



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Digitalização de objetos 3D para representação em nuvem de pontos

Ricardo Arôso Mendes Kury

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Orientador
Prof. Dr. Daniel Chaves Café

Brasília
2019

Agradecimentos

Agradeço:

Ao Laboratório Aberto de Brasília e aos seus colaboradores por viabilizarem, através de treinamento, equipamentos e auxílio técnico, o emprego da manufatura aditiva no desenvolvimento deste projeto;

Ao meu orientador, pela disponibilidade, entusiasmo e compreensão ao longo do último ano;

A todos os que contribuíram com o sucesso deste trabalho cedendo ferramentas, materiais, componentes ou parte do seu tempo e conhecimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio do Acesso ao Portal de Periódicos.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a criação de um escâner 3D capaz de gerar nuvens de pontos de pequenos objetos, com foco em redução de custos e da complexidade de operação. Foram estudados modelos de escâneres 3D disponíveis comercialmente, assim como processos de manufatura para as peças da montagem.

O aparelho proposto utiliza o sensor de distância a laser VL53L0X, baseado em tecnologia *Time-of-Flight* (ToF), além de motores de passo NEMA-17 e 28BYJ-48 para movimentação de peças e um Raspberry Pi para comandar os componentes. Algumas das peças usadas na construção foram fabricadas em impressoras 3D. O software do escâner foi desenvolvido em Python 3.7 utilizando os módulos Rpi.GPIO e Open3D para controle dos pinos lógicos do Raspberry pi e processamento e visualização de nuvens de pontos, respectivamente.

O escâner criado foi capaz de adquirir nuvens de pontos de objetos selecionados e serve como plataforma para análise de características do sensor de distância utilizado.

Palavras-chave: escâner 3D, *time-of-flight*, baixo custo, Raspberry Pi, VL53L0X

Abstract

This work is aimed at designing a low-cost, easy to use 3D scanner capable of acquiring point clouds of small objects. Commercially available 3D scanners and manufacturing processes for parts of the assembly were studied.

The proposed device uses the VL53L0X, a laser distance sensor based on time-of-flight technology, as well as NEMA-17 and 28BYJ-48 stepper motors and a Raspberry Pi for controlling the components and acquiring sensor data. Some parts used in the assembly were 3D printed. The scanner's software was written in Python 3.7 and relies on the third party modules Rpi.GPIO and Open3D for controlling the logical pins on the Pi and point cloud processing, visualization and exporting, respectively.

The constructed scanner has been able to generate point clouds from select small objects and can be useful as a testing platform to assess the chosen distance sensor's capabilities at 3D scanning applications.

Keywords: 3D scanner, time-of-flight, low-cost, Raspberry Pi, VL53L0X

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivo geral	1
1.3	Objetivos específicos	2
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Escâneres 3D	3
2.1.1	Escâneres a Laser	3
2.1.2	Luz Estruturada (ou "Luz Branca")	3
2.1.3	Câmeras ToF	5
2.2	Manufatura aditiva	7
2.2.1	Impressoras 3D cartesianas	7
2.3	Sensor de proximidade VL53L0X	7
2.3.1	Capa protetora	9
3	Metodologia	11
3.1	Caracterização do sensor VL53L0X	11
3.1.1	Precisão e ruído em função da distância	12
3.2	Capa para proteção contra poeira	12
3.3	O escâner	12
3.3.1	Construção	13
3.3.2	Funcionamento do escâner	17
3.3.3	Estrutura do software	17
4	Resultados e Análise	22
4.1	Caracterização do sensor	22
4.2	Capa protetora	23
4.3	Nuvens de pontos	25

5 Conclusão	33
5.1 Trabalhos futuros	33
Referências	35

Lista de Figuras

2.1	Princípio de funcionamento de um sistema de triangulação a laser. (Fonte: [1])	4
2.2	Escâner 3D da <i>Matter and Form</i> , que utiliza um sistema de triangulação a laser. (Fonte: [2])	4
2.3	Escâner de luz estruturada David SLS 3. (Fonte: [3])	5
2.4	Exemplos de padrões utilizados por escâneres de luz estruturada. (Fonte: [4])	5
2.5	Ilustração do funcionamento de uma câmera ToF. (Fonte: [5])	6
2.6	Dispositivos Kinect e HoloLens, da Microsoft, utilizam câmeras ToF para reconhecimento de gestos e realidade aumentada.	6
2.7	Ender-3: impressora 3D cartesiana da fabricante Creality3D. (Fonte: [6])	8
2.8	Sensor de proximidade VL53L0X com placa de expansão. (Fonte: [7])	8
2.9	Efeito de <i>cross-talk</i> causado pela superfície refletiva posicionada entre o sensor e o alvo. (Fonte: [8])	9
2.10	Impacto do <i>cross-talk</i> nas medidas obtidas pelo sensor. (Fonte: [8])	10
3.1	Montagem para caracterização do sensor	11
3.2	Modelos 3D de capas protetoras para o sensor	13
3.3	Modelo do escâner 3D proposto	14
3.4	Escâner construído e indicação dos componentes	15
3.5	Visão detalhada dos componentes do escâner	16
3.6	Visualização dos posicionamento do escâner em relação ao espaço cartesiano da nuvem de pontos gerada.	19
3.7	Visualizações bidimensionais do escâner com marcações de dimensões	21
4.1	Gráfico do resultado dos testes de precisão do sensor.	23
4.2	Versão final das capas protetoras para o sensor VL53L0X.	23
4.3	Gráficos obtidos nos testes realizados para mensurar a influência do material usado para cobrir a janela da capa protetora no comportamento do sensor.	24
4.4	Escaneamento do objeto 1, forçando o alinhamento vertical dos pontos (20585 pontos).	25

4.5	Resultado do escaneamento do objeto 1 (19112 pontos).	28
4.6	Resultado do escaneamento do objeto 1 modificado para analisar o impacto do material translúcido nas medidas do escâner (17850 pontos).	29
4.7	Resultado do escaneamento do objeto 2 (21774 pontos).	30
4.8	Resultado do escaneamento do objeto 3 (17690 pontos).	31
4.9	Visualização de um objeto com escala saturada devido aos pontos fora do alcance do sensor. O arco é composto por pontos fora do alcance do sensor de distância e todos os pontos do objeto estão aglomerados no ponto central da imagem (18725 pontos).	32

Lista de Tabelas

4.1 Resultados obtidos no teste de precisão do sensor VL53L0X.	22
--	----

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

A construção de objetos tridimensionais reais em ambiente virtual possui diversas aplicações. Dentre elas, podemos citar: preservação e estudo de objetos antigos; compartilhamento de modelos 3D via mídias digitais, democratizando acesso a obras de arte ou artefatos arqueológicos; representação virtual de objetos para compra e venda *on-line*; replicação de partes mecânicas, possivelmente defeituosas, para efetuar reparos em máquinas; análise de características estruturais.

Os escâneres 3D disponíveis comercialmente apresentam alto custo para o consumidor comum, sendo mais utilizados por empresas e instituições especializadas para fins de pesquisa ou desenvolvimento de produtos. Além disso, esses aparelhos são de difícil manuseio, necessitando de mão de obra especializada para uso adequado. Essas barreiras podem ser intransponíveis para indivíduos e pequenas empresas.

Caso as barreiras de custo e dificuldade de uso de escâneres 3D fossem reduzidas, essa tecnologia se tornaria acessível a novos grupos. Para tal, é proposto um escâner 3D baseado em sensores de distância *time of flight* (ToF), ideal para extrair informações geométricas de objetos de tamanho limitado. Ao contrário dos métodos mais comumente utilizados, esse tipo de sensor de baixo custo não exige do usuário final processos intrincados de calibração ou colimação.

1.2 Objetivo geral

Construir o protótipo de um aparelho capaz de escanear objetos pequenos, obtendo nuvens de pontos que permitam a reconstrução da geometria dos objetos em ambiente virtual e eventual replicação por meio de processos de manufatura computadorizada. O aparelho

deve ter custo mais baixo do que os escâneres 3D disponíveis comercialmente e ser de fácil uso, não exigindo conhecimento técnico especializado dos usuários.

1.3 Objetivos específicos

1. Caracterização do sensor: analisar características de precisão e ruído do sensor de distância a ser utilizado no projeto. Isso definirá a viabilidade do sensor para a aplicação desejada.
2. Desenvolvimento de:
 - Capa de proteção: uma capa para proteger o sensor contra poeira e outros resíduos sólidos.
 - Estrutura para movimentação do sensor.
 - Estrutura para movimentação do objeto a ser escaneado.
 - Software para movimentar os sensores e o objeto e adquirir os dados para criação da nuvem de pontos, exportando os dados adquiridos pelo escâner para formato compatível com softwares de processamento e visualização de nuvens de pontos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Escâneres 3D

Escâneres 3D são dispositivos usados para gerar representações digitais de objetos ou ambientes do mundo real. Existem diversos tipos de escâneres 3D de curto, médio e longo alcance. Aqui, o foco será nos escâneres de curto alcance e nas técnicas utilizadas para escanear pequenos objetos, além de escâneres que utilizam câmeras de ToF.

2.1.1 Escâneres a Laser

É possível obter o modelo 3D de um objeto medindo a distância de vários pontos da superfície do objeto para um ponto fixo no espaço. Os escâneres a laser utilizam sistemas de triangulação a laser para aferir a distância para diversos pontos do objeto.

Sistemas de triangulação a laser são compostos por pelo menos um laser (emissor) e um sensor similar a uma câmera. Quando a posição do sensor em relação ao emissor é conhecida, é possível, através de relações trigonométricas, calcular a distância entre o laser e uma superfície refletiva. Esse princípio de funcionamento é ilustrado na figura 2.1, que ilustra como a posição em que o laser incide na superfície no sensor depende da distância entre o emissor e a superfície refletiva.

Diversos modelos de escâneres 3D baseados em laser estão disponíveis comercialmente. Eles apresentam resiliência à influência da iluminação ambiente e portabilidade como pontos positivos. Pode ser citado como exemplo o escâner da empresa canadense *Matter and Form*, representado na figura 2.2 [2].

2.1.2 Luz Estruturada (ou "Luz Branca")

Esse tipo de escâner utiliza uma combinação de projetor e câmera para projetar padrões luminosos no objeto escaneado. Os padrões luminosos utilizados geralmente se parecem

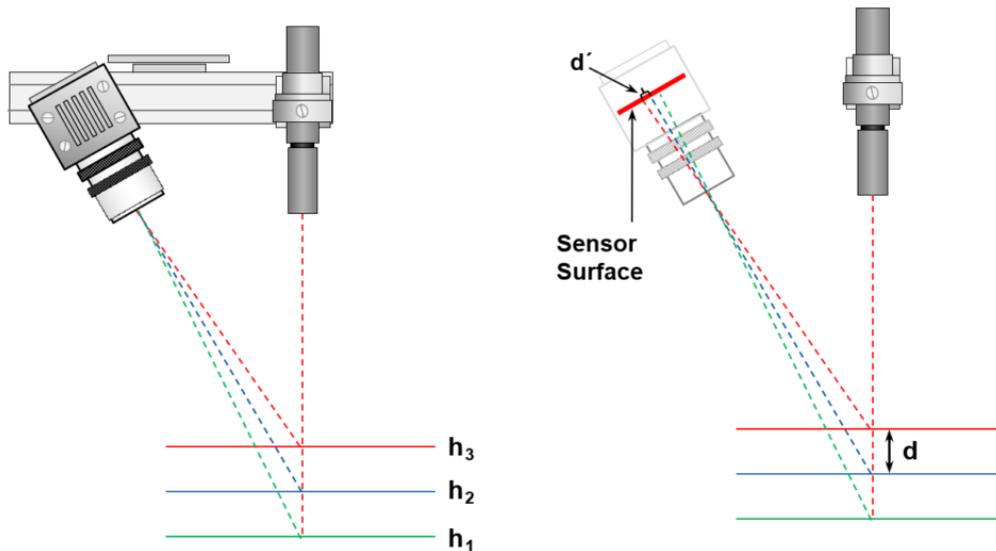


Figura 2.1: Princípio de funcionamento de um sistema de triangulação a laser. (Fonte: [1])

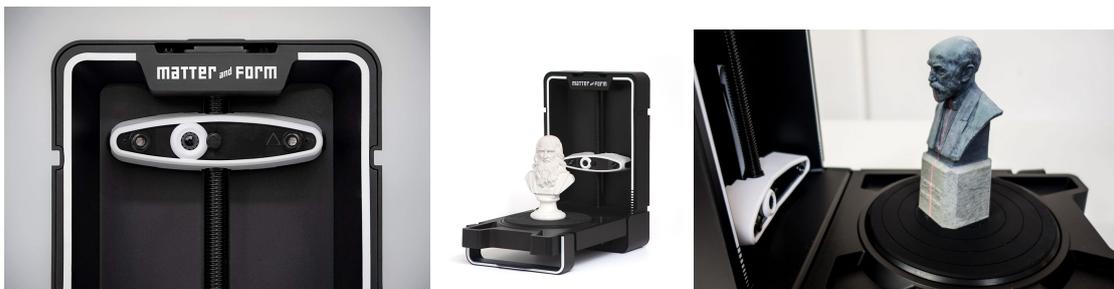


Figura 2.2: Escâner 3D da *Matter and Form*, que utiliza um sistema de triangulação a laser. (Fonte: [2])

com barras ou retângulos, mas podem ser cuidadosamente construídos por diversas técnicas, visando identificar unicamente cada ponto da imagem. Correspondências entre o padrão projetado e a imagem obtida pela câmera são utilizadas para computar informações geométricas da superfície escaneada [9].

Escâneres 3D baseados em luz estruturada possibilitam a aquisição de um grande número de pontos simultaneamente. Com equipamento de qualidade, é possível obter nuvens de pontos com excelente precisão. Também é possível utilizar as imagens capturadas para um processo de fotogrametria, que pode ser usado para melhorar a qualidade da nuvem de pontos obtida. Essa técnica se mostra especialmente útil para remover pontos capturados no plano de fundo que não pertencem ao objeto.

A figura 2.3 mostra um escâner de luz estruturada disponível comercialmente. Na figura 2.4 é possível ver exemplos de padrões luminosos que podem ser utilizados para escanear superfícies.



Figura 2.3: Escâner de luz estruturada David SLS 3. (Fonte: [3])

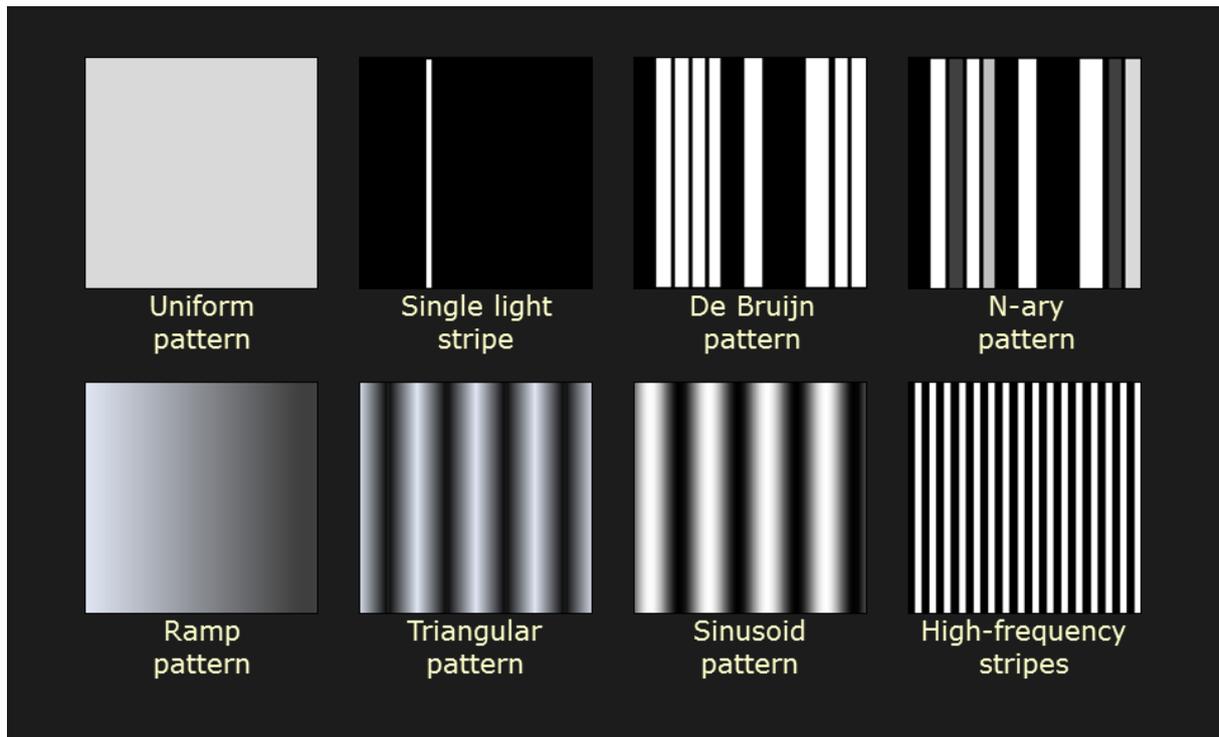


Figura 2.4: Exemplos de padrões utilizados por escâneres de luz estruturada. (Fonte: [4])

2.1.3 Câmeras ToF

Esse tipo de equipamento geralmente se enquadra nas categorias de escâner de médio ou longo alcance. Câmeras ToF funcionam emitindo sinais de laser para o ambiente, geralmente fora do espectro da luz visível, que cobrem uniformemente o campo de visão da câmera. Em seguida, um sensor bidimensional mede a distância entre o emissor do laser e a superfície que o refletiu com base no atraso ou defasagem entre o sinal emitido e o recebido. O princípio de funcionamento de câmeras ToF é ilustrado na figura 2.5.

A diferença fundamental entre uma câmera ToF e um sensor como o VL53L0X é que a câmera utiliza seu sensor bidimensional para aferir a distância de diversos pontos simultaneamente, enquanto o sensor VL53L0X obtém a distância para um ponto por

medição.

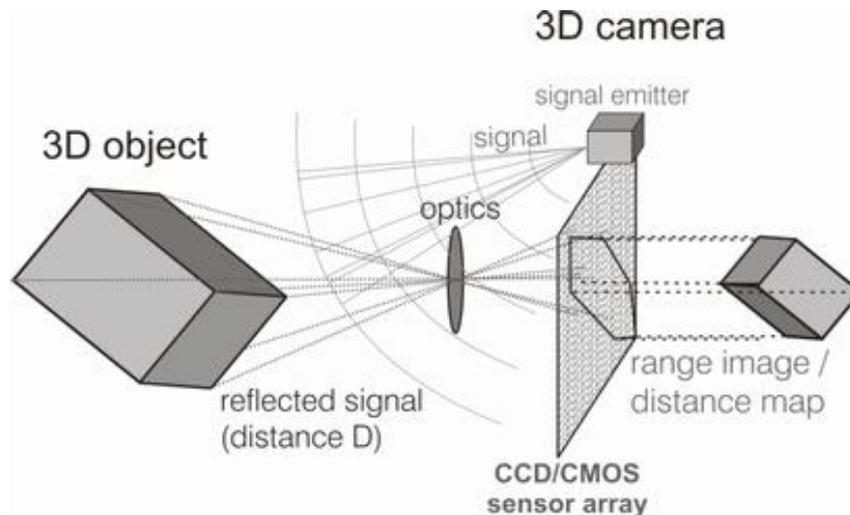


Figura 2.5: Ilustração do funcionamento de uma câmera ToF. (Fonte: [5])

Câmeras ToF são particularmente adequadas para aplicações de tempo real devido à sua capacidade única de obter informações de profundidade de uma cena a taxas de vídeo. Produtos como Kinect [10] e HoloLens [11] utilizam essa tecnologia para reconhecimento de gestos e realidade aumentada (figura 2.6); *drones* usam câmeras ToF para navegação ou reconstrução do ambiente em meio digital [12]; alguns *smartphones* utilizam tecnologia ToF como instrumento auxiliar para as câmeras fotográficas, servindo para melhorar o desempenho de auto-foco, efeitos de profundidade de campo (a exemplo do que ficou conhecido como “modo retrato”) e até desbloqueio por reconhecimento facial [13].



(a) Kinect (Fonte: [10])



(b) HoloLens (Fonte: [14])

Figura 2.6: Dispositivos Kinect e HoloLens, da Microsoft, utilizam câmeras ToF para reconhecimento de gestos e realidade aumentada.

Apesar de excelentes para aplicações de tempo real, as câmeras ToF geram modelos 3D de qualidade geralmente inferior às técnicas de triangulação a laser e luz estruturada devido à sua baixa resolução espacial e considerável ruído aleatório. Por isso, são necessárias técnicas de processamento de nuvens de pontos obtidas por esse tipo de câmera, objetivando a obtenção de resultados próximos aos escâneres mais precisos [15, 16].

2.2 Manufatura aditiva

Manufatura aditiva, popularmente conhecida como *impressão 3D*, é um processo que possibilita a fabricação de peças diretamente a partir de modelos CAD. Ao contrário da manufatura subtrativa, que parte de blocos de material e remove matéria para esculpir uma peça, a manufatura aditiva cria peças depositando material em camadas.

Processos de manufatura aditiva reduzem o tempo de desenvolvimento de produtos, com iterações curtas possibilitadas pela prototipagem rápida. Essa modalidade de manufatura é eficiente para fabricação de peças em baixo volume e pode fabricar peças que não seriam possíveis por meio de manufatura subtrativa [17].

2.2.1 Impressoras 3D cartesianas

Um dos equipamentos mais acessíveis para manufatura aditiva é a impressora 3D cartesiana, utilizando termoplásticos (usualmente ABS ou PLA) como matéria-prima. Esse tipo de impressora é chamada de cartesiana porque a movimentação do bico extrusor em relação à mesa de impressão é representada em termos de coordenadas cartesianas. Impressoras desse tipo estão disponíveis em amplas faixas de preço e por isso são populares entre entusiastas e em muitos ramos da indústria. Um exemplo de impressora 3D cartesiana pode ser visto na figura 2.7.

2.3 Sensor de proximidade VL53L0X

O sensor VL53L0X, fabricado pela ST Microelectronics, mede precisamente distâncias até 2 metros com resolução de 1 milímetro por meio do princípio de *time of flight* (ToF), ou tempo de voo. Para isso, o sensor conta com um emissor de luz e um receptor. Ao realizar uma medição, o sensor emite um sinal luminoso para o ambiente e mede a defasagem entre o sinal emitido e o sinal recebido, refletido do ambiente. Com base no comprimento de onda utilizado e na velocidade da luz, é possível associar valores de defasagem à distância percorrida pela luz para chegar até o objeto e de volta ao sensor.

 Ender



Figura 2.7: Ender-3: impressora 3D cartesiana da fabricante Creality3D. (Fonte: [6])

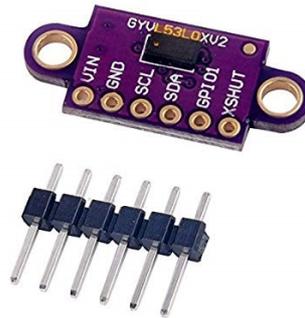


Figura 2.8: Sensor de proximidade VL53L0X com placa de expansão. (Fonte: [7])

O módulo do sensor possui um microcontrolador, responsável por realizar a interface entre o sensor e dispositivos externos por meio do protocolo de comunicação I2C. Esse protocolo permite, inclusive, que vários dispositivos se comuniquem através do mesmo barramento.

A nível de software, o controlador do sensor expõe uma API que pode ser utilizada para configurar e controlar o sensor, descrita em [18]. Isso proporciona ao sensor considerável flexibilidade de configuração. A API fornece, por exemplo, a possibilidade de configuração do limite de tempo gasto para cada medição (com influência direta na precisão) e calibração para compensação de alguns tipos de ruído (*offset*, *cross-talk*).

Diversas implementações em código aberto da API estão disponíveis como bibliotecas de alto nível para plataformas populares como Arduino [19] e Linux [20, 21], incluindo bibliotecas criadas por fabricantes ou fornecedores de placas de expansão para o sensor [19,

21].

2.3.1 Capa protetora

Em projetos comerciais, a fabricante do VL53L0X recomenda utilizar o sensor em conjunto com um tipo de proteção contra poeira, pois o acúmulo natural de partículas sólidas na superfície do sensor pode obstruir o emissor ou receptor de luz e reduzir a sua precisão. Como o sensor costuma ser embarcado em projetos maiores, fica a cargo do projetista desenvolver uma capa protetora que se adeque ao seu projeto.

A STMicroelectronics fornece documentos com diretrizes para o projeto de capas protetoras para o VL53L0X [8, 22]. As diretrizes são feitas para reduzir o impacto da capa protetora na qualidade dos dados obtidos pelo sensor.

Cross-talk

Uma capa mal projetada tem potencial para amplificar fontes de imprecisão presentes em qualquer condição de uso do sensor, como a dispersão do sinal emitido pelo sensor e a perda de potência do sinal no ambiente. No entanto, um tipo de ruído se destaca por ser causado especificamente pela capa protetora: o *cross-talk*.

Esse efeito, retratado na figura 2.9, é causado pela reflexão do sinal emitido pelo sensor na janela da capa protetora. Parte do sinal emitido é refletido diretamente no sensor de retorno, reduzindo a distância aferida.

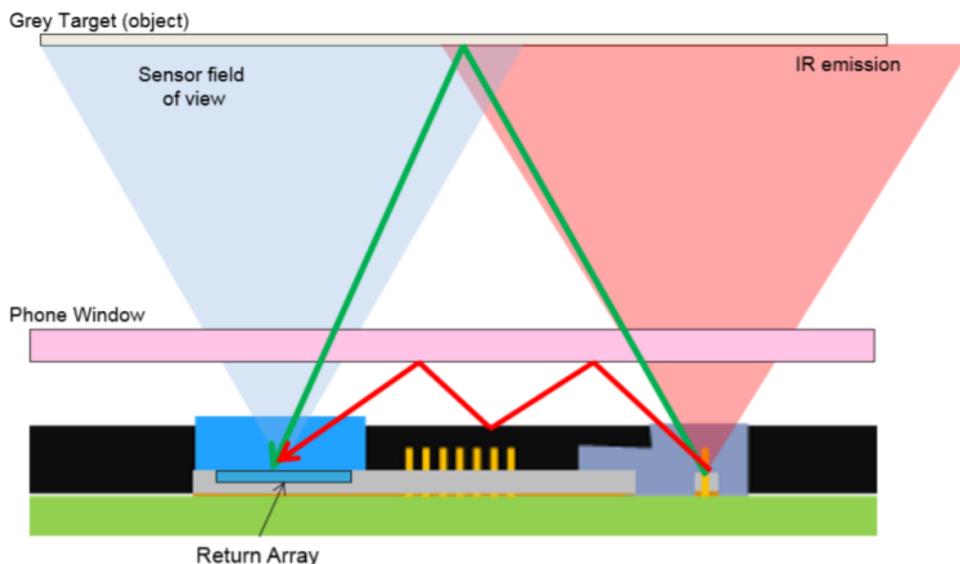


Figura 2.9: Efeito de *cross-talk* causado pela superfície refletiva posicionada entre o sensor e o alvo. (Fonte: [8])

A influência do *cross-talk* sobre a distância aferida é proporcional à razão entre a potência do sinal refletido na janela de proteção (sinal vermelho na figura 2.9) e a do sinal refletido no alvo (sinal verde). Conforme a distância até o alvo aumenta, a potência do sinal verde diminui, mas o sinal vermelho se mantém constante. Assim, percebe-se que o ruído causado por *cross-talk* é maior para grandes distâncias do alvo, como pode ser visto na figura 2.10.

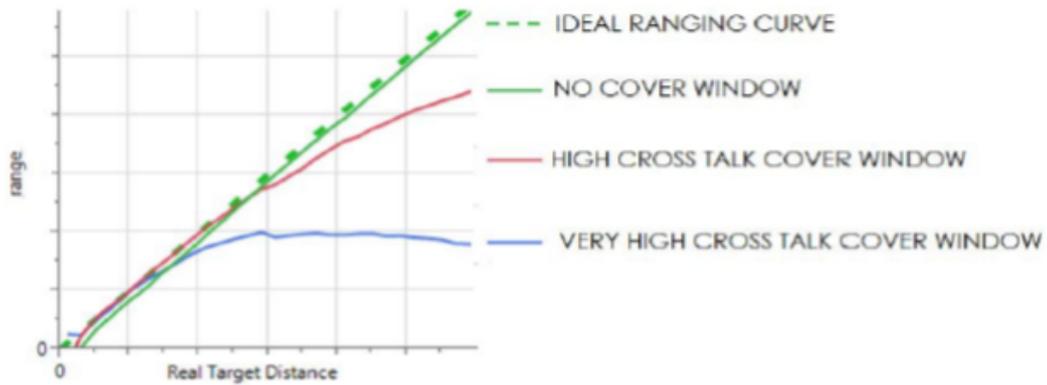


Figura 2.10: Impacto do *cross-talk* nas medidas obtidas pelo sensor. (Fonte: [8])

O módulo VL53L0X possui ferramentas para compensação de *cross-talk*; no entanto, a eficácia dessas ferramentas é maior quando o ruído de *cross-talk* é pequeno. Portanto, é vantajoso que, no projeto da capa protetora, sejam tomadas providências para minimizar esse tipo de ruído. Com esse fim, recomenda-se adicionar um anteparo opaco entre o emissor e o receptor do sinal, de modo a bloquear o caminho do sinal refletido na janela de proteção.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Caracterização do sensor VL53L0X

Para determinar a viabilidade do uso do sensor VL53L0X no projeto e suas limitações, foram realizados procedimentos para caracterização do sensor. Os procedimentos descritos levaram a importantes informações relativas à precisão e ruído do sensor sob diferentes modos de configuração. Além disso, essa etapa foi importante para a familiarização com o funcionamento do sensor.

Foi construída uma montagem para fixar o sensor de distância e um anteparo a um paquímetro. O sensor foi fixado à orelha fixa do paquímetro e o anteparo, à móvel, como pode ser visto na figura 3.1. Dessa maneira, é possível posicionar o sensor a distâncias determinadas do anteparo e comparar a distância informada pelo sensor com a distância marcada no paquímetro. O suporte para o sensor e o anteparo são feitos de PVC.

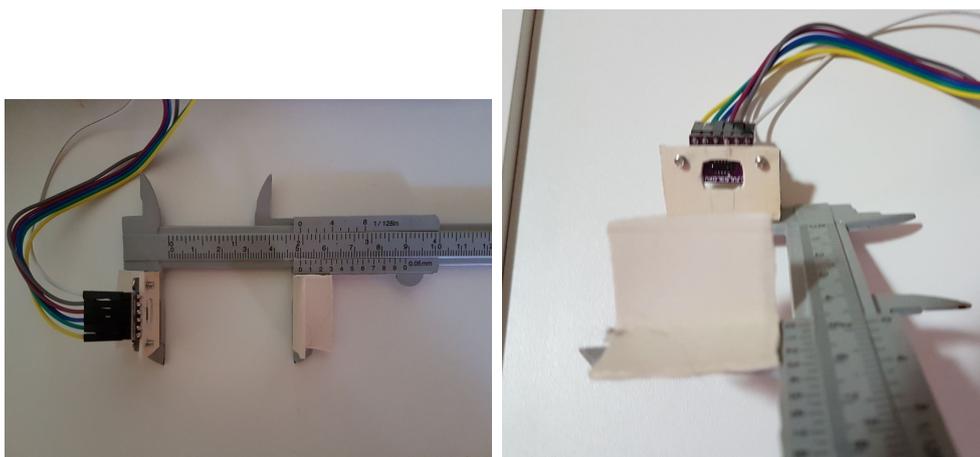


Figura 3.1: Montagem para caracterização do sensor

3.1.1 Precisão e ruído em função da distância

Para avaliar a precisão do sensor de acordo com a distância para o alvo, múltiplas medidas foram tomadas com o sensor posicionado a distâncias pré-determinadas do anteparo. Inicialmente, foram tomadas 50 medidas para cada distância, variando de $10mm$ a $120mm$ em passos de $10mm$. A partir dessas medidas, foram calculadas média e desvio padrão. As medidas foram tomadas com a montagem posicionada em uma caixa de papelão fechada, visando limitar a interferência do meio externo nos resultados.

O sensor VL53L0X [23] permite configurar o tempo disponível para cada medição (*timing budget*). Com o aumento do tempo disponível, espera-se também um aumento na precisão dos dados obtidos. Para analisar a relação entre o *timing budget* e a qualidade dos dados obtidos, o seguinte procedimento foi realizado: o procedimento descrito foi repetido para *timing budgets* de 50, 100, 150, 200 e 250 milissegundos.

3.2 Capa para proteção contra poeira

Uma capa para proteção contra poeira é recomendada para reduzir imprecisões decorrentes do acúmulo de partículas sólidas no sensor.

A *STMicroelectronics* disponibiliza, em seu site, uma página dedicada ao sensor VL53L0X [24]. Nela, estão disponíveis um modelo 3D sugerido para uma capa protetora para o sensor e uma planilha com diretrizes para projetar outras proteções desse tipo. Esses recursos foram usados para criar e imprimir modelos em impressora 3D.

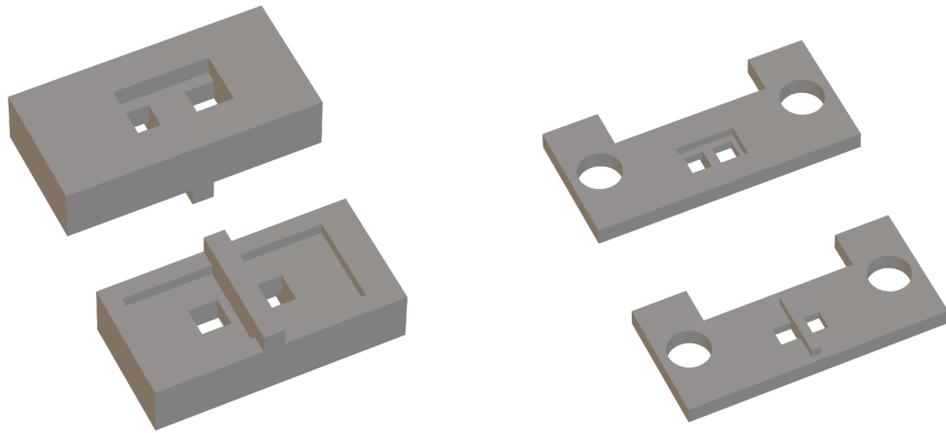
A figura 3.2a representa o modelo disponível no site da ST, modificado para remover detalhes estéticos que exigem muita precisão da impressora. Esse modelo deve ser encaixado diretamente no sensor. A figura 3.2b exibe um modelo criado para ser fixado ao sensor por meio de parafusos. A ideia é que esse modelo seja mais robusto e apresente melhores margens para imprecisões inerentes ao processo de manufatura.

Ambos os modelos de capa de proteção foram fabricados por meio de impressão 3D e foram testados no sensor. Para o material da janela de proteção, foram utilizados acrílico, com espessura de $1mm$ e acetato, de $0.1mm$. Com cada um dos materiais, os testes de precisão do sensor foram repetidos.

3.3 O escâner

Aqui é proposto um modelo para o escâner 3D a ser construído, retratado na figura 3.3.

O modelo consiste de uma montagem para o sensor de distância, que será movimentado verticalmente por um parafuso de potência ligado a um motor de passo. Durante o funcionamento, o objeto a ser escaneado (retratado na figura 3.3 como uma pirâmide



(a) Capa protetora baseada no modelo da ST, fixada por encaixe

(b) Capa protetora customizada, fixada por parafusos

Figura 3.2: Modelos 3D de capas protetoras para o sensor

verde) é posicionado sobre uma base giratória, que é rotacionada por um motor de passo e posicionada a uma distância fixa e conhecida da montagem do sensor.

Para escanear o objeto, o escâner deve realizar medidas de distância para pontos diferentes da superfície do objeto. Para cada medida tomada, sabendo a posição da base rotatória, o seu ângulo de rotação e a altura à qual o sensor de distância está posicionado, é possível inferir a posição de um ponto no espaço tridimensional que coincide com a superfície do objeto. Ao final do procedimento, os pontos obtidos devem ser combinados em uma nuvem de pontos contendo informações geométricas do objeto.

Em comparação com escâneres 3D disponíveis comercialmente, o modelo proposto assemelha-se, tanto em estrutura quanto em princípio de funcionamento, ao escâner retratado na figura 2.2. A diferença fundamental entre esses aparelhos reside no tipo do sensor de distância: enquanto o aparelho estudado no capítulo 2 utiliza um sistema de triangulação a laser, o modelo proposto utiliza um sensor de *Time of Flight*.

3.3.1 Construção

O escâner construído pode ser visto na figura 3.4. Imagens mais detalhadas dos componentes utilizados estão na figura 3.5. Os seguintes materiais foram utilizados:

- 1 motor de passo NEMA-17
- 1 controlador de motor de passo A4988
- 1 motor de passo 28BYJ-48
- 1 driver de motor de passo A0591

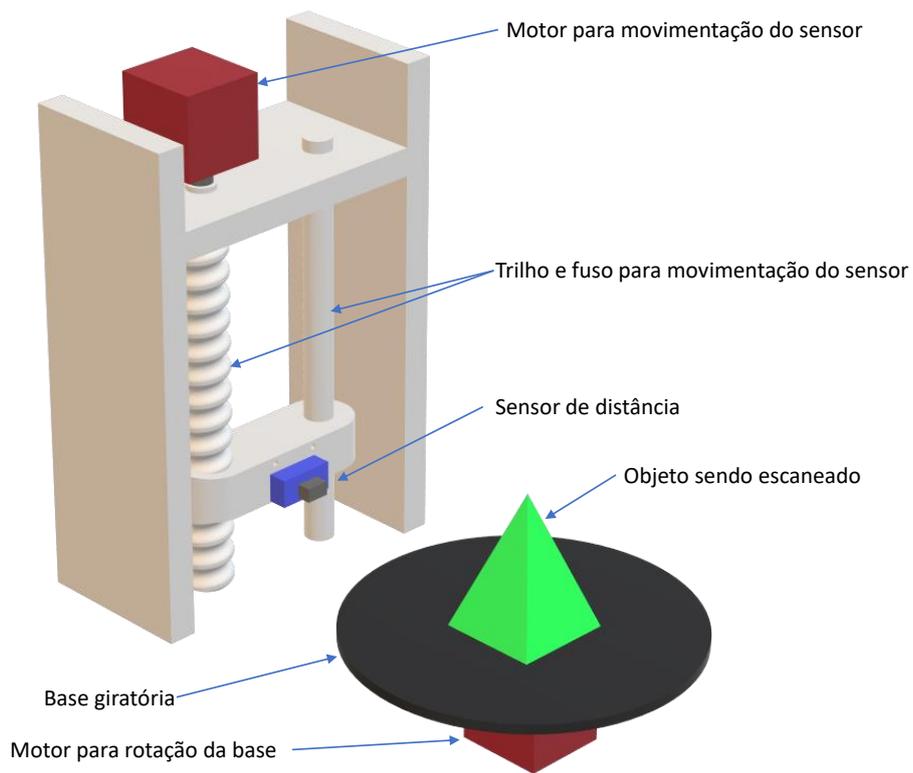


Figura 3.3: Modelo do escâner 3D proposto

- 1 sensor de distância VL53L0X
- 1 suporte para o sensor de distância
- 1 fuso e guia para movimentação do sensor
- 2 lacres plásticos para fixação do sensor de distância ao suporte
- 1 CD, usado como base giratória para o objeto escaneado
- 1 lixa para madeira
- 1 sensor de fim de curso
- 1 Raspberry Pi 3 model B com placa de expansão
- 1 fonte de alimentação de computador (alimentação de 5V e 12V)
- Protoboard, jumpers e cabos para conexão dos componentes
- Placas de madeira, cantoneiras de aço e de madeira, parafusos e porcas

O controlador de motor de passo A4988 foi usado para comandar o motor NEMA-17, responsável por movimentar o fuso que desloca o sensor de distância. Ele foi conectado à fonte de 12V para alimentação do motor e ao pino de 3.3V do Raspberry Pi para alimentação da lógica.

O *driver* de motor de passo A0591 foi utilizado para controlar o motor 28BYJ-48, responsável por rotacionar a base giratória na qual o objeto deve ser posicionado para ser escaneado. A base giratória foi feita usando um CD com uma lixa para madeira cobrindo a sua superfície. O propósito da lixa é aumentar a aderência para que o objeto escaneado não deslize durante a movimentação da base e ocultar a superfície refletiva do CD, que poderia interferir na operação do sensor de distância.

O fuso para movimentação do sensor de distância e seu suporte foram fabricados em impressora 3D em material ABS. Os modelos 3D utilizados foram obtidos em um site de compartilhamento [25] sob licença *Creative Commons* [26] e modificados em software de CAD para adequação aos requisitos do projeto. Em particular, o modelo do fuso foi ajustado para preencher lacunas que dificultavam a impressão e a rosca foi utilizada como parte do suporte do sensor.

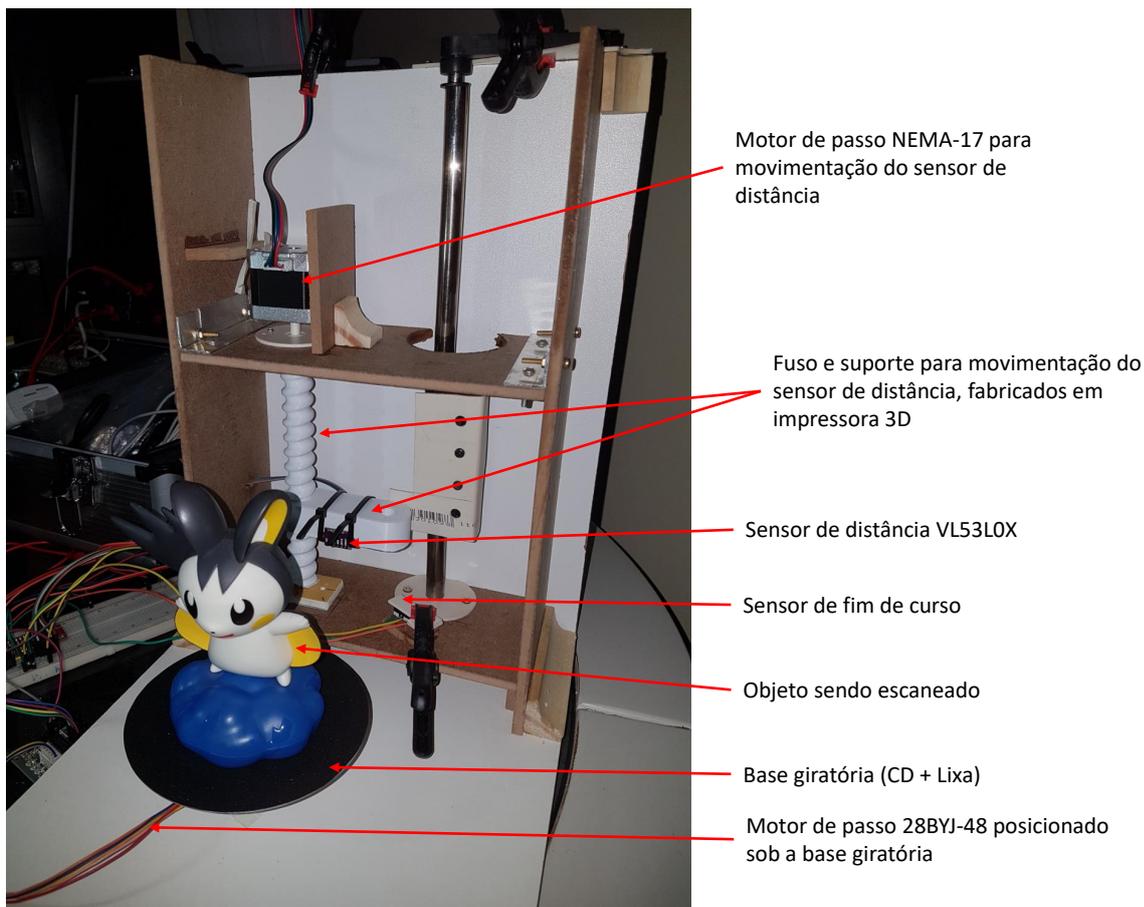
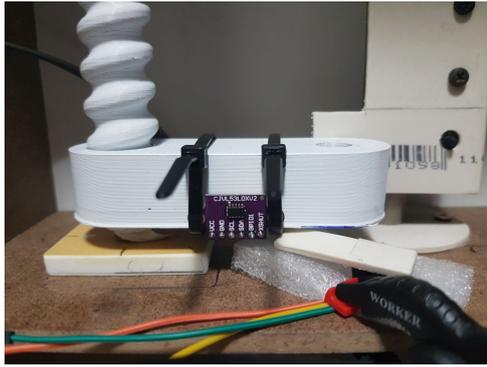
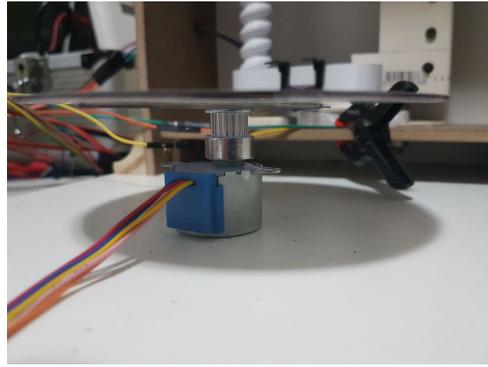


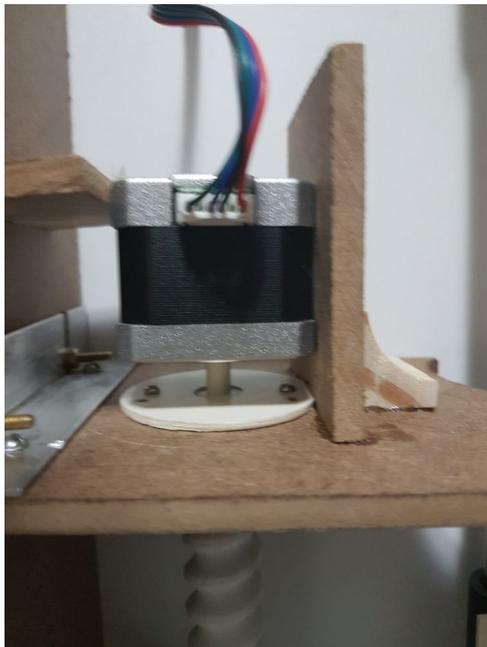
Figura 3.4: Escâner construído e indicação dos componentes



(a) Sensores de distância e de fim de curso.



(b) Motor da base giratória.



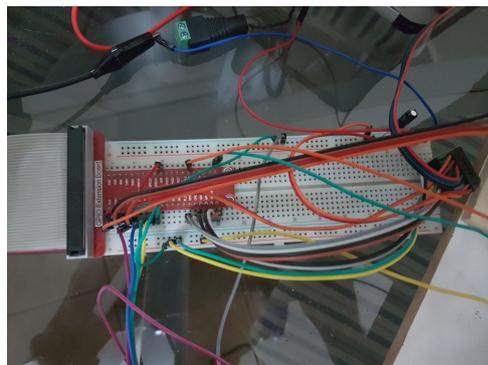
(c) Motor para movimentação do sensor de distância.



(d) Fonte de alimentação para os motores de passo.



(e) Raspberry Pi com cabo paralelo.



(f) Conexões entre os componentes realizadas por meio de uma *protoboard*.

Figura 3.5: Visão detalhada dos componentes do escâner

3.3.2 Funcionamento do escâner

Para escanear um objeto, ele deve ser posicionado sobre a base giratória, preferencialmente com seu centro de massa próximo ao centro da base. Em seguida, habilita-se a alimentação dos motores de passo. Feito isso, pode-se executar o software responsável por tomar as medidas do objeto.

Inicialmente, a posição do sensor de distância não é conhecida pelo software. Portanto, após a inicialização dos motores de passo e dos sensores, o sensor de distância é deslocado para baixo até que o sensor de fim de curso seja pressionado. Nesse momento, a posição do VL53L0X é conhecida: ele está na altura 0.

Em seguida, o sensor de distância é movimentado para cima enquanto são tomadas medidas de distância para o objeto. Essas medidas não são armazenadas, já que são utilizadas exclusivamente para determinar o ponto mais alto do objeto. Uma vez que o sensor obtenha uma medida de distância muito grande, sabemos que ele está posicionado acima do topo do objeto.

A coleta de dados é iniciada no topo do objeto e a altura à qual o sensor de distância está posicionado é reduzida em passos fixos ao longo do escaneamento. Para cada altura do sensor de distância, a base giratória rotaciona o objeto em uma quantidade de passos fixa, aqui chamada de *avanço da base*, até completar uma volta. Após cada movimentação do objeto, o sensor toma uma medida de distância para o objeto e armazena o resultado numa tripla, juntamente com o ângulo de rotação atual da base e a altura do sensor. Quando a base giratória chega a uma rotação completa, a altura do sensor de distância é reduzida em uma quantidade de passos fixa (*avanço do sensor*) e o processo se repete até a altura do sensor de distância chegar a zero.

Para a geração das nuvens de pontos, os objetos foram escaneados com o *avanço do sensor* em 8 passos e *avanço da base* em 7 passos. O avanço da base foi deliberadamente escolhido como um número de passos que não divide 512 (número de passos que levam a uma rotação completa da base) para que os pontos coletados não ficassem naturalmente alinhados verticalmente. Nessa situação, para forçar o alinhamento vertical dos pontos, é necessário mudar a direção de rotação da base sempre que ela está a um avanço de realizar uma volta completa. Desse modo, as medições são tomadas nos mesmos ângulos que as anteriores, ainda que na ordem contrária. Foram realizados testes forçando ou não o alinhamento vertical dos pontos e uma análise comparativa será feita entre as estratégias.

3.3.3 Estrutura do software

Todo o software aqui criado foi desenvolvido em Python 3.7 e está disponível em [27]. Foram utilizados módulos para controle dos pinos de GPIO do Raspberry Pi [28] e para

uso do VL53L0X [21], além de alguns módulos da biblioteca padrão do Python. Adicionalmente, para visualização e exportação de nuvens de pontos, foi utilizada a biblioteca Open3D [29]. Um módulo para controle dos motores de passo através dos drivers A4988 e A0591 foi desenvolvido para esse projeto.

O software criado para esse projeto é dividido em duas partes:

1. Aquisição de dados
2. Processamento, visualização e exportação

A primeira parte é responsável por controlar o hardware e coletar dados do objeto, executada no Raspberry Pi. A segunda parte, que pode ser executada em um computador separado, lida com o pré-processamento dos dados obtidos durante o escaneamento do objeto, a conversão dos dados obtidos para coordenadas cartesianas, geração da nuvem de pontos, visualização e exportação para formato PCD, compatível com inúmeros programas de visualização e processamento de nuvens de pontos.

Representação dos dados coletados

Ao final do escaneamento, toda a informação coletada está representada como uma lista de dicionários, na memória de execução do programa de aquisição de dados. Cada ponto é representado como um dicionário, contendo as seguintes chaves:

Angle: ângulo de rotação da base, em graus (número decimal entre 0.0 e 360.0)

Height: altura do sensor de distância, medida em passos do motor NEMA-17 (número inteiro entre 0 e 2400, representando a quantidade de passos do motor necessários para chegar a essa altura a partir do sensor de fim de curso)

Range: distância aferida pelo sensor, em milímetros (número inteiro entre 0 e 8160)

Na última etapa da execução do programa de aquisição de dados, essa lista é serializada em formato *Pickle*. Esse é um formato de arquivo binário suportado pela biblioteca padrão do Python para persistir estruturas de dados da linguagem. Esse arquivo é usado como entrada para o *script* de processamento, visualização e exportação.

Conversão de coordenadas e pré-processamento

É evidente que o formato dos dados coletados não é propício para visualização ou compartilhamento: enquanto é possível posicionar cada ponto em um espaço cartesiano tridimensional, isso requer conhecimentos específicos sobre a construção do escâner e do software de aquisição de dados. Para que os dados coletados possam ser utilizados em

programas e bibliotecas de terceiros, converteremos cada ponto de medida adquirido pelo escâner para um ponto no espaço cartesiano tridimensional, buscando posicionar o centro da base rotatória na origem, como retratado na figura 3.6. Todas as coordenadas serão expressas em milímetros.

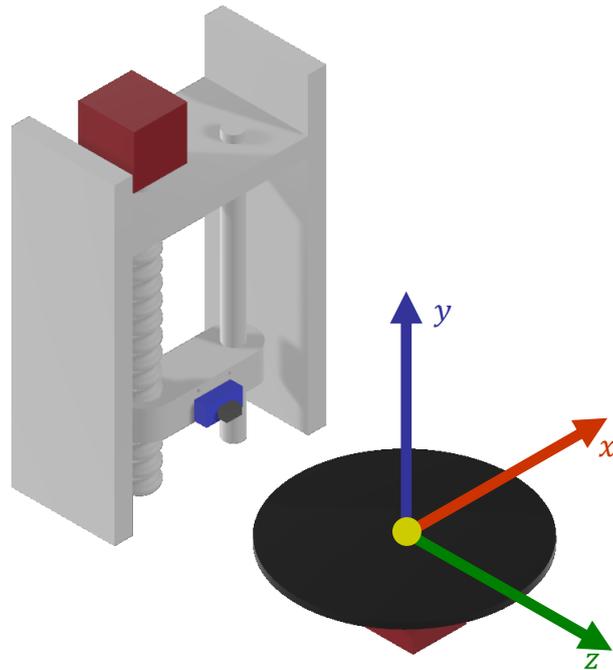


Figura 3.6: Visualização dos posicionamento do escâner em relação ao espaço cartesiano da nuvem de pontos gerada.

Antes de realizar a conversão das coordenadas, é necessário compreender algumas dimensões relevantes do escâner, representadas na figura 3.7. As medidas y_{max} e y na figura 3.7a representam, respectivamente, a distância máxima que o sensor de distância pode assumir e a sua posição em determinado momento do escaneamento.

A figura 3.7b mostra as dimensões relevantes para o cálculo das coordenadas x e z . A dimensão b representa a *baseline*, distância fixa entre o sensor VL53L0X e o eixo y , que passa pelo centro da base giratória. A distância d é medida diretamente pelo VL53L0X (valor guardado no campo *Range* dos pontos coletados pelo escâner). A partir desses valores, é possível calcular o valor de r : o raio que representa o ponto em um sistema

de coordenadas cilíndricas. O ângulo do ponto é o de rotação da base, armazenado no campo *Angle*.

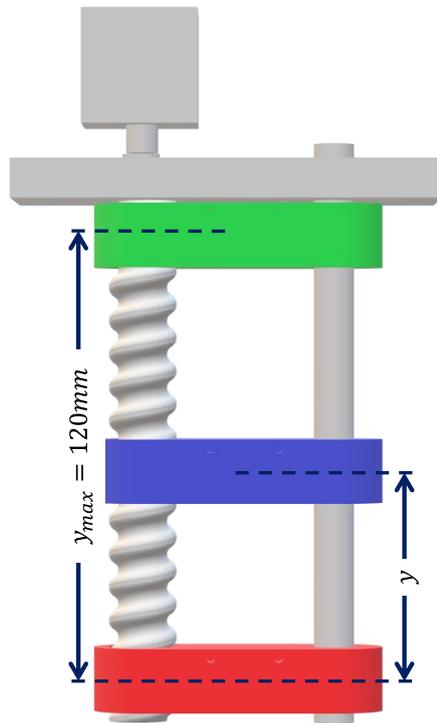
As coordenadas que representam determinado ponto no espaço cartesiano são calculadas através das equações 3.1 a 3.3.

$$x = r \cdot \sin(\textit{Angle}) \quad (3.1)$$

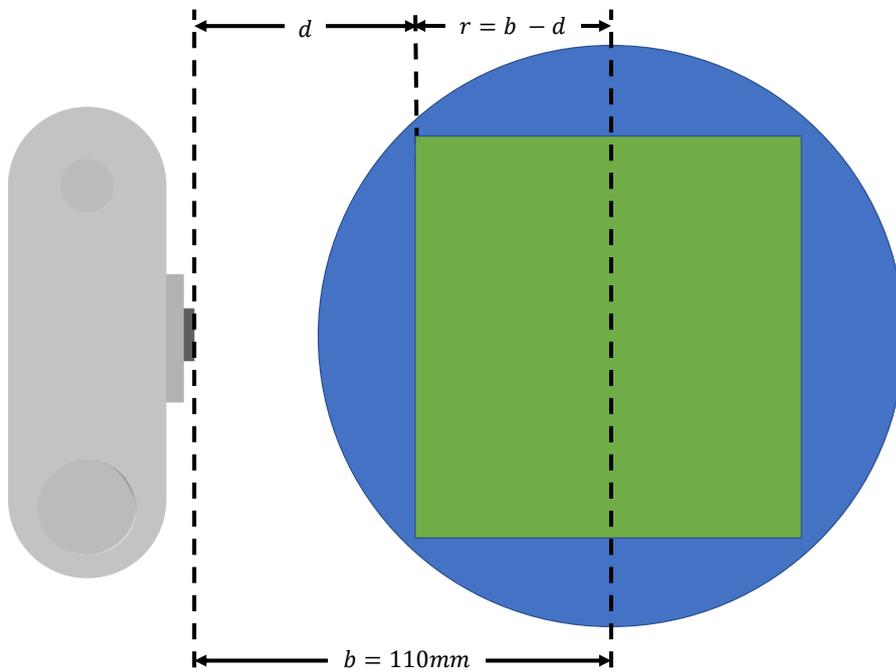
$$y = \textit{Height} \cdot \frac{y_{max}}{2400} \quad (3.2)$$

$$z = r \cdot \cos(\textit{Angle}) \quad (3.3)$$

Durante o escaneamento de um objeto, é natural que, devido à geometria complexa dos objetos escaneados, alguns pontos coletados pelo sensor registrem distâncias muito grandes ou fora do alcance. Isso ocorre quando o objeto está fora do campo de visão do sensor. Como esses valores são de magnitude maior do que se encontra em pontos reais, eles saturam a escala da nuvem de pontos gerada, inviabilizando a visualização. Para permitir a exibição da nuvem de pontos em escala apropriada, os pontos cujas distâncias aferidas pelo sensor VL53L0X estão acima de determinado limiar são eliminados no momento da leitura do arquivo de dados do escâner.



(a) Visão frontal, representando: em verde, a posição mais alta do sensor; em vermelho, a posição correspondente à altura 0; em azul, uma posição intermediária.



(b) Visão superior, representando: em cinza, o suporte para o sensor de distância; em azul, a base giratória; em verde, o alvo - objeto sendo escaneado.

Figura 3.7: Visualizações bidimensionais do escâner com marcações de dimensões

Capítulo 4

Resultados e Análise

4.1 Caracterização do sensor

A tabela 4.1 mostra os resultados do procedimento realizado para caracterização do sensor VL53L0X. Suas colunas mostram, respectivamente, a distância em que foram realizadas as medições, a média das 50 amostras coletadas, o desvio padrão da amostra, a diferença entre a distância aferida e a distância real em valor absoluto e em percentual relativo à distância real. Esses mesmos dados podem ser visualizados em forma gráfica na figura 4.1.

Distância real (mm)	Média aferida (mm)	σ	Erro (abs)	Erro (%)
10	19.3	1.6	9.3	93%
20	28.3	1.7	8.3	42%
30	37.9	1.4	7.9	26%
40	43.4	2.0	3.4	9%
50	54.2	1.4	4.2	8%
60	67.9	1.2	7.9	13%
70	79.2	1.5	9.2	13%
80	88.4	1.4	8.4	11%
90	106.2	1.3	16.2	18%
100	121.5	1.4	21.5	22%
110	138.3	1.6	28.3	26%
120	162.4	1.7	42.4	35%

Tabela 4.1: Resultados obtidos no teste de precisão do sensor VL53L0X.

Observa-se que o sensor apresenta melhor precisão, com o *timing budget* utilizado, nas faixas de distância entre 40mm e 80mm; portanto, é preferível posicionar a base giratória do escâner de modo que a superfície do objeto fique dentro dessa faixa de distância na maior parte do tempo.

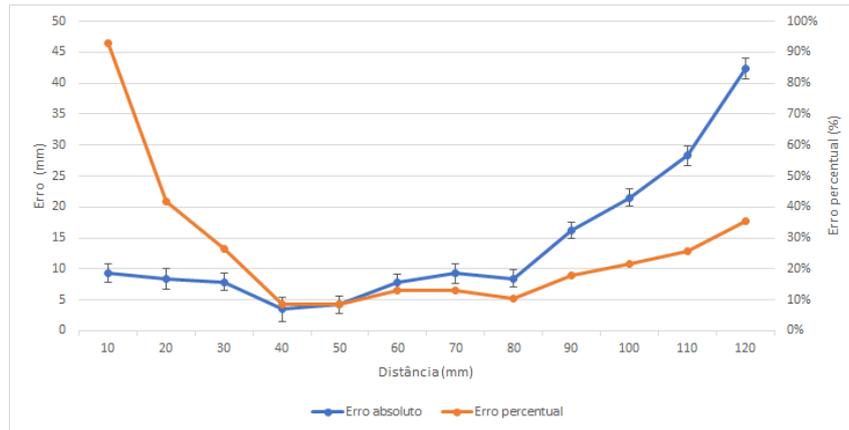
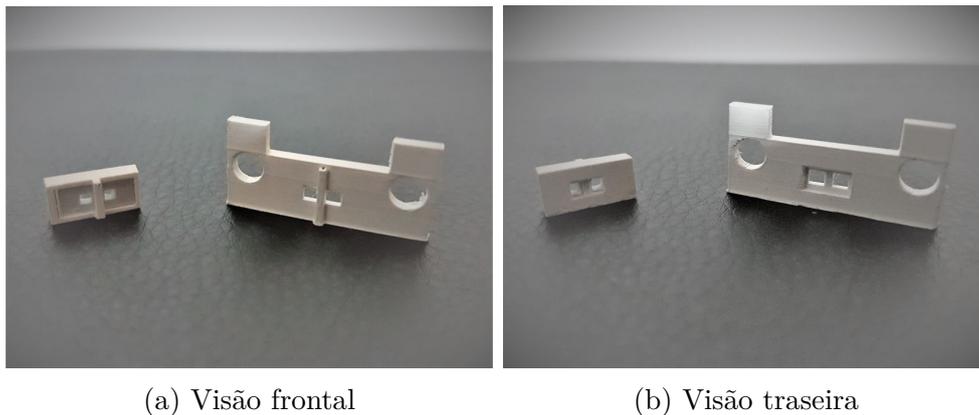


Figura 4.1: Gráfico do resultado dos testes de precisão do sensor.

4.2 Capa protetora

No total, foram necessárias 3 iterações de ajustes nos parâmetros da impressão 3D para fabricar uma capa protetora que ficasse com qualidade boa o suficiente para encaixar no sensor de distância. A figura 4.2 mostra a versão final das capas.



(a) Visão frontal

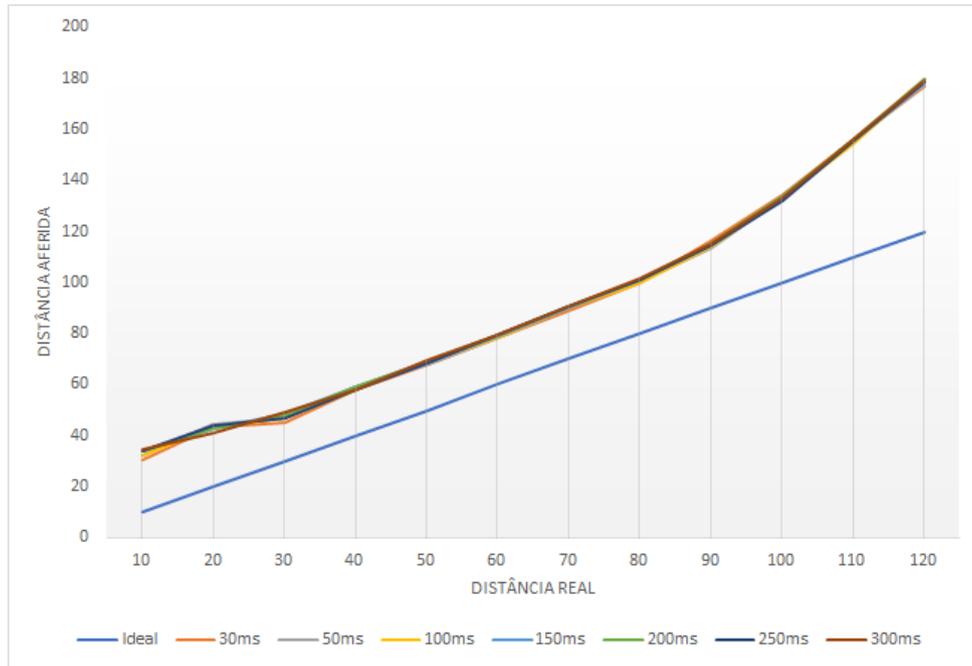
(b) Visão traseira

Figura 4.2: Versão final das capas protetoras para o sensor VL53L0X.

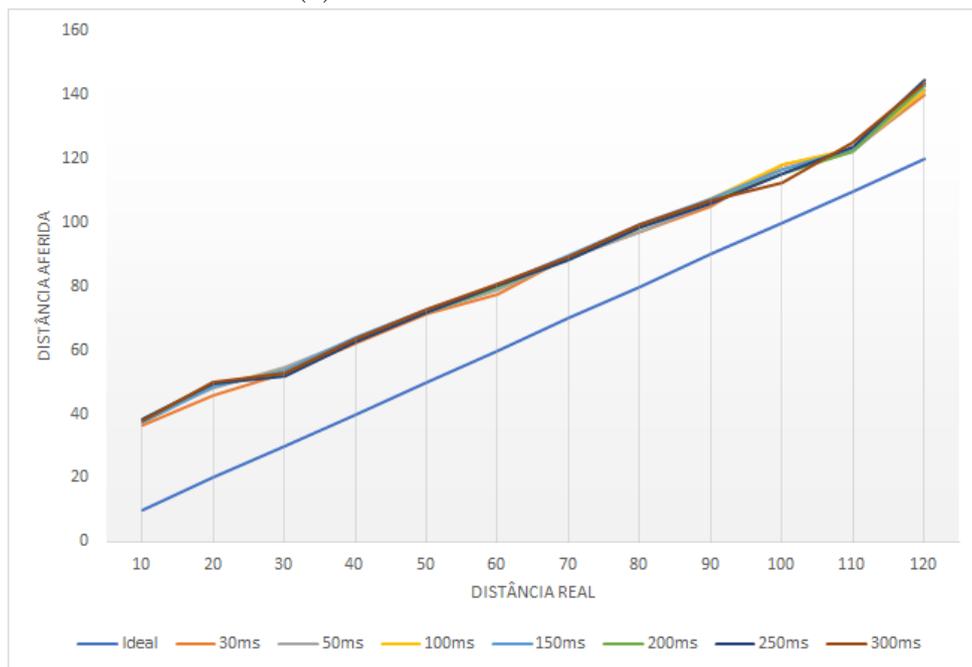
Ambos os modelos retratados na figura 4.2 puderam ser fixadas no sensor. No entanto, a capa menor apresenta dificuldade de encaixe, por vezes caindo ou ficando desalinhada. Por isso, somente a capa maior foi usada para realizar os testes seguintes.

A figura 4.3 representa os gráficos resultantes dos testes de material para a janela da capa protetora. A figura 4.3a mostra os resultados obtidos utilizando uma placa de acrílico com espessura de $1mm$; para a figura 4.3b foi utilizado acetato com espessura de $0.1mm$.

O resultado encontrado indica um deslocamento da curva de distância aferida em relação à curva ideal. Esse tipo de imprecisão pode ser trivialmente corrigido através de software, portanto não é um problema sério por si só. A figura 4.3a indica que a diferença



(a) Janela coberta com acrílico



(b) Janela coberta com acetato

Figura 4.3: Gráficos obtidos nos testes realizados para mensurar a influência do material usado para cobrir a janela da capa protetora no comportamento do sensor.

entre as curvas de distância aferida e real aumenta linearmente a partir da marca de 90mm, sendo que o *timing budget* tem pouca influência nas curvas resultantes. Já a figura 4.3b mostra uma influência maior do *timing budget* do sensor em alguns pontos. A curva de distância aferida parece se aproximar linearmente da curva ideal até a distância

de 110mm , a partir de onde elas começam a divergir.

As imprecisões registradas na figura 4.3 não se assemelham à característica de ruído de *cross-talk* (figura 2.10). Isso é uma indicação que a proteção contra ruído de *cross-talk* incorporada no projeto da capa funciona adequadamente.

Até esse ponto, os resultados eram encorajadores para o uso da capa protetora com a janela coberta por acetato, pois os testes realizados indicaram pouca influência na precisão do sensor. No entanto, durante as etapas iniciais da montagem do escâner, percebeu-se que a janela de proteção amplificava o efeito da dispersão do laser emitido pelo sensor, o que poderia causar perda de resolução espacial. Para evitar o acréscimo de imprecisões desnecessárias, foi decidido que a montagem seria realizada sem a capa de proteção.

4.3 Nuvens de pontos

Para a aquisição de nuvens de pontos, foram descritas, no capítulo 3, duas estratégias de movimentação da base: a primeira proporciona um alinhamento vertical dos pontos ao longo das camadas de altura, e a segunda permite que os pontos fiquem desalinhados. A figura 4.4 mostra o resultado obtido com alinhamento vertical dos pontos. É possível observar que os pontos estão, de fato, alinhados verticalmente, indicando que a estratégia de mudar a direção de rotação da base a cada redução da altura do sensor de distância alcançou o objetivo. Para efeito de comparação, a figura 4.5 mostra a nuvem de pontos gerada pelo mesmo objeto, escaneado sem alinhamento vertical dos pontos.

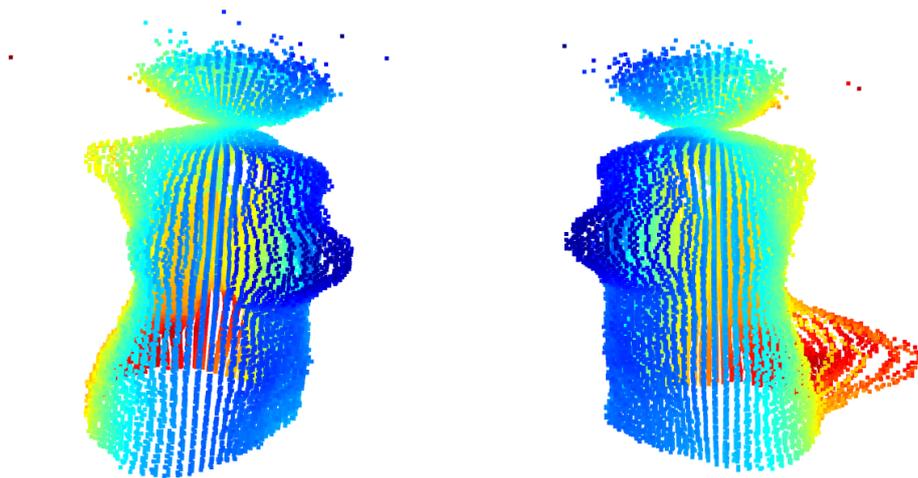


Figura 4.4: Escaneamento do objeto 1, forçando o alinhamento vertical dos pontos (20585 pontos).

Para a visualização dos resultados nas figuras 4.5 a 4.8, foram usadas nuvens de pontos sem alinhamento vertical. Isso ocorre porque é mais fácil visualizar a geometria dos objetos em imagens de nuvens de pontos dessa maneira.

Dentre os objetos escaneados, o retratado na figura 4.5 apresentou o resultado mais agradável. Isso se dá porque o objeto em questão apresenta predominantemente contornos suaves, não possui geometrias problemáticas para o sensor de distância e apresenta o menor nível de detalhes. No entanto, é evidente uma imprecisão interessante: o sensor registrou um brusco aumento nas distâncias aferidas para a região vermelha do objeto 1. Uma hipótese é que isso ocorra porque esse material é translúcido, permitindo com que o laser emitido pelo sensor o atravessasse e seja refletido em uma superfície interna do objeto. Para testar essa hipótese, uma das regiões vermelhas do mesmo objeto foi coberta com uma fita adesiva branca e o escaneamento foi repetido. O resultado desse teste se encontra na figura 4.6.

Analisando a figura 4.6, percebe-se que, de fato, cobrir o material translúcido teve efeito significativo no resultado do escaneamento. A geometria da parte esquerda do objeto 1, onde o material foi coberto pela fita adesiva, é representada com mais fidelidade do que o lado direito, que ainda registra brusco aumento na distância medida pelo sensor.

A figura 4.7 ilustra bem as limitações do escâner. Uma deformação significativa foi observada nas superfícies côncavas do objeto 2 (asas e orelhas): na nuvem de pontos gerada, todas elas aparecem convexas. Isso ocorre por causa da dispersão do laser emitido pelo sensor VL53L0X. Também é visto, na nuvem de pontos, que as orelhas são englobadas em uma única superfície, o que ocorre porque, durante o escaneamento, em momento nenhum o sensor tem linha de visão para a parte posterior (convexa) das orelhas. Esse problema poderia ser mitigado com o uso de múltiplos sensores simultaneamente, escaneando o objeto de diversos pontos de vista.

O objeto 3 é menor que os anteriores e bem mais detalhado. Por isso, os resultados exibidos na figura 4.8 evidenciam as limitações de resolução espacial do sensor de distância utilizado. É difícil identificar as partes do objeto escaneado, alguns detalhes pequenos desaparecem completamente ou são confundidos com ruído. Na parte superior da imagem, o ruído tem magnitude maior que os pontos pertencentes ao objeto. Ainda assim, é possível reconhecer algumas características do cabelo da personagem e do posicionamento das mãos.

Em todos os resultados exibidos nas figuras 4.5 a 4.8, é possível ver um artefato, em formato paraboloide, gerado acima dos objetos. Isso ocorre porque o escaneamento começa em uma posição em que o objeto está no limite do campo de visão do sensor de distância. Isso quer dizer que, nas primeiras camadas escaneadas, muitos pontos fora do alcance do sensor são encontrados. Um processo de limiarização é aplicado para eliminar os pontos que estão com certeza mais longe que a superfície do objeto. Sem o processo de limiarização, é impossível visualizar o objeto escaneado porque a distância dos pontos fora do alcance satura a escala de visualização, como representado na figura 4.9.

Conforme a altura do sensor diminui, o objeto gradualmente entra em seu campo de visão, e a distância aferida é reduzida, até chegar ao ponto em que a distância aferida é pequena o suficiente para que o ponto possa ser considerado como parte do objeto. Esses pontos não podem ser eliminados somente pelo processo de limiarização, e são eles que formam os artefatos parabólicos observados nos resultados.

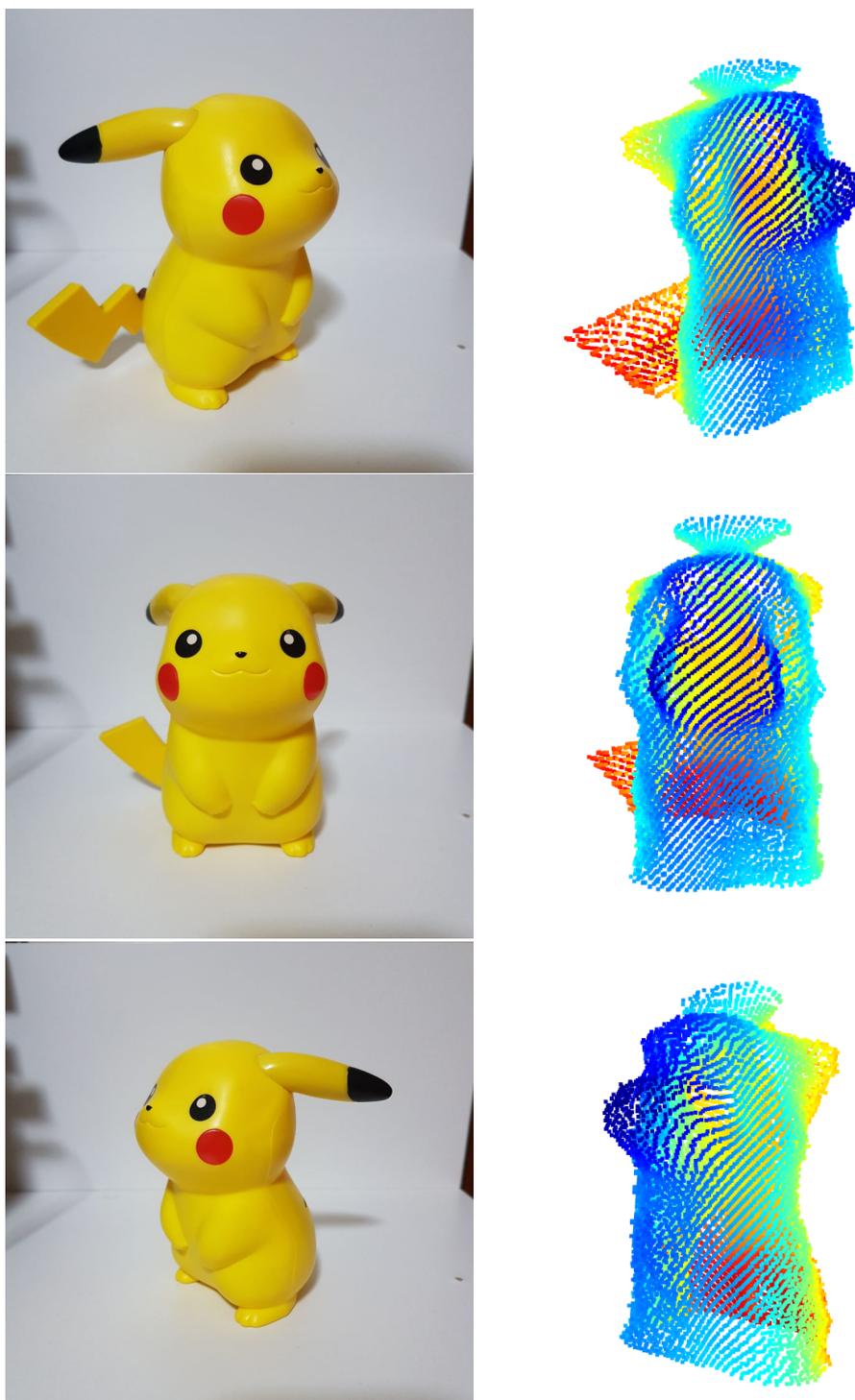


Figura 4.5: Resultado do escaneamento do objeto 1 (19112 pontos).

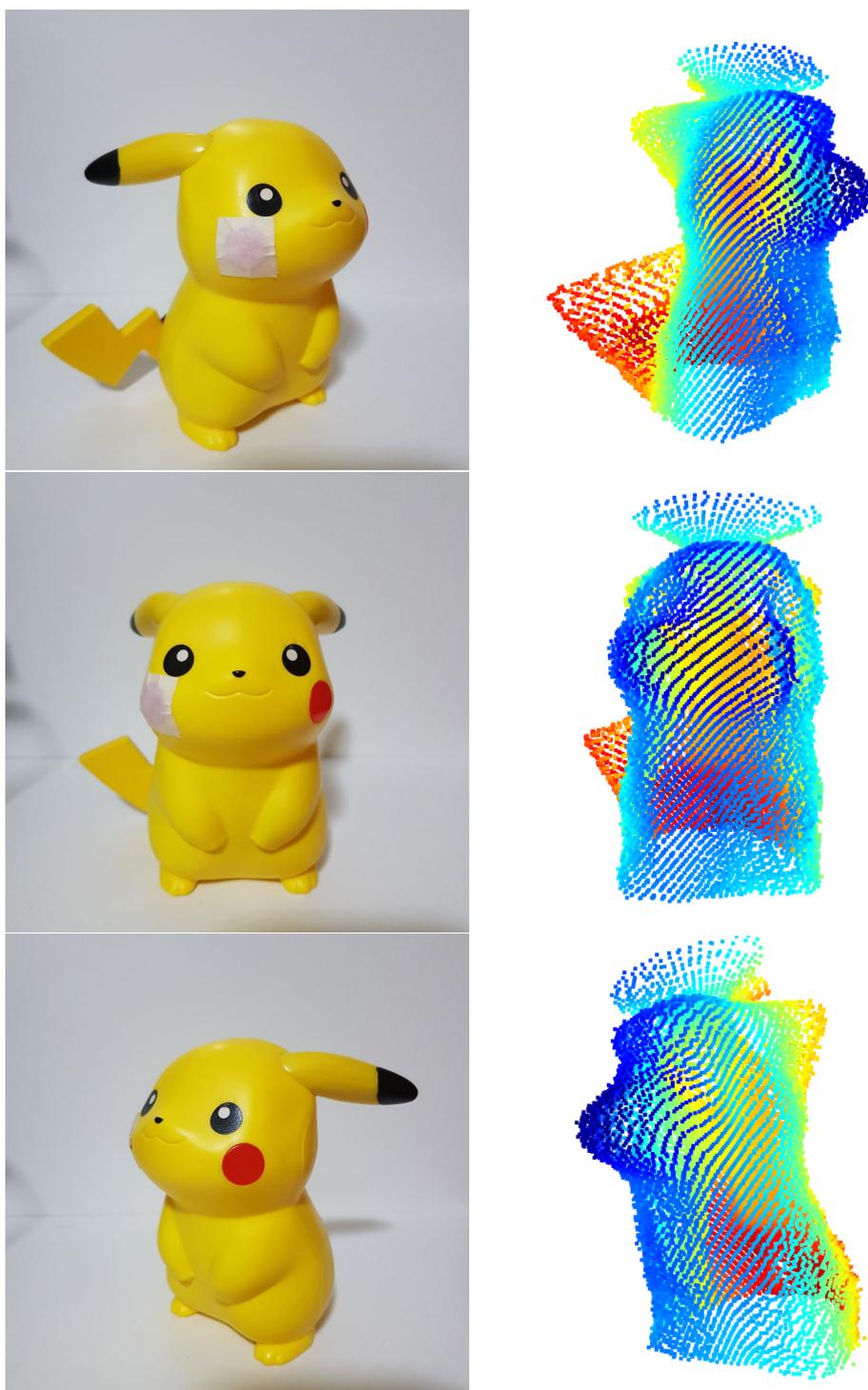


Figura 4.6: Resultado do escaneamento do objeto 1 modificado para analisar o impacto do material translúcido nas medidas do escâner (17850 pontos).

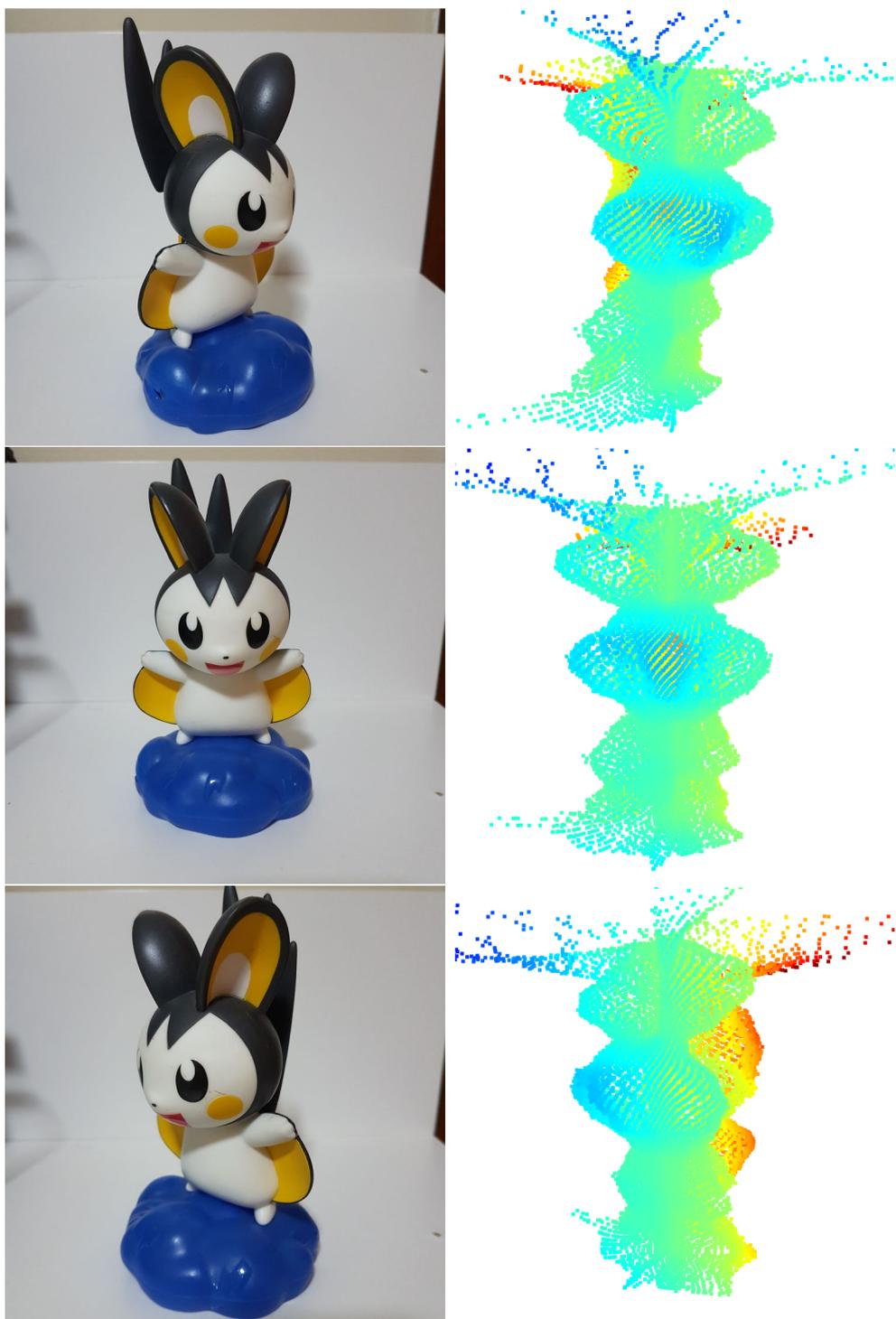


Figura 4.7: Resultado do escaneamento do objeto 2 (21774 pontos).

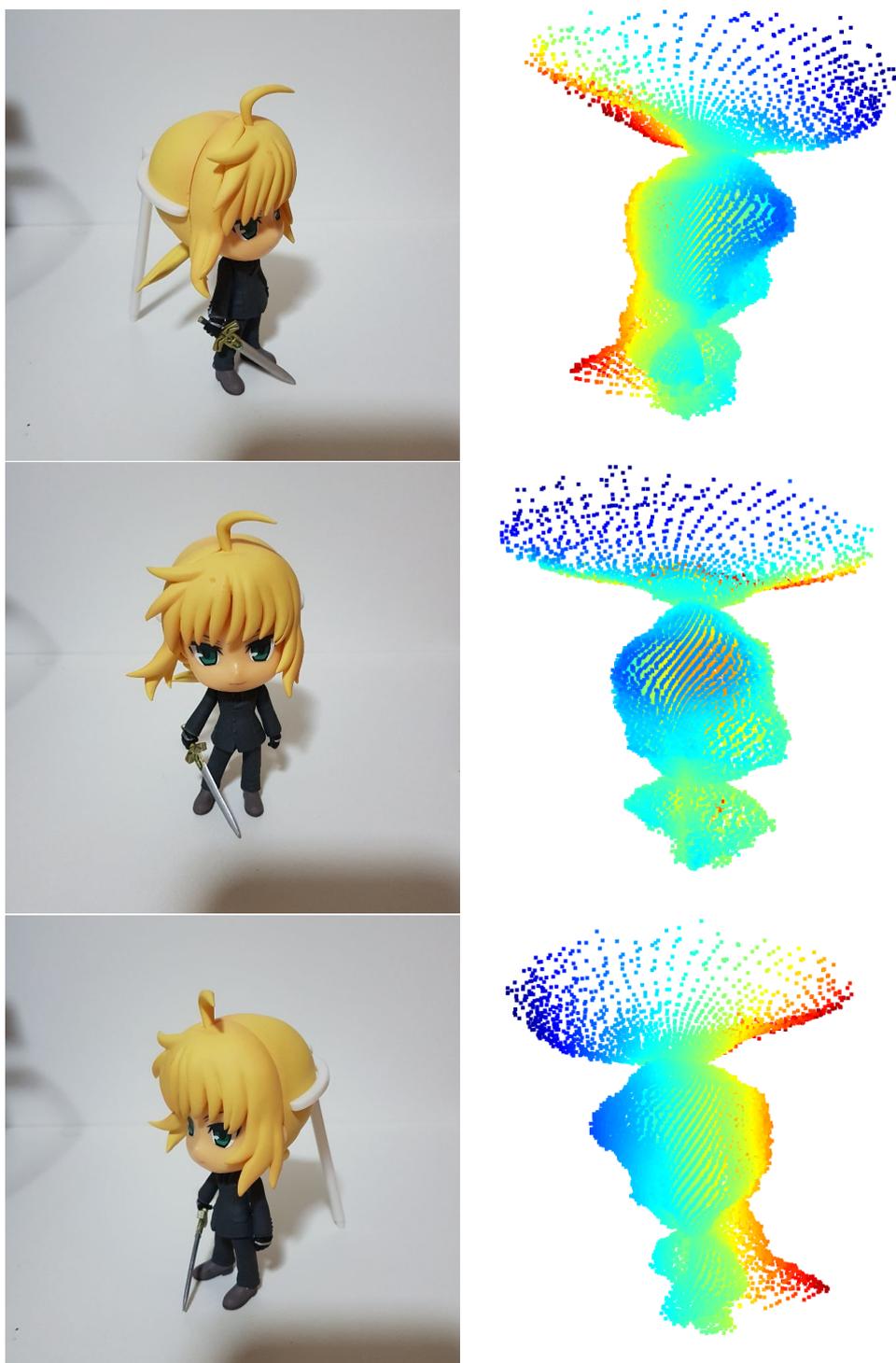


Figura 4.8: Resultado do escaneamento do objeto 3 (17690 pontos).

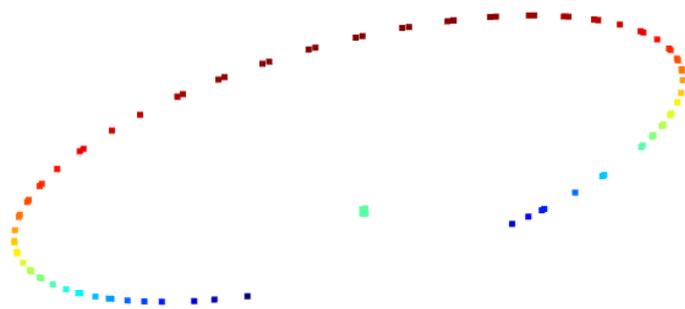


Figura 4.9: Visualização de um objeto com escala saturada devido aos pontos fora do alcance do sensor. O arco é composto por pontos fora do alcance do sensor de distância e todos os pontos do objeto estão aglomerados no ponto central da imagem (18725 pontos).

Capítulo 5

Conclusão

Os resultados encontrados evidenciam que o formato do escâner proposto pode ser viável para digitalizar objetos. A estratégia de movimentação combinada do objeto escaneado e do sensor de distância se provou adequada para a aquisição da nuvem de pontos.

O principal fator limitante para a qualidade da nuvem de pontos resultante foi a dispersão do laser emitido pelo sensor de distância VL53L0X, que age como um filtro passa-baixas, causando a perda de detalhes finos do objeto.

Diante das limitações do sensor de distância utilizado, e levando em consideração que a única forma de processamento aplicada aos dados adquiridos foi uma limiarização para eliminação dos pontos fora do alcance do sensor, o resultado obtido foi satisfatório. É possível identificar os objetos escaneados e analisar o comportamento do escâner frente a diversas geometrias.

Como protótipo, o projeto desenvolvido cumpriu passos importantes em direção aos objetivos propostos no capítulo 1. Os testes iniciais com o sensor de distância não levaram em consideração a dispersão do sinal emitido por ele, mas a análise das nuvens de pontos geradas permite inferir características do sensor relevantes para a aplicação em escâneres 3D. Os testes da capa de proteção do sensor ressaltam a importância da escolha de um material adequado para cobrir as janelas, mas novos testes devem ser propostos que analisem o impacto da proteção na perda de resolução espacial do sensor. Os demais objetivos específicos foram satisfeitos.

5.1 Trabalhos futuros

Há oportunidade para que sejam realizados diversos trabalhos visando melhorar a qualidade das nuvens de pontos geradas pelo escâner. Dentre eles:

- Criação ou adaptação de técnicas de processamento de nuvens de pontos para mitigar as imprecisões encontradas;

- Experimentação com o uso de outros sensores de distância com melhor resolução espacial;
- Uso de múltiplos sensores de distância simultaneamente para obter pontos a partir de diferentes perspectivas.

Uma vez que as nuvens de pontos geradas pelo escâner possuam qualidade suficiente para representação fiel da geometria de objetos reais, é interessante buscar a melhoria da experiência do usuário final por meio do desenvolvimento de um software para integrar as funcionalidades do escâner em uma única interface gráfica, incluindo controle do hardware, ajuste de parâmetros do escâner e exportação da nuvem de pontos gerada.

Referências

- [1] *What is laser triangulation?* <https://www.movimed.com/knowledgebase/what-is-laser-triangulation>, acesso em 27/10/2019. viii, 4
- [2] *Matter and Form V2 3D Scanner*. <https://matterandform.net/scanner>, acesso em 27/10/2019. viii, 3, 4
- [3] *Buy DAVID SLS-3 3D Scanners at an unbeatable price!* <http://david-sls-usa.com>, acesso em 27/10/2019. viii, 5
- [4] Nayar, S.K. e M. Gupta: *Diffuse Structured Light*. Em *IEEE International Conference on Computational Photography*, páginas 1–8, Apr 2012. viii, 5
- [5] Padzensky, Ron: *Mobile AR hardware*, 2014. <http://augmera.com/?p=280>, acesso em 10/11/2019. viii, 6
- [6] *Creality3D Ender-3 pro high precision 3D printer*. <https://www.creality3d.shop/products/creality3d-ender-3-pro-high-precision-3d-printer>, acesso em 27/10/2019. viii, 8
- [7] *SODIAL VL53L0X Time-of-Flight distance sensor GY-VL53L0XV2 module for Arduino*. <https://www.amazon.com/SODIAL-VL53L0X-Flight-Distance-GY-VL53L0XV2/dp/B075LHC51D>, acesso em 16/07/2019. viii, 8
- [8] STMicroelectronics: *AN4907 - VL53L0X ranging module cover window guidelines*, 2018. Version 3.0. viii, 9, 10
- [9] Salvi, Joaquim, Sergio Fernandez, Tomislav Pribanic e Xavier Llado: *A state of the art in structured light patterns for surface profilometry*. *Pattern Recognition*, 43(8):2666 – 2680, 2010, ISSN 0031-3203. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003132031000124X>. 4
- [10] Meisner, Jeffrey: *Collaboration, expertise produce enhanced sensing in Xbox One*, 2013. https://blogs.technet.microsoft.com/microsoft_blog/2013/10/02/collaboration-expertise-produce-enhanced-sensing-in-xbox-one/, acesso em 10/11/2019. 6
- [11] Cooley, Sarah e Teresa-Motiv: *HoloLens 2 hardware*, 2019. <https://docs.microsoft.com/en-us/hololens/hololens2-hardware>, acesso em 10/11/2019. 6

- [12] Corrigan, Fintan: *Flash Lidar time of flight (ToF) camera sensors on drones and 10 terrific uses*, 2019. <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/best-uses-for-time-of-flight-tof-camera-depth-sensor-technology-in-drones-or-gro> acesso em 10/11/2019. 6
- [13] Tillman, Maggie: *What is a ToF camera and which phones have it? time-of-flight sensor explained*, 2019. <https://www.pocket-lint.com/phones/news/147024-what-is-a-time-of-flight-camera-and-which-phones-have-it>, acesso em 10/11/2019. 6
- [14] *Microsoft HoloLens*. <https://www.windowscentral.com/microsoft-hololens>, acesso em 10/11/2019. 6
- [15] Cui, Y., S. Schuon, D. Chan, S. Thrun e C. Theobalt: *3d shape scanning with a time-of-flight camera*. Em *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, páginas 1173–1180, June 2010. 7
- [16] Schuon, S., C. Theobalt, J. Davis e S. Thrun: *Lidarboost: Depth superresolution for tof 3d shape scanning*. Em *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, páginas 343–350, June 2009. 7
- [17] Guo, Nannan e Ming C. Leu: *Additive manufacturing: technology, applications and research needs*. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3):215–243, Sep 2013, ISSN 2095-0241. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>. 7
- [18] STMicroelectronics: *UM2039 - world smallest time-of-flight ranging and gesture detection sensor application programming interface*, 2018. Version 1.1. 8
- [19] Pololu Robotics and Electronics: *vl53l0x-arduino - pololu arduino library for VL53L0X time-of-flight distance sensor*. <https://github.com/pololu/vl53l0x-arduino>, 2016-2019. 8, 9
- [20] mjbogusz: *vl53l0x-linux - library for interfacing with VL53L0X time-of-flight distance sensor under linux*. <https://github.com/mjbogusz/vl53l0x-linux>, 2017. 8
- [21] Adafruit Industries: *Adafruit_CircuitPython_VL53L0X - CircuitPython module for interacting with the VL53L0X distance sensor*. https://github.com/adafruit/Adafruit_CircuitPython_VL53L0X, 2017-2019. 8, 9, 18
- [22] STMicroelectronics: *How to calculate the dimensions of the Cover-Window exclusion zone above the VL53L0X*. Version 1.0. 9
- [23] STMicroelectronics: *VL53L0X - world's smallest time-of-flight ranging and gesture detection sensor - datasheet*, 2018. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>, acesso em 01/06/2019, Version 2.0. 12
- [24] STMicroelectronics: *VL53L0X - world's smallest time-of-flight (tof) ranging sensor - resources*. <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/vl53l0x.html>. 12

- [25] Ish, Karoly: *3d printable round threaded lead screw and nut*, 2017. <https://www.thingiverse.com/thing:2036771>, acesso em 16/09/2019. 15
- [26] *Attribution 3.0 Unported*. <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>. 15
- [27] Kury, Ricardo: *3D scanner*. <https://github.com/ramkury/3D-scanner>, 2019. 17
- [28] Croston, Ben: *A Python module to control the GPIO on a Raspberry Pi*. <https://sourceforge.net/projects/raspberry-gpio-python/>, 2013-2019. 17
- [29] Zhou, Qian Yi, Jaesik Park e Vladlen Koltun: *Open3D: A modern library for 3D data processing*. arXiv:1801.09847, 2018. 18