



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E
COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO

Bruno Bueno Bronzeri
Bruno Yuri Igarashi
Gabriel Mariano Gonçalves Santos
Leonardo dos Santos Schmitt

Projeto Final: Scanner 3D para dimensionamento e digitalização 3D de objetos

Blumenau
2025

Bruno Bueno Bronzeri
Bruno Yuri Igarashi
Gabriel Mariano Gonçalves Santos
Leonardo dos Santos Schmitt

Projeto Final: Scanner 3D para dimensionamento e digitalização 3D de objetos

Relatório final de projeto, que aborda o desenvolvimento de um *scanner* tridimensional para a disciplina de Projeto Especializado, no curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Campus Blumenau.

Orientadores:

Prof. Carlos Moratelli, Dr.
Prof. Ebrahim El Samer Youseff, Dr.

Blumenau
2025

RESUMO

O artigo em questão visa apresentar os resultados da construção de um *scanner* 3D, amplamente utilizados na indústria de manufatura. O projeto foi proposto dentro da matéria de Projeto Especializado, para o curso de engenharia de controle e automação da UFSC campus Blumenau. O artigo tem o intuito de permitir que os autores, e leitores, explorem conceitos de gerenciamento de projeto, visão computacional e sistemas embarcados. Alguns modelos de *scanner* que são estado da arte utilizam tecnologia de ponta para realizar o procedimento de reconstrução 3D. Este projeto, no entanto, visa explorar e detalhar alternativas para a construção de um projeto com custo reduzido, e com uma funcionalidade que permita, ao menos, exemplificar o processo de escaneamento de 3D. Neste artigo foram obtidos bons resultados por meio de um escaneamento com luz estruturada monocromática, utilizando um feixe de laser.

Palavras-chave: *Scanner* 3D; Visão Computacional; Sistemas Embarcados; Manufatura.

ABSTRACT

This article aims to present the results of the construction of a 3D scanner, widely used in the manufacturing industry. The project was proposed within the Specialized Project course of the Control and Automation Engineering program at UFSC – Blumenau. The purpose of the article is to allow the authors and readers to explore concepts of project management, computer vision, and embedded systems. Some state-of-the-art scanner models use cutting-edge technology to perform the 3D reconstruction process. This project, however, seeks to explore and detail alternatives for building a low-cost solution, with functionality that at least exemplifies the 3D scanning process. In this article good results were obtained through a monochromatic structured light, using a laser beam

Keywords: 3D Scanner; Computer Vision; Embedded Systems; Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Câmera OAK-D - Luxonis	8
Figura 2 – Imagens obtidas da câmera OAK-D.	8
Figura 3 – Câmera OAK-D - Profundidade	8
Figura 4 – LiDaR Arduino	9
Figura 5 – Cenário para Escaneamento	12
Figura 6 – Modelo Linear da Câmera	14
Figura 7 – Exemplo de Tabuleiro	15
Figura 8 – Cenário Luz Estruturada	16
Figura 9 – Distorção da câmera	19
Figura 10 – Representação do plano	21
Figura 11 – Plano do laser e TVEC	22
Figura 12 – Reconstrução 3D de uma caneca utilizando luz estruturada	23
Figura 13 – Objeto com material de difícil reconstrução (reflexivo ou transparente)	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	CONTEXTO	6
1.2	ESTADO DA ARTE	7
1.2.1	Câmera Stereo	7
1.2.2	LiDaR	9
1.2.3	Câmera RGB-D	9
1.2.4	Luz Estruturada	10
2	METODOLOGIA	11
2.1	CENÁRIO	11
2.2	CALIBRAÇÃO DE CÂMERA	13
2.2.1	Modelagem Matemática para Calibração	13
2.2.2	Calibração Prática	14
2.3	LUZ ESTRUTURADA	15
2.4	MOTOR	17
2.5	INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS	17
3	RESULTADOS	19
3.0.1	Resultados Intermediários	19
3.0.2	Resultados Finais	22
3.1	ADVERSIDADES PRÁTICAS	24
3.1.1	Motor de Passo e Controle	24
3.1.2	Projeção com Laser e Projetor	25
3.1.3	Problemas de Calibração e Ambiente	25
3.1.4	Integração entre Módulos	26
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS E AGRADECIMENTOS	27
	REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Escaneamento 3D (*3D scanning*) é uma técnica cada vez mais difundida na atualidade, devido à sua praticidade, confiabilidade e precisão na obtenção das formas e dimensões de objetos. Essa tecnologia é essencial para aplicações industriais, científicas e comerciais. Entre suas principais áreas de uso, destacam-se: impressão 3D, controle de qualidade, medicina, *design* industrial, jogos e animações, além da preservação de patrimônio histórico.

Dentre as diversas técnicas existentes de digitalização 3D, a *luz estruturada* (*structured light*) é uma das mais utilizadas, principalmente por permitir alta precisão com potencial de baixo custo, quando comparada a soluções baseadas em *laser* ou sensores de tempo de vôo. Essa técnica consiste na projeção de padrões ópticos como faixas codificadas (*gray code*, *phase shifting*, etc.) sobre a superfície do objeto. As distorções observadas, capturadas por uma ou mais câmeras, permitem reconstruir a geometria da superfície por meio de triangulação óptica.

Diversas empresas de renome oferecem soluções comerciais baseadas em luz estruturada. Exemplos incluem a Creaform, Cognex, Artec 3D, Shining 3D e ainda a HP. Embora essas soluções apresentem altíssima qualidade e precisão, seus custos ainda são elevados, o que limita o acesso em contextos de pesquisa, educação e hobby. Como consequência, tem crescido o interesse por projetos alternativos e de baixo custo que buscam replicar os princípios dessas soluções comerciais. Esses projetos geralmente utilizam componentes acessíveis e modulares, como *Arduino*, *Raspberry Pi*, câmeras IP ou webcams, projetores convencionais e motores de passo.

O mercado global de digitalização 3D tem apresentado crescimento acelerado. De acordo com relatórios da *Markets and Markets*, o setor de 3D *scanning* movimentou mais de 5 bilhões de dólares em 2023, com projeções de crescimento contínuo impulsionado por avanços na automação industrial, manufatura digital e aplicações em saúde. No setor educacional e *maker*, a democratização de componentes e softwares *open-source*, como o *OpenCV* (com o módulo **structured_light**) e o *Blender*, tem favorecido o desenvolvimento de soluções funcionais e acessíveis, incentivando a inovação e a disseminação do conhecimento. Tais características, além da sua complexidade e capacidade de aprendizagem, justificam o interesse do grupo pelo projeto.

Antes de prosseguir, é importante explicitar a organização do artigo. Na próxima seção serão tratados os métodos mais utilizados para escaneamento 3D.

Em seguida, será abordada a metodologia utilizada para construir o projeto. Por último, serão apresentados os resultados, adversidades e conclusões associados ao desenvolvimento do projeto.

1.2 ESTADO DA ARTE

O campo de detecção 3D é amplo, aborda diversas áreas do conhecimento, como engenharia, eletrônica, programação e ciências. Diversas abordagens, sensores e métodos foram desenvolvidos para capturar a geometria tridimensional de objetos e ambientes. Seguem as principais técnicas e dispositivos da atualidade, destacando características, vantagens e limitações.

1.2.1 Câmera Stereo

A estereoscopia baseia-se na captura de imagens a partir de duas câmeras posicionadas em diferentes pontos de vista, simulando a visão binocular humana. Neste caso, utiliza-se o cálculo da disparidade, que mede a distância em *pixels* entre duas regiões correspondentes nestas imagens. Com os dados de distância entre as câmeras, é possível estimar a profundidade da região e reconstruir a cena por triangulação, além dos dados de calibração de câmera, que identificam o cenário real sob a ótica da mesma. O custo relativamente baixo e a possibilidade de uso com câmeras convencionais.

No entanto, sua acurácia depende fortemente de boas condições de iluminação, textura adequada na cena, calibração precisa entre as câmeras e posicionamento da câmera estereoscópica de modo geral. Superfícies homogêneas (e.g. paredes brancas), reflexivas ou transparentes, apresentam desafios significativos para esse método. Na Figura 1, há uma câmera *stereo* OAK-D, *open-source*, da marca luxonis. Esta câmera custa cerca de U\$ 299, o que já possibilita testar tal tecnologia. No entanto, este tipo de câmera tem uma série de limitações que impossibilitam um possível uso para precisão.

É possível obter resultados surpreendentes, e bastante satisfatórios a depender do projeto. Na Figura 2 estão apresentados resultados das imagens obtidas pelas câmeras. Na Figura 3 tem-se o mapa de profundidade gerado a partir da disparidade entre os *pixels* relacionados em ambas as imagens.

Figura 1 – Câmera OAK-D - Luxonis



Fonte: Luxonis.

Figura 2 – Imagens obtidas da câmera OAK-D.



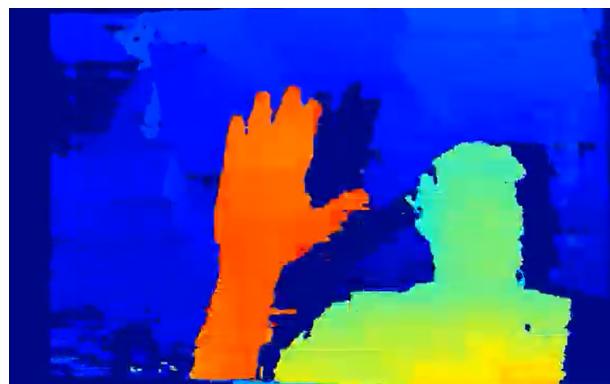
(a) Câmera OAK-D - Esquerda



(b) Câmera OAK-D - Direita

Fonte: Autores.

Figura 3 – Câmera OAK-D - Profundidade



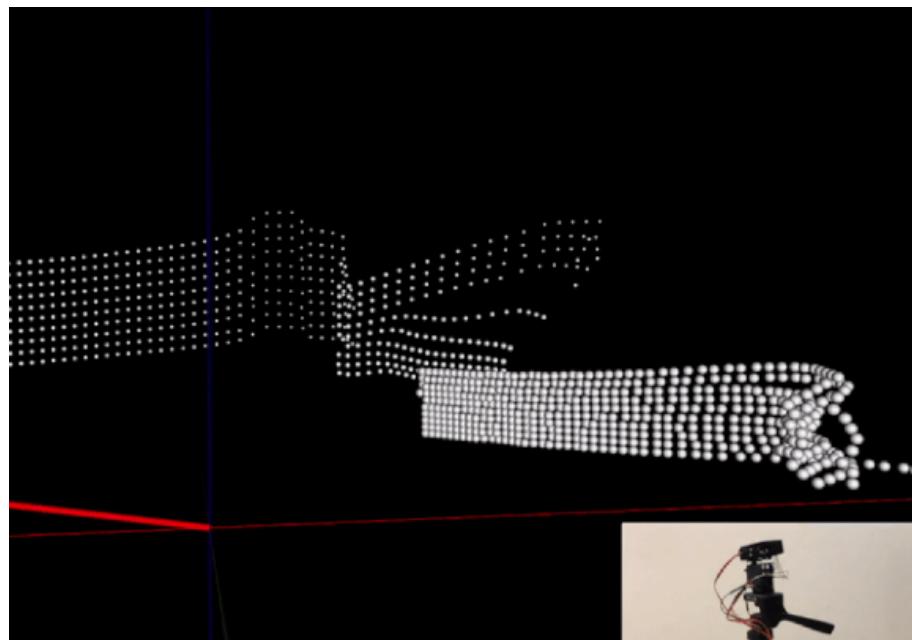
Fonte: Autores.

1.2.2 LiDaR

O *Light Detection and Ranging* (LiDaR) é um método ativo que utiliza pulsos de *laser* para medir a distância entre o sensor e os pontos de uma superfície, a partir do tempo de viagem entre os pulsos. Utilizada em robótica autônoma e fotogrametria. Dentre as vantagens destacam-se: alta precisão, alcance e capacidade de operar em diferentes condições de luminosidade. Porém, o custo elevado e a complexidade do sistema são fatores limitantes para seu uso em aplicações de baixo custo ou em projetos acadêmicos. Há também a impossibilidade que quase todos os métodos que utilizam luz recaem, superfícies reflexivas ou transparentes. Nestes casos, é praticamente impossível identificar a luz refletida por esses materiais.

Um exemplo da utilização de LiDaR, são as detecções de ambientes. Na Figura 4, está um projeto encontrado dentro do *hub* de projetos da arduino. Um LiDaR específico para projetos *maker*, escaneando a cena.

Figura 4 – LiDaR Arduino



Fonte: Arduino Hub.

1.2.3 Câmera RGB-D

As câmeras RGB-D combinam uma imagem colorida (RGB) com um mapa de profundidade (Depth), geralmente obtido por sensores infravermelhos baseados em projeção estruturada ou tempo de voo (ToF). Dispositivos como o Microsoft

Kinect e o Intel RealSense popularizaram essa tecnologia em aplicações de realidade aumentada, robótica e mapeamento *indoor*. Desta forma, é possível perceber que as câmeras RGB-D associam a capacidade de uma câmera convencional em perceber o ambiente, com um dispositivo que se assemelha à um LiDaR.

As principais vantagens das câmeras RGB-D são a facilidade de integração, o custo acessível e a disponibilidade comercial. No entanto, sua acurácia e alcance são limitados, especialmente em ambientes externos com alta luminosidade, o que compromete a confiabilidade dos dados em determinadas situações. O resultado obtido com uma câmera RGB-D é muito semelhante àquele obtido na Figura 3.

1.2.4 Luz Estruturada

A técnica de luz estruturada consiste na projeção de padrões luminosos (geralmente listras ou padrões codificados) sobre a superfície do objeto a ser escaneado. Uma câmera capta a deformação desses padrões e, com base em algoritmos geométricos, calcula a profundidade ponto a ponto.

Esse método é conhecido por sua alta precisão e resolução, sendo amplamente utilizado em aplicações industriais de metrologia e controle de qualidade. Todavia, é sensível à iluminação ambiente e à cor/textura do objeto, exigindo um controle cuidadoso do ambiente para resultados satisfatórios. Além disso, o tempo de captura pode ser maior quando múltiplos padrões precisam ser projetados sequencialmente. Esta técnica foi a escolhida para ser alvo do estudo em questão. Assim, não serão apresentados maiores detalhes, neste presente momento.

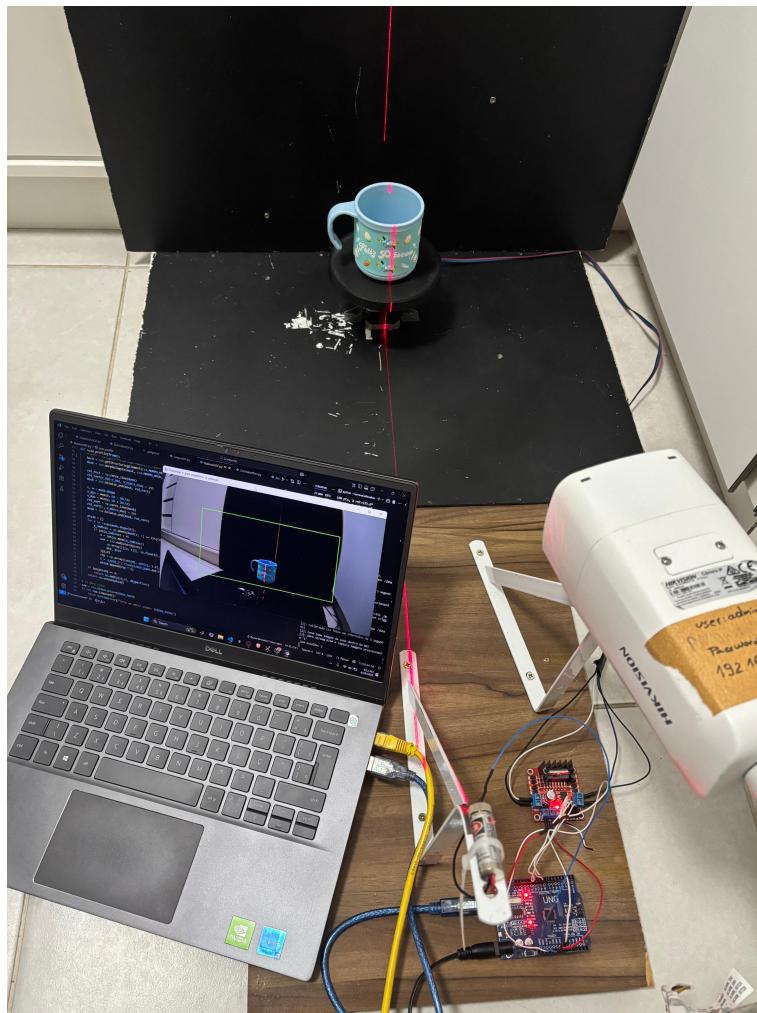
2 METODOLOGIA

Como citado anteriormente, neste momento, serão explicitados os métodos, ferramentas e construções que foram considerados para de fato construir um ambiente de escaneamento 3D. Desta forma, serão abordados os principais tópicos utilizados para formalizar o projeto, bem como algumas alternativas e possíveis caminhos que poderiam ser percorridos, facilitando o aprendizado para aqueles que desejam replicar o experimento e entender melhor o funcionamento de um *scanner* 3D. Na ordem de construção, em um primeiro momento fez-se o cenário utilizado para permitir o escaneamento, após isto, as etapas de calibração de câmera e luz estruturada, finalmente partindo para uma peça chave do projeto, o motor, e por último, abordando a integração de sistemas. Vale ressaltar, ainda, que esta metodologia não tem a perspectiva de ser exaustiva, mas sim apresentar o modo com o qual os autores optarem por seguir, e construir um *scanner* que seja barato e de fácil entendimento.

2.1 CENÁRIO

A primeira etapa prática do projeto consistiu na montagem do cenário físico onde o escaneamento tridimensional seria realizado. Para isso, foram adotados os princípios técnicos de *luz estruturada*, inspirando-se em montagens amplamente descritas na literatura e em esquemas técnicos, como ilustrado na Figura 5. Nesse tipo de configuração, posiciona-se uma câmera e um projetor (ou fonte de luz) em ângulos distintos em relação ao objeto, de forma que os padrões de luz projetados sofram deformações ao incidir sobre a superfície. Essas deformações são então capturadas pela câmera e processadas por algoritmos de reconstrução 3D baseados em triangulação. A montagem do cenário buscou respeitar essa geometria, como pode ser observado na Figura 5. A câmera foi posicionada de forma a cobrir integralmente a área iluminada pelo projetor, garantindo que todos os padrões projetados fossem registrados com clareza. Como fonte de luz estruturada, foi utilizado um *laser de linha*, que gera um plano luminoso estreito sobre o objeto.

Figura 5 – Cenário para Escaneamento



Fonte: Autores.

Além da geometria, a preparação do ambiente físico também foi fundamental para assegurar a qualidade das capturas. Com o objetivo de minimizar interferências ópticas como reflexos ou diferenças de iluminação externa, optou-se por utilizar materiais escuros e foscos, evitando tais reflexos ou ruídos indesejados. Essa escolha teve como finalidade melhorar o contraste dos padrões projetados e facilitar a segmentação da região de interesse durante o processamento das imagens.

Por fim, destaca-se que a estrutura foi desenhada com foco em simplicidade e custo acessível, utilizando materiais facilmente disponíveis, e permitindo eventuais ajustes de posicionamento dos dispositivos ópticos para melhorar a calibração ou adaptação a diferentes objetos.

2.2 CALIBRAÇÃO DE CÂMERA

A discussão inicial para a construção de um *scanner* 3D começou pela necessidade de utilizar uma câmera. Existem diversos modelos de câmera, cada uma com suas particularidades, e certamente cada uma com um preço específico. Visando tornar o processo de construção mais barato, utilizou-se uma câmera da marca HIKVISION, presente na Figura 5, que pertence à empresa Eagle (local de estágio de dois autores).

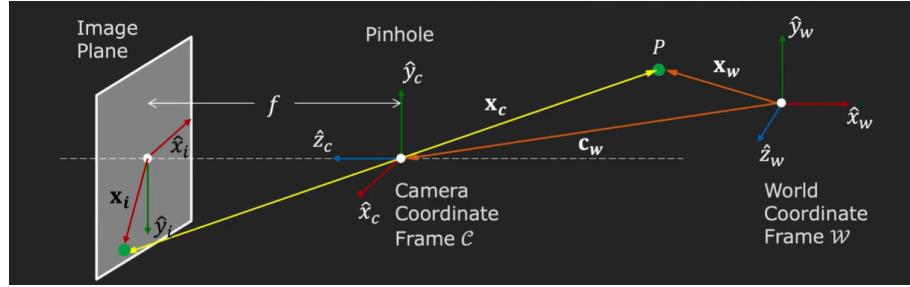
Em projetos que utilizam imagem 2D, a calibração não é necessária, haja vista que não há uma necessidade de se conectar o mundo real com os pixels da imagem. Em diversos momentos, realiza-se a segmentação de cores, ou extração de características e atualmente, utiliza-se rótulos, para construir modelos de inteligência artificial. Assim, não é preciso que o usuário realize a calibração de câmera. No entanto, ao tratar de visão computacional 3D, é intrinsecamente necessário que haja a calibração de câmera, para que os *pixels* vistos pela câmera, possam ser entendidos no espaço real. Em linhas gerais, a ideia da calibração de câmera, é enxergar como os *pixels* “enxergados” estão associados com um determinado eixo cartesiano de referência, que será considerado o eixo ótico da câmera.

Visando entender o método de operação para a calibração de câmera, foi realizada uma reunião com o Prof. Dr. Marcos Matsuo, responsável por ministrar a matéria de visão computacional para os alunos da UFSC campus Blumenau. Nesta reunião, o professor apresentou o caminho mais simples para realizar a calibração, bem como a necessidade de realizar esse tipo de procedimento, que será visto adiante.

2.2.1 Modelagem Matemática para Calibração

Antes de iniciar a calibração de fato, é importante entender a linguagem matemática associada. Neste caso, deve-se relembrar conceitos de geometria projetiva, bem como de álgebra linear e geometria analítica, principalmente. Na Figura 6, é possível encontrar o modelo linear da câmera, que é tratada como uma câmera *pinhole*, ou câmera estenopeica.

Figura 6 – Modelo Linear da Câmera



Fonte: Columbia.

Basicamente, a luz advinda de um ponto P , com um eixo de coordenadas associado ao mundo real. A luz então passa pela lente da câmera, que têm um eixo de coordenadas específico associado com o mundo real. Finalmente, os raios são projetados no plano da imagem, que está a uma distância focal f do eixo de coordenadas da câmera. Deste modo, tem-se um modelo importante para definir as câmeras utilizadas. Este método é denominado modelo linear da câmera, haja vista a ausência das não linearidades associadas com o ramo da ótica física (*e.g.* curvatura de lentes, material...), basicamente, define o processo de obtenção de uma imagem.

Partindo para o fim, é importante destacar que objetivo da calibração, é construir uma matriz de projeção, que permita levar um ponto do espaço geométrico para o plano da imagem. A Equação (1) consegue representar esta transformada de um ponto no \mathbb{R}^3 para um ponto \mathbb{R}^2 , demonstrando o funcionamento de uma matriz de projeção.

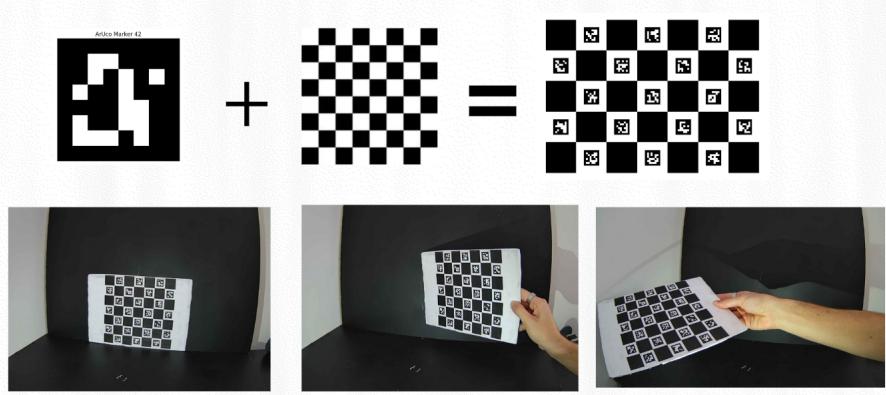
$$\begin{bmatrix} u^{(i)} \\ v^{(i)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w^{(i)} \\ y_w^{(i)} \\ z_w^{(i)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2.2 Calibração Prática

Desta forma, deve-se encontrar um modo de determinar esta matriz de projeção. Para então conseguir realizar esta etapa, deve-se levar um ponto conhecido no espaço para o seu *pixel* correspondente. Para isso, diversos artigos utilizaram métodos que envolvem tabuleiros de xadrez, neste caso não foi diferente. Na Figura 7, pode-se perceber o uso de um tabuleiro, em diferentes posições, para realizar a

calibração de câmera. Este tabuleiro foi impresso, e utilizado pelo grupo ao longo de todo o projeto. A ideia neste caso, é utilizar este tabuleiro como referência, pois sabe-se o tamanho e posicionamento de cada uma das informações do tabuleiro.

Figura 7 – Exemplo de Tabuleiro



Fonte: Autores.

Deste modo, portanto, é possível encontrar uma relação válida entre o mundo real e o plano da imagem. Assim, pode-se encontrar uma matriz de projeção que pode ser escrita conforme a Equação (2), que define os parâmetros intrínsecos e extrínsecos de uma câmera. Com a matriz de parâmetros intrínsecos, sabe-se onde está o eixo da câmera, bem como as distâncias focais associadas à construção da câmera.

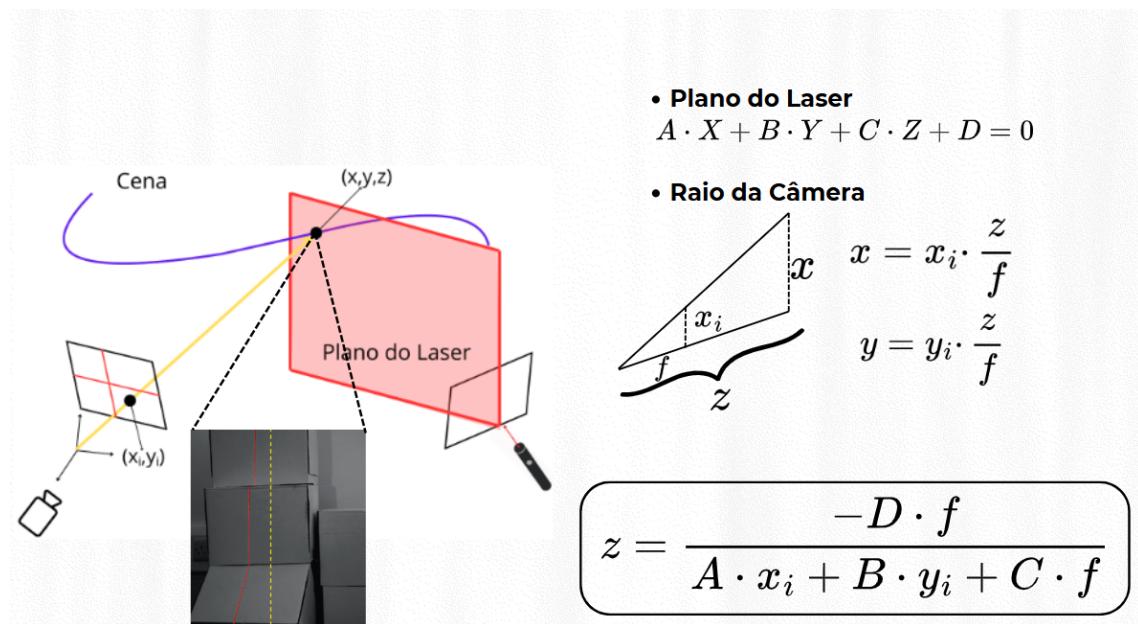
$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} f_x & 0 & o_x & 0 \\ 0 & f_y & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{M_{\text{int}}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{M_{\text{ext}}} \quad (2)$$

2.3 LUZ ESTRUTURADA

Com o modelo de câmera após a calibração, é possível, então, associar os *pixels* de uma imagem com pontos no espaço. Neste momento, portanto, é preciso discutir o método de luz estruturada a ser utilizado para realizar o projeto. Como citado em outros momentos, os métodos atuais de escaneamento 3D utilizam diversas técnicas, mesclando padrões de luz estruturada com câmeras estereográficas,

visando extrair o máximo de precisão para o *scanner*. Visando simplificar a compreensão, bem como diminuir a complexidade do projeto, tornando-o viável em um curto espaço de tempo, o grupo optou por utilizar o segundo padrão mais simples de luz estruturada, uma linha. Antes de mais nada, vale ressaltar que a utilização de uma fonte de luz pontual, configura o padrão mais simples de luz estruturada, e é utilizada principalmente em mecanismos biométricos (*e.g. iPhone*). Na Figura 8, tem-se a representação do cenário de estudo da luz estruturada. Neste cenário, é possível perceber a presença de um *laser*, bem como o plano de luz gerado por este. Nesta representação teórica do comportamento esperado para o escaneamento 3D, justifica-se a necessidade de uma calibração bem feita, já que diversas variáveis são abordadas a partir desta calibração.

Figura 8 – Cenário Luz Estruturada



Fonte: Autores.

Na Figura 8 ainda é possível observar o método utilizado para calcular a profundidade de um *pixel* na posição (x_i, y_i) , dado que já foi encontrado o plano do *laser*. Ou seja, a obtenção da profundidade se dá pela interseção entre um raio que sai do centro óptico da câmera, passa por aquele *pixel* no plano da imagem, e encontra o plano formado pelo *laser*. Desta forma, é fácil enxergar a teoria e, consequentemente, a metodologia utilizada para encontrar a profundidade dos *pixels* associados. No entanto, como o *laser* forma apenas uma linha única, é preciso

que essa linha seja capaz de varrer todo o objeto para permitir a sua reconstrução 3D, disso, surge a necessidade de um motor.

2.4 MOTOR

A movimentação controlada do objeto no cenário de escaneamento é uma etapa fundamental para garantir a qualidade da reconstrução tridimensional. A necessidade de precisão e repetibilidade nesse processo levou à escolha de um motor de passo, amplamente utilizado em projetos de automação e impressão 3D, por oferecer controle fino de posição e fácil integração com microcontroladores como o *Arduino Uno*.

O NEMA 17 apresenta uma resolução típica de $1,8^\circ$ por passo, o que equivale a 200 passos por rotação completa. Com o uso de técnicas de *microstepping*, esse valor pode ser subdividido ainda mais, possibilitando rotações altamente controladas. Para o controle do motor, foi utilizada uma ponte H, responsável por alimentar e inverter a corrente dos enrolamentos do motor conforme os sinais enviados pelo Arduino. Essa combinação permite ao usuário definir, com precisão, o número de passos a serem executados por rotação e a direção do movimento.

Com essa configuração, tornou-se possível realizar a sincronização entre os passos do motor e as capturas de imagem da câmera, garantindo que cada aquisição ocorra em um intervalo angular constante. Esse controle é essencial para manter a coerência geométrica entre os diferentes ângulos capturados durante o escaneamento e, assim, viabilizar a reconstrução precisa do modelo tridimensional.

Adicionalmente, o controle sobre os passos do motor permitiu implementar ajustes finos no processo de escaneamento, adaptando o número de capturas à complexidade ou tamanho do objeto. Por exemplo, para objetos menores ou com menos detalhes, foi possível reduzir o número de passos entre cada captura, diminuindo o tempo total do processo sem comprometer a qualidade da reconstrução.

2.5 INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS

Por fim, é preciso integrar todos os métodos aqui tratados. Inicialmente, calibra-se a câmera. O processo de calibração ocorre com a captura de cerca de 20 posições para o tabuleiro. Dessa forma, podem ser estimadas 20 matriz de projeção, das quais é calculada uma média dos elementos, visando contemplar todos os pontos do plano da imagem. Com a projeção, é possível calcular, também, a distorção da câmera, que é útil para objetos muito alto ou largos, que fogem do centro da imagem.

Após a calibração, existem outras duas etapas importantes, a referência do eixo do motor e a estimativa do plano do *laser*. Estas etapas são importantes por dois motivos: o primeiro é que os objetos rotacionam sobre o eixo do motor, esta referência é utilizada para possibilitar a reconstrução do objeto. Já o plano do *laser* é utilizado, como já citado, para calcular a distância de um *pixel*. A calibração de ambos consiste em utilizar o tabuleiro como referência para saber em que ponto do espaço se encontram estes objetos. Após realizada esta etapa, os determinados valores (calibração de câmera, eixo do motor e plano do *laser*) são substituídos no código, e desta forma roda-se o algoritmo de captura.

Como explicado anteriormente, há uma comunicação síncrona entre câmera, computador e arduino. O computador envia uma requisição para a câmera, que retorna o código 200. O computador recebe o retorno e envia um comando para girar 1 passo do motor. Esse processo é iterativo até completarem 200 passos (uma revolução). Com estas 200 imagens tiradas, cria-se um vídeo, do qual é retirado apenas a região de interesse, que contém o rastro do *laser*.

Finalmente, outro algoritmo recebe o vídeo criado e recortado, e constrói uma nuvem de pontos para cada uma das 200 imagens. Estas nuvens de pontos são plotadas em sequência em torno do eixo do motor, sendo rotacionadas de $1,8^\circ$, analogamente ao passo do motor. Os resultados, então, serão apresentados na próxima seção.

3 RESULTADOS

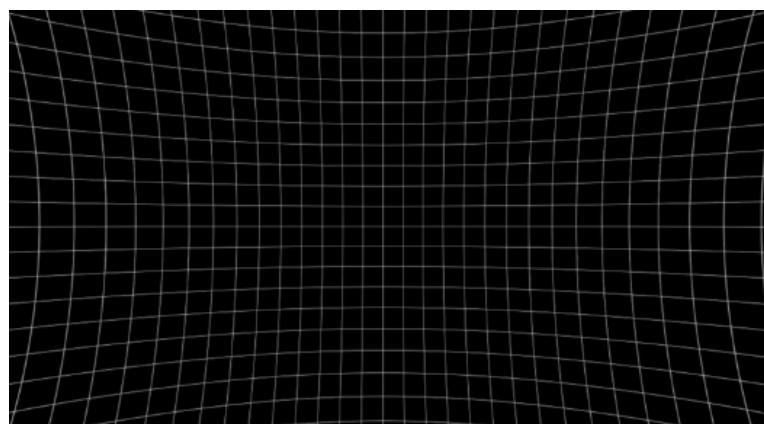
Com base na metodologia adotada e nas etapas de construção do sistema descritas anteriormente, esta seção apresenta os resultados obtidos por meio do processo de escaneamento 3D. Os resultados são divididos em duas partes: os intermediários, correspondentes às validações parciais de etapas fundamentais do projeto, e os resultados finais, representando a reconstrução tridimensional propriamente dita.

3.0.1 Resultados Intermediários

Durante o desenvolvimento do sistema, foi necessário realizar algumas etapas fundamentais para a obtenção da nuvem de pontos. A primeira delas consistiu na calibração da câmera. Como mencionado anteriormente, essa etapa foi realizada utilizando o método baseado no tabuleiro *Charuco* (Chess + Aruco), que combina o padrão de tabuleiro de xadrez com marcadores *Aruco*, proporcionando maior precisão e robustez no processo de detecção dos cantos.

Como resultado dessa calibração, foi possível estimar os parâmetros intrínsecos da câmera, bem como os coeficientes de distorção causados pela lente. Esses parâmetros estão representados nas Equação (3) e Equação (4). Além disso, o efeito da distorção causada pela lente pode ser visualizado na Figura 9, onde é possível observar a deformação da grade provocada pela lente da câmera.

Figura 9 – Distorção da câmera



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1156.18694 & 0 & 946.144623 \\ 0 & 1159.36796 & 542.665969 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} -0.460023728 \\ 0.289221221 \\ -0.0000694434885 \\ 0.00180476702 \\ -0.108612312 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

A etapa seguinte consistiu na estimativa do plano correspondente ao feixe do laser. Por meio de medições físicas realizadas no cenário experimental, obteve-se a distância entre a câmera e o ponto de emissão do laser. Com base nesses dados, foi definida a equação do plano do laser considerando a posição da câmera como a origem do sistema de coordenadas. O plano é então representado como um deslocamento fixo no caso deste projeto, aproximadamente 12 cm em relação à origem.

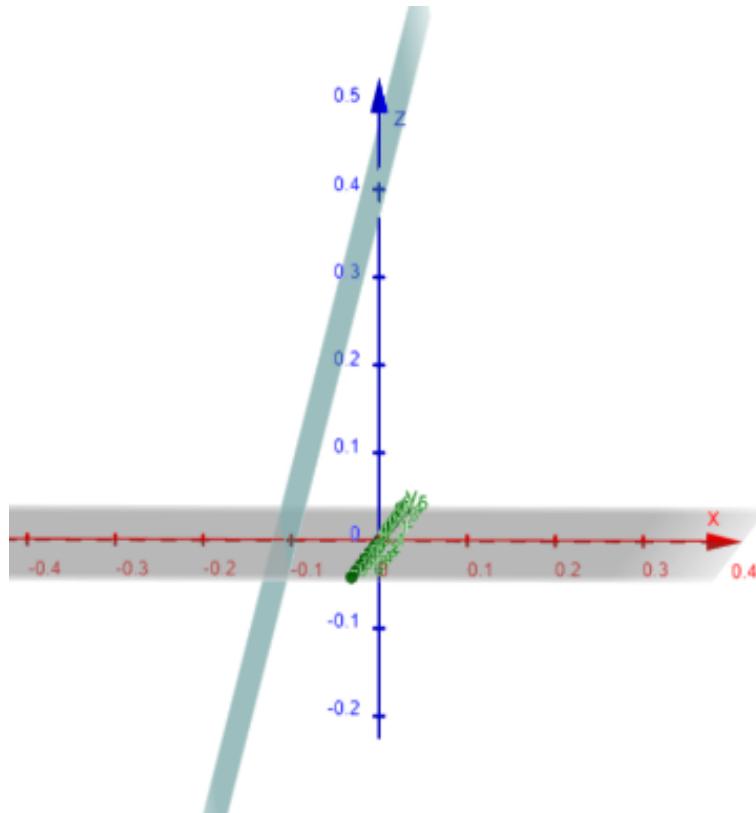
$$0.97771972x + 0.09235763y - 0.188550524z + 0.09127957687542472 = 0 \quad (5)$$

Na Figura 10, é possível observar que a distância entre a origem do sistema (associada à câmera) e o plano estimado é compatível com as medições físicas realizadas. Essa correspondência valida a equação do plano do laser utilizada no processo de reconstrução, apresentada na Equação (5).

Prosseguindo com o processo de configuração geométrica do sistema, foi necessário estimar também os parâmetros extrínsecos da câmera, que representam a posição e orientação do objeto em relação ao referencial da câmera. Esses parâmetros são dados por dois vetores: o vetor de rotação (*rotation vector* — **rvec**) e o vetor de translação (*translation vector* — **tvec**). Juntos, eles permitem que a câmera compreenda a localização do objeto no espaço físico e, portanto, possam ser usados para alinhar corretamente os pontos reconstruídos em relação ao cenário real. Os valores obtidos podem ser visualizados na Equação (6) e na Equação (7).

$$\mathbf{rvec} = \begin{bmatrix} -0.12992581 \\ 0.40412338 \\ -1.52086446 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Figura 10 – Representação do plano



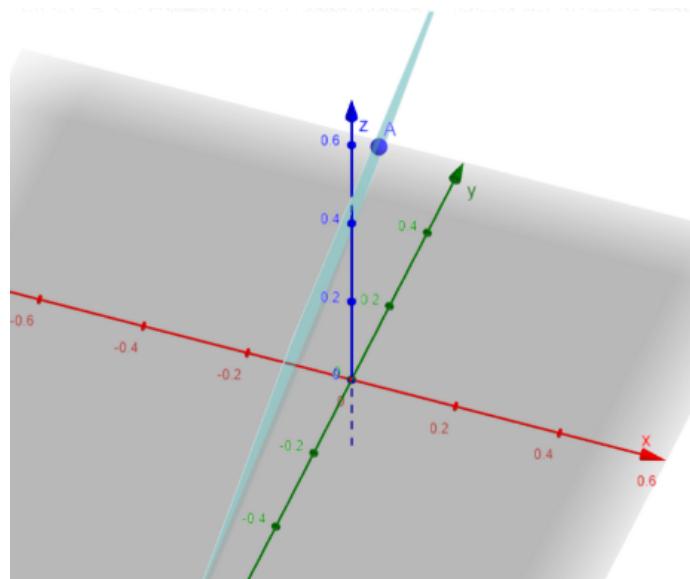
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

$$\mathbf{tvec} = \begin{bmatrix} 0.01266874 \\ 0.10931843 \\ 0.49754032 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Com a equação do plano do laser previamente definida e os parâmetros extrínsecos corretamente estimados, é possível garantir que a câmera possui uma representação precisa do mundo tridimensional. Isso é essencial para que a triangulação utilizada na reconstrução da nuvem de pontos seja confiável.

Na Figura 11, é possível visualizar que o plano do laser intercepta o ponto definido por \mathbf{tvec} , o que confirma que os parâmetros estimados estão coerentes com a realidade física do sistema. Essa validação garante que a câmera está corretamente orientada e posicionada em relação ao ambiente, estabelecendo a base para a reconstrução precisa dos perfis tridimensionais dos objetos.

Figura 11 – Plano do laser e TVEC

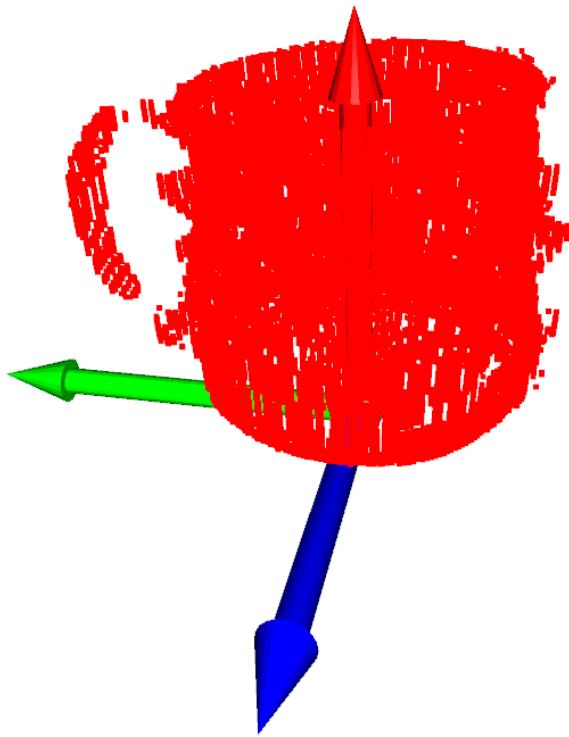


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

3.0.2 Resultados Finais

Concluídas as etapas de calibração e preparação do ambiente, foi possível realizar a reconstrução tridimensional de diferentes objetos. A Figura 12 apresenta um exemplo de reconstrução da superfície de uma caneca, utilizando um conjunto de imagens capturadas com o padrão estruturado projetado e o objeto sendo rotacionado a cada passo do motor.

Figura 12 – Reconstrução 3D de uma caneca utilizando luz estruturada

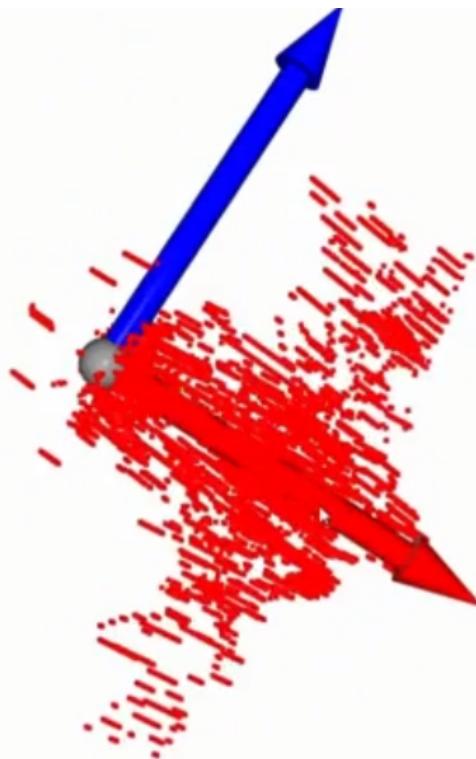


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A reconstrução foi realizada por meio de triangulação entre os feixes de luz capturados e o plano estimado do laser. Observa-se que a nuvem de pontos resultante apresenta fidelidade à forma real do objeto, o que indica o bom funcionamento das etapas anteriores.

Entretanto, durante os testes, foi observado que o sistema apresenta limitações ao lidar com certos tipos de materiais. Objetos altamente reflexivos, transparentes ou com baixa difusão de luz apresentaram reconstruções parciais ou com baixa densidade de pontos, conforme mostrado na Figura 13. Tal comportamento era esperado, dado que esses materiais alteram significativamente a trajetória da luz incidente, dificultando a captação correta pela câmera.

Figura 13 – Objeto com material de difícil reconstrução (reflexivo ou transparente)



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

3.1 ADVERSIDADES PRÁTICAS

Durante o desenvolvimento do sistema de escaneamento 3D, diversas dificuldades práticas foram encontradas, tanto no aspecto de hardware quanto na implementação de software e nas etapas de calibração. Essas adversidades impactaram diretamente o tempo de desenvolvimento, a estabilidade da aquisição de dados e a qualidade da reconstrução tridimensional. A seguir, são descritas as principais barreiras enfrentadas ao longo do projeto.

3.1.1 Motor de Passo e Controle

Inicialmente, foi planejado o uso do motor NEMA 23 para realizar a movimentação do objeto com alta precisão, similar ao NEMA 17 mencionado em etapas anteriores. No entanto, dois grandes problemas inviabilizaram sua adoção. O primeiro foi a exigência de uma alimentação elétrica de corrente elevada, incompatível com os controladores utilizados no projeto. O segundo refere-se à comunicação: os

drivers normalmente empregados com o NEMA 23 são projetados para controladores industriais como CLPs, o que dificultou sua integração com microcontroladores de uso geral, como o Arduino. Além disso, constatou-se que o NEMA 23 estava superdimensionado para a aplicação, tornando sua adoção desnecessária.

3.1.2 Projeção com Laser e Projetor

A etapa de aquisição por luz estruturada pode ser realizada de diferentes formas. Neste projeto, foram considerados dois métodos principais: o uso de laser (implementado) e o uso de projetor (alternativa avaliada). O uso de projetor apresenta algumas vantagens relevantes, como a necessidade de um número menor de capturas, menor tempo de aquisição e menor dependência de um ambiente com iluminação controlada. No entanto, sua principal limitação está na complexidade da calibração: alinhar corretamente os parâmetros do projetor com os da câmera requer técnicas mais avançadas e ajustes finos, o que dificultaria a execução dentro dos recursos e tempo disponíveis no projeto.

3.1.3 Problemas de Calibração e Ambiente

Um dos maiores desafios enfrentados esteve relacionado à calibração da câmera, do plano do laser e do eixo de rotação do objeto. Inicialmente, foram utilizados métodos convencionais aprendidos em disciplinas anteriores, mas esses apresentaram grande imprecisão, resultando em reconstruções tridimensionais superficiais e de baixa fidelidade. Embora fosse possível gerar uma nuvem de pontos, a geometria obtida era incompleta e imprecisa.

Com a adoção de técnicas mais modernas e robustas de calibração, como a utilização do tabuleiro *Charuco* e algoritmos baseados em correspondência projetor-câmera, foi possível melhorar significativamente a estimativa do plano do laser e dos parâmetros extrínsecos da câmera.

Outro ponto crítico foi a calibração do eixo de rotação do motor. Essa etapa envolve tanto o entendimento conceitual — ou seja, a representação espacial do eixo em relação à câmera — quanto a aplicação prática, que requer ajustes para garantir que o vetor de translação (t_{vec}) esteja corretamente posicionado no plano de rotação. Essa calibração exige alta precisão e condições de ambiente controladas, como iluminação estável e ausência de ruídos ópticos, para que os parâmetros geométricos estejam corretamente alinhados com a realidade física do sistema.

3.1.4 Integração entre Módulos

Por fim, a integração entre os módulos de software responsáveis pela calibração, aquisição e reconstrução também apresentou dificuldades. A necessidade de sincronia entre a movimentação do motor e a captura das imagens exigiu ajustes finos na lógica de controle e no tempo de resposta dos dispositivos. Testes iterativos foram fundamentais para garantir que cada componente funcionasse de maneira coordenada.

Essas adversidades, apesar de desafiadoras, contribuíram para o amadurecimento técnico da equipe e permitiram um aprendizado mais profundo sobre os aspectos práticos da visão computacional aplicada à reconstrução 3D.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento do sistema de escaneamento 3D proposto neste projeto foi concluído com êxito, atingindo os principais objetivos definidos inicialmente. A abordagem adotada, baseada na técnica de luz estruturada combinada com o uso de um laser, permitiu a reconstrução tridimensional de objetos reais por meio da extração de coordenadas espaciais a partir de imagens 2D.

Durante o processo, foram implementadas diversas etapas fundamentais, como a calibração da câmera com tabuleiros *Charuco*, a estimativa do plano do laser, a definição precisa do eixo de rotação do objeto e a geração da nuvem de pontos com posterior transformação em malha 3D. O sistema utilizou bibliotecas consolidadas como OpenCV, Open3D e Scikit-learn, além de ferramentas auxiliares desenvolvidas para controle de hardware e segmentação de imagens.

Os resultados demonstraram a viabilidade técnica da solução, com reconstruções aceitáveis de objetos como canecas, bonecos e figuras geométricas. Apesar disso, algumas limitações foram identificadas, como a dificuldade de escanear superfícies reflexivas ou translúcidas, além da sensibilidade a condições de iluminação e ruído. Outro desafio significativo foi a calibração precisa dos componentes — especialmente o alinhamento do plano do laser e do eixo do motor —, o que exigiu revisões metodológicas ao longo do processo.

Ainda assim, o projeto se mostrou didático e útil, tanto para fins acadêmicos quanto para futuras aplicações práticas. A proposta de continuidade inclui a adoção de técnicas mais robustas de calibração, a substituição do motor de passo por modelos mais compatíveis e eficientes, e a exploração de abordagens com inteligência artificial para segmentação e reconstrução de malhas. Tais melhorias visam aumentar a precisão, reduzir o tempo de aquisição e ampliar a gama de objetos escaneáveis.

Em suma, o projeto representou um desafio técnico relevante e proporcionou aos autores um profundo aprendizado prático em visão computacional, integração hardware-software e reconstrução 3D, abrindo caminhos para futuros trabalhos de pesquisa e desenvolvimento na área. Além de outros aprendizados, como organização, disciplina, trabalho em equipe, e outros detalhes relevantes para a formação de um engenheiro. Finalmente, ficam alguns agradecimentos aos professores: Ebrahim, Carlos Moratelli, por seu acompanhamento e dedicação à matéria. Ao professor Marcos Matsuo, que motivou e mostrou o caminho a ser desbravado. E por fim, à todos os professores da UFSC, que de alguma forma contribuiram para a formação dos autores.

REFERÊNCIAS

- AUTOCORE ROBÓTICA. **Motor de Passo NEMA 23 - 12,6 kgf.cm.** [S.l.: s.n.], 2025. Acessado em: 3 abr. 2025. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/motor-de-passo-nema-23-12-6-kgfcm>.
- EPSON. **Projetor Laser QL3000B 3LCD de Alto Brilho e Resolução 4K HDR.** 2025. Disponível em: <https://epson.com.br/Para-casa/Projetores/Projetores-Pro-Cinema/Projetor-Laser-QL3000B-3LCD-de-Alto-Brilho-e-Resolu%C3%A7%C3%A3o-4K-HDR/p/V11HB34820>. Acesso em: 3 abr. 2025.
- HALEEM, Abid; JAVAID, Mohd; SINGH, Ravi Pratap; RAB, Shanay; SUMAN, Rajiv; KUMAR, Lalit; KHAN, Ibrahim Haleem. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview. **International Journal of Cognitive Computing in Engineering**, v. 3, p. 161–171, 2022. ISSN 2666-3074.
- HARTLEY, Richard; ZISSELMAN, Andrew. **Multiple View Geometry in Computer Vision.** 2. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003. ISBN 978-0521540513.
- HOWELLS, S.; ABUOMAR, O. Depth Maps Comparisons from Monocular Images by MiDaS Convolutional Neural Networks and Dense Prediction Transformers. In: 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME). [S.l.: s.n.], nov. 2022. P. 1–6.
- INTELBRAS. **Câmera IP Full HD da Série 1000 VIP 1230 B G5.** 2025. Disponível em: <https://www.intelbras.com/pt-br/camera-ip-full-hd-da-serie-1000-vip-1230-b-g5>. Acesso em: 3 abr. 2025.
- JÚNIOR, Paulo; VON WANGENHEIM, Aldo; SOBIERANSKI, ANTONIO. Scanner 3D de Baixo Custo Utilizando Marcadores Artificiais: Um scanner 3D de baixo custo que utiliza uma câmera digital, um laser e marcadores artificiais. **Relatórios Técnicos do INCoD (ISSN 2236-5281)**, v. 7, p. 1–21, out. 2017.

NAMIKI, Akio; SHIMADA, Keitaro; KIN, Yusuke; ISHII, Idaku. Development of an Active High-Speed 3-D Vision System. **Sensors**, v. 19, n. 7, 2019. ISSN 1424-8220.

ROBOCORE. **Raspberry Pi 4 – 1GB**. 2025. Disponível em: <https://www.robocore.net/placa-raspberry-pi/raspberry-pi-4-1gb>. Acesso em: 3 abr. 2025.

SALVI, Joaquim; FERNANDEZ, Jordi; PRIBANIC, Tomislav; LLADO, Xavier. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. **Pattern Recognition**, Elsevier, v. 43, n. 8, p. 2666–2680, 2010.

SILFVAST, William T. **Laser Fundamentals**. 2. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2004. ISBN 9780521833451.

SILVA, Augusto Moura Alves. **Segurança para câmeras IP**. Uberlândia, Brasil: [s.n.], 2018. Bacharelado em Sistemas de Informação.

SOUSA, João Filipe Cruz. **Scanner a 3D**. Jan. 2015. Dissertação de Mestrado – Universidade do Minho.

SUN, Jian; ZHENG, Nan-Ning; SHUM, Heung-Yeung. Stereo matching using belief propagation. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, IEEE, v. 25, n. 7, p. 787–800, 2003.

TAO, Xiaoyang; GAO, Hong; FERIS, Rogerio S; SMITH, Jason K; WEN, Shalini; LIU, Xiaoming. Deep stereo matching with explicit cost aggregation sub-architecture. **IEEE Transactions on Image Processing**, IEEE, v. 27, n. 4, p. 1793–1805, 2018.

ZHANG, Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, IEEE, v. 22, n. 11, p. 1330–1334, 2000.