilizadas: **Google Drive**.

Acesso ao código da ferramenta de integração: **GitHub**.