

**CENTRO PAULA SOUZA  
FACULDADE DE SANTO ANDRÉ  
Tecnologia em Eletrônica Automotiva**

**DOUGLAS PRIETO DA SILVA**

**SISTEMA DE SENSORES ÓPTICOS COM CICLAGEM DE 90° NO  
EIXO Z PARA MAPEAMENTO 2D DO PLANO XY**

**FACULDADE DE SANTO ANDRÉ  
2022**

**DOUGLAS PRIETO DA SILVA**

**SISTEMA DE SENSORES ÓPTICOS COM CICLAGEM DE 90° NO  
EIXO Z PARA MAPEAMENTO 2D DO PLANO XY**

Trabalho realizado como requisito para conclusão do curso de graduação em Eletrônica Automotiva na Faculdade de Tecnologia de Santo André do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza.

Orientador: Me. Wesley Medeiros Torres

**FACULDADE DE SANTO ANDRÉ**

**2022**

## FICHA CATALOGRÁFICA

S586s

Silva, Douglas Prieto da  
Sistema de sensores ópticos com ciclagem de 90° no eixo Z para mapeamento 2D do Plano XY / Douglas Pietro da Silva. - Santo André, 2022. – 101f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.  
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2022.

Orientador: Prof. Me. Wesley Medeiros Torres

1. Eletrônica. 2. Veículos autônomos. 3. Sensores ópticos. 4. Tecnologia. 5. Sistema LIDAR. 6. Projeto. 7. Mapeamento 2D. I. Sistema de sensores ópticos com ciclagem de 90° no eixo Z para mapeamento 2D do Plano XY.

629.2

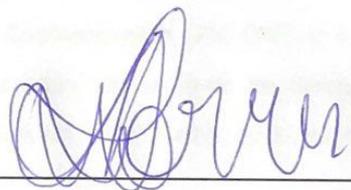
**LISTA DE PRESENÇA**

Santo André, 12 de dezembro de 2022.

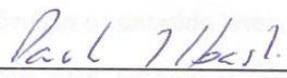
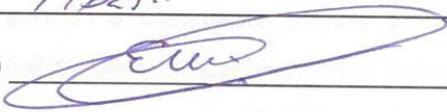
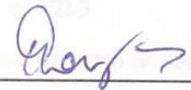
LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA:  
“SISTEMA DE SENSORES ÓPTICOS COM CICLAGEM DE 90°  
NO EIXO Z PARA MAPEAMENTO 2D DO PLANO XY” DOS  
ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

**BANCA**

PRESIDENTE:

PROFº WESLEY MEDEIROS TORRES 

MEMBROS:

PROF. PAULO TETSUO HOASHI PROF. ELIEL WELLINGTON MARCELINO **ALUNO:**DOUGLAS PRIETO DA SILVA 

*A meus pais, maiores e melhores orientadores na vida,  
A minha esposa Fabiula pela colaboração em manter o  
lar operacional durante o desenvolvimento dessa  
pesquisa e, claro, a minha filha Lorena, motivação para  
minha persistência e resiliência.*

*SILVA, D. P.*

## AGRADECIMENTO

Ao professor orientador Me. Wesley Medeiros Torres, pela paciência e divisão de suas experiências para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao professor Esp. Fernando Garup Dalbo pela dedicação na orientação das normas internas e externas durante toda a edição desse estudo.

Ao auxiliar docente Sr. Otavio Pellegrini Buscaratto da Fatec Itaquera - Prof. Miguel Reale pela colaboração com as impressões 3D aplicadas nesse estudo.

Aos demais docentes por compartilhar seus respectivos conhecimentos ao longo da formação, bem como aos demais funcionários pela dedicação e disposição em suas relativas atividades na Fatec Santo André.

*“A maioria das pessoas gasta mais tempo e energia indo em torno dos problemas do que na tentativa de resolvê-los.” (1)*

## RESUMO

Um dos sistemas aplicados em veículos autônomo, entre diversos outros, é o sistema LIDAR. Nesse sentido, esse estudo apresenta o projeto de um sistema LIDAR 2D, desenvolvido com o custo e a reprodução acessível à comunidade acadêmica na área de pesquisa de sistemas embarcados em veículos autônomos. O conceito do projeto trata de um mecanismo de movimentação do eixo z compatível ao número e posicionamento de sensores ópticos, *hardware* mecânico para os transdutores e sensores, bem como a programação do microcontrolador do sistema, disponibilizando em tempo real os dados do plano xy para aplicação em conjunto com outros dispositivos de sistema embarcado. O projeto apresenta algumas ressalvas, entretanto, com resultados suficientes para reprodução do projeto e aplicação prática para o desenvolvimento de pesquisas na área de veículos autônomos futuro.

Palavras-chave: LIDAR. Mapeamento 2D. Sensor Óptico.

## ABSTRACT

*One of the systems applied at the autonomous vehicles, among others, it is the LIDAR system. In this sense, this study presents the project of a 2D LIDAR system, developed with the cost and reproduction accessible for the academic community in the research systems embedded area at the autonomous vehicles. The project concept deals with a z axis movement mechanism compatible with the number and positioning of optical sensors, mechanical hardware for transducers and sensors, as well as programming the system's microcontroller, providing real-time data from the xy plane for application in conjunction with other devices in the embedded system. The project has some reservations, however, with sufficient results for project reproduction and practical application for the development of research in the area of autonomous vehicles in the future.*

*Keywords: LIDAR. 2D Mapping. Optical Sensor.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ajuste com folga.....	20
Figura 2: Ajuste com interferência.....	20
Figura 3: Campo de tolerância de ajuste com folga ou interferência e incerto. ....	21
Figura 4: Escala 5:1 do conjunto furo e eixo com folga e com interferência. ....	22
Figura 5: Conversão de movimento rotativo em movimento linear.....	22
Figura 6: Projeto CAD 3D no <i>Solidworks</i> .....	23
Figura 7: Impressora 3D por FDM - Modelo Ender-5 Pro da Creality.....	24
Figura 8: Processo de fatiamento e geração do <i>G-code</i> .....	25
Figura 9: Área de trabalho do <i>Ultimaker Cura®</i> .....	26
Figura 10: Bico extrusor desgastado x novo .....	26
Figura 11: Cálculo da distância pelo <i>Time-of-Flight</i> .....	29
Figura 12: Relação de deslocamento angular das polias.....	30
Figura 13: Vista explodida do <i>hardware</i> mecânico versão 1.0 .....	31
Figura 14: Conjunto do <i>hardware</i> mecânico versão 1.0 completo.....	32
Figura 15: Acabamento superficial em áreas de suporte da versão 1.0.....	33
Figura 16: Cisalhamento na polia motora da versão 1 .....	33
Figura 17: Reforço nos pinos móveis na versão 1.1 .....	34
Figura 18: Acabamento superficial em áreas de suporte versão 1.1.....	35
Figura 19: Vista explodida do <i>hardware</i> mecânico versão 1.1 .....	35
Figura 20: <i>Hardware</i> mecânico versão 1.1 montado.....	36
Figura 21: Assimetria e região de quebra da biela .....	36
Figura 22: Variáveis que influenciam no ângulo de ciclo teórico .....	37
Figura 23: Esforço na biela assimétrica .....	37
Figura 24: Diferentes raios para inserção do pino.....	38
Figura 25: Diferentes raios para inserção do pino.....	39
Figura 26: Vista explodida do <i>hardware</i> mecânico versão 1.3 .....	39
Figura 27: Processo de impressão 3D do <i>hardware</i> mecânico .....	40
Figura 28: Conjunto do <i>hardware</i> mecânico versão 1.3 impresso e montado.....	40
Figura 29: Pinos do ATmega328P padrão TQFP .....	42
Figura 30: Pinos do Arduino Nano .....	42
Figura 31: Driver para o motor DC .....	43

Figura 32: Circuito do <i>Encoder</i> com comparador de tensão .....	43
Figura 33: Circuito de dois <i>Encoders</i> com o LM393 .....	44
Figura 34: <i>Shield</i> ToF VL53L0X .....	44
Figura 35: Circuito eletrônico <i>Adafruit</i> ® VL53L0X_REV-B .....	45
Figura 36: Fonte de alimentação .....	45
Figura 37: ATmega328P com oscilador, capacitores de desacoplamento etc .....	46
Figura 38: PCB do sistema LIDAR proposto .....	47
Figura 39: PCB com os componentes soldados.....	48
Figura 40: Sistema LIDAR.....	48
Figura 41: Parte do gabarito milimetrado .....	49
Figura 42: Pontos dos sensores ToFs no <i>LabVIEW</i> ®.....	52
Figura 43: Posicionamento de objeto para calibração à 150mm.....	53
Figura 44: Histórico de valores lidos pelo sensor ToF 1 com o objeto estático .....	53
Figura 45: Gráfico no <i>LabVIEW</i> ® do processo de calibração .....	54
Figura 46: Resultado pós calibração em objeto à 150mm do centro.....	56
Figura 47: Deslocamento linear em função do tempo .....	58
Figura 48: Detecção de objeto opaco pelo sensor ToF 1 (sem rotação).....	59
Figura 49: Detecção de objeto translúcido pelo sensor ToF 1 (sem rotação) .....	61
Figura 50: Comportamento em objeto opaco e plano .....	63
Figura 51: Gráfico no <i>LabVIEW</i> ® de um instante da varredura do objeto plano.....	64
Figura 52: Gráfico com histórico de pontos de uma varredura do objeto cilíndrico ...	64
Figura 53: Gráfico comparativo entre dados teóricos e reais do objeto plano.....	65
Figura 54: Variável de inferência de cálculo dos pontos xy do objeto plano .....	66
Figura 55: Comportamento em objeto opaco e cilíndrico .....	67
Figura 56: Gráfico no <i>LabVIEW</i> ® de um instante da varredura do objeto cilíndrico .	67
Figura 57: Gráfico com histórico de pontos de uma varredura do objeto cilíndrico ...	68
Figura 58: Gráfico comparativo entre dados teóricos e reais do objeto cilíndrico .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Configurações de impressão 3D .....	32
Tabela 3.2 Especificação do motor DC com caixa de redução .....	32
Tabela 3.3 Consumo de corrente elétrica e frequência do ciclo da polia movida entre protótipos.....	34
Tabela 3.4 Combinações possíveis de relação de transmissão para a polia movida	38
Tabela 3.5 Especificação do ATmega328P .....	41
Tabela 3.6 Dados coletados para ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 1 .....	54
Tabela 3.7 Dados coletados para ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 2 .....	55
Tabela 3.8 Dados coletados para ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 3 .....	55
Tabela 3.9 Dados coletados para ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 4 .....	55
Tabela 4.1 Tempos de leitura entre cada posição angular.....	57
Tabela 4.2 Tempos de cada tarefa dentro do código C .....	58
Tabela 4.3 Dados coletados pós ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 1 (sem rotação)....	59
Tabela 4.4 Dados coletados pós ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 2 (sem rotação)....	60
Tabela 4.5 Dados coletados pós ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 3 (sem rotação)....	60
Tabela 4.6 Dados coletados pós ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 4 (sem rotação)....	60
Tabela 4.7 Dados coletados pós ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 1 (sem rotação)....	61
Tabela 4.8 Dados coletados pós ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 2 (sem rotação)....	62
Tabela 4.9 Dados coletados pós ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 3 (sem rotação)....	62
Tabela 4.10 Dados coletados pós ajuste de <i>offset</i> do sensor ToF 4 (sem rotação)..	62
Tabela 4.11 Descrição básica do custo do protótipo do sistema LIDAR .....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Reception and Transmission</i>
2D	Duas dimensões
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
NIST	<i>National Institute for Standards and Technology</i>
AGMA	<i>American Gear Manufacturer Association</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
3D	Três dimensões
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CAM	Manufatura Auxiliada por Computador
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
SPAD	<i>Single Photon Avalanche Diode</i>
ToF	<i>Time-of-Flight</i>
S.I	Sistema Internacional
DC	<i>Direct Current</i>
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo

A.O	Amplificador Operacional
LGA	<i>Land Grid Array</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$mm$	Comprimento em milímetro
$^{\circ}C$	Temperatura em graus Celsius
$mm/s$	Velocidade em milímetro por segundo
$^{\circ}$	Ângulo em graus
$g$	Peso em grama
$ps$	Tempo em pico segundo
$ms$	Tempo em mili segundo
$M$	Comprimento em metro
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$s$	Tempo em segundo
$m/s$	Velocidade em metro por segundo
$cm^3$	Volume em centímetro cúbico
$\Delta\theta$	Deslocamento angular
$V$	Tensão em volt
$RPM$	Rotação por minuto
$mA$	Corrente elétrica em mili ampere
$Hz$	Frequência em hertz
$\approx$	Aproximadamente igual à
$h$	Hora
$MHz$	Frequência em mega-hertz
$I/O$	Entrada e saída de sinal digital
$\Omega$	Resistência elétrica ohm
$Z$	Impedância

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
1.1	Objetivo	17
1.2	Justificativa	17
1.3	Estrutura do trabalho	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	19
2.1	Projeto Mecânico	19
2.1.1	Ferramentas Computacionais	19
2.1.2	Tolerância e Ajuste	20
2.1.3	Movimento Mecânico	22
2.2	Prototipagem	23
2.2.1	Impressão 3D por FDM	24
2.2.2	<i>Ultimaker Cura</i> ®	24
2.2.3	<i>Polylactic Acid</i> (PLA)	26
2.2.4	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> (ABS)	27
2.3	Sensores <i>Time-of-Flight</i> (ToF)	28
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	30
3.1	<i>Hardware</i> Mecânico	30
3.2	Circuito Eletrônico	41
3.3	<i>Layout</i> da PCB	46
3.4	Conjunto do Sistema LIDAR	48
3.5	Código de Programação do Sistema LIDAR	49
3.6	<i>LabVIEW</i> ®	51
3.7	Ajuste de <i>Offset</i>	52
3.8	Análise do Sistema LIDAR	56
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	57

<b>4.1</b>	<b>Especificações Gerais .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2</b>	<b>Validação do Ajuste de <i>Offset</i>.....</b>	<b>59</b>
<b>4.3</b>	<b>Comportamento dos Sensores em Objetos Translúcidos .....</b>	<b>61</b>
<b>4.4</b>	<b>Detecção de Geometria do Projeto.....</b>	<b>63</b>
4.4.1	Formato Plano .....	63
4.4.2	Formato Cilíndrico .....	66
<b>4.5</b>	<b>Custo do Protótipo.....</b>	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>71</b>
	<b>APÊNDICE A - CROQUI DO <i>HARDWARE</i> MECÂNICO VERSÃO 1.3.....</b>	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE B - CONFIGURAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D .....</b>	<b>86</b>
	<b>APÊNDICE C - CIRCUITO ELÉTRICO DO SISTEMA LIDAR.....</b>	<b>91</b>
	<b>APÊNDICE D - <i>LAYOUT</i> DA PCB DO LIDAR .....</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE F - <i>BLOCK DIAGRAM</i> PARA COMUNICAÇÃO DO LIDAR.....</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE G - CÓDIGO DO SISTEMA LIDAR .....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia para veículos autônomos é complexa e composta por diversos dispositivos com interação entre si. Pesquisar a criação ou inovação dessa tecnologia requer o isolamento do objeto de estudo dos demais componentes do sistema, entretanto, a obtenção dos resultados da pesquisa normalmente virá da interação do objeto de estudo com o sistema embarcado de veículo autônomo completo. A indisponibilidade de um veículo autônomo, mesmo que em escala, limita os ensaios e a obtenção de resultados práticos, confinando o estudo a pesquisas teóricas.

A obtenção de um veículo autônomo em escala pode ser o resultado de frentes de trabalhos diferentes, mas complementares a um sistema embarcado de veículo autônomo. Dentre o conjunto de componentes do sistema embarcado de um veículo autônomo, o *hardware Light Detection and Ranging* (LIDAR) é uma das tecnologias de maior custo entre os dispositivos do conjunto desse sistema embarcado.

Nesse sentido, esse estudo apresenta o projeto de desenvolvimento do *hardware* mecânico, eletrônico e programação do sistema LIDAR, composto por sensores ópticos e mecanismo de movimentação para o mapeamento em duas dimensões (2D) do ambiente, coletando e tratando os dados para comunicação *Universal Asynchronous Reception and Transmission* (UART) com outros dispositivos.

### 1.1 Objetivo

Desenvolvimento de um sistema LIDAR de custo e reprodutibilidade mais acessível, com transmissão de dados tratados e disponível à diversos outros dispositivos de pesquisas futuras complementares ao sistema embarcado de um veículo autônomo em escala.

### 1.2 Justificativa

Contribuir com um sistema LIDAR em apoio ao desenvolvimento de um veículo autônomo em escala completo para aplicação em estudos futuros nesse campo de pesquisa.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

A estrutura do presente trabalho é composta por Revisão Bibliográfica do conceito de projeto mecânico, programação e comunicação do sistema buscando a disponibilidade comercial e o custo acessível dos componentes.

Em Materiais e Métodos são apresentados todos os componentes, circuitos, códigos de programação, mecanismo de movimentação, ferramentas e equipamentos utilizados com as características em tabelas e nos apêndices (desenho técnico, circuitos etc) desse estudo. Nos Resultados e Discussão são expostos tabelas e gráficos para melhor compreensão dos dados e da compreensão da conclusão. Finalmente a Conclusão trata a validação do projeto, bem como suas limitações e especificações para aplicações práticas, além de sugerir propostas à trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Projeto Mecânico

Um projeto mecânico é uma tarefa complexa que exige diversas habilidades desde o conceito de um projeto em geral até a concepção do projeto de engenharia mecânica em particular. O projetista deve ter um plano para satisfazer uma necessidade específica e solucionar o problema, devendo o produto ser funcional, seguro, confiável, competitivo, utilizável, manufaturável e comerciável. Além disso, habilidades pessoais como criatividade, comunicação e capacidade de solução de problemas tem de estar intercalado com o conhecimento de tecnologia e princípios fundamentais como matemática, estatística, computação, desenho e linguagem. (2)

É indispensável na definição do problema, incluir todas as especificações do objeto em desenvolvimento como a quantidade de entradas e saídas, características e dimensões limites para o produto e uma síntese de todos os elementos possíveis do sistema. À medida que o projeto evolui, análises devem ser realizadas quanto ao seu desempenho, verificando se esta satisfatório, pode ser aprimorado ou tem que ser corrigido. Durante a análise no desenvolvimento, as considerações de projeto referente a certa característica de influência no mesmo ou no sistema deve ser observada, como a funcionalidade, dimensão, resistência, custo, fricção, peso, ruído, lubrificação, propriedades mecânicas, térmicas etc. (2)

#### 2.1.1 Ferramentas Computacionais

Uma das ferramentas no desenvolvimento de um projeto são os programas de *Computer-Aided Design* (CAD), a qual permitem o desenvolvimento de projetos em três dimensões (3D) e posteriormente aplicação num método de prototipagem rápida. (2)

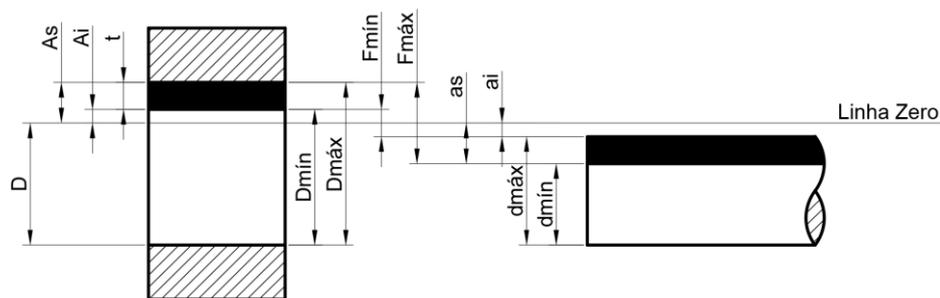
Muitas dessas ferramentas computacionais já contemplam especificações de padrões para o projeto baseado em normas como a *International Standards Organization* (ISO) e *National Institute for Standards and Technology* (NIST). Mas há diversas normas que podem ser consultadas durante o desenvolvimento do projeto: *American Gear Manufacturer Association* (AGMA), *American National Standards Institute* (ANSI), *American Society for Metals* (ASM), *American Society of Testing and Materials* (ASTM), *American Welding Society* (AWS), *Society of Automotive Engineers* (SAE) etc. (2)

### 2.1.2 Tolerância e Ajuste

Um padrão é um conjunto de especificações para peças, materiais ou processos destinados a atingir uniformidade, eficiência e uma qualidade determinada. (3)

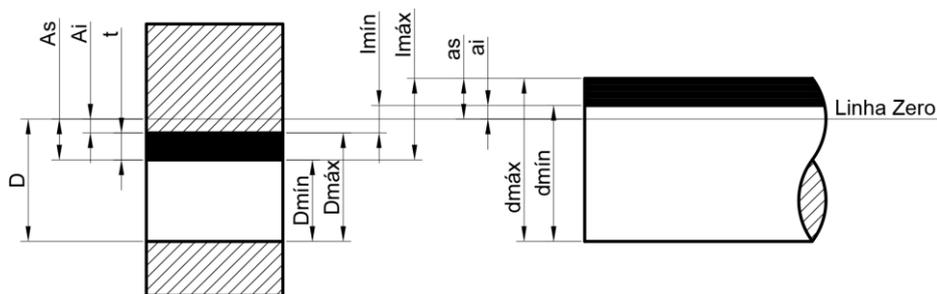
Nesse quesito, conforme apresentado na Figura 1 e na Figura 2, encontra-se a definição de afastamento nominal ou afastamento ( $D$ ) como sendo a diferença entre as dimensões limites e a nominal, diferentemente do conceito de tolerância, dado pela diferença entre as dimensões máxima e mínimas ( $t$ ). As figuras ainda ilustram o afastamento inferior caracterizado pela diferença entre a dimensão mínima e a nominal ( $A_i$  e  $a_i$ ) e o afastamento superior como a diferença entre a dimensão máxima e a nominal ( $A_s$  e  $a_s$ ). (3)

Figura 1: Ajuste com folga.



Fonte: Adaptado de (3)

Figura 2: Ajuste com interferência.



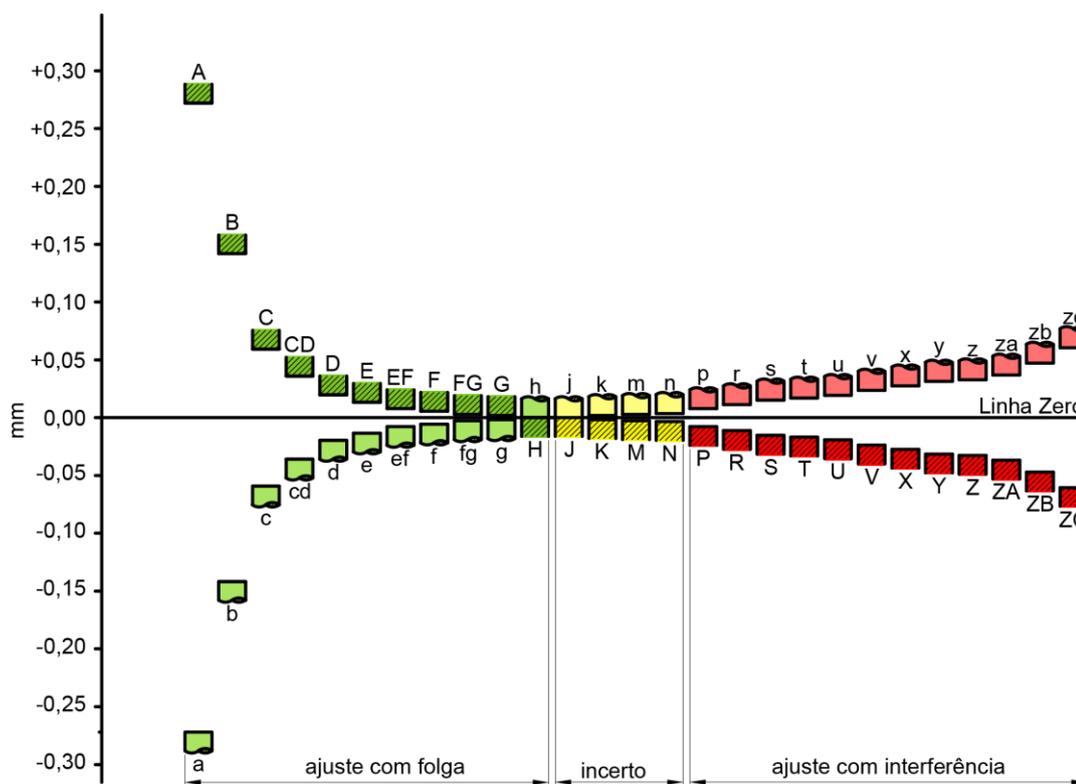
Fonte: Adaptado de (3)

Com base nesse conceito, fica claro a compreensão da definição de ajuste como sendo o comportamento do acoplamento entre eixo e furo, com mesmo dimensional nominal, entretanto, caracterizado por folga ou interferência e considerando a variabilidade de cada elemento do conjunto (incerto). A Figura 1 ilustra

o ajuste com folga, a qual o afastamento superior do eixo é menor ou igual ao afastamento inferior do furo ( $F_{m\acute{a}x}$  e  $F_{m\acute{i}n}$ ), de forma correlata, a Figura 2 demonstra o ajuste com interfer\ecencia, a qual o afastamento superior do furo \u00e9 menor ou igual ao afastamento inferior do eixo ( $I_{m\acute{a}x}$  e  $I_{m\acute{i}n}$ ). (3)

O campo de toler\ancia designa letras min\u00fasculas para eixos e mai\u00fasculas para furos, conforme ilustra\c\ao da Figura 3, onde al\u00e9m de observar a regi\ao de folga e a regi\ao de interfer\ecencia, \u00e9 poss\u00edvel notar uma regi\ao de indetermina\c\ao dado as combina\c\oes de variabilidade dos elementos do conjunto de acoplamento. (3)

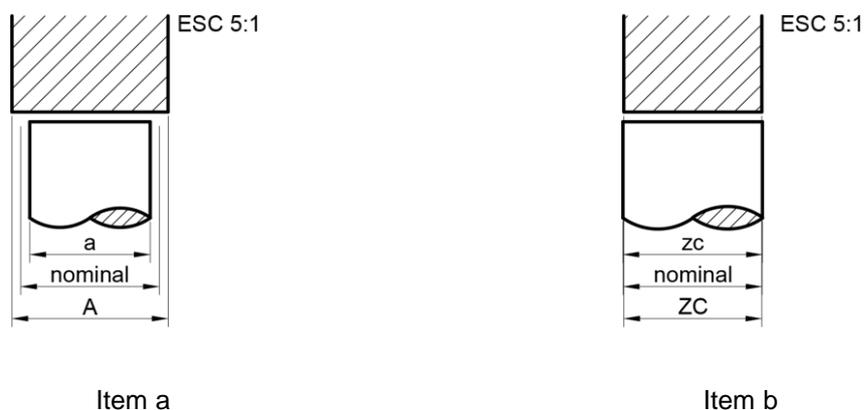
Figura 3: Campo de toler\ancia de ajuste com folga ou interfer\ecencia e incerto.



Fonte: Adaptado de (3)

Na Figura 4 \u00e9 apresentado em escala 5:1, um ajuste com folga A5/a5 ('item a' \u00e0 esquerda) e um ajuste com interfer\ecencia ZC5/zc5 ('item b' \u00e0 direita).

Figura 4: Escala 5:1 do conjunto furo e eixo com folga e com interferência.



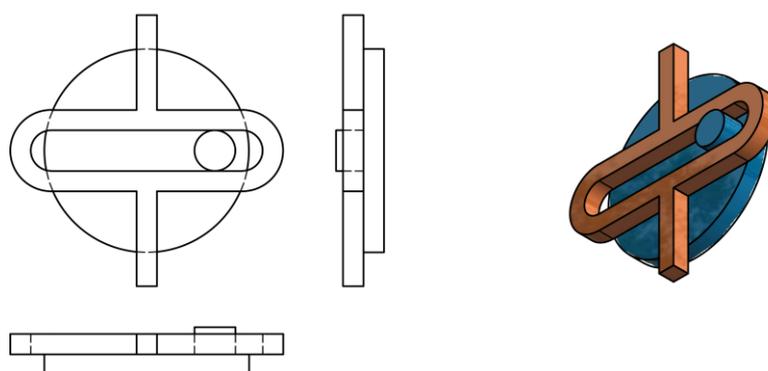
Fonte: Autor, 2022.

O ajuste comum, H11 e h11, é indicado quando as exigências da medida ou exatidão não sejam tão precisas como em mecanismos móveis (deslizantes ou rotativos), por exemplo, em manivelas. (4)

### 2.1.3 Movimento Mecânico

Em consulta a obra de Henry T. Brown, com 507 movimentos mecânicos, encontramos por exemplo, dentre os diversos conjuntos de sistema, a conversão de movimento rotativo em movimento linear, conforme Figura 5, em que um pino guia acoplado ao disco em rotação movimenta linearmente uma barra por meio do deslizamento do conjunto pino guia e o canal de acoplamento, resultando em uma oscilação sem a necessidade de um conjunto biela-manivela. (5)

Figura 5: Conversão de movimento rotativo em movimento linear.



Fonte: Adaptado de (5)

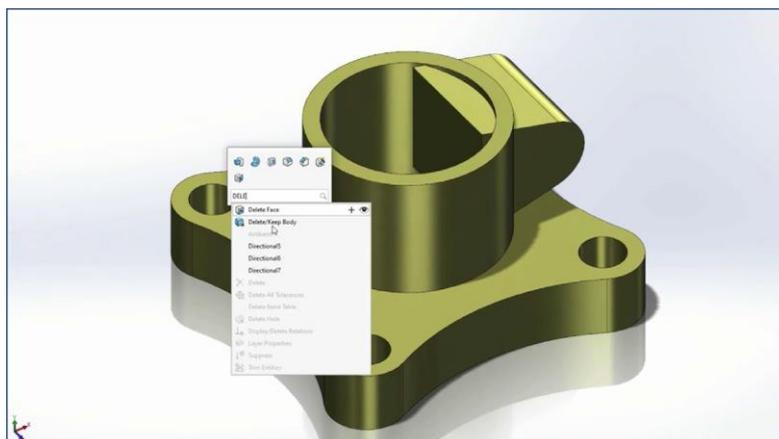
Diversos outros sistemas podem ser consultados, a qual o projetista pode aplicar ou adequar ao seu projeto em desenvolvimento.

## 2.2 Prototipagem

Conforme mencionado anteriormente no item 2.1.1, uma das ferramentas no desenvolvimento de um projeto são os programas de CAD, a qual permitem o desenvolvimento de projetos em 3D e posteriormente aplicação num método de prototipagem rápida. (3)

Os *softwares* CAD 3D mais comuns no desenvolvimento de componentes mecânicos são os desenvolvidos pela *Dassault Systèmes®* como o *Solidworks®* e *CATIA®*, bem como os desenvolvidos pela *Autodesk®* como o *Fusion 360®*, *AutoCAD®* e *Inventor®*. A Figura 6 ilustra a área de trabalho de um projeto de CAD 3D.

Figura 6: Projeto CAD 3D no *Solidworks*



Fonte: Solidworks (5)

Por meio de um projeto 3D criado em um programa CAD é possível realizar a impressão 3D do produto por diferentes tecnologias de prototipagem rápida atualmente disponíveis, sendo a mais comum conhecida como *Fused Deposition Modeling (FDM)*. (6)

A impressão 3D (também conhecido como manufatura aditiva) é uma das tecnologias utilizadas para projetos de prototipagem, até mesmo para produção de peças de uso final, podendo ser aplicada em indústrias aeroespacial, arquitetura, construção civil, automotiva, ciência biomédica, design industrial e de produto etc.

Essa tecnologia permite a prototipagem para modelos conceituais ou peças de uso final, como ferramentas, moldes, montagens e dispositivos personalizados para experimentos. (7)

### 2.2.1 Impressão 3D por FDM

A impressão 3D por FDM consiste na formação de camadas por deposição de material em alta temperatura, a qual o intervalo de tempo entre as camadas é o suficiente para esfriar e aderir a próxima camada. Esse processo é aditivo, ao contrário de um processo de Controle Numérico Computadorizado (CNC) que subtrai material, entretanto, ambos utilizam o *G-code* para movimentação da ferramenta. Na impressão 3D, o *G-code* pode ser gerado por programas denominados fatiadores, como o *Ultimaker Cura*®, entretanto existe outros programas como o *PrusaSlicer*® e o *IdeaMaker*®. (6)

Na Figura 7 é apresentado um modelo de impressora 3D por método FDM.

Figura 7: Impressora 3D por FDM - Modelo Ender-5 Pro da Creality

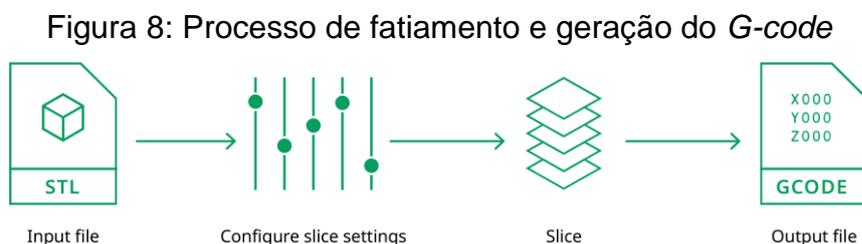


Fonte: Creality (5)

### 2.2.2 Ultimaker Cura®

O resultado satisfatório numa impressão 3D vem da integração perfeita entre o *hardware*, o material e o *software* de controle do processo de impressão. Todo modelo CAD deve ser preparado para impressão 3D usando um programa de fatiamento que define finas camadas horizontais do modelo adequadas à impressão, além de uma série de outras funções para a produção da peça. Após o projeto CAD, basicamente

o processo de impressão 3D consiste em fatiamento das camadas e criação do *G-code*, conforme ilustra a Figura 8. (8)



Fonte: (8)

Por meio do projeto de Manufatura Auxiliada por Computador (CAM) gera-se facilmente um arquivo STL, OBJ, X3D ou 3MF. O *Ultimaker Cura®* trabalha com esses formatos, além de suportar alguns formatos de arquivo CAD padrão da indústria. (8)

Por meio do arquivo 3D suportado pelo *Ultimaker Cura®*, define-se os parâmetros de fatiamento que controlam as características de qualidade da superfície, resistência da peça e velocidade de impressão. O *Ultimaker Cura®* possui parametrizações prontas de velocidade de impressão, densidade de preenchimento e altura da camada que facilitam a impressão 3D. Após configuração dos parâmetros sugeridos ou ajustado pelo usuário, gera-se o fatiamento. Nesse processo também são realizados os cálculos de otimização de movimentação da ferramenta. (8)

Por fim, cria-se o arquivo *G-code* que será aplicado ao equipamento de impressão 3D. (8)

A tela de trabalho do *Ultimaker Cura®* pode ser visualizada na Figura 9, onde pode-se aplicar um fatiamento pré-configurado com base no modelo, tipo de material etc. (evitando experimentações de configurações que demandam tempo e trabalho intensivo), e posteriormente se o usuário julgar necessário, pode-se realizar pequenos ajustes buscando o melhor resultado. Além disso, as pré-configurações podem ser personalizadas para atender as necessidades individuais em aplicações futuras. (8)

Figura 9: Área de trabalho do *Ultimaker Cura*®



Fonte: (6)

É importante salientar que as configurações do fatiador influenciam no resultado final do produto, entretanto, a manutenção da impressora também é uma variável no resultado da impressão 3D. Na Figura 10 as duas peças tem o mesmo *G-code*, entretanto, a peça da direita foi impressa com um bico extrusor novo, ao passo que a da esquerda foi impresso com um bico de aço temperado que tem uma durabilidade maior, mais não impede a degradação ao longo do tempo de uso, chegando nesse resultado de impressão e sendo necessário sua substituição. (6)

Figura 10: Bico extrusor desgastado x novo



Fonte: (6)

### 2.2.3 *Polylactic Acid* (PLA)

O PLA é o mais comum e mais fácil dos materiais para trabalhar com impressão 3D, além disso, é um tipo de material com alta resistência a tração, baixa taxa de retração e custo mais acessível. As configurações para o PLA normalmente aplicadas no fatiador são:

- Temperatura de impressão: A faixa de temperatura desse material é ampla, podendo variar dependendo do fabricante entre 180°C a 205°C ou 205°C a

220°C, sendo indicado as temperaturas de 200° e 215° respectivamente. (6)

- Temperatura da mesa: o PLA é um dos poucos materiais que a mesa não precisa ser aquecida, entretanto a mesa aquecida entre 50°C a 60°C contribui muito nas primeiras camadas de impressão, evitando o desprendimento da peça da mesa e consequentemente afetando o resultado da peça. (6)
- Retração: O sistema de extrusão pode ser *Direct Drive* ou *Bowden*, onde as configurações normalmente são para *Direct Drive* uma distância de 3,5mm, velocidade de 35mm/s e curso mínimo de 0,9mm, já para extrusão *Bowden*, são indicados uma distância de 4,8mm, velocidade de 55mm/s e curso mínimo de 0,8mm. (6)
- Velocidade: Para o sistema de extrusão *Direct Drive*, as configurações normalmente são de 55mm/s de velocidade, 27mm/s para paredes externas, 30mm/s para superior ou inferior, 20mm/s para a camada inicial e 150mm/s de deslocamento. Já no sistema de extrusão *Bowden*, as configurações indicadas são 60mm/s de velocidade, 30mm/s para as paredes externas e para superior e inferior, 25mm/s para a camada inicial e 150mm/s de deslocamento. (6)
- Configurações de suporte: de 50 a 55° de ângulo de balanço, 12% de densidade, 0,2mm de distância no eixo Z, 0,8mm de distância no eixo X/Y e 1mm de espessura. (6)

#### 2.2.4 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

Depois do PLA, o ABS é o material mais utilizado na produção de peças mecânicas de baixo custo, sendo utilizado por exemplo nas peças *LEGO*®. Suas propriedades mecânicas são alta resistência ao calor, com resistência a deflexão de até 95°C, é solúvel à acetona, o que após a impressão pode ser aplicado melhorando o acabamento superficial da peça. (6)

A impressão 3D em ABS exige cuidados adicionais com a temperatura ambiente, assim, deve-se realizar a impressão em um gabinete fechado e, dependendo da peça, um controle de temperatura interna em 50°C. Mesmo com todo esse controle, peças com mais de 500g começa a ser inviável de ser produzida. (6)

As configurações para o ABS normalmente aplicadas no fatiador são:

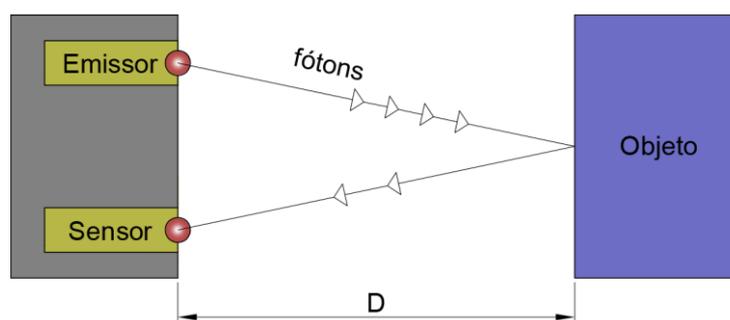
- Temperatura de impressão: A faixa de temperatura desse material é maior do que a do PLA, normalmente entre 230°C a 240°C, mas pode haver fabricantes em que com uma temperatura de 260°C obtém-se melhores resultados. (6)
- Temperatura da mesa: é indicado uma temperatura de 105°C, o que dificulta a impressão 3D em relação ao PLA, além de justificar a importância do controle de temperatura ambiente, pois a diferença de temperatura com o ar ambiente pode resultar em deformações na peça. Esses problemas tendem a ser menos suscetíveis em peças menores. (6)
- Retração: Como mencionado nas configurações de fatiamento do PLA, o sistema de extrusão pode ser *Direct Drive* ou *Bowden*, assim, as configurações para *Direct Drive* normalmente são uma distância de 1,8mm, velocidade de 15mm/s e curso mínimo de 1,2mm, já para extrusão *Bowden*, são indicados uma distância de 3,5mm, velocidade de 35mm/s e curso mínimo de 1,2mm. (6)
- Velocidade: Para o sistema de extrusão *Direct Drive*, as configurações normalmente são de 35mm/s de velocidade, 25mm/s para paredes externas, 30mm/s para superior ou inferior, 25mm/s para a camada inicial e 150mm/s de deslocamento. Já no sistema de extrusão *Bowden*, as configurações indicadas são 35mm/s de velocidade, 25mm/s para as paredes externas, 30mm/s para superior ou inferior, 25mm/s para a camada inicial e 150mm/s de deslocamento. (6)
- Configurações de suporte: de 45 a 50° de ângulo de balanço, 15% de densidade, 0,2mm de distância no eixo Z, 0,8mm de distância no eixo X/Y e 1mm de espessura. (6)

### 2.3 Sensores *Time-of-Flight* (ToF)

O sensor ToF é composto por emissor, receptor e processador em um mesmo invólucro de forma compacta, capaz de medir a distância de um objeto, independentemente da cor e refletância, por meio da emissão de luz (emissor), reflexão da luz no objeto para o sensor (receptor) e cálculo da distância pelo intervalo de tempo e velocidade da luz (processador). Assim, o princípio do sensor ToF se baseia no intervalo de tempo entre o envio dos fótons pelo emissor, a qual serão

refletidos pelo objeto alvo e detectados pelo sensor, chamado *Single Photon Avalanche Diode* (SPAD), a qual conhecendo a velocidade da luz e o tempo entre a emissão e a recepção da luz, o sensor ToF processa e informa a distância do objeto, conforme ilustra a Figura 11. (9)

Figura 11: Cálculo da distância pelo *Time-of-Flight*



Fonte: Adaptado de (9)

Da Figura 11, considerando o metro no Sistema Internacional (S.I) como sendo o espaço percorrido pela luz no tempo de  $1/299792458$  segundos e sendo o cálculo da distância dado pela (1), podemos concluir que o tempo para cada distância de 1 milímetro é de 6,67ps.

$$D = \frac{\Delta t_{fóton}}{2} \times V_{luz} \quad (1)$$

Onde:

$D$  → distância [m]

$\Delta t_{fóton}$  → intervalo de tempo [s]

$V_{luz}$  → velocidade da luz [m/s] = 299.792.458m/s

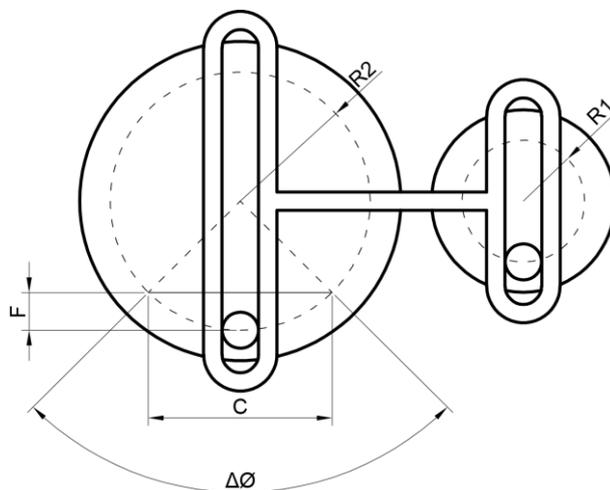
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Hardware Mecânico

O projeto do *hardware* mecânico inicial foi idealizado com base no mecanismo número 93 de Henry T. Brown (5), conforme o item 2.1.3 da revisão bibliográfica, constituído de componentes básicos como polia motora, biela e polia movida. Sendo a proposta desse projeto para aplicações em estudos futuros de veículos autônomos em escala, o dimensional do *hardware* mecânico foi limitado a um volume de 10 cm<sup>3</sup>, além disso, dado o processo de impressão 3D, conjuntos de componentes móveis foram desenhados com ajuste de folga de 6/10 mm e conjuntos de componentes montados com ajuste de folga de 3/10 mm.

O cálculo da relação de polias para obtenção do ciclo de 90° (para 4 sensores ToFs, realizando a varredura de 360°), conforme Figura 12, foi deduzido da (2 (flecha) e da (3 (corda)). O deslocamento linear máximo é produzido com 180° da polia motora e dado a relação de transmissão, produz-se um deslocamento angular na polia movida, em nosso caso, devendo ser de 90°. Dessa forma, chegamos a (4):

Figura 12: Relação de deslocamento angular das polias



Fonte: Autor, 2022

$$F = R - (R \cdot \cos \Delta\phi) \quad (2)$$

$$C = 2 \cdot \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \cdot R \quad (3)$$

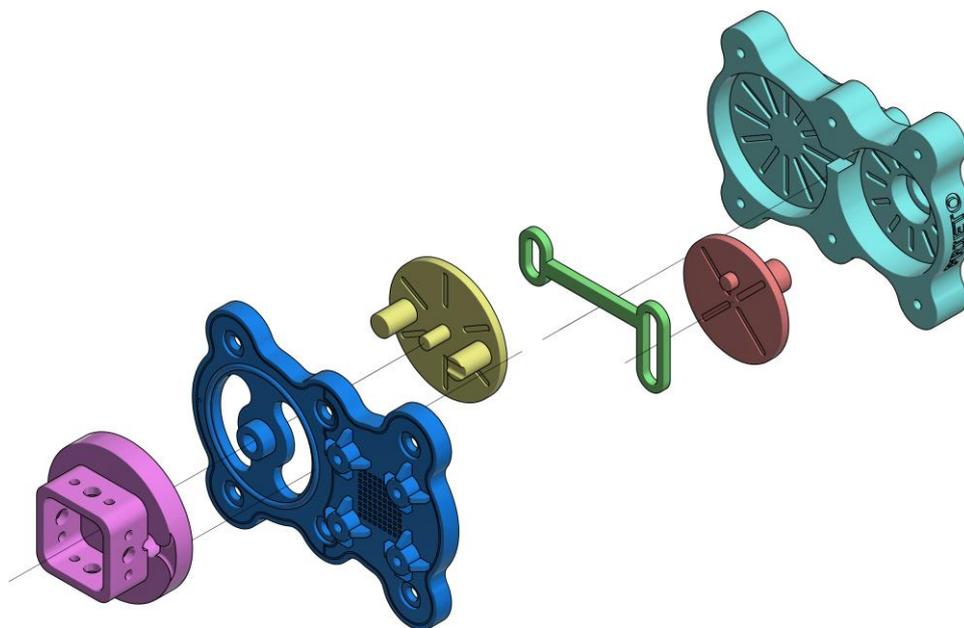
$$R_2 = \frac{R_1}{\sin 45^\circ} \quad (4)$$

Onde:

$F$	→	<i>flecha</i> [mm]
$C$	→	<i>corda</i> [mm]
$R$	→	<i>raio</i> [mm]
$\Delta\phi$	→	<i>deslocamento angular</i> [°]

Para validação do *hardware* mecânico, desenvolvido conforme desenho em vista explodida da Figura 13, utilizou-se o *Inventor*® como CAD de modelagem 3D para o conjunto mecânico.

Figura 13: Vista explodida do *hardware* mecânico versão 1.0



Fonte: Autor, 2022

Para a produção do conjunto mecânico foi utilizado uma impressora 3D *Ender 5*, com o fatiamento realizado no *Ultimaker Cura*® versão 5.1.0, onde o material aplicado foi o PLA e as principais configurações de fatiamento estão descritas na Tabela 3.1, assim como as características elétricas do motor *Direct Current* (DC) na Tabela 3.2.

**Tabela 3.1 Configurações de impressão 3D**

Altura de Camada [mm]	Densidade do Preenchimento [%]	Temperatura de Impressão [°C]	Velocidade de Impressão [mm/s]
0,2	10,0	195,0	50,0

Fonte: Autor, 2022

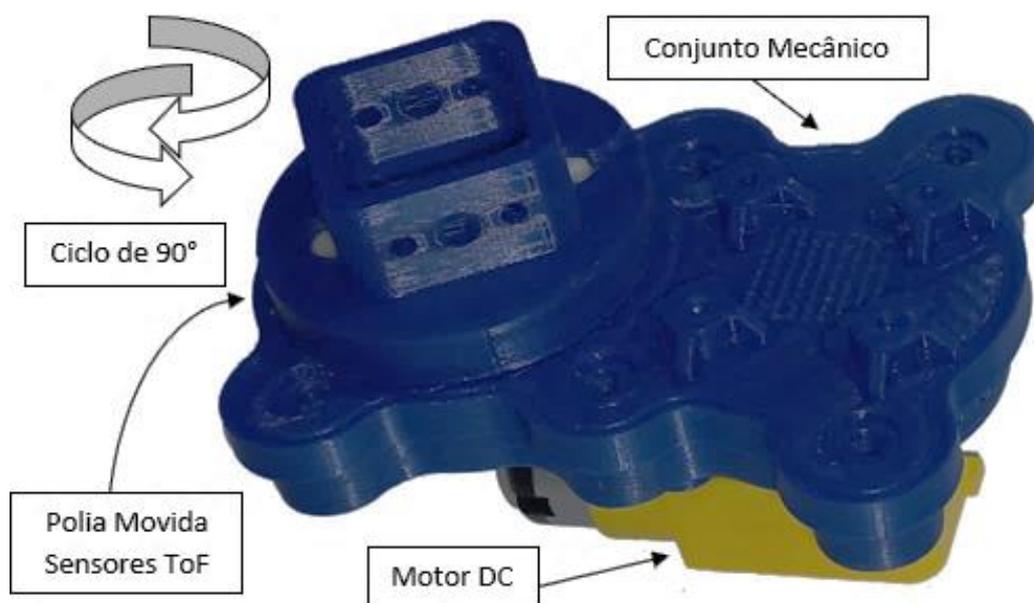
**Tabela 3.2 Especificação do motor DC com caixa de redução**

<i>Tensão de Operação</i> [V]	<i>Relação de Redução</i> [RPM/RPM]	<i>Corrente sem Carga</i> [mA]	<i>Velocidade sem Carga</i> [RPM]
3 a 6	1:48	200 (6V), 150 (3V)	200 (6V), 90 (3V)

Fonte: Autor, 2022

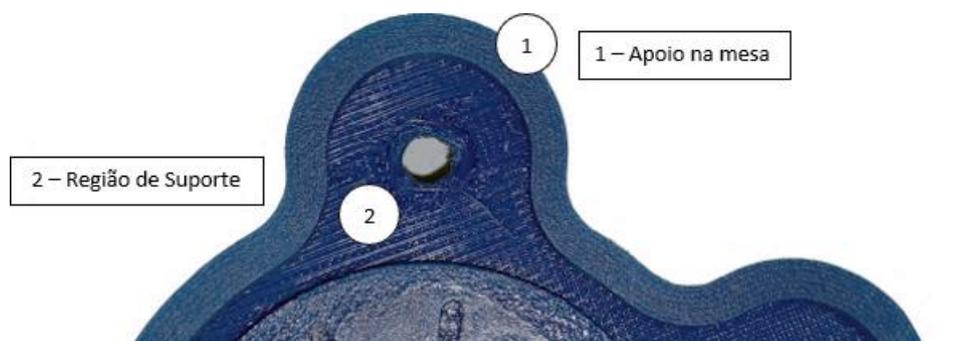
Com os componentes produzidos, conforme conjunto da Figura 14 e, por meio de análise visual, foi observado acabamento superficial com grandes irregularidades, conforme Figura 15, causados por suportes provenientes do processo de impressão 3D.

Figura 14: Conjunto do *hardware* mecânico versão 1.0 completo



Fonte: Autor, 2022

Figura 15: Acabamento superficial em áreas de suporte da versão 1.0



Fonte: Autor, 2022

Em aplicação prática do *hardware* mecânico em conjunto com o motor DC, observou-se que não havia suavidade no movimento, além de ser perceptível pontos com maior esforço do que outros, com o motor DC consumindo uma corrente elétrica entre 260 mA e 300 mA e uma frequência de ciclo da polia movida de 1,0 Hz. Diante desse cenário, foi adicionado vaselina sólida aos componentes moveis do conjunto, a qual resultou em uma melhora na suavidade dos movimentos, com redução no consumo de corrente elétrica para entre 200 mA e 250 mA e um aumento na frequência de ciclo da polia movida para quase 1,5 Hz, entretanto, houve o cisalhamento em um dos pinos, conforme Figura 16, em poucos minutos de funcionamento.

Figura 16: Cisalhamento na polia motora da versão 1

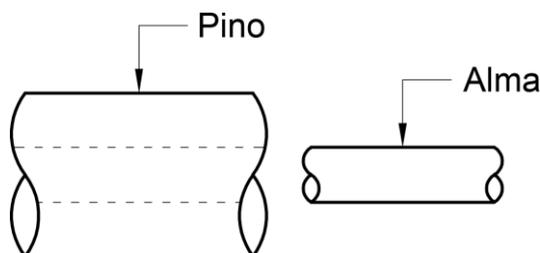


Fonte: Autor, 2022

Assim, o *hardware* mecânico foi redesenhado mantendo se as mesmas características de ajuste, configuração de impressão 3D, material etc, entretanto

adicionado uma alma de arame de aço galvanizado com 2 mm de diâmetro nominal em todos os pinos sob esforço radial, conforme Figura 17, projetado com ajuste incerto, buscando uma melhor resistência mecânica aos pinos do conjunto mecânico.

Figura 17: Reforço nos pinos móveis na versão 1.1



Fonte: Autor, 2022

Para o problema de acabamento superficial, o projeto foi fragmentado em mais componentes, visando a redução da necessidade de suportes de sustentação do processo de impressão 3D, buscando um resultado melhor do acabamento superficial nos componentes. Além disso, nessa versão 1.1 foi contemplado berços para os demais componentes eletrônicos que compõem o sistema LIDAR.

A mesma análise visual foi realizada obtendo-se melhores resultados, registrados na Tabela 3.3 e em comparação ao modelo inicial.

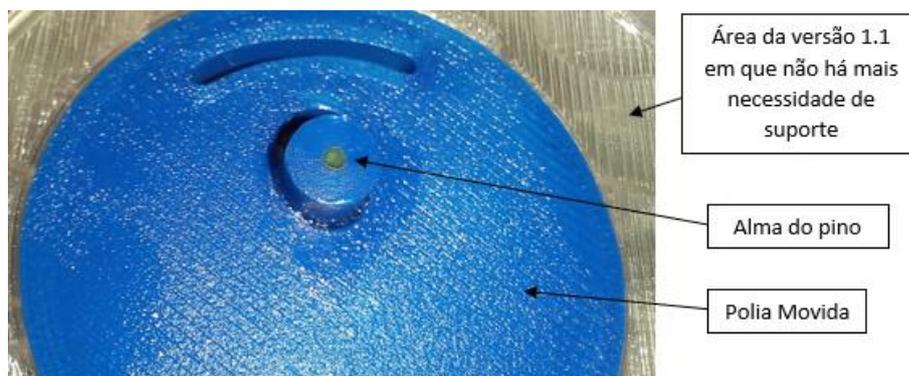
**Tabela 3.3 Consumo de corrente elétrica e frequência do ciclo da polia movida entre protótipos**

<i>Protótipo</i>	<i>Tensão de Operação</i> [V]	<i>Corrente com Carga</i> [mA]	<i>Frequência de ciclo da polia</i> [Hz]
Versão 1.0 sem lubrificação	5	260 a 300	≈1,0
Versão 1.0 com lubrificação	5	200 a 250	≈1,5
Versão 1.1 com lubrificação	5	200 a 250	≈2,0

Fonte: Autor, 2022

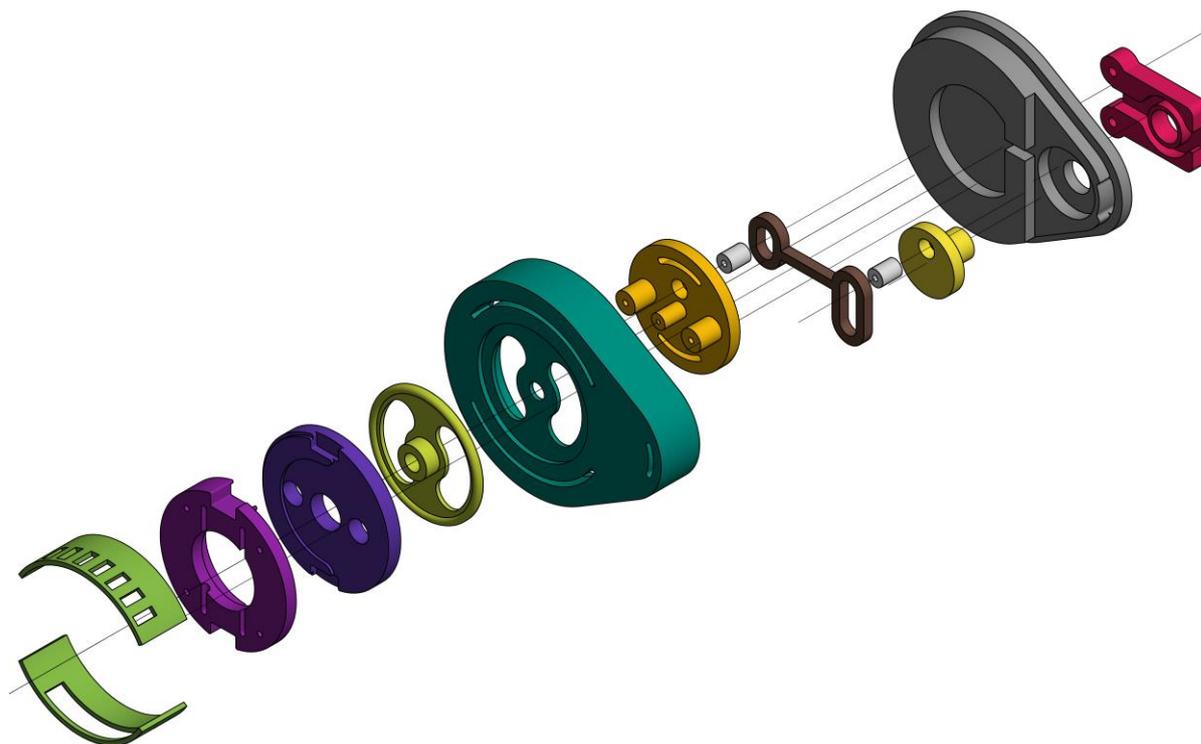
Houve uma melhora significativa no acabamento superficial, conforme Figura 18.

Figura 18: Acabamento superficial em áreas de suporte versão 1.1



Fonte: Autor, 2022

O projeto redesenhado tem a vista explodida apresentado na Figura 19.

Figura 19: Vista explodida do *hardware* mecânico versão 1.1

Fonte: Autor, 2022

Esse modelo de *hardware* mecânico versão 1.1 montado pode ser visto Figura 20.

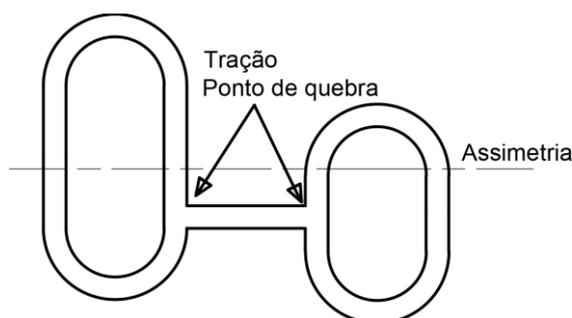
Figura 20: *Hardware* mecânico versão 1.1 montado



Fonte: Autor, 2022

Em análise do grau de ciclo de  $90^\circ$ , constatou-se um ciclo muito inferior, com cerca de  $70^\circ$ , além disso, o *hardware* mecânico versão 1.1 foi submetido a um ciclo de funcionamento contínuo de 4h com pausa de 1h, a qual resultou na quebra da biela entre o quinto e o sexto ciclo, ou seja, entre 20h e 24h de funcionamento, na região indicada na Figura 21.

Figura 21: Assimetria e região de quebra da biela

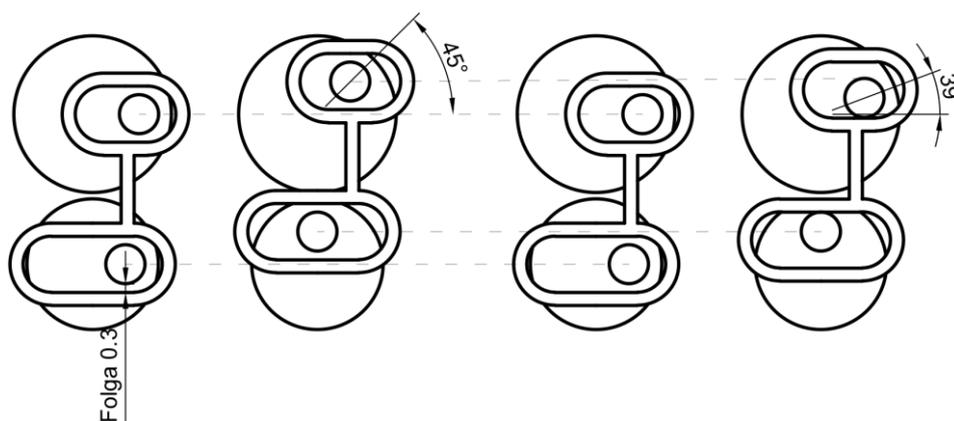


Fonte: Autor, 2022

Em relação ao problema da polia movida não ciclar em  $90^\circ$  chegou-se à conclusão, devido ao dimensional do *hardware* mecânico, que mesmo um pequeno ajuste com folga, previsto no projeto de 6/10mm para os conjuntos móveis, no conjunto polia motora, biela e polia movida, resulta numa grande diferença no ângulo da polia movida, conforme Figura 22, a qual o par de conjuntos à esquerda obtém-se um ciclo de  $90^\circ$  desconsiderando-se as folgas (teórico), já no par de conjuntos à direita considera-se a folga de 6/10mm (3/10mm de cada lado), que resulta num ângulo de

ciclo de  $78^\circ$ , ou seja, um erro de 13% (que resulta em falha de leitura de 2 a 3 posições angulares, afetando todo o processo de obtenção da posição angular por ser incremental e não absoluta), além de na prática haver outras variáveis que alteram o dimensional das peças, como variabilidade no processo de fabricação, temperatura etc.

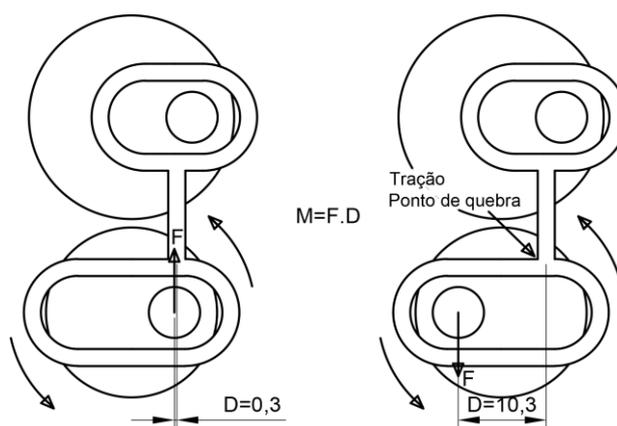
Figura 22: Variáveis que influenciam no ângulo de ciclo teórico



Fonte: Autor, 2022

Já em relação a quebra da biela verificou-se que o design da biela, assimétrica, resulta numa maior alavanca em determinados ângulos, conforme Figura 23.

Figura 23: Esforço na biela assimétrica



Fonte: Autor, 2022

De forma a resolverem esses problemas, optou-se por novamente remodelar o *hardware* mecânico, atentando-se além das ações tomadas na versão 1.1, para a quebra da biela e para o ângulo de ciclo satisfatória em  $90^\circ$ .

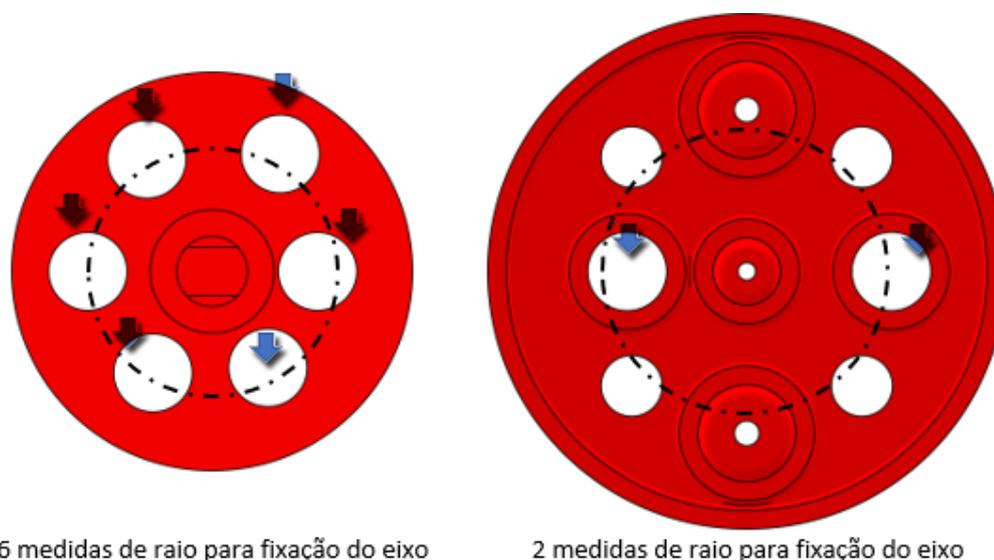
Assim, para o problema do ângulo de ciclo, as polias motora e movida foram projetadas com liberdade em seus respectivos raios (pontos determinados), conforme Figura 24, sendo à esquerda a polia motora e à direita a polia movida, resultando em 12 combinações de relação de transmissão teórica conforme a Tabela 3.4.

**Tabela 3.4** Combinações possíveis de relação de transmissão para a polia movida

<i>Raio da Polia Motora</i>	<i>Raio da Polia Movida</i>	<i>Relação de Transmissão</i>
$R_1$	$R_1$	1,12: 1
$R_2$	$R_1$	1,06: 1
$R_3$	$R_1$	1,01: 1
$R_4$	$R_1$	0,95: 1
$R_5$	$R_1$	0,91: 1
$R_6$	$R_1$	0,87: 1
$R_1$	$R_2$	1,36: 1
$R_2$	$R_2$	1,28: 1
$R_3$	$R_2$	1,22: 1
$R_4$	$R_2$	1,15: 1
$R_5$	$R_2$	1,10: 1
$R_6$	$R_2$	1,05: 1

Fonte: Autor, 2022

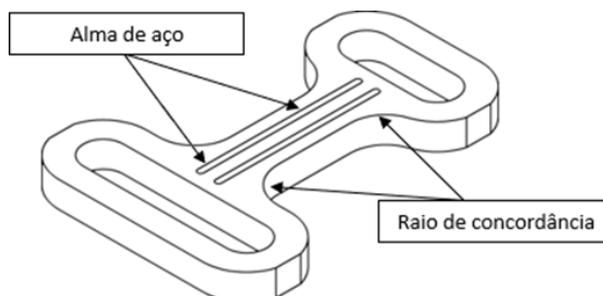
Figura 24: Diferentes raios para inserção do pino



Fonte: Autor, 2022

Para a quebra da biela, assim como adotado nos pinos, previu-se a adição de almas de arame de aço galvanizado com 2 mm de diâmetro nominal, além de um raio nas áreas de quebra, conforme Figura 25.

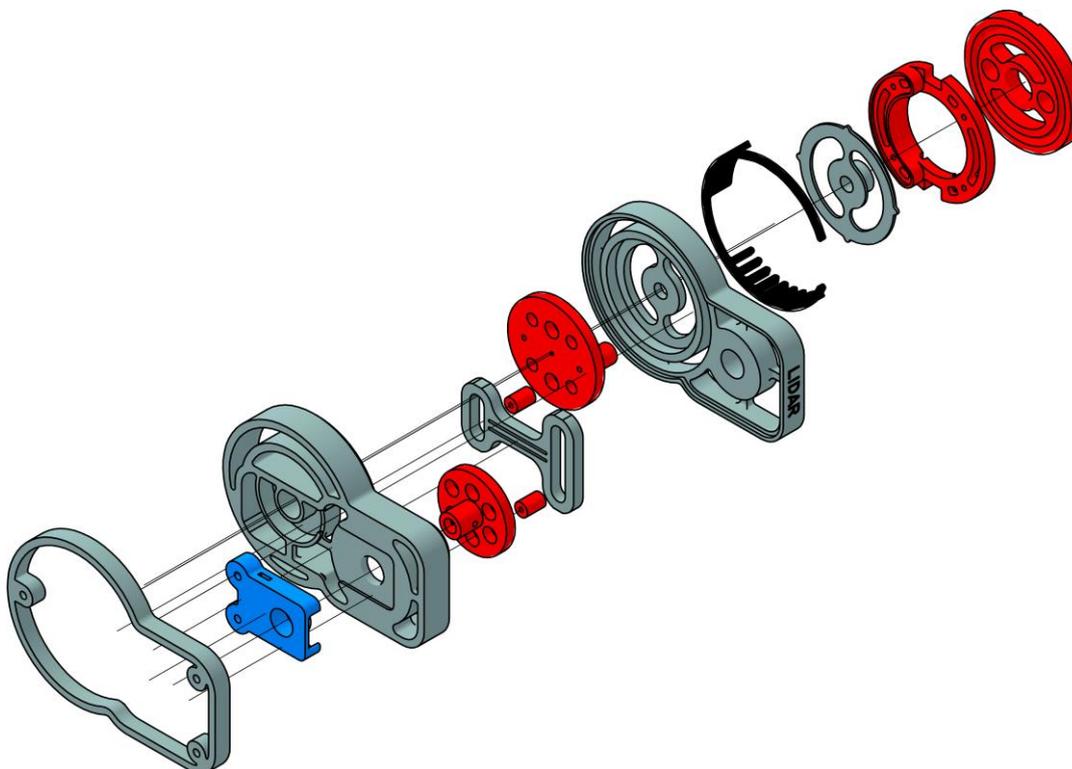
Figura 25: Diferentes raios para inserção do pino



Fonte: Autor, 2022

Assim, o *hardware* mecânico versão 1.3 tem a vista explodida conforme Figura 26 e no APÊNDICE A - CROQUI DO *HARDWARE* MECÂNICO VERSÃO 1.3 pode ser visualizado o croqui de todas os componentes do conjunto do *hardware* mecânico versão 1.3.

Figura 26: Vista explodida do *hardware* mecânico versão 1.3



Fonte: Autor, 2022

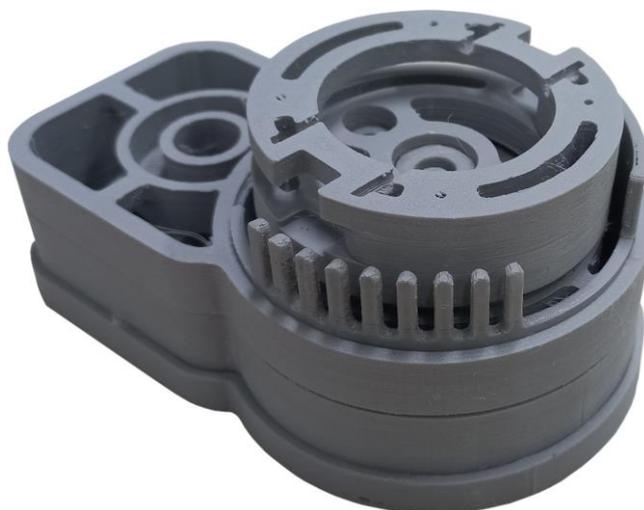
Para todas as impressões 3D do *hardware* mecânico foi utilizado a impressora *Ender 5* com filamento PLA com as mesmas configurações básicas já descritas na Tabela 3.1, onde encontra-se todos os ajustes no APÊNDICE B - CONFIGURAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D. A Figura 27 ilustra o processo de impressão em PLA, bem como a Figura 28 consiste do conjunto impresso e montado.

Figura 27: Processo de impressão 3D do *hardware* mecânico



Fonte: Autor, 2022

Figura 28: Conjunto do *hardware* mecânico versão 1.3 impresso e montado



Fonte: Autor, 2022

Com esse modelo de *hardware* mecânico (versão 1.3), que faz a ciclagem em aproximadamente 100°, garantido a varredura de 90° de cada 1 dos 4 sensores ToFs, eliminando pontos cegos, o projeto seguiu para desenvolvimento do circuito eletrônico.

### 3.2 Circuito Eletrônico

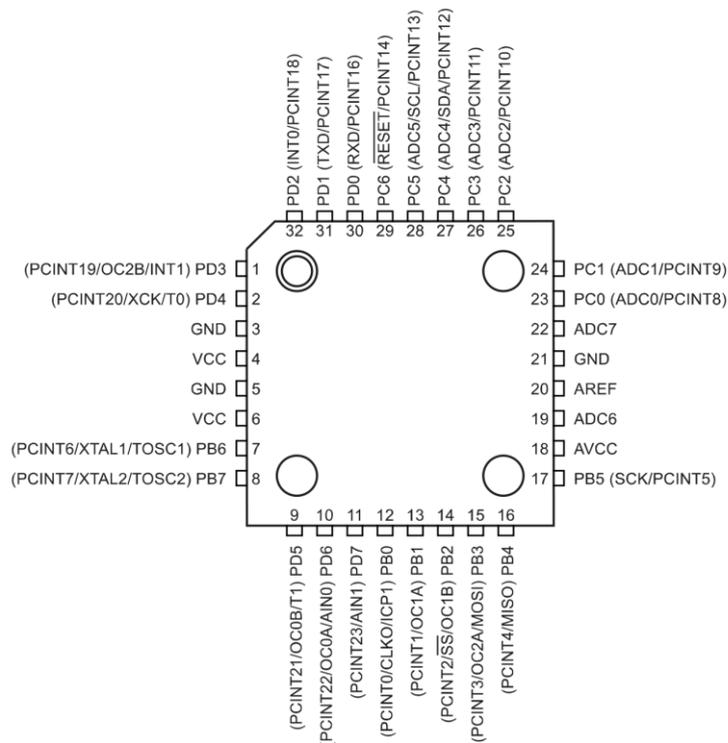
Para o circuito eletrônico e proposta desse estudo, buscou-se um microcontrolador de fácil acesso e baixo custo, chegando-se no ATmega328P, a qual encontra-se o componente em *surface-mount device* (SMD) padrão TQFP, entre outros, bem como em plataforma livre como o Arduino Nano, a qual apresenta as especificações conforme Tabela 3.5, bem como disposição física conforme Figura 29 e Figura 30 para o Arduino Nano.

**Tabela 3.5 Especificação do ATmega328P**

Architecture	AVR
Operating Voltage	5 V
Flash Memory	32 KB of which 2 KB used by bootloader
EEPROM	1kB
SRAM	2 KB
Flash Program Memory	32KB
Two Timer/Counters	8-bit
One Timer/Counters	16-bit
Clock Speed	16 MHz
DC Current per I/O Pins	40 mA (I/O Pins)
Digital I/O Pins	22 (6 of which are PWM)
Temperature Range	-40°C to +125°C
Power Consumption (Active mode)	1.5mA at 3V - 4MHz
Power Consumption (Power-down mode)	1µA at 3V

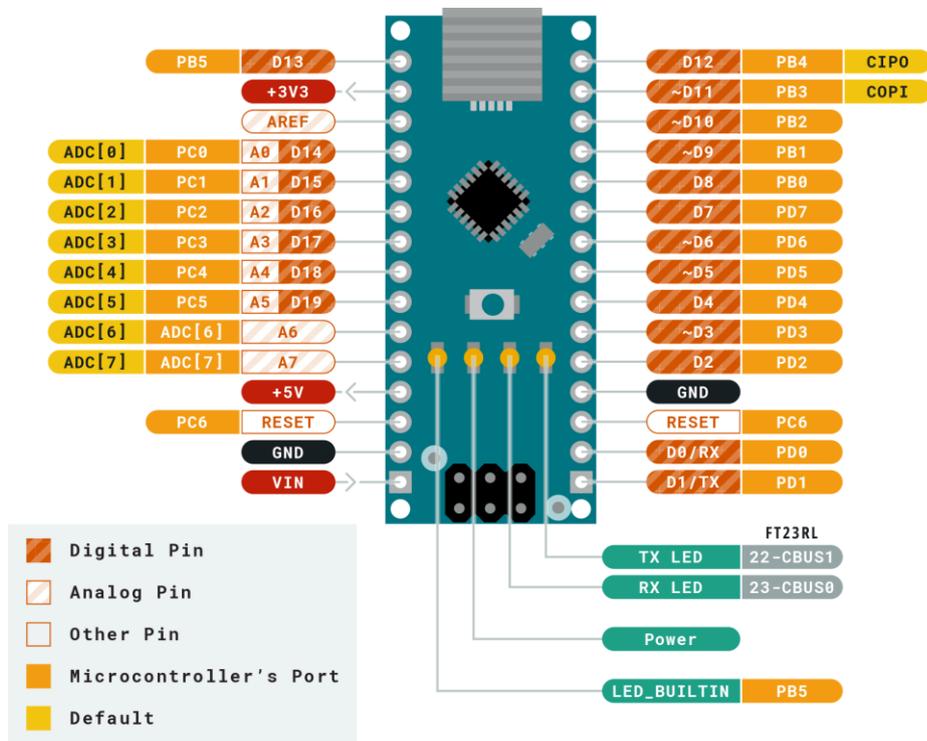
Fonte: Microchip

Figura 29: Pinos do ATmega328P padrão TQFP



Fonte: Microchip

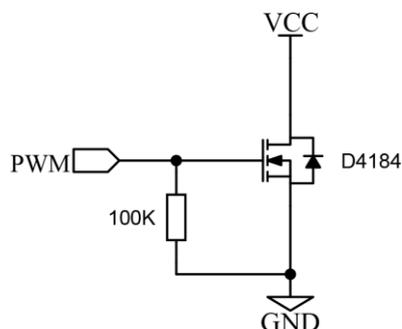
Figura 30: Pinos do Arduino Nano



Fonte: Arduino (10)

Para os sensores e atuadores, foi adotado circuitos comumente encontrados em *shields*. Assim, para o driver do motor DC, foi determinado o uso de um Transistor de Efeito de Campo (MOSFET), tendo o circuito ilustrado na Figura 31.

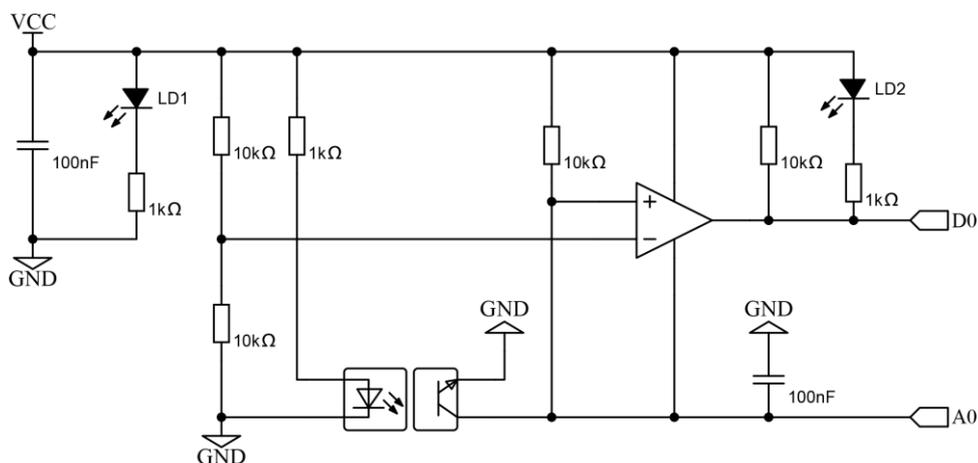
Figura 31: Driver para o motor DC



Fonte: Adaptado de ACELEX

Para leitura da posição angular e para a sincronização foi implementado sensor óptico com Amplificador Operacional (A.O) configurado como comparador de tensão, conforme ilustração da Figura 32.

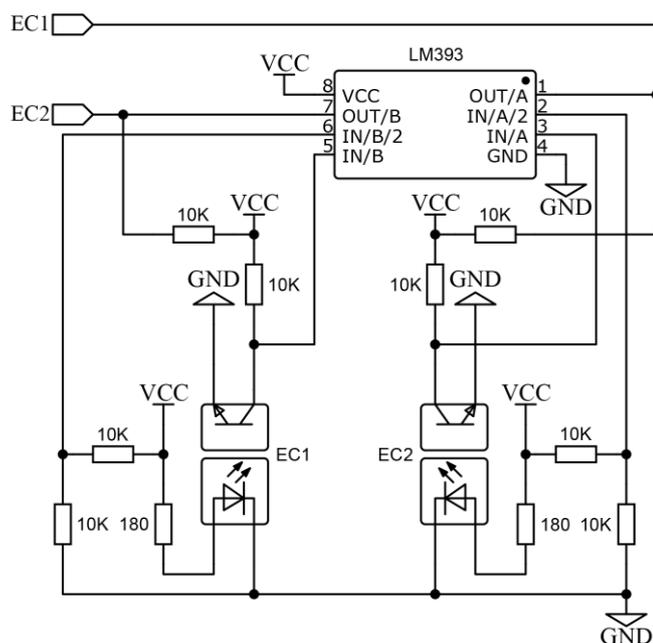
Figura 32: Circuito do *Encoder* com comparador de tensão



Fonte: Adaptado de TZZ Brand

Como o circuito usa o A.O podendo ser de uso geral como o LM393, a qual possui 2 A.O em seu invólucro e, o projeto contemplando 2 *encoders* (um contador e um sincronizador), o circuito pode ser redesenhado conforme Figura 33.

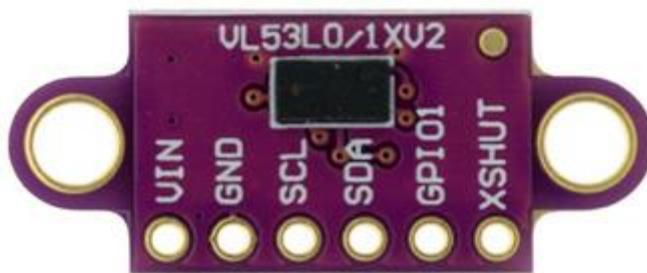
Figura 33: Circuito de dois *Encoders* com o LM393



Fonte: Autor, 2022

Para a leitura de distância optou-se por sensor de luz, a qual encontra-se o VL53L0X da ST com custo acessível e melhor precisão em relação à tecnologia de Sensor Ultrassônico. O sensor VL53L0X da ST é fornecido em padrão *Land Grid Array* (LGA), sendo assim, dado sua dificuldade de montagem, optou-se por uma *shield* a exemplo da *Adafruti*®, onde a *shield* similar aplicada foi a do modelo da Figura 34 e o circuito elétrico básico pode ser verificado na Figura 35.

Figura 34: *Shield* ToF VL53L0X



Fonte: EstarDyn



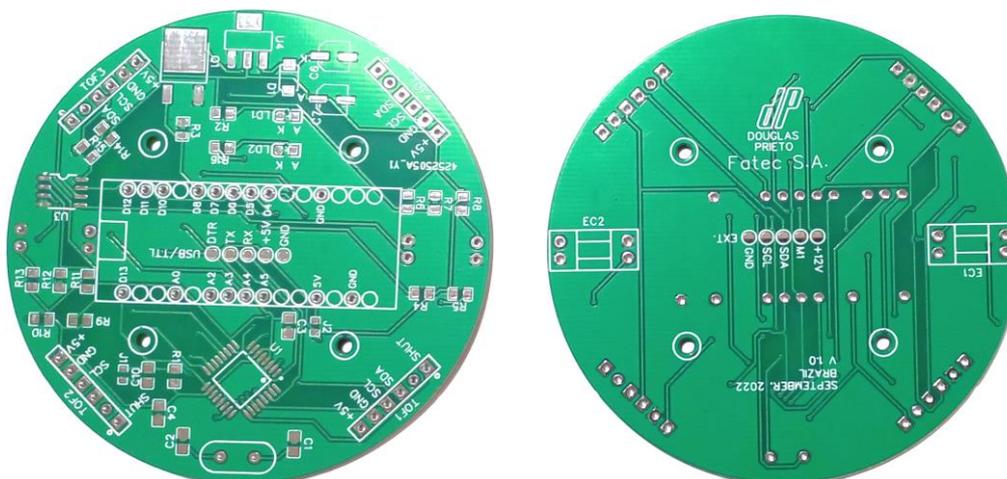


**Quadro 1 Configurações de jumpers e conexões externas**

Conexão		Descrição
Jumper	J1	On: Inutiliza o C10 no pino <i>RESET</i> do ATmega328P para uso do conversor USB/TTL (comunicação serial); Off: Aplica o C10 no pino <i>RESET</i> do ATmega328P para uso do conversor USB/TTL (comunicação serial).
	J2	On: Arduino Nano é alimentado pela fonte externa do circuito; Off: Arduino Nano é alimentado pela conexão USB <i>on board</i> .
Comunicação de Desenvolvimento	DTR	Conexão DTR para o conversor USB/TTL (comunicação serial).
	RX	Conexão para o RX do conversor USB/TTL (comunicação serial).
	TX	Conexão para o TX do conversor USB/TTL (comunicação serial).
	+5V	Conexão de alimentação do conversor USB/TTL (comunicação serial).
	GND	Conexão GND do conversor USB/TTL (comunicação serial).
Comunicação I2C	GND	Conexão GND para o motor DC.
	SCL	Conexão SCL para comunicação I2C com outros dispositivos.
	SDA	Conexão SDA para comunicação I2C com outros dispositivos.
	M1	Conexão Pulse Width Modulation (PWM) para o motor DC.
	+12V	Alimentação do dispositivo.
$Z_{I2C}$	R14	Casamento de impedância (SCL).
	R15	Casamento de impedância (SDA).

Fonte: Autor, 2022

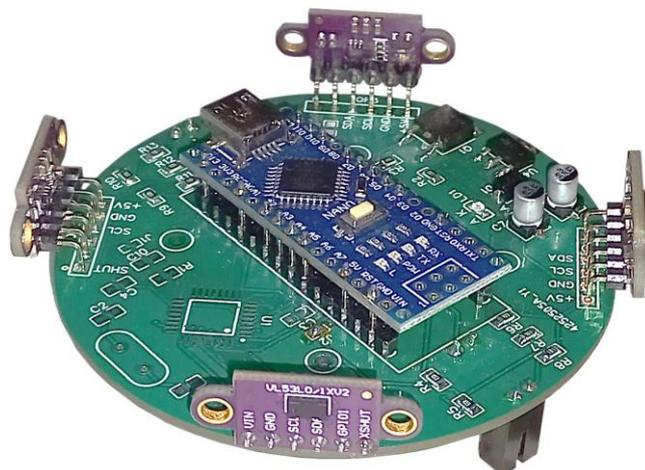
**Figura 38: PCB do sistema LIDAR proposto**



Fonte: Autor, 2022

A Figura 39 ilustra a PCB completa, com todos os componentes, na versão com o Arduino Nano.

Figura 39: PCB com os componentes soldados

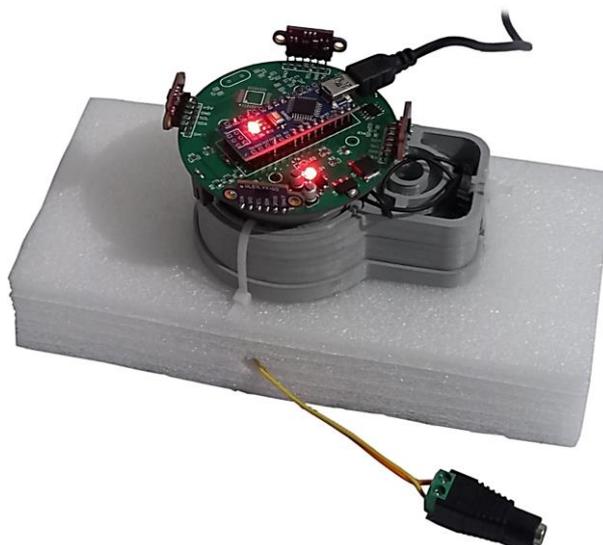


Fonte: Autor, 2022

### 3.4 Conjunto do Sistema LIDAR

Com os componentes do *hardware* mecânico impressos e o circuito eletrônico com a PCB produzida e já com os componentes eletrônicos soldados, montou-se todo o sistema para trabalhar com o *software*. O resultado visual do conjunto completo pode ser verificado na Figura 40, onde é possível verificar, basicamente, o *hardware* mecânico, a PCB acoplada ao mecanismo de ciclo de 90°, os fotossensores com os *encoders* e os sensores ToFs posicionados entre si em 90°. Essa versão apresenta um volume físico de 724 cm<sup>3</sup> e, baseado no LIDAR da LUMINAR®, modelo IRIS, com 1730cm<sup>3</sup>, o protótipo apresenta aproximadamente uma escala 1:2.

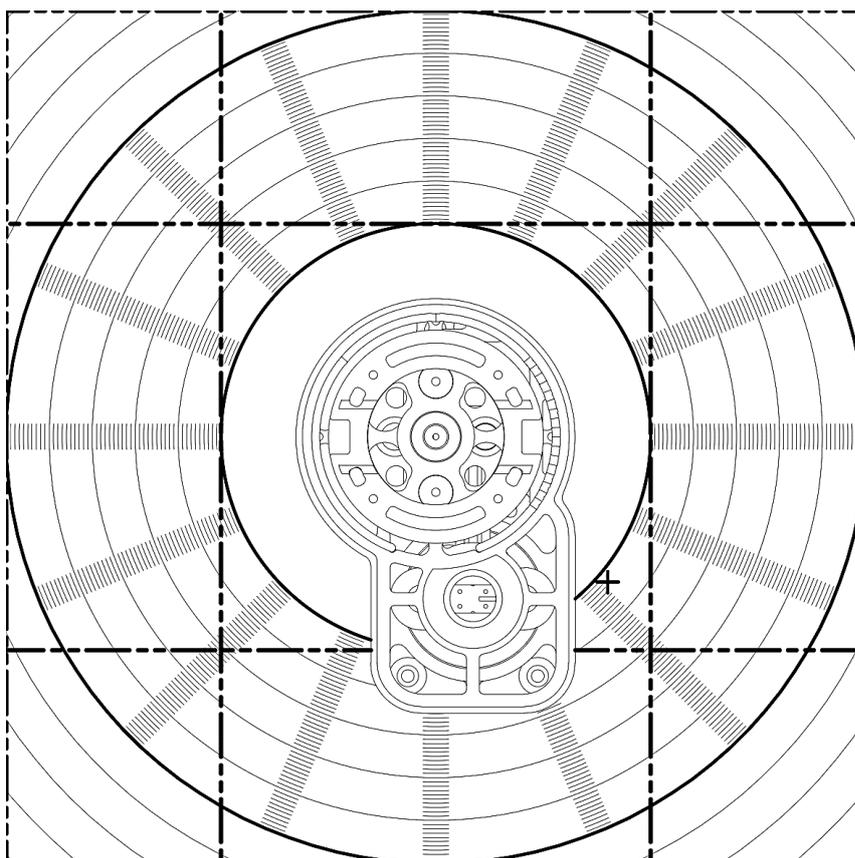
Figura 40: Sistema LIDAR



Fonte: Autor, 2022

Para calibração dos sensores ToFs e análise do funcionamento do sistema LIDAR, foi impresso em escala 1:1 o gabarito da Figura 41, com diâmetro máximo de 1000mm, subdivisões de 10mm e 1mm, além de linhas horizontais e verticais equidistantes de 50mm.

Figura 41: Parte do gabarito milimetrado



Fonte: Autor, 2022

### 3.5 Código de Programação do Sistema LIDAR

Para o código usando a linguagem C, foi instalado a biblioteca VL53L0X de *Pololu*, versão 1.3.1 para o uso dos sensores ToFs, além disso, é importante salientar que a *shield* do sensor ToF tem endereço fixo (normalmente 0x29), a qual para a comunicação de dois ou mais sensores ToFs é necessário alterar o endereço de cada sensor ToF por meio do *software*, devendo deixar o pino XSHUT de todos os sensores ToFs em nível baixo, exceto um, a qual deve ser reconfigurado. O trecho utilizado para essa função pode ser verificado no Código 1.

```

digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(7, LOW);
digitalWrite(14, LOW);
digitalWrite(16, LOW);

delay(100);
Serial.println("Resetting ToF 3...");
digitalWrite(7, HIGH);
delay(100);
Serial.println("Setting ToF 3...");
Read_ToF3.init(true);
delay(10);
Read_ToF3.setAddress((uint8_t)01);

delay(100);
Serial.println("Resetting ToF 4...");
digitalWrite(4, HIGH);
delay(100);
Serial.println("Setting ToF 4...");
Read_ToF4.init(true);
delay(10);
Read_ToF4.setAddress((uint8_t)02);

```

Código 1

A programação ainda conta com o escalonamento de tarefas, com o tempo base de 1ms, a qual consistem em:

- Tarefa 1: realiza o PWM para o motor DC, controlando a velocidade do motor e, indiretamente, o tempo entre leitura dos *encoders*, considerando que o rpm do motor esta diretamente proporcional a velocidade escalar linear e, assim, ao tempo de leitura entre as posições angulares dos sensores ToFs.
- Tarefa 2: realiza o *blink* do LD2, como indicador de funcionamento do sistema LIDAR;
- Tarefa 3: realiza a leitura do ângulo da polia movida.
- Tarefa 4: realiza a leitura a cada 40ms dos 4 sensores ToFs, armazenando os valores obtidos em um vetor e assumindo valor máximo de 500mm (0,5m). A cada leitura chama as funções de cálculo por trigonometria dos pontos xy e de envio dos dados para o *LabVIEW®* via serial.
  - Cálculo dos pontos xy: conhecendo o ângulo da polia movida no instante da leitura do sensor ToF, realiza o cálculo do ponto xy por trigonometria.
  - Cria uma *string* com o valor da posição da polia movida e os valores lidos dos 4 sensores ToFs, enviando via serial ao *LabVIEW®*, que realiza a plotagem do gráfico.

O código completo pode ser verificado no APÊNDICE G - CÓDIGO DO SISTEMA LIDAR.

### 3.6 LabVIEW®

Para melhor análise e visualização do funcionamento do sistema LIDAR foi idealizado a comunicação serial com o LabVIEW® para visualização gráfica em tempo real dos pontos xy lidos pelos 4 sensores ToFs.

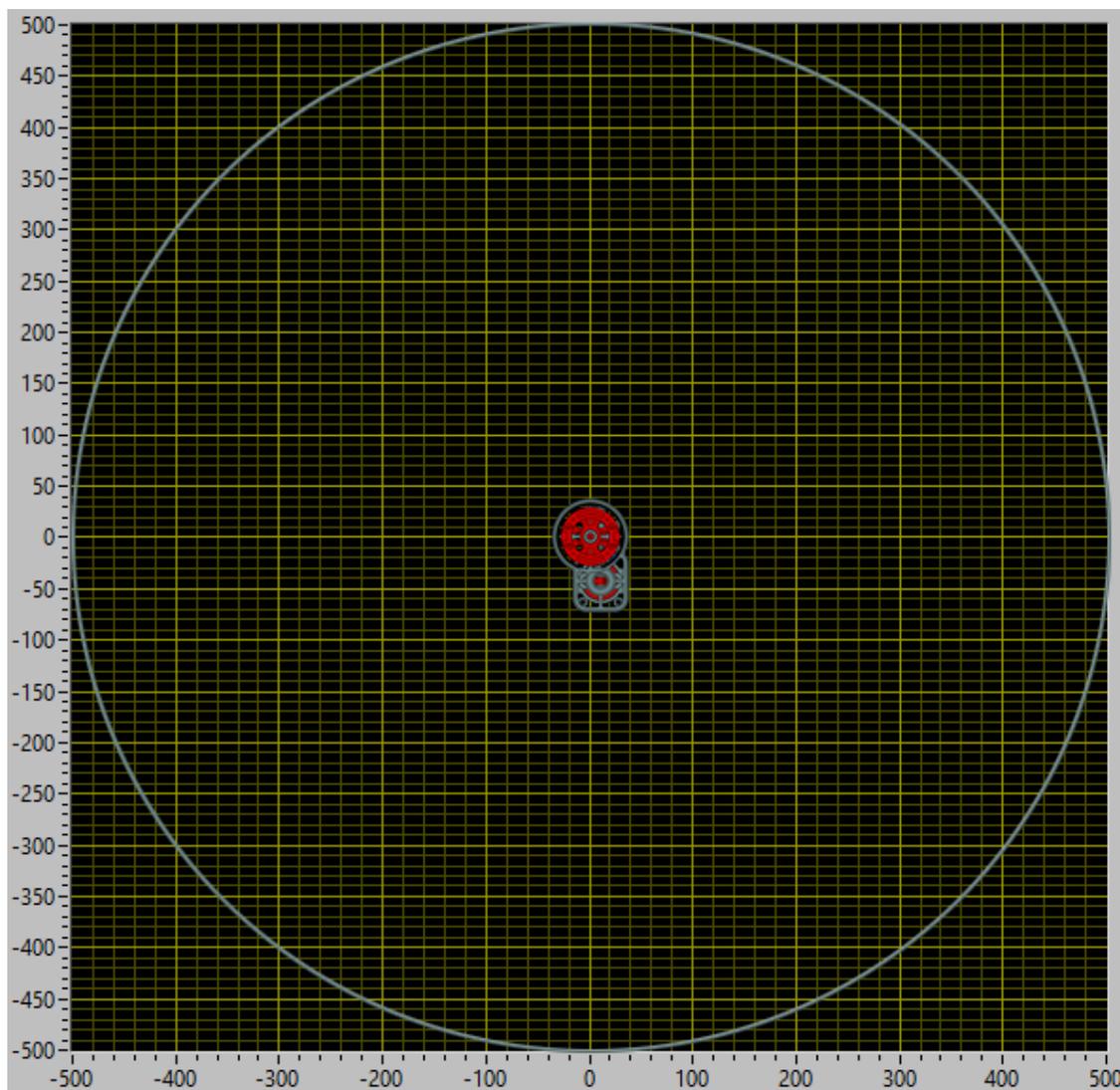
A informação é enviada em *string* com o ângulo, valor do eixo da abcissa e valor do eixo da coordenada, separados por TAB, conforme linha do Código 2 da programação em C.

```
for (int i = 0; i < 4; i++) {
    str_data[i] = counter_angle_current;
    str_data[i] += "\t";
    str_data[i] += calculated_xy_point[i][0];
    str_data[i] += "\t";
    str_data[i] += calculated_xy_point[i][1];
    Serial.println(str_data[i]);
}
```

**Código 2**

O *Block Diagram* completo criado no LabVIEW® para essa análise pode ser verificado no APÊNDICE F - *BLOCK DIAGRAM PARA COMUNICAÇÃO DO LIDAR*.

Os 4 pontos dos sensores ToFs são apresentados graficamente e atualizados a cada leitura dos sensores ToFs da Tarefa 4, ou seja, a cada 40ms, conforme mencionado no item 3.5 e ilustrado na Figura 42 com o resultado do gráfico *XY Graph* do LabVIEW® formatado com um diâmetro de 1000mm, representado pelo eixo x de -500mm a 500mm e pelo eixo y também de -500mm a 500mm, logo, o ponto (0, 0) é o centro da circunferência, coincidente com o raio de giro dos sensores ToFs do sistema LIDAR, representado no gráfico.

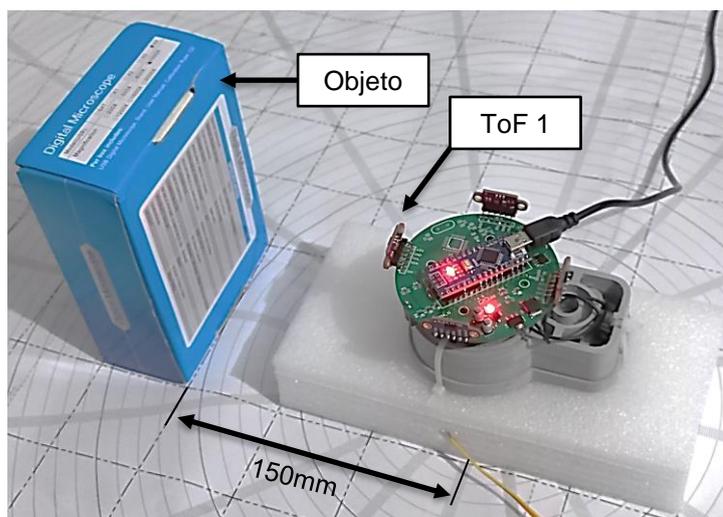
Figura 42: Pontos dos sensores ToFs no *LabVIEW*®

Fonte: Autor, 2022

### 3.7 Ajuste de *Offset*

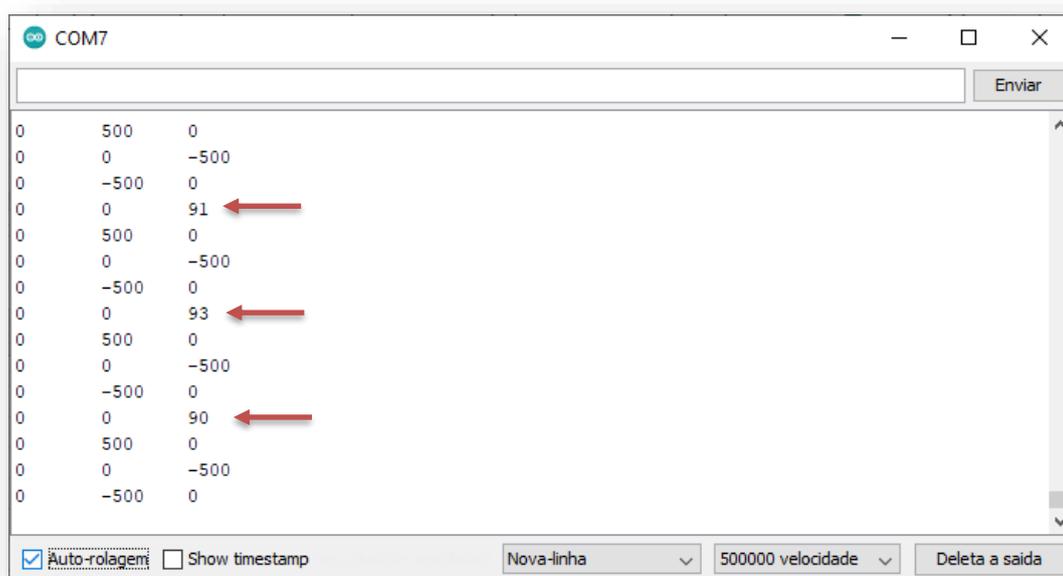
Para o ajuste de *offset*, foi desabilitado a rotação do motor DC e posicionado a polia movida de forma que os sensores se alinhassem com os eixos da abcissa e da coordenada, coletado 5 amostras de 5 distâncias diferentes para cada 1 dos 4 sensores ToFs e realizando a média simples da diferença entre os valores lidos pelos sensores ToFs e o valor medido de forma direta, para inserção da média da diferença de cada sensor ToF no código C na função de cálculo dos pontos xy. A Figura 43 ilustra o posicionamento do objeto no gabarito, a Figura 44 apresenta os valores lidos e a Figura 45 o resultado gráfico no *LabVIEW*®.

Figura 43: Posicionamento de objeto para calibração à 150mm



Fonte: Autor, 2022

Figura 44: Histórico de valores lidos pelo sensor ToF 1 com o objeto estático



Fonte: Autor, 2022



**Tabela 3.7 Dados coletados para ajuste de *offset* do sensor ToF 2**

Sensor ToF	Valor Lido [mm]	Valor Medido [mm]	Diferença [mm]	Eixo
2	127,6	150	22,4	+X
2	175,0	200	25,0	+X
2	236,6	250	13,4	+X
2	290,2	300	9,8	+X
2	471,0	450	-21,0	+X
Média			10	

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 3.8 Dados coletados para ajuste de *offset* do sensor ToF 3**

Sensor ToF	Valor Lido [mm]	Valor Medido [mm]	Diferença [mm]	Eixo
3	134,6	150	15,4	-Y
3	181,2	200	18,8	-Y
3	234,4	250	15,6	-Y
3	289,6	300	10,4	-Y
3	470,2	450	-20,2	-Y
Média			8	

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 3.9 Dados coletados para ajuste de *offset* do sensor ToF 4**

Sensor ToF	Valor Lido [mm]	Valor Medido [mm]	Diferença [mm]	Eixo
4	113,2	150	36,8	-X
4	166,2	200	33,8	-X
4	261,8	250	33,2	-X
4	270,0	300	30,0	-X
4	412,4	450	37,6	-X
Média			34	

Fonte: Autor, 2022

Com esses dados o ajuste de *offset* foi realizado no código conforme Código 3 na programação em C.

```
Value_ToF1 = Read_ToF1.readRangeContinuousMillimeters ()+51;  
Value_ToF2 = Read_ToF2.readRangeContinuousMillimeters ()+10;  
Value_ToF3 = Read_ToF3.readRangeContinuousMillimeters ()+ 8;  
Value_ToF4 = Read_ToF4.readRangeContinuousMillimeters ()+34;
```

**Código 3**

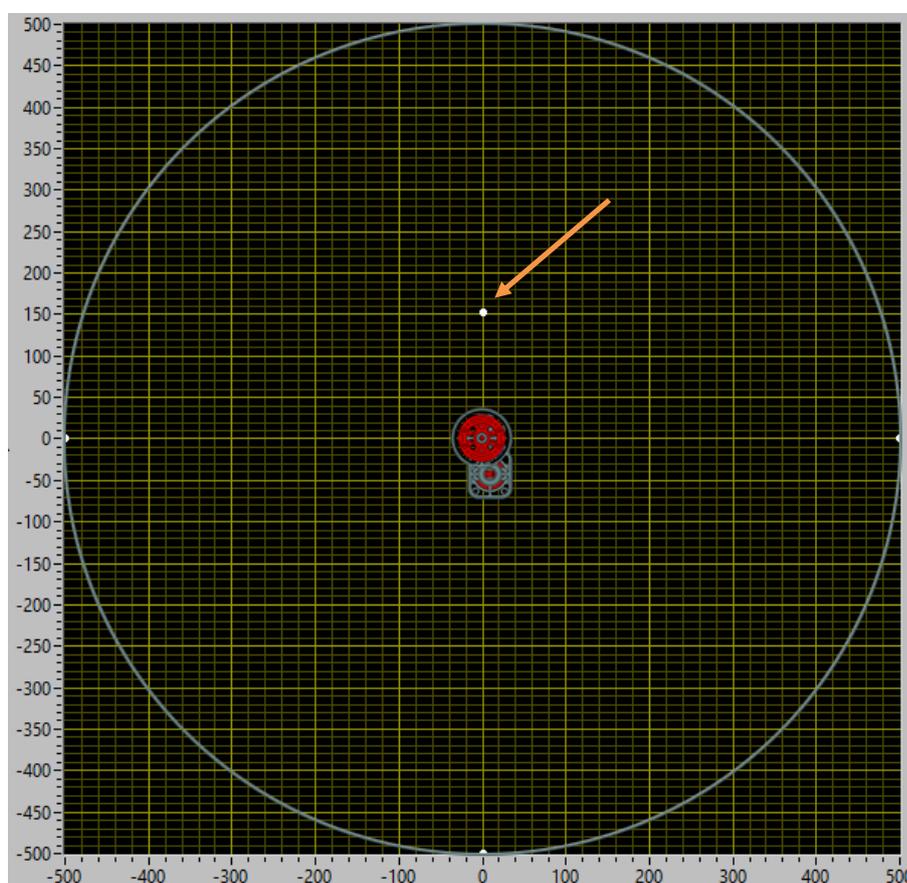
### 3.8 Análise do Sistema LIDAR

Foi coletado amostras de tempo de execução de cada tarefa, individualmente, para um melhor ajuste de tempo de cada tarefa no código C.

O gabarito milimetrado da Figura 41 do item 3.4 também foi aplicado para teste do sistema LIDAR, com objetos estáticos, de geometria e dimensional diferentes, registrando os gráficos do *LabVIEW®*, o histórico de pontos de varreduras da polia movida para sobreposição dos valores em gráfico de dispersão no *Excel®* e a projeção do resultado esperado.

A Figura 46 ilustra o método para registro do resultado gráfico no *LabVIEW®* de uma das medições após ajuste de *offset*.

Figura 46: Resultado pós calibração em objeto à 150mm do centro



Fonte: Autor, 2022

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Especificações Gerais

A Tabela 4.1 apresenta os valores médios de tempos entre leituras do ângulo da polia movida (sensores ToFs), a referência angular de cada posição da polia movida para cada sensor ToF, configurado o PWM com *duty cycle* de 100% (condição de menor tempo entre as leituras).

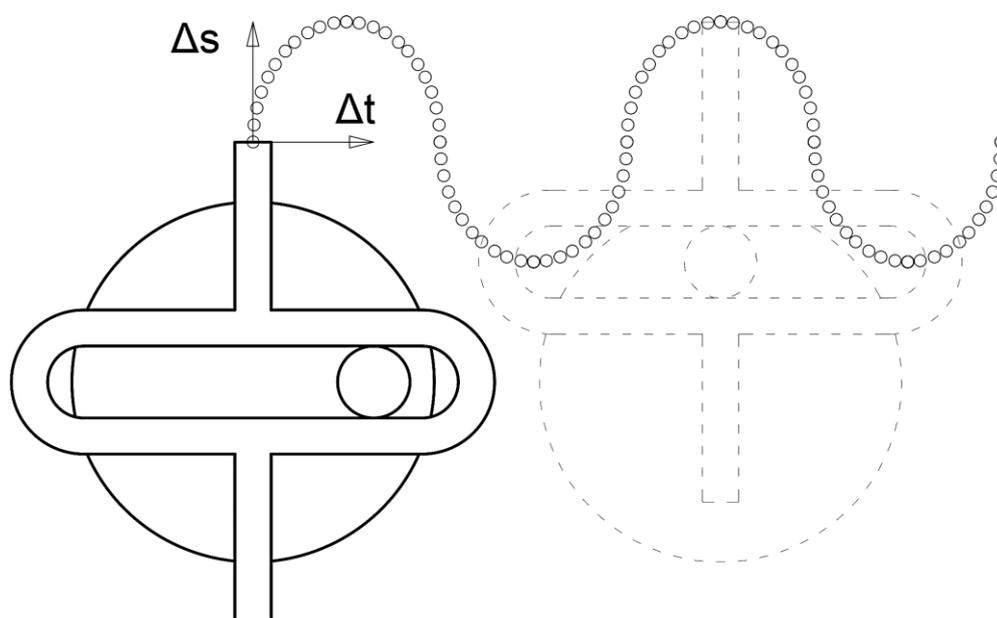
**Tabela 4.1 Tempos de leitura entre cada posição angular**

Posição Angular	Referência ToF 1 [°]	Referência ToF 2 [°]	Referência ToF 3 [°]	Referência ToF 4 [°]	Tempo [ ms ]
0	0,00	90,00	180,00	270,00	84,0
1	351,82	81,82	171,82	261,82	4,3
2	343,64	73,64	163,64	253,64	5,3
3	335,45	65,45	155,45	245,45	6,0
4	327,27	57,27	147,27	237,27	7,7
5	319,09	49,09	139,09	229,09	8,7
6	310,91	40,91	130,91	220,91	9,3
7	302,73	32,73	122,73	212,73	10,0
8	294,55	24,55	114,55	204,55	11,3
9	286,36	16,36	106,36	196,36	12,7
10	278,18	8,18	98,18	188,18	7,0
11	270,00	0,00	90,00	180,00	100,3

Fonte: Autor, 2022

A diferença entre leituras de cada ângulo apresentadas na Tabela 4.1 são esperadas, considerando que a velocidade escalar linear da polia movida não é constante, dado o seu movimento de rotação ser em função de um movimento linear com aceleração e desaceleração, conforme Figura 47.

Figura 47: Deslocamento linear em função do tempo



Fonte: Autor, 2022

Além disso, os pontos extremos como o 0 (ângulos: ToF 1 0°, ToF 2 90°, ToF 3 180° e ToF 4 270°) e o 11 (ângulos: ToF 1 270°, ToF 2 0°, ToF 3 90° e ToF 4 180°), tem deslocamento angular maior, de forma a garantir todo o curso da polia movida dentro dos 90°, justificando o maior tempo nesses extremos em relação ao tempo dos demais ângulos. O resultado é que a detecção de uma nova posição angular pode ocorrer entre 4,3ms a 100,3 ms.

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios de tempos de processamento de cada tarefa do código C do sistema LIDAR.

**Tabela 4.2 Tempos de cada tarefa dentro do código C**

Tarefa	Void	Tempo [ms]
Ler os sensores ToFs	<i>read_tof()</i>	25,45
Calcular os pontos xy	<i>pointxy_operation()</i>	0,04
Enviar os pontos ao <i>LabVIEW®</i>	<i>send_labview()</i>	1,40

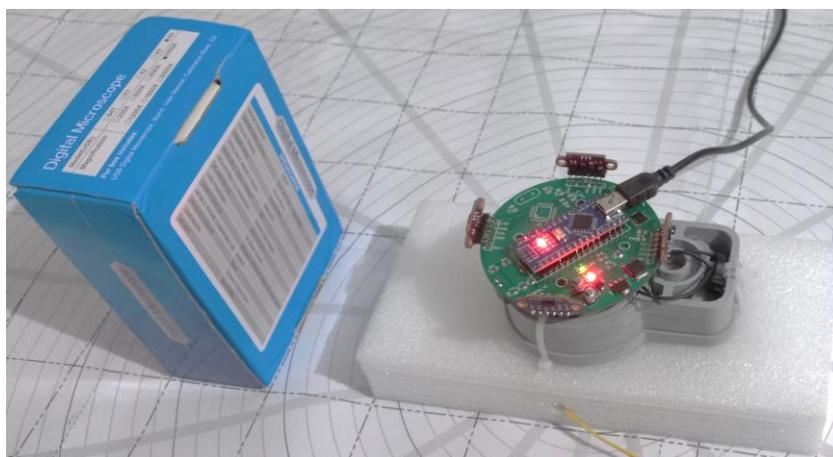
Fonte: Autor, 2022

Pela Tabela 4.2, a tarefa de maior tempo é a de leitura dos sensores ToFs, o que justifica a configuração do tempo da tarefa 4 - *send\_labview()* dentro do código C do sistema LIDAR em 40ms (60% maior que o tempo médio).

## 4.2 Validação do Ajuste de *Offset*

Com o sistema LIDAR calibrado (ajuste de *offset*), foi repetido o método descrito no item 3.7, conforme registro da Figura 48, com o protótipo físico completo, obtendo-se os resultados da Tabela 4.3, que apresenta os valores médios lidos da medição indireta (sensor ToF), os valores reais de medida direta, a diferença entre os valores (medida direta e indireta) e a média das diferenças para o sensor ToF 1, assim como as Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6 apresentam os dados coletados para os sensores ToF 2 a ToF 4.

Figura 48: Detecção de objeto opaco pelo sensor ToF 1 (sem rotação)



Fonte: Autor, 2022

Tabela 4.3 Dados coletados pós ajuste de *offset* do sensor ToF 1 (sem rotação)

Sensor ToF	Valor Lido [mm]	Valor Medido [mm]	Diferença [mm]	Eixo
1	147,5	150	2,5	+Y
1	197,0	200	3,0	+Y
1	252,3	250	-2,3	+Y
1	299,3	300	0,8	+Y
1	452,3	450	-2,3	+Y
Média			0	

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 4.4 Dados coletados pós ajuste de *offset* do sensor ToF 2 (sem rotação)**

Sensor ToF	Valor Lido [mm]	Valor Medido [mm]	Diferença [mm]	Eixo
2	143,8	150	6,3	+X
2	191,3	200	8,8	+X
2	246,0	250	4,0	+X
2	303,0	300	-3,0	+X
2	481,0	450	-31,0	+X
Média			-3	

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 4.5 Dados coletados pós ajuste de *offset* do sensor ToF 3 (sem rotação)**

Sensor ToF	Valor Lido [mm]	Valor Medido [mm]	Diferença [mm]	Eixo
3	128,3	150	21,8	-Y
3	185,3	200	14,8	-Y
3	230,8	250	19,3	-Y
3	282,8	300	17,3	-Y
3	449,0	450	1,0	-Y
Média			15	

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 4.6 Dados coletados pós ajuste de *offset* do sensor ToF 4 (sem rotação)**

Sensor ToF	Valor Lido [mm]	Valor Medido [mm]	Diferença [mm]	Eixo
4	149,3	150	0,8	-X
4	196,5	200	3,5	-X
4	249,0	250	1,0	-X
4	298,8	300	1,3	-X
4	429,5	450	20,5	-X
Média			5	

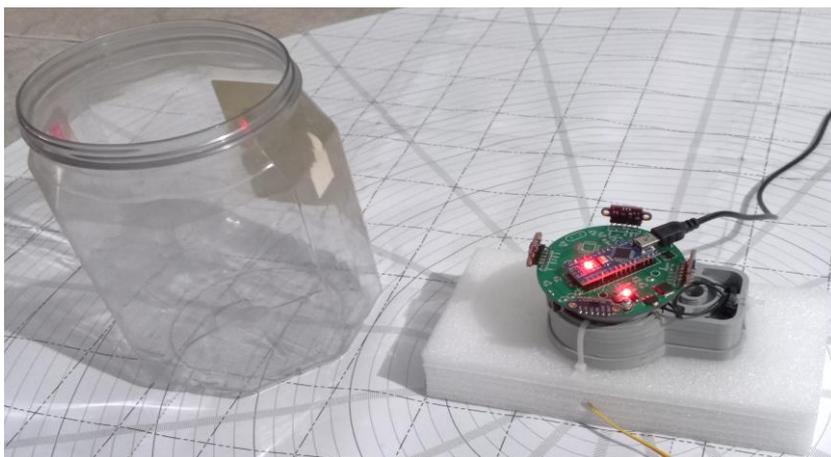
Fonte: Autor, 2022

Com esses dados, verificou-se que deve ser considerado na aplicação desse projeto de sistema LIDAR, uma tolerância de  $\beta_{+15}^{-15} mm$  na leitura dos sensores ToFs.

### 4.3 Comportamento dos Sensores em Objetos Translúcidos

Para análise do comportamento dos sensores em objetos translúcidos foi aplicado o mesmo método do item 4.2, em um objeto translúcido, conforme Figura 49, obtendo-se os resultados da Tabela 4.7, Tabela 4.8, Tabela 4.9 e Tabela 4.10, respectivamente para os sensores ToF 1, 2, 3 e 4.

Figura 49: Detecção de objeto translúcido pelo sensor ToF 1 (sem rotação)



Fonte: Autor, 2022

Tabela 4.7 Dados coletados pós ajuste de *offset* do sensor ToF 1 (sem rotação)

Sensor ToF	Valor Lido [mm]	Valor Medido [mm]	Diferença [mm]	Eixo
1	152,3	150	-2,3	+Y
1	255,0	200	-55,0	+Y
1	278,0	250	-28,0	+Y
1	351,3	300	-51,3	+Y
1	496,5	450	-46,5	+Y
		Média	-37	

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 4.8 Dados coletados pós ajuste de *offset* do sensor ToF 2 (sem rotação)**

Sensor ToF	Valor Lido [mm]	Valor Medido [mm]	Diferença [mm]	Eixo
2	186,3	150	-36,3	+X
2	267,8	200	-67,8	+X
2	318,3	250	-68,3	+X
2	368,8	300	-68,8	+X
2	500	450	-50	+X
Média			-76	

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 4.9 Dados coletados pós ajuste de *offset* do sensor ToF 3 (sem rotação)**

Sensor ToF	Valor Lido [mm]	Valor Medido [mm]	Diferença [mm]	Eixo
3	153,5	150	-3,5	-Y
3	212,5	200	-12,5	-Y
3	288,0	250	-38,0	-Y
3	351,3	300	-51,3	-Y
3	500,0	450	-50,0	-Y
Média			-31	

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 4.10 Dados coletados pós ajuste de *offset* do sensor ToF 4 (sem rotação)**

Sensor ToF	Valor Lido [mm]	Valor Medido [mm]	Diferença [mm]	Eixo
4	147,8	150	2,3	-X
4	254,3	200	-54,3	-X
4	290,0	250	-40,0	-X
4	386,3	300	-86,3	-X
4	475,0	450	-25,0	-X
Média			-41	

Fonte: Autor, 2022

Apesar de haver detecção no objeto translúcido, observa-se nesses resultados uma margem de erro razoável, normalmente para mais, devendo ser considerado na

aplicação desse projeto de sistema LIDAR, quando sujeito a objetos translúcidos, uma tolerância de  $\beta_{+5}^{-90} mm$  (onde  $\beta$  é a distância lida) na leitura dos sensores ToFs.

#### 4.4 Detecção de Geometria do Projeto

Para análise do comportamento do projeto do sistema LIDAR com os sensores ToFs em rotação, foram aplicadas 2 formas geométricas (plana e cilíndrica), opacas e estáticas, em posições diferentes no plano xy.

##### 4.4.1 Formato Plano

A Figura 50 apresenta o registro da aplicação de formato geométrico plano, a uma distância de 250mm do centro de rotação dos sensores ToFs.

Figura 50: Comportamento em objeto opaco e plano



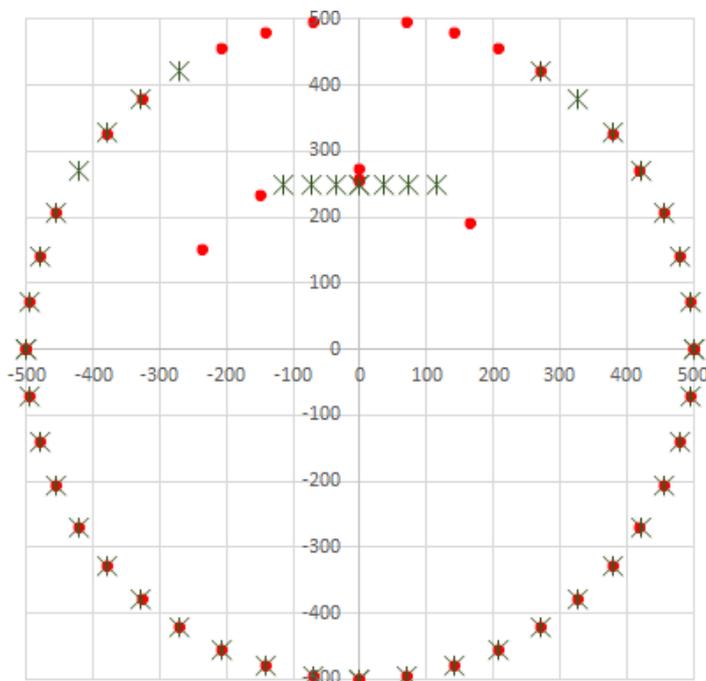
Fonte: Autor, 2022

O resultado gráfico no *LabVIEW*® pode ser verificado na Figura 51, a qual foi registrado um instante da varredura, podendo-se identificar quando a polia movida esta na posição 0, indicando um ponto (0, 275)mm do plano xy.



Já na Figura 53, os mesmos dados foram sobrepostos aos dados teóricos para melhor visualização gráfica comparativa, onde os pontos em vermelho são os dados lidos pelo LIDAR e os asteriscos em verde são os dados teóricos.

Figura 53: Gráfico comparativo entre dados teóricos e reais do objeto plano



Fonte: Autor, 2022

Traçando uma linha constante imaginária em  $y = 250$ , nota-se 3 pontos abaixo e 1 ponto acima, a qual o ponto mais próximo e mais afastado da abscissa são representados, respectivamente, por  $(-235, 151)$  e  $(0, 256)$ .

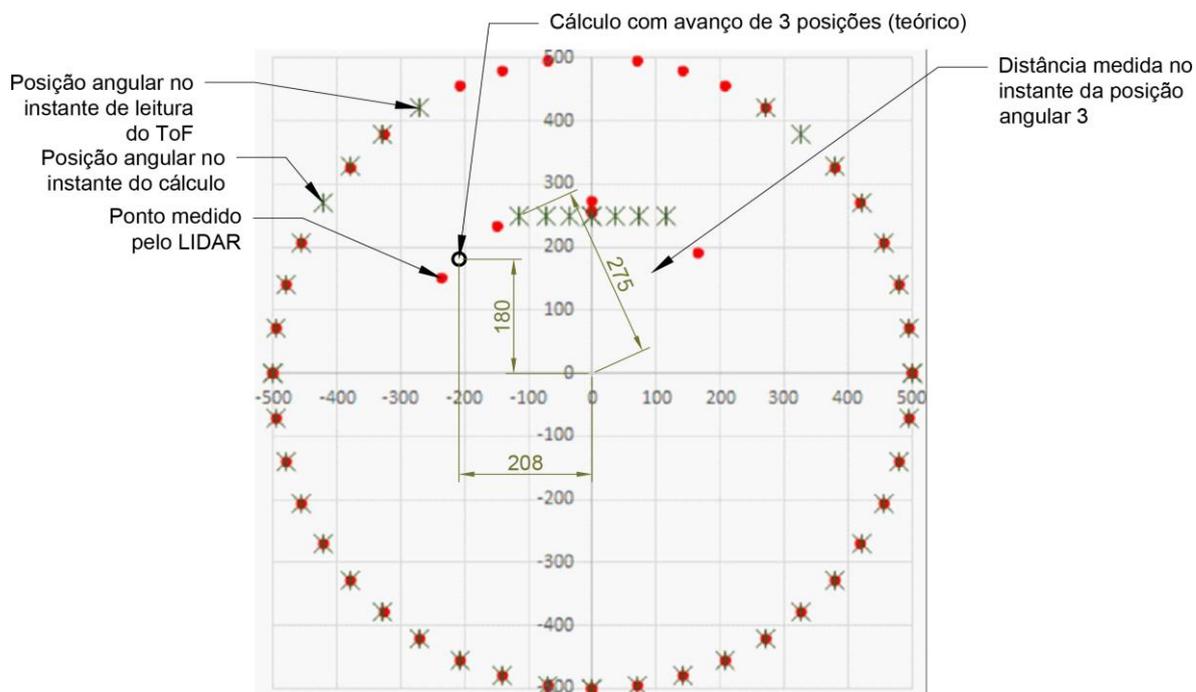
Observa-se que entre os ângulos  $335,45^\circ$  (ângulo 3 para o sensor ToF 1) e o ângulo  $24,55^\circ$  (ângulo 8 para o sensor ToF 2) houve detecção de 5 pontos (incluindo os dois pontos sob o eixo  $y$ , que são lidos pelo sensor ToF 1 e pelo sensor ToF2), havendo falha de leitura nos demais, a qual por característica do projeto, assume a leitura como valor máximo. Ainda nos pontos detectados, verifica-se uma dispersão razoável entre os valores teóricos e os valores lidos pelo LIDAR, na qual a tolerância dimensional do conjunto mecânico é uma variável que contribui para essa dispersão.

Considerando que a leitura dos sensores ToFs tem um tempo médio de  $25,45\text{ms}$  e as diferentes posições angulares podem ocorrer em tempos de  $4,3\text{ms}$  a  $12,7\text{ms}$  (desconsiderando as posições angulares 0 e 11, extremidades, de maior deslocamento angular) e a leitura da posição angular é realizada a todo instante (a cada  $1\text{ms}$ ), pode haver inferência com erro de cálculo, já que durante o

processamento do cálculo, a posição angular considerada pode já não ser a do instante de leitura do sensor ToF. Esta variável é a principal beneficiadora da dispersão dos pontos.

Exemplificando com a análise do terceiro ponto teórico em sentido anti-horário, do segundo quadrante do resultado da Figura 53, último ponto de detecção do objeto à esquerda, em que a distância é de 275mm e posição angular 3 ( $335,45^\circ$  no sensor ToF 1), a qual o ponto xy teórico é (-114, 250), nota-se que com o tempo médio de leitura dos sensores ToFs de 25,45ms pode-se no momento de execução da função de cálculo do ponto, a posição angular ter avançado mais 3 posições (considerando o tempo médio de detecção de posição angular), sendo aplicado para cálculo do ponto, o seno e cosseno da posição angular 6, resultando num ponto (-208, 180), muito próximo ao valor lido pelo LIDAR com o ponto de (-235, 151), conforme detalhes na Figura 54.

Figura 54: Variável de inferência de cálculo dos pontos xy do objeto plano



Fonte: Autor, 2022

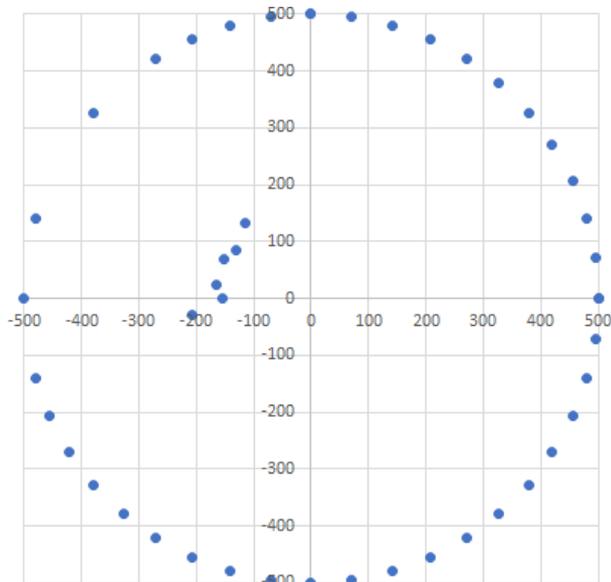
#### 4.4.2 Formato Cilíndrico

A Figura 55 apresenta o registro da aplicação da forma geométrica cilíndrica, a uma distância de 150mm do centro de rotação dos sensores ToFs.



O histórico de pontos para um ciclo de 360° foi aplicado na construção do gráfico de dispersão conforme Figura 57.

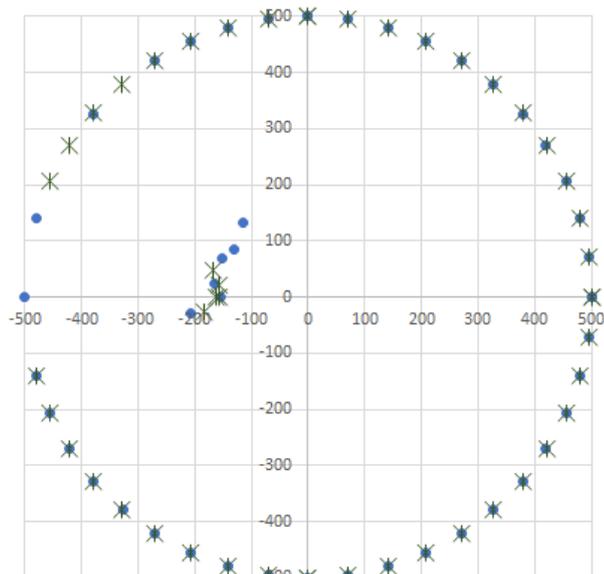
Figura 57: Gráfico com histórico de pontos de uma varredura do objeto cilíndrico



Fonte: Autor, 2022

Já na Figura 58, os mesmos dados foram sobrepostos aos dados teóricos para melhor visualização gráfica comparativa, onde os pontos em azul são os dados lidos pelo LIDAR e os asteriscos em verde são os dados teóricos.

Figura 58: Gráfico comparativo entre dados teóricos e reais do objeto cilíndrico



Fonte: Autor, 2022

Assim como no objeto plano, observa-se uma dispersão razoável entre os valores teóricos e os valores lidos pelo LIDAR, causados de forma análoga ao analisado na geometria plana.

#### 4.5 Custo do Protótipo

O custo do protótipo foi determinado por uma média de 3 cotações (exceto para a PCB que foi apenas 1 cotação), sem considerar fretes, lote mínimo, mão de obra ou recursos (energia elétrica, material de consumo, ferramentas etc) e estão descritos na Tabela 4.11, com valores em moeda brasileira em dezembro de 2022.

**Tabela 4.11 Descrição básica do custo do protótipo do sistema LIDAR**

Nome	Descrição	Identificação	Quantidade	Custo [R\$]
Resistor	10k	R1, R4:R7, R9:R12	9	0,07/unidade
Resistor	470R	R2	1	0,07/unidade
Resistor	100k	R3	1	0,07/unidade
Resistor	180R	R8, R13	2	0,07/unidade
Resistor	1k	R16	1	0,07/unidade
Capacitor	10uF	C6:C7	2	1,19/unidade
Diodo	1N4007	D1:D2	2	0,16/unidade
LED	SMD	LD1:LD2	2	0,13/unidade
Transistor	AOD4184A	Q1	1	5,95/unidade
Sensor	ITR9608	EC1:EC2	2	4,55/unidade
Regulador	LM7805	U2	1	2,13/unidade
Regulador	AMS1117-5.0	U4	1	2,16/unidade
A.O.	LM393	U3	1	1,93/unidade
Arduino	Nano	U5	1	31,12/unidade
Motor DC	3 a 6V	MT	1	12,90/unidade
PCB	JLCPCB	N.A.*	1	2,13/unidade
<i>Hardware</i>	PLA	N.A.*	84 [g]	99,69/kg
*N.A.: Não Aplicado			Total	79,73

Fonte: Autor, 2022

Considerando uma produção em série, o custo será menor e dependente do volume anual, principalmente para o *hardware* mecânico, pois pode deixar de ser produzido em impressora 3D e ser produzido com o processo de injeção plástica.

## 5 CONCLUSÕES

Os tempos de leitura de posição angular são dependentes da rotação da polia movida, a qual quanto maior a rotação, menor o tempo entre as leituras e, para a rotação máxima do motor DC, os tempos são satisfatórios, mesmo com relação ao maior tempo de leitura nos extremos do ciclo, onde ocorre a reversão da rotação.

Para as funções do código C, a função de leitura dos sensores ToFs acaba sendo um fator limitador, apresentando em média um tempo de 25,45ms para a leitura dos 4 sensores ToFs, muito maior do que a capacidade de leitura da posição angular, mesmo assim, ainda pode-se obter uma varredura completa em menos de 2 segundos. Logo, mesmo que o objeto seja detectado por apenas um ponto (dimensional do objeto menor que 70mm, considerando o raio de ação e o ângulo entre os pontos de medição), sendo necessário uma varredura completa para sua detecção, é possível esse protótipo acusar um objeto se aproximando a 1k/h, uma característica funcional dentro da proposta de aplicação desse projeto.

A medição de distância com objetos opacos, estáticos e sem rotação dos sensores ToFs traz margens de erro desprezíveis, aproximadamente de 3% em relação ao campo de ação, entretanto, não se aplica a este projeto. Todavia, em objetos translúcidos, sua aplicação já não é satisfatória, considerando a margem de erro em 18%, mesmo na condição de objeto estático e sem rotação dos sensores ToFs.

Já com os sensores em rotação e em objetos estáticos e opacos, apesar das dispersões apresentadas, ainda torna a aplicação desse projeto aplicável, considerando que a relação entre os pontos detectados e os pontos que deveria detectar, tomando como exemplo o ensaio de objeto plano, foi de 71%.

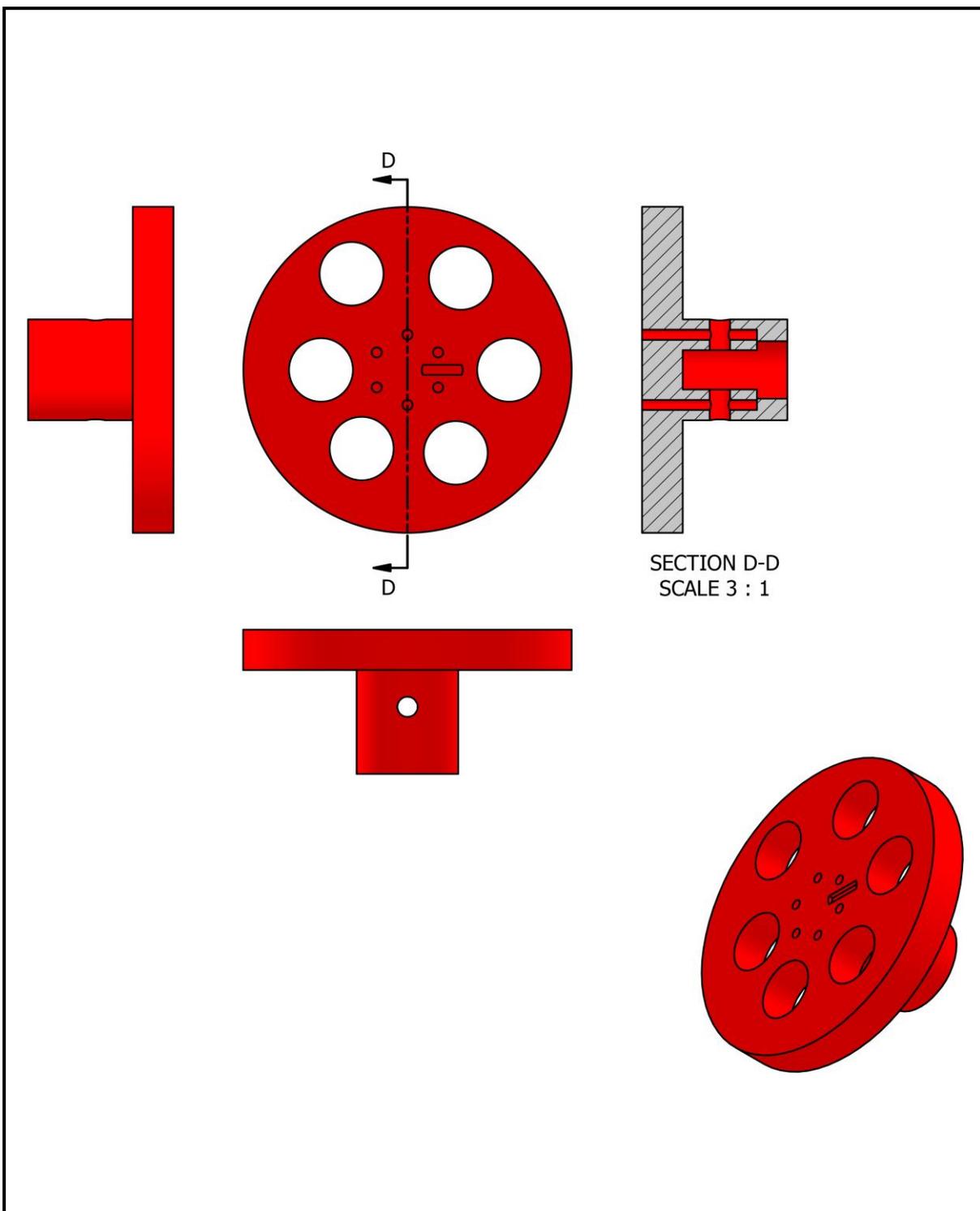
Melhorias podem ser implementadas e reavaliado os resultados, principalmente no cálculo dos pontos do plano xy e, assim, considerando a real aplicação desse sistema LIDAR em um sistema autônomo veicular em escala, obter resultados de ensaios com cenário dinâmico.

Logo, como proposta futura destacam-se melhorias no método de cálculo dos pontos xy e aplicação do projeto em veículo em escala, avaliando o comportamento de detecção em cenário dinâmico, com objetos em movimento em relação ao sistema LIDAR.

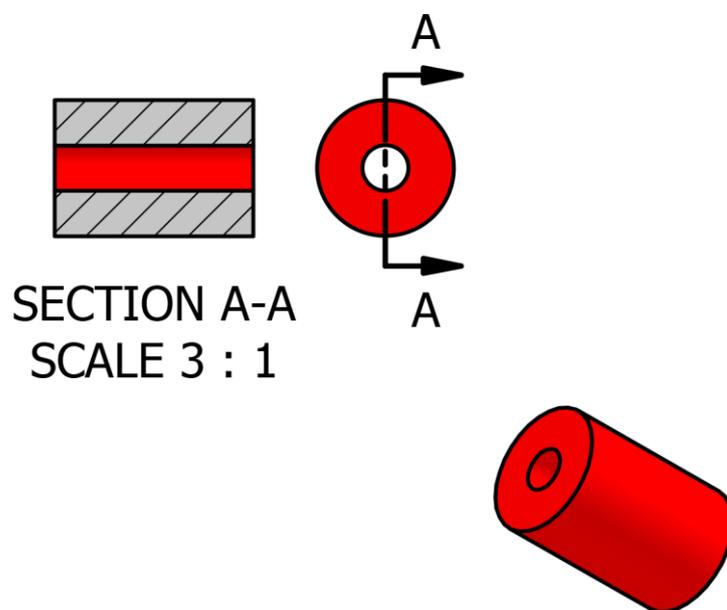
## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Watson G. The Inspirational Life Story Of Henry Ford: From Automobiles To Philosophy. In: Inspirational Life Stories. 2013. p. 19.
2. R. RGBJESC. Projeto de Engenharia Mecânica. 7°. 2005. 960 p.
3. Provenza F. Projetista de Máquinas. In: Pro-tec. 1996. p. 481.
4. Casillas AL. Máquinas. Formulário Técnico. 2013. 638 p.
5. Brown HT. 507 Movimentos Mecânicos: Mecanismos e Dispositivos. 2019. 176 p.
6. Aranda S. 3D Printing Failures: How to Diagnose and Repair All Desktop 3D Printing Issues. 2022nd ed. 2022. 492 p.
7. Ultimaker. 3D printing in higher education and research. 2022.
8. Ultimaker. Important 3D printing *software* features. 2020.
9. STMicroelectronic [Internet]. 2022 [cited 2022 Jun 12]. Available from: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/time-of-flight-sensors.html>
10. Arduino [Internet]. <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>. 2022 [cited 2022 Sep 6]. Available from: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>

APÊNDICE A - CROQUI DO *HARDWARE* MECÂNICO VERSÃO 1.3



<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 01	<b>REV</b> 03
<b>SHEET</b> 01 OF 14	Polia Motora		



**DRAW**  
Douglas Prieto da Silva

Fatec Santo André

**DATE**  
July 16, 2022

**TITLE**  
LIDAR - *Mechanical Hardware Design*

**REVISION**  
October 28, 2022

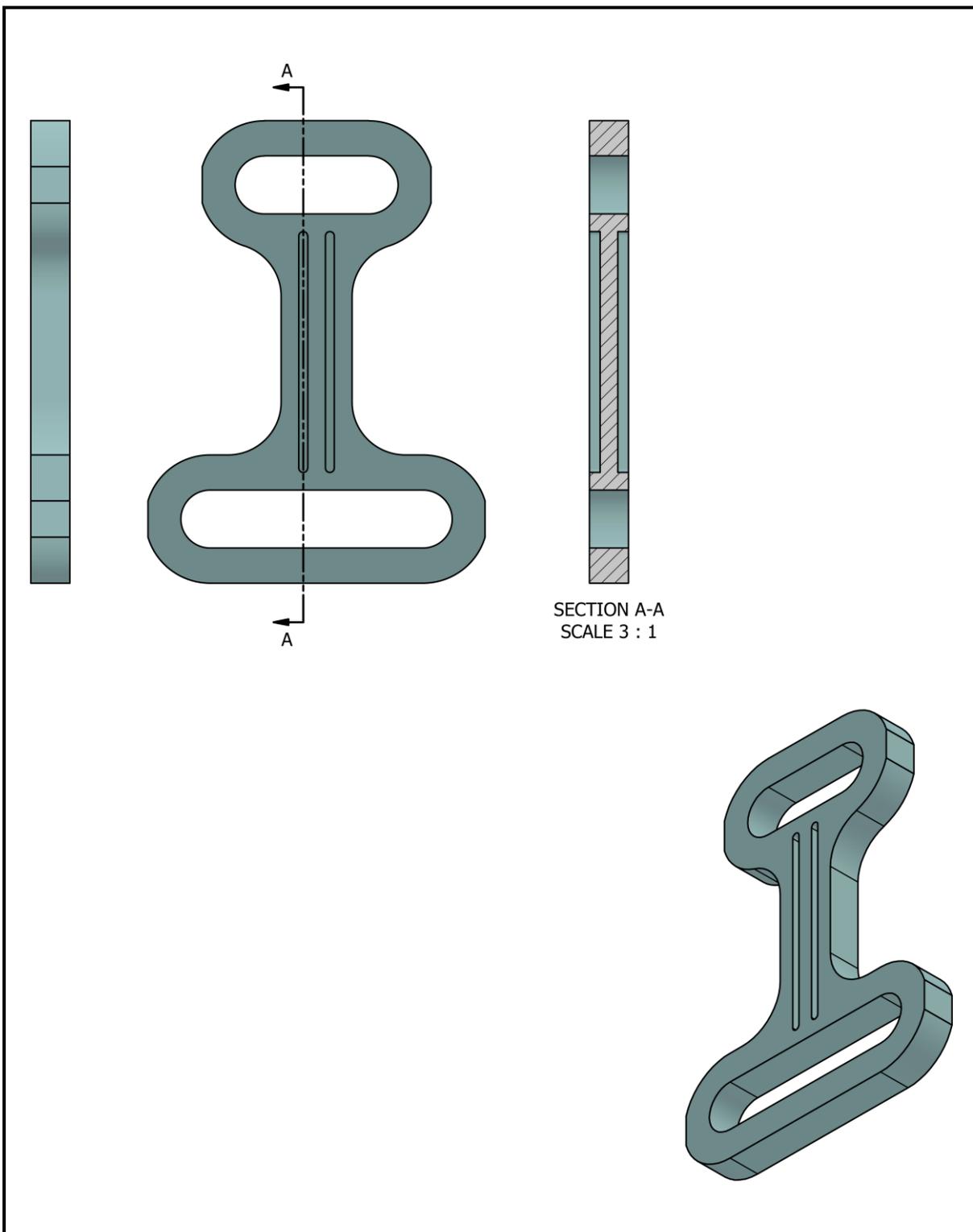
**SIZE**  
A4

**DWG No**  
02

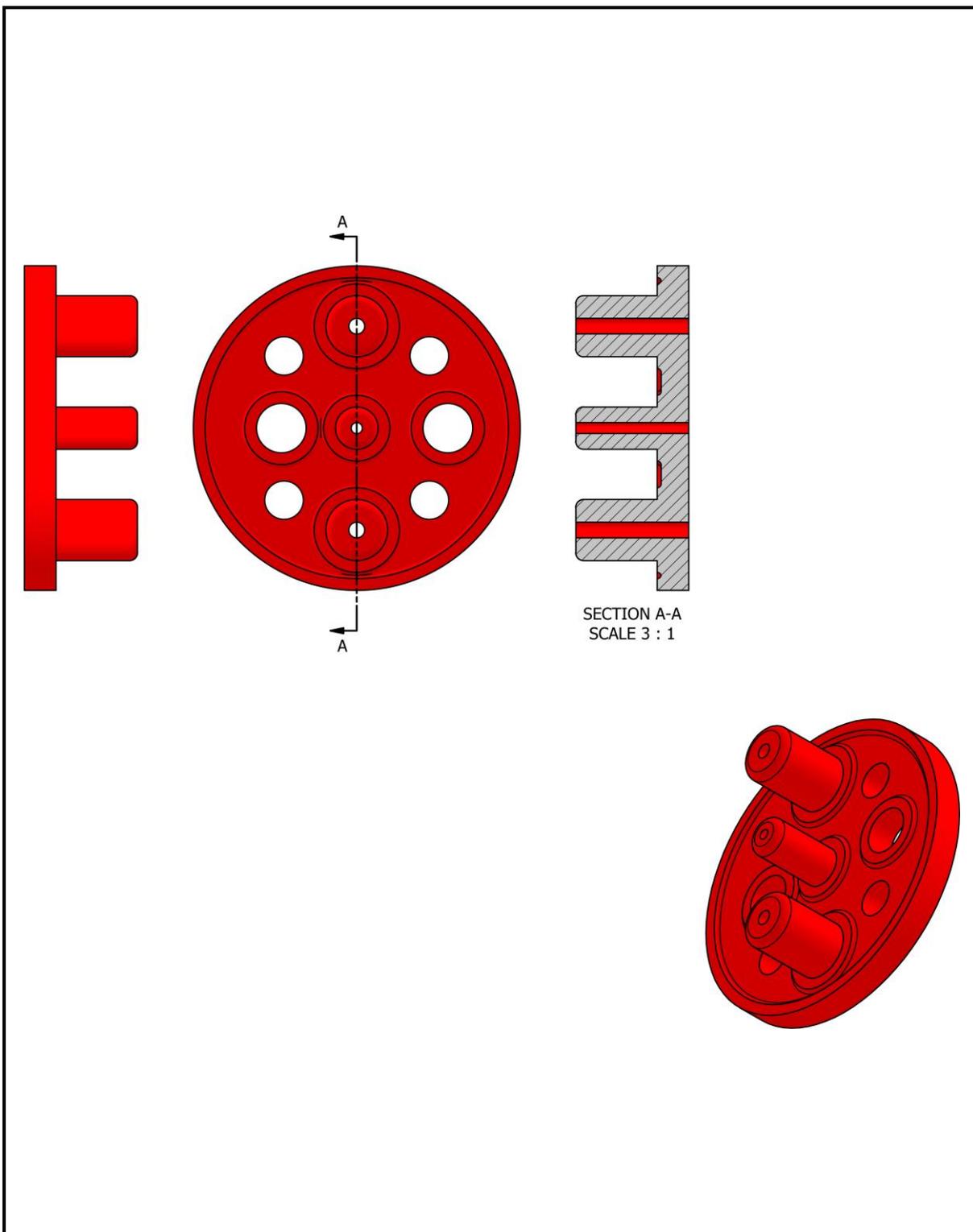
**REV**  
03

**SHEET 02 OF 14**

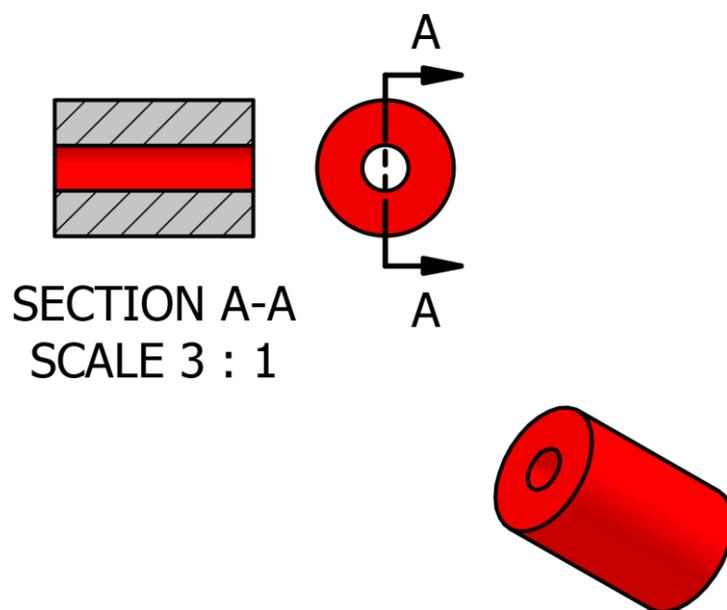
Pino da Polia Motora



<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 03	<b>REV</b> 03
<b>SHEET 03 OF 14</b>	Biela		



<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 04	<b>REV</b> 03
<b>SHEET 04 OF 14</b>	Polia Movida		



**DRAW**  
Douglas Prieto da Silva

Fatec Santo André

**DATE**  
July 16, 2022

**TITLE**  
LIDAR - *Mechanical Hardware Design*

**REVISION**  
October 28, 2022

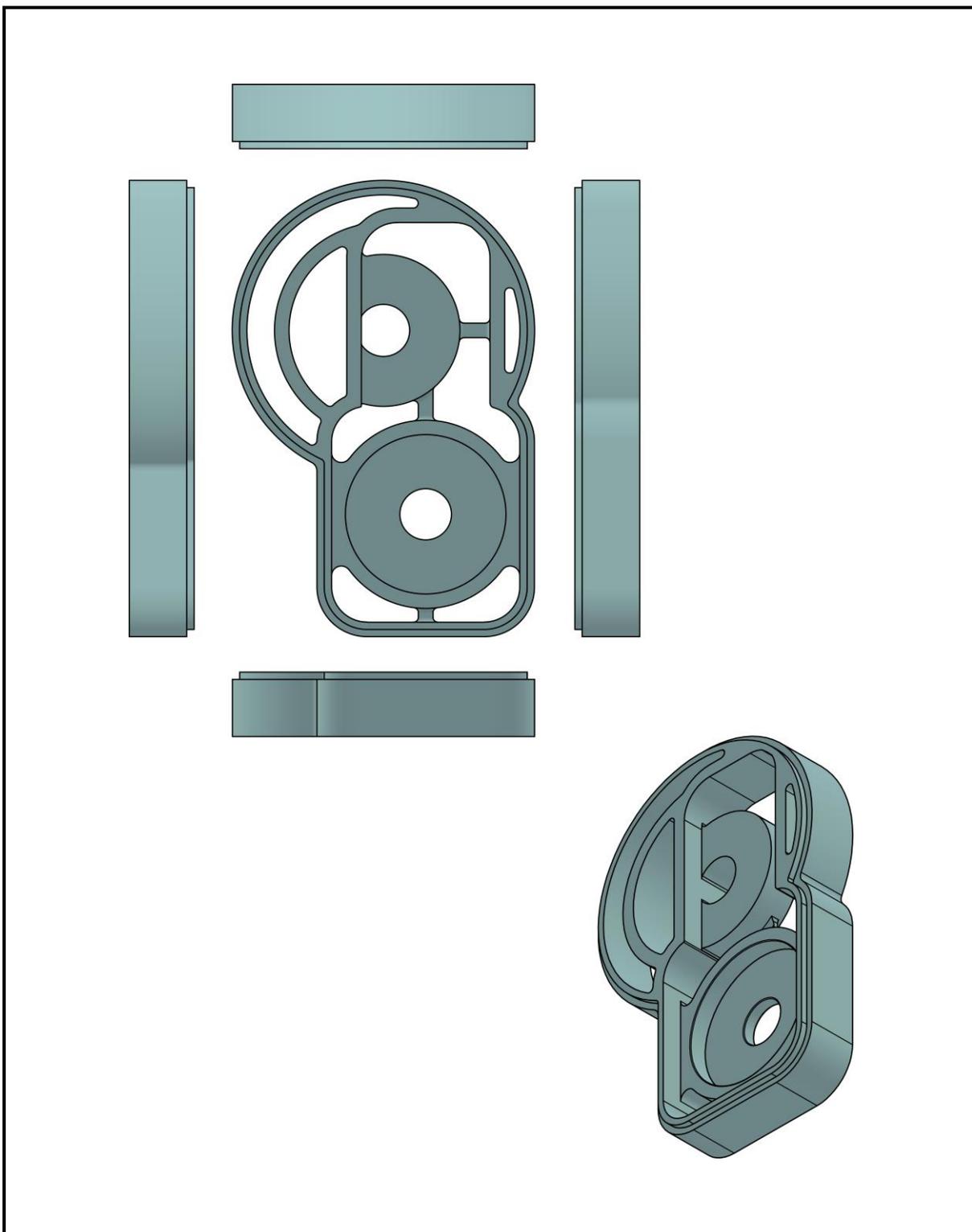
**SIZE**  
A4

**DWG No**  
05

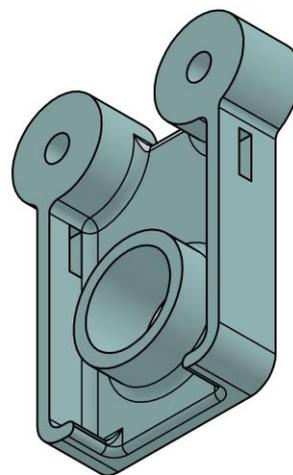
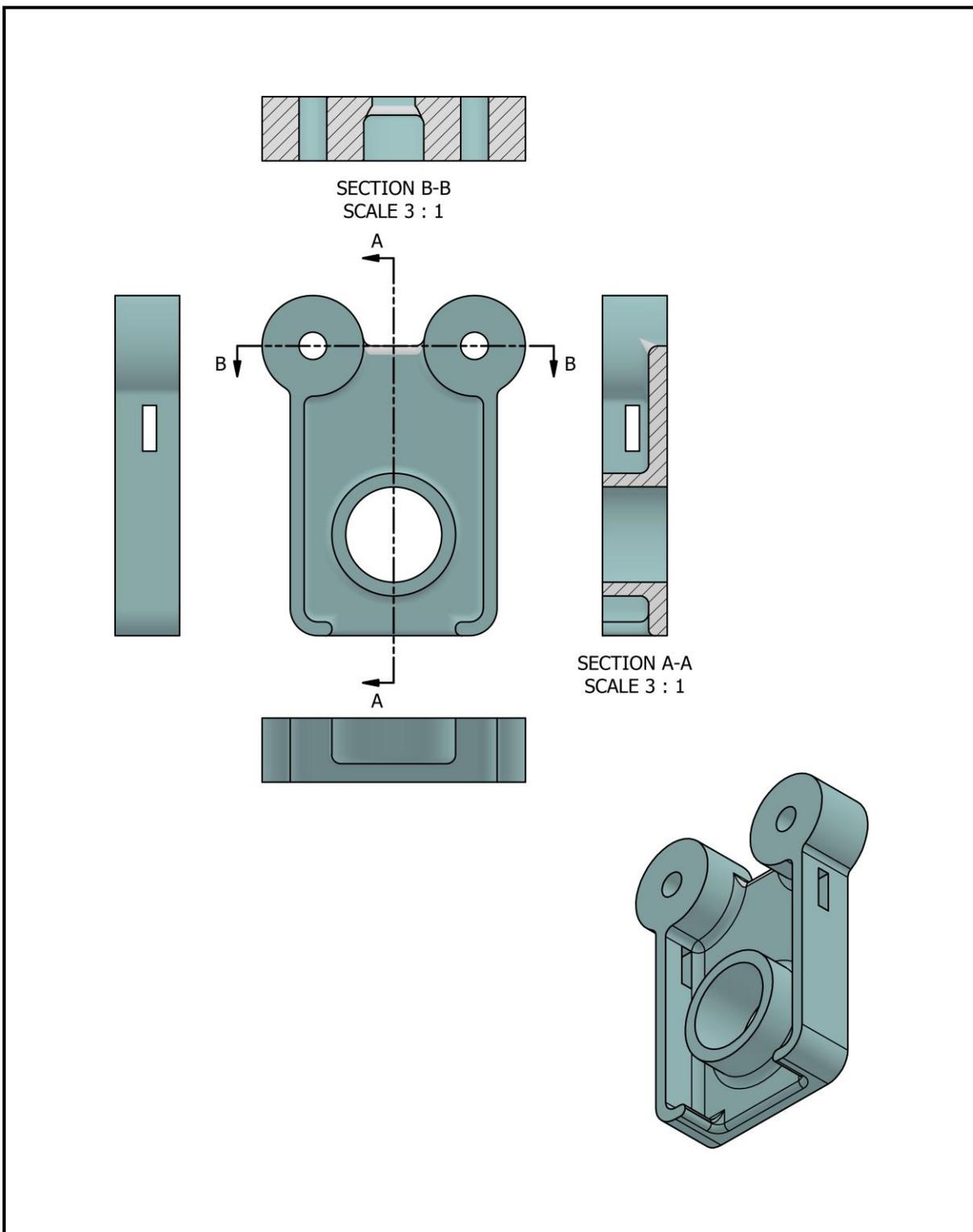
**REV**  
03

**SHEET 05 OF 14**

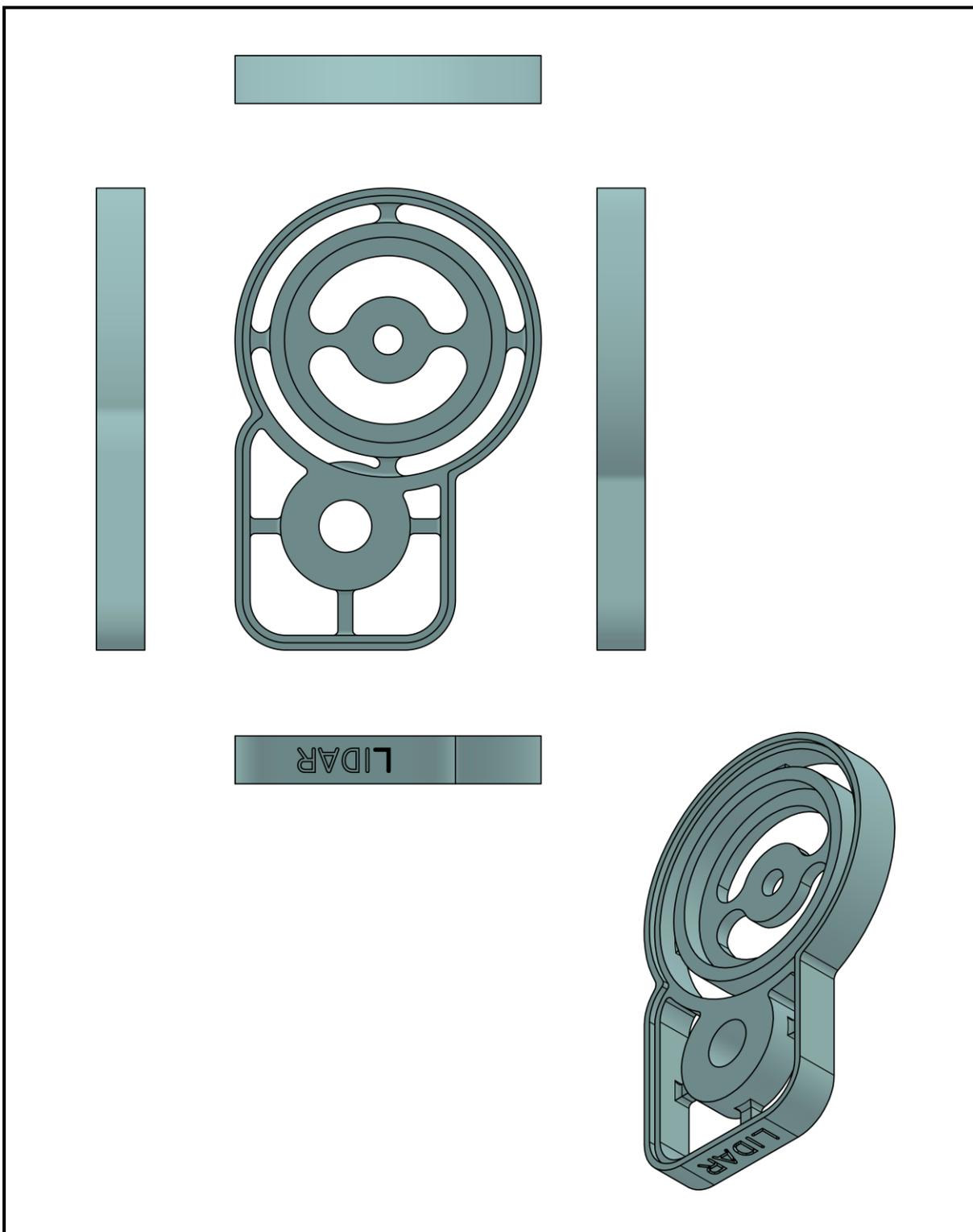
Pino da Polia Movidá



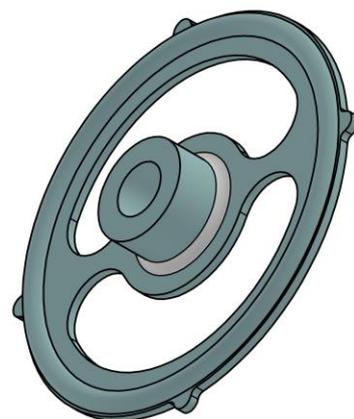
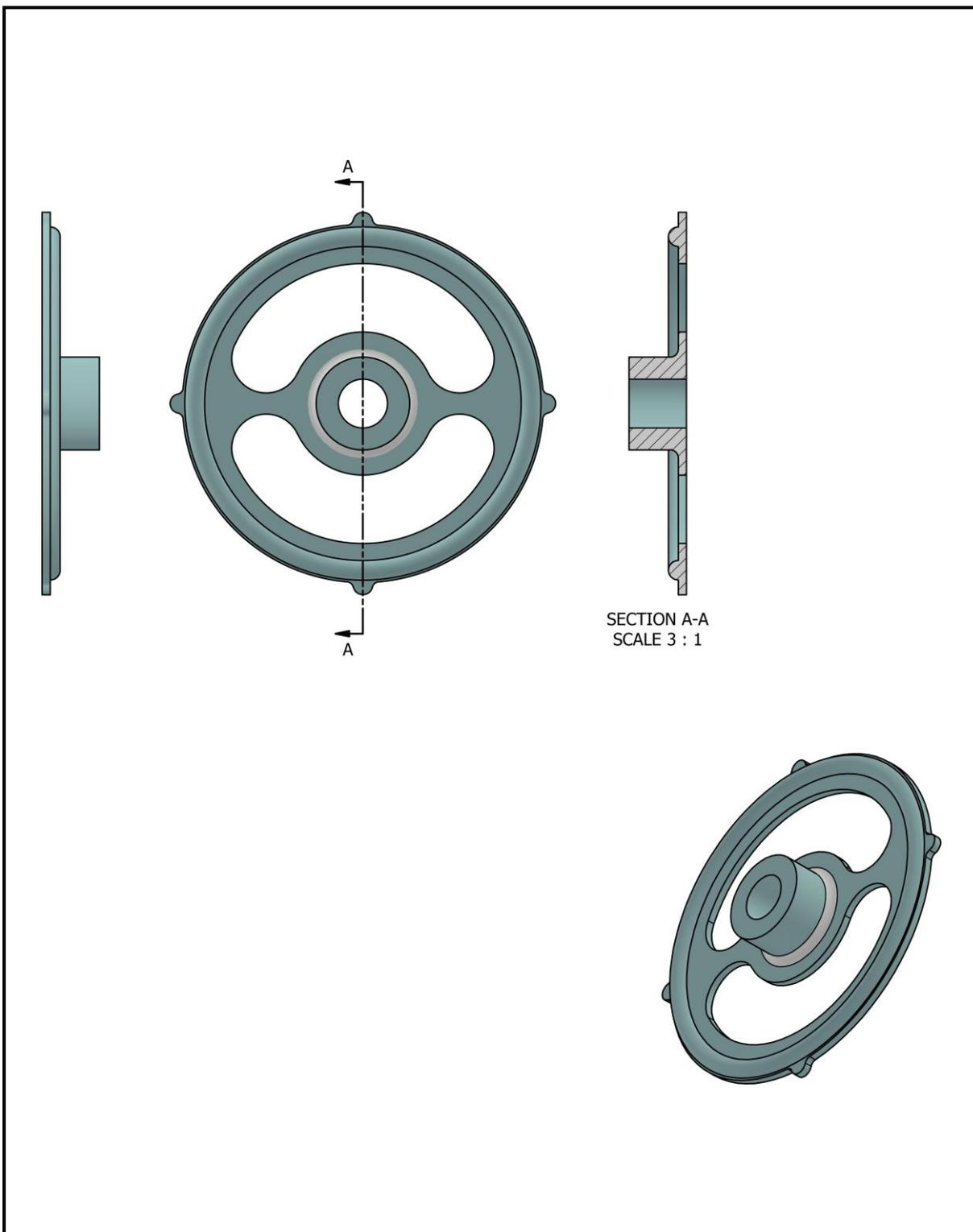
<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 06	<b>REV</b> 03
<b>SHEET 06 OF 14</b>	Case Inferior		



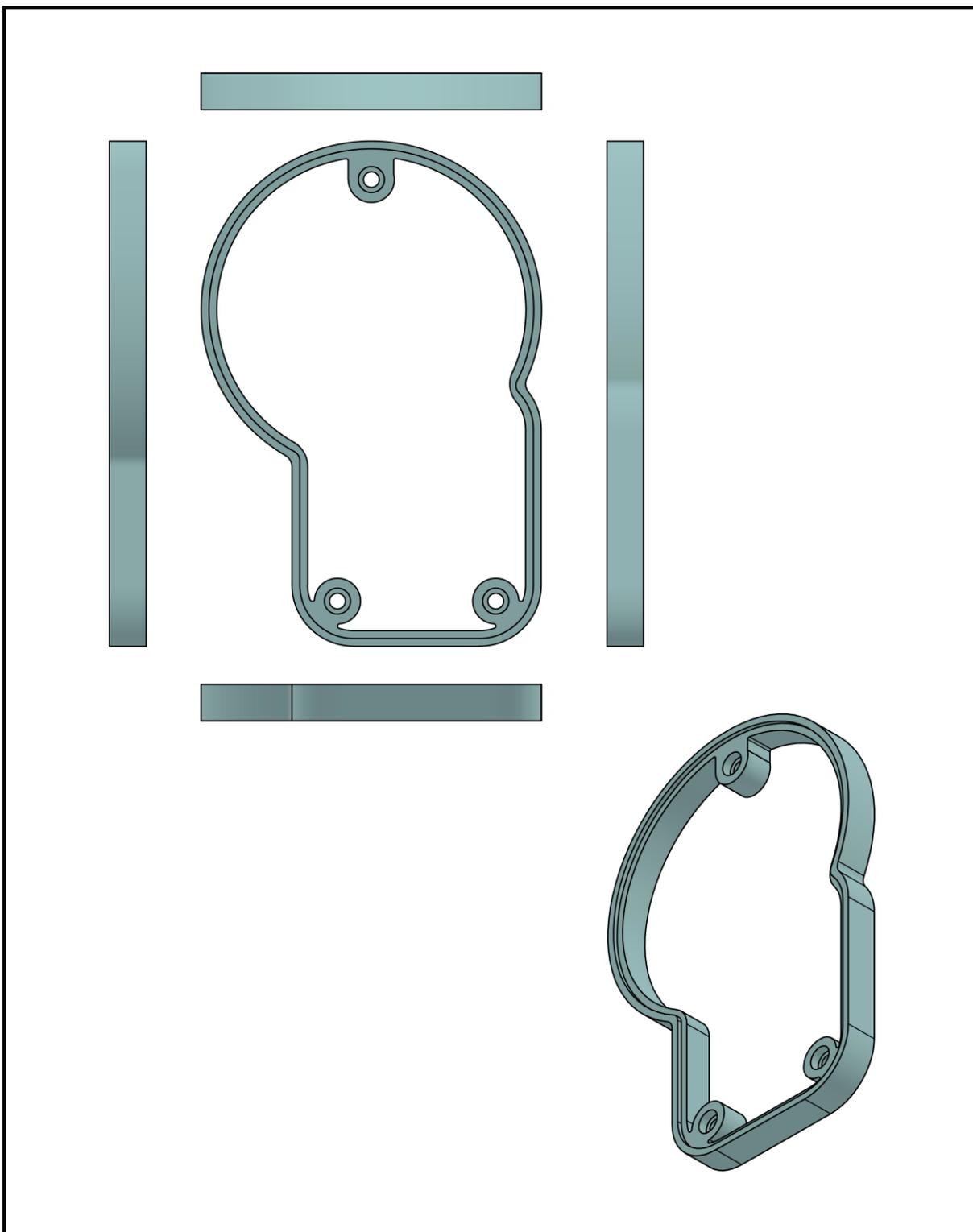
<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 07	<b>REV</b> 03
<b>SHEET 07 OF 14</b>	Acabamento do Case Inferior		



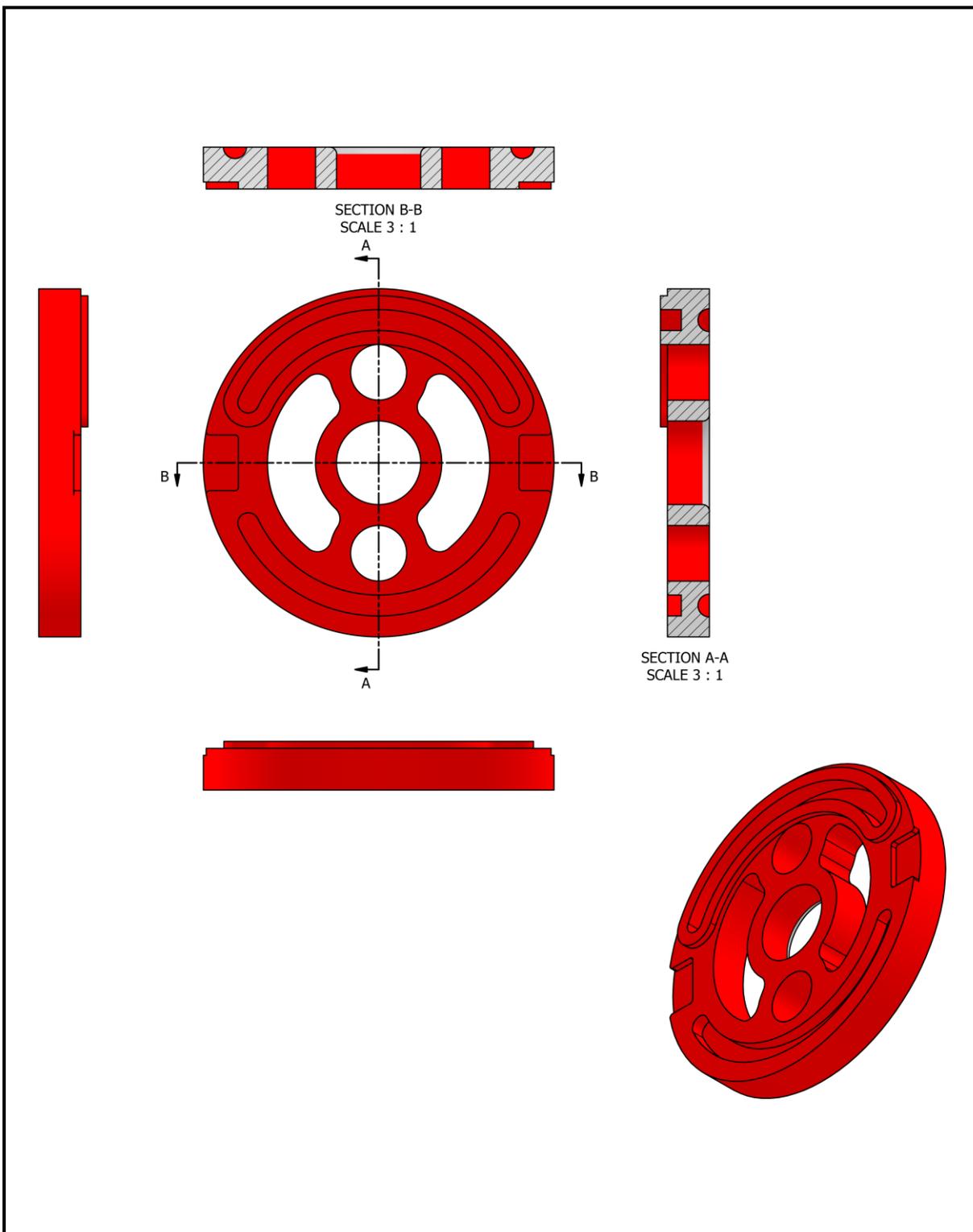
<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 08	<b>REV</b> 03
<b>SHEET 08 OF 14</b>	Case Superior		



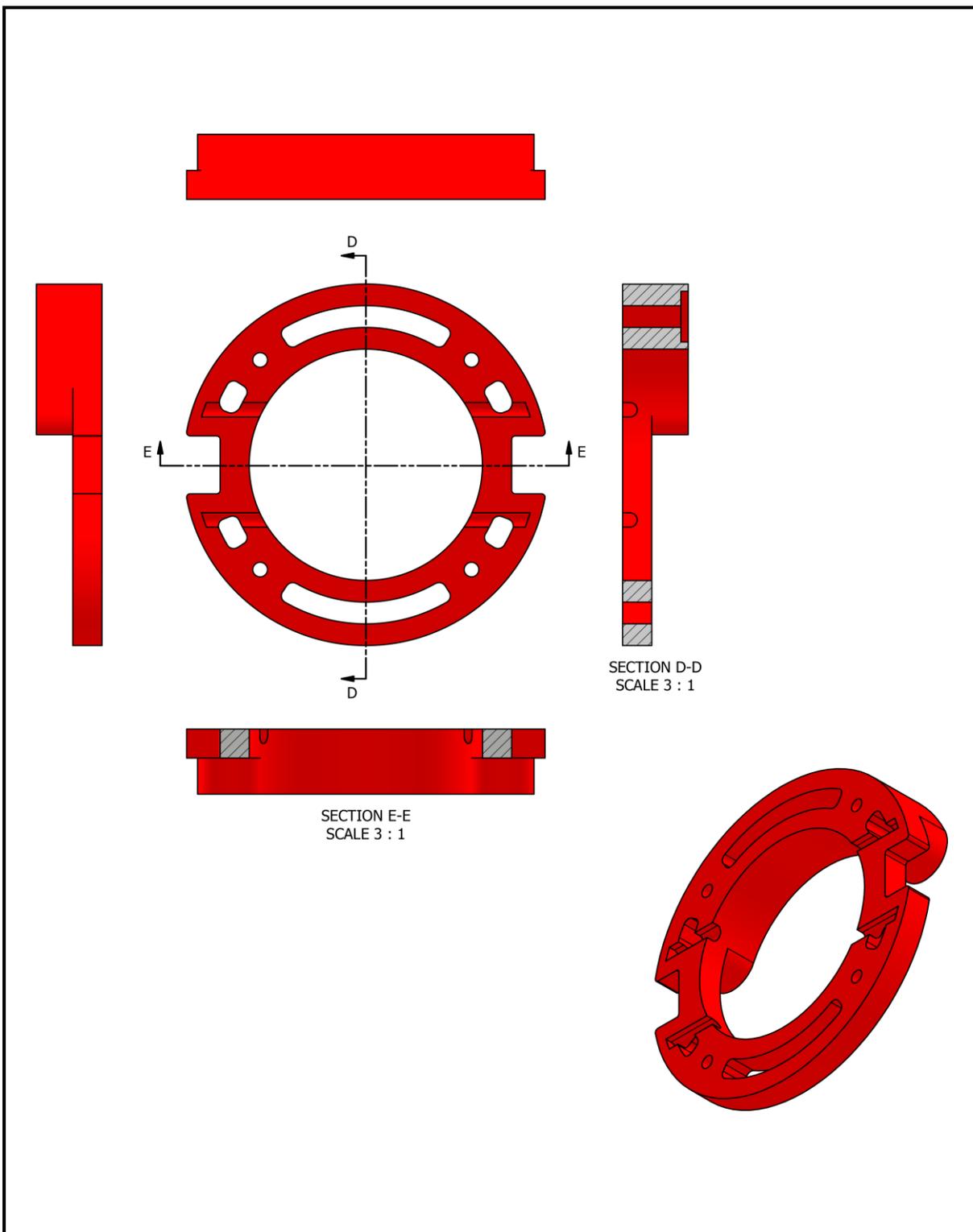
<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 09	<b>REV</b> 03
<b>SHEET 09 OF 14</b>	Acabamento do Case Superior		



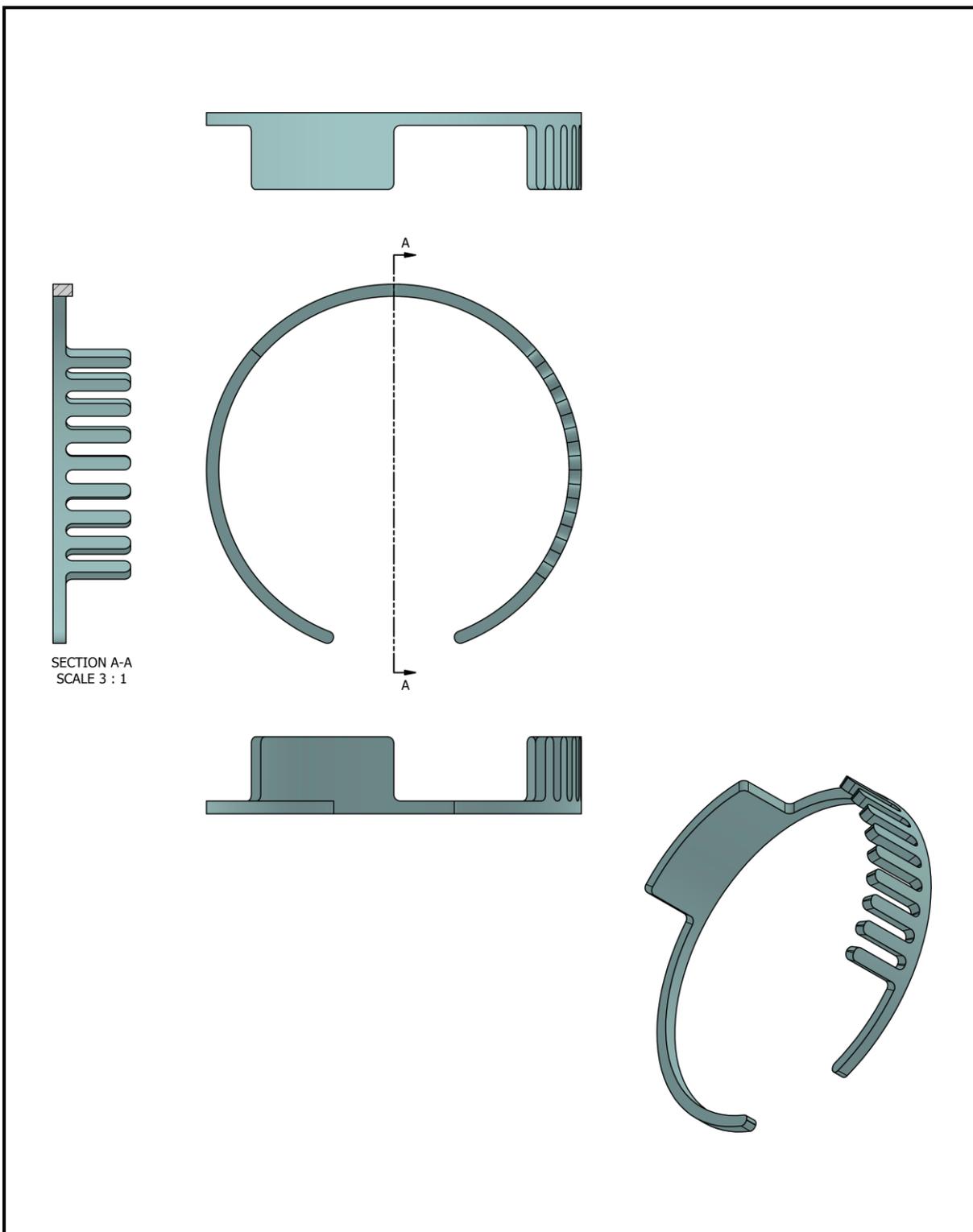
<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 10	<b>REV</b> 03
<b>SHEET 10 OF 14</b>	Suporte do Case Inferior		



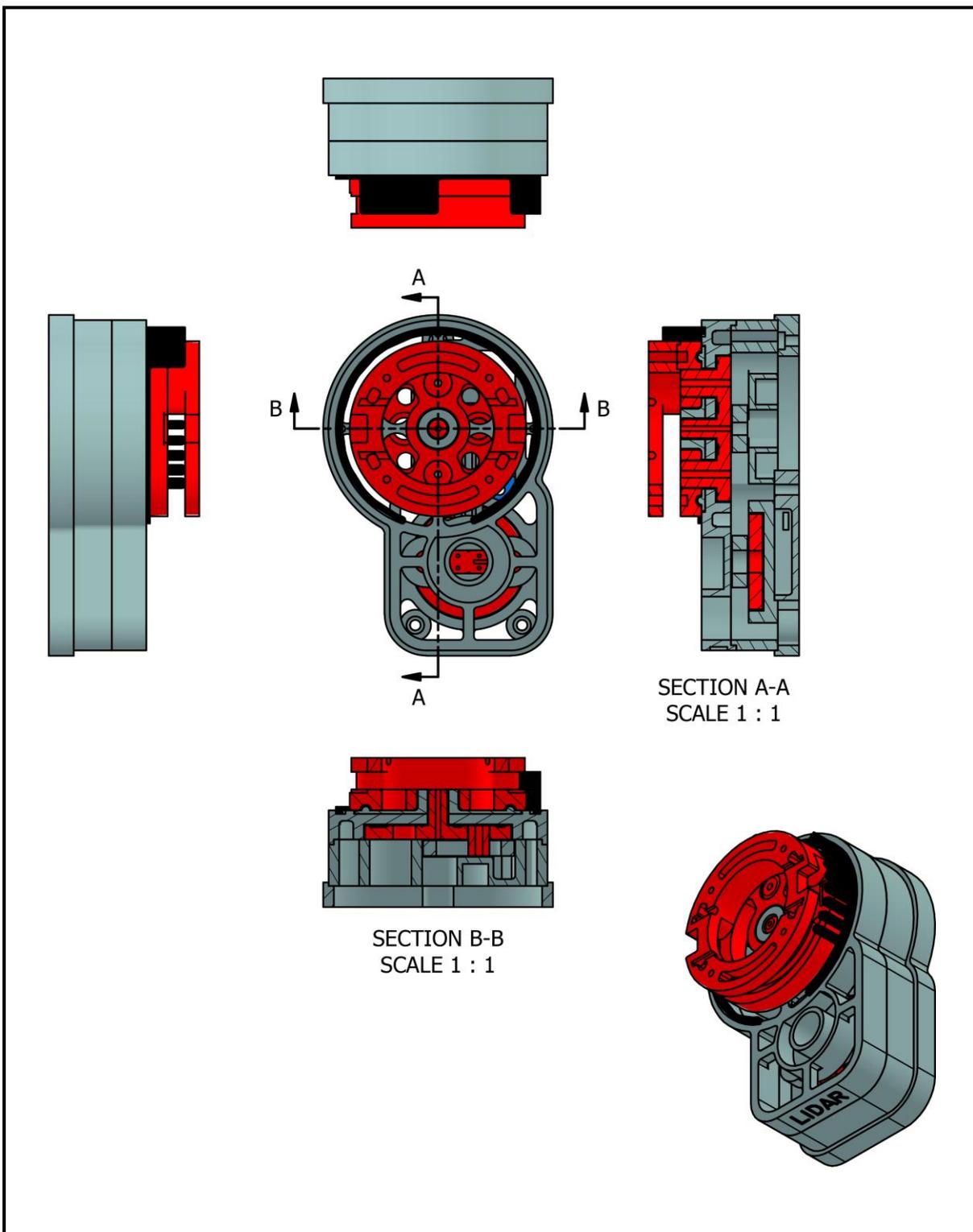
<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 11	<b>REV</b> 03
<b>SHEET</b> 11 OF 14	Roldana Inferior da Polia Movida		



<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 12	<b>REV</b> 03
<b>SHEET</b> 12 OF 14	Roldana Superior da Polia Movida		

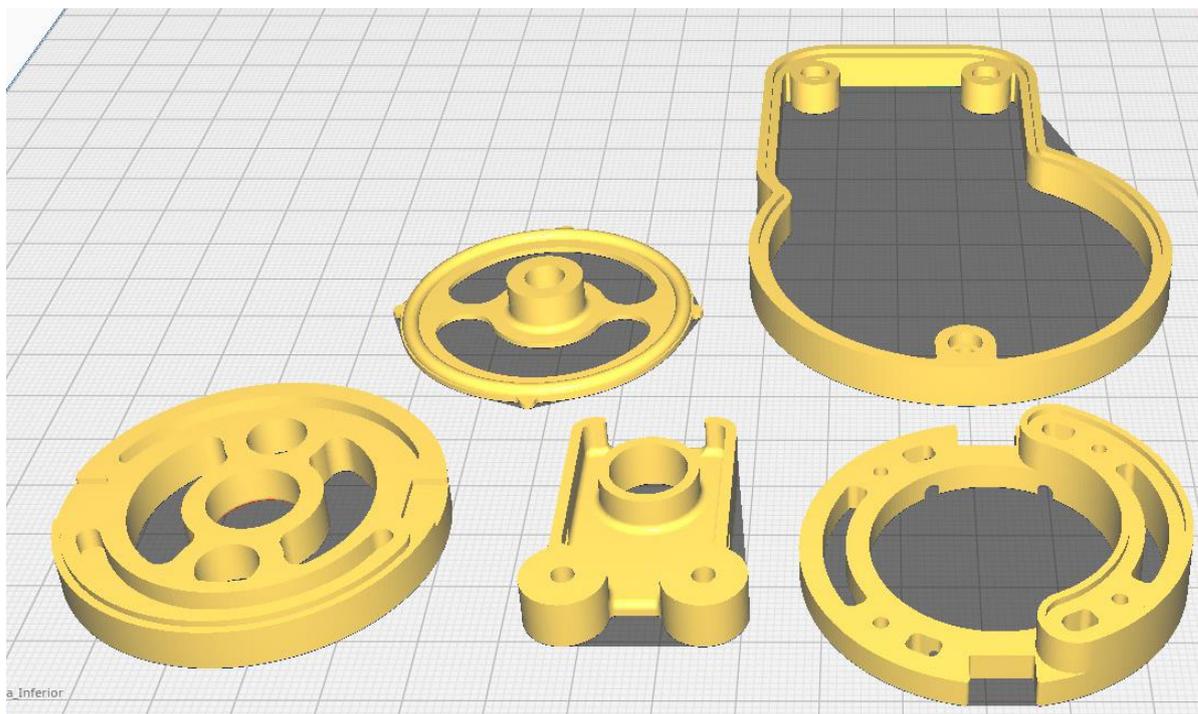


<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 13	<b>REV</b> 03
<b>SHEET</b> 13 OF 14	Encoder		



<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 16, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - <i>Mechanical Hardware Design</i>		
<b>REVISION</b> October 28, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 14	<b>REV</b> 03
<b>SHEET</b> 14 OF 14	Conjunto Montado		

## APÊNDICE B - CONFIGURAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D



Qualidade			
Altura de Camada		0.2	mm
Altura da Primeira Camada		0.2	mm
Largura de Extrusão		0.4	mm
Largura de Extrusão da Parede		0.4	mm
Largura de Extrusão da Parede Externa		0.4	mm
Largura de Extrusão das Paredes Internas		0.4	mm
Largura de Extrusão Superior/Inferior		0.4	mm
Largura de Extrusão do Preenchimento		0.4	mm
Largura de Extrusão da Camada Inicial		100.0	%

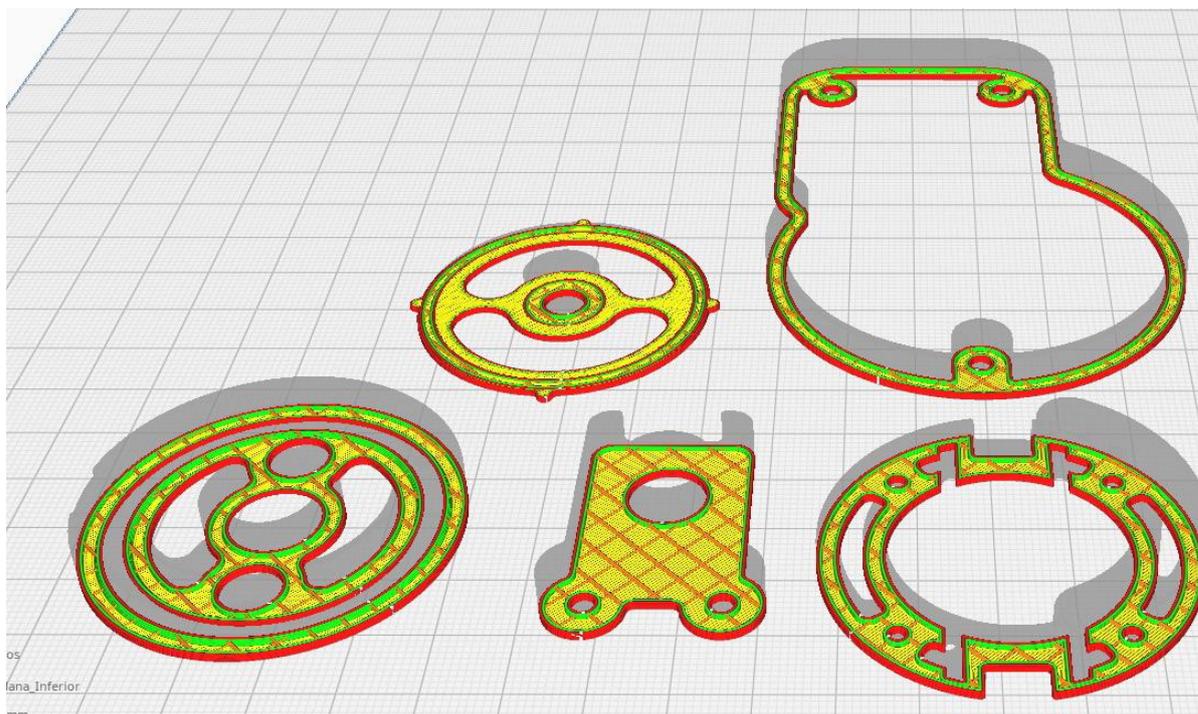
Superior/Inferior			
Espessura Superior/Inferior	$f_x$	1.1	mm
Espessura Superior		1.1	mm
Camadas Superiores	$f_x$	3	
Espessura Inferior		1.1	mm
Camadas Inferiores	$f_x$	3	
Padrão Superior/Inferior		Linhas	▼
Ordem Monotônica Superior/Inferior		<input checked="" type="checkbox"/>	
Habilitar Passar a Ferro		<input checked="" type="checkbox"/>	
Penetração da Passagem a Ferro		0.38	mm

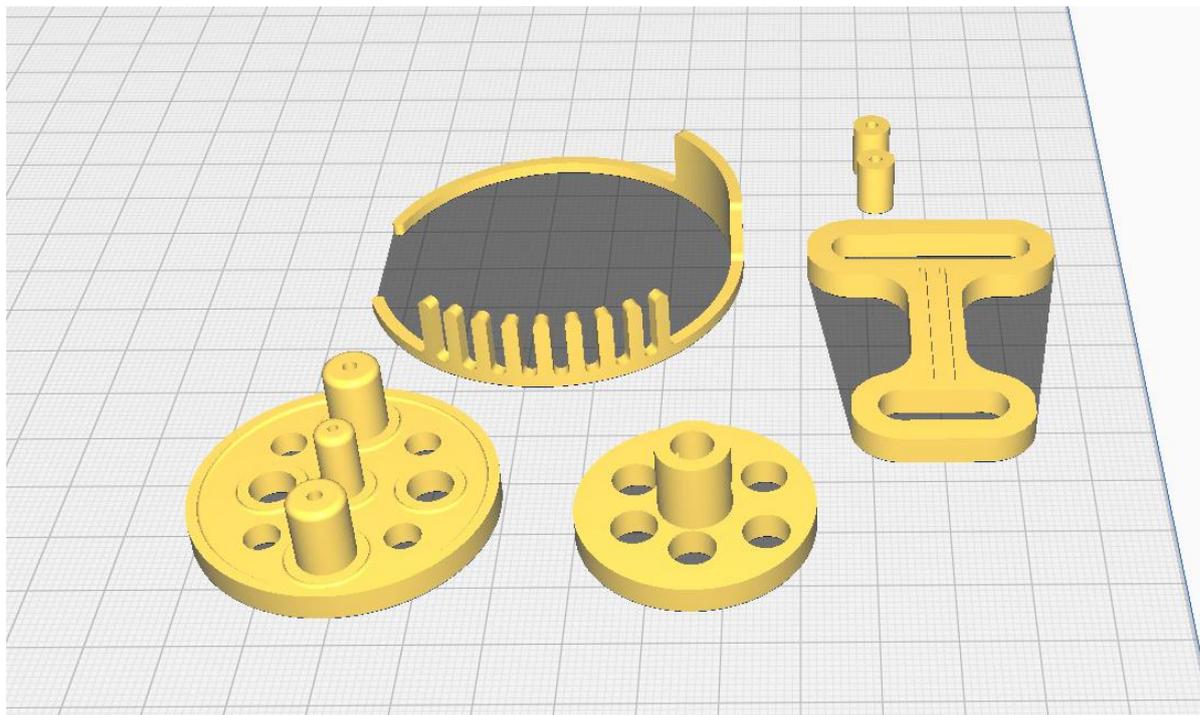
Paredes			
Espessura de Parede	$f_x$	2.0	mm
Número de Filetes da Parede	$f_x$	2	
Otimizar Ordem de Impressão de Paredes		<input checked="" type="checkbox"/>	
Expansão Horizontal		0.0	mm

Preenchimento			
Densidade do Preenchimento		10.0	%
Distância da Linha de Preenchimento		4.0	mm
Padrão de Preenchimento	$f_x$	Linhas	▼
Multiplicador de Filete de Preenchimento		1	
Porcentagem de Sobreposição do Preenchimento		30.0	%



<b>Material</b>		<b>Velocidade</b>	
Temperatura de Impressão	$f_x$ 195.0 °C	Velocidade de Impressão	50.0 mm/s
Temperatura de Impressão da Camada Inicial	$f_x$ 200.0 °C	Velocidade de Preenchimento	50.0 mm/s
Temperatura Inicial de Impressão	195.0 °C	Velocidade da Parede	$f_x$ 60.0 mm/s
Temperatura de Impressão Final	195.0 °C	Velocidade da Parede Exterior	60.0 mm/s
Temperatura da Mesa de Impressão	$\infty$ 60.0 °C	Velocidade da Parede Interior	60.0 mm/s
Temperatura da Mesa de Impressão da Camada Inicial	$\infty$ 60 °C	Velocidade Superior/Inferior	25.0 mm/s
		Velocidade de Percurso	$f_x$ 100.0 mm/s
		Velocidade da Camada Inicial	40.0 mm/s
<b>Percurso</b>		<b>Refrigeração</b>	
Habilitar Retração	<input checked="" type="checkbox"/>	Habilitar Refrigeração de Impressão	<input checked="" type="checkbox"/>
Retrai em Mudança de Camada	<input type="checkbox"/>	Velocidade da Ventoinha	$f_x$ 100.0 %
Distância da Retração	3.5 mm	Velocidade Regular da Ventoinha	100.0 %
Velocidade de Retração	40.0 mm/s	Velocidade Máxima da Ventoinha	100.0 %
Modo de Combing	$\infty$ Desligado	Limite de Tempo para Mudança de Velocidade da Ventoinha	10.0 s
Salto Z Ao Retrair	<input type="checkbox"/>	Velocidade Inicial da Ventoinha	0.0 %
		Velocidade Regular da Ventoinha na Altura	0.6 mm
		Velocidade Regular da Ventoinha na Camada	4

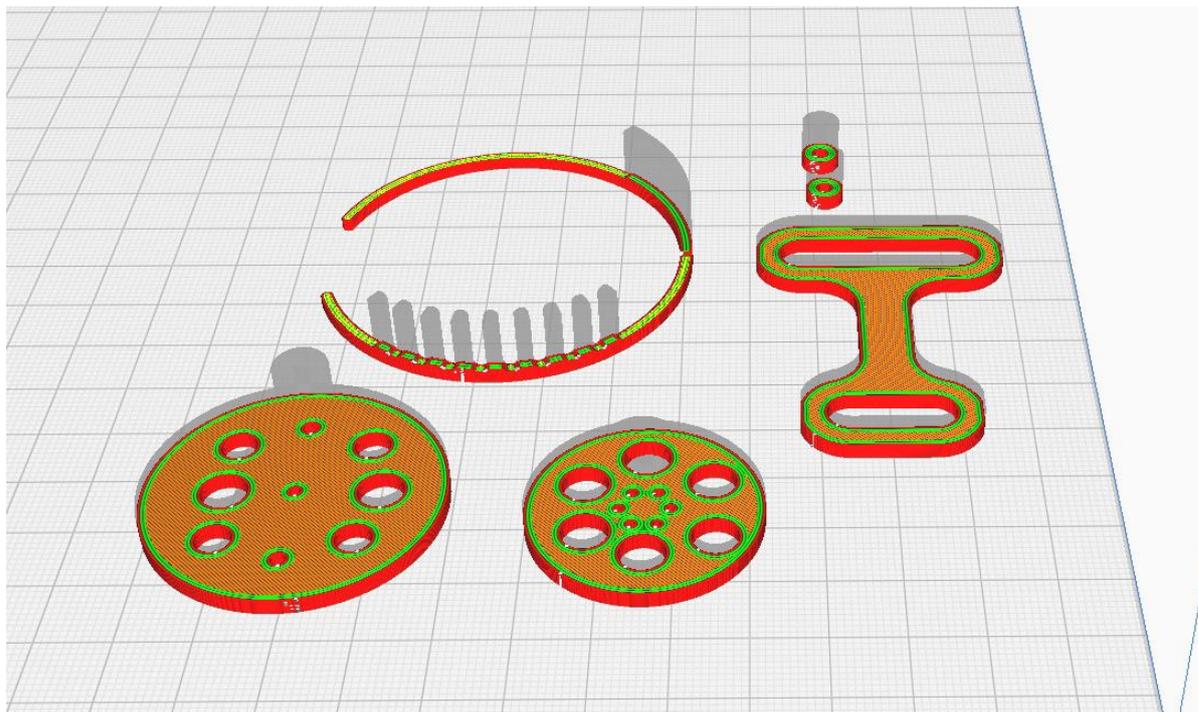


Qualidade			
Altura de Camada		0.2	mm
Altura da Primeira Camada		0.2	mm
Largura de Extrusão		0.4	mm
Largura de Extrusão da Parede		0.4	mm
Largura de Extrusão da Parede Externa		0.4	mm
Largura de Extrusão das Paredes Internas		0.4	mm
Largura de Extrusão Superior/Inferior		0.4	mm
Largura de Extrusão do Preenchimento		0.4	mm
Largura de Extrusão da Camada Inicial		100.0	%

Superior/Inferior			
Espessura Superior/Inferior	$f_x$	1.1	mm
Espessura Superior		1.1	mm
Camadas Superiores	$f_x$	3	
Espessura Inferior		1.1	mm
Camadas Inferiores	$f_x$	3	
Padrão Superior/Inferior		Linhas	▼
Ordem Monotônica Superior/Inferior		<input checked="" type="checkbox"/>	
Habilitar Passar a Ferro		<input checked="" type="checkbox"/>	
Penetração da Passagem a Ferro		0.38	mm

Paredes			
Espessura de Parede	$f_x$	2.0	mm
Número de Filetes da Parede	$f_x$	3	
Otimizar Ordem de Impressão de Paredes		<input checked="" type="checkbox"/>	
Expansão Horizontal		0.0	mm

Preenchimento			
Densidade do Preenchimento		100.0	%
Distância da Linha de Preenchimento		0.4	mm
Padrão de Preenchimento	$f_x$	Linhas	▼
Multiplicador de Filete de Preenchimento		1	
Porcentagem de Sobreposição do Preenchimento		30.0	%



### Material

Temperatura de Impressão	$f_x$	195.0	°C
Temperatura de Impressão da Camada Inicial	$f_x$	200.0	°C
Temperatura Inicial de Impressão		195.0	°C
Temperatura de Impressão Final		195.0	°C
Temperatura da Mesa de Impressão		60.0	°C
Temperatura da Mesa de Impressão da Camada Inicial		60	°C

### Percurso

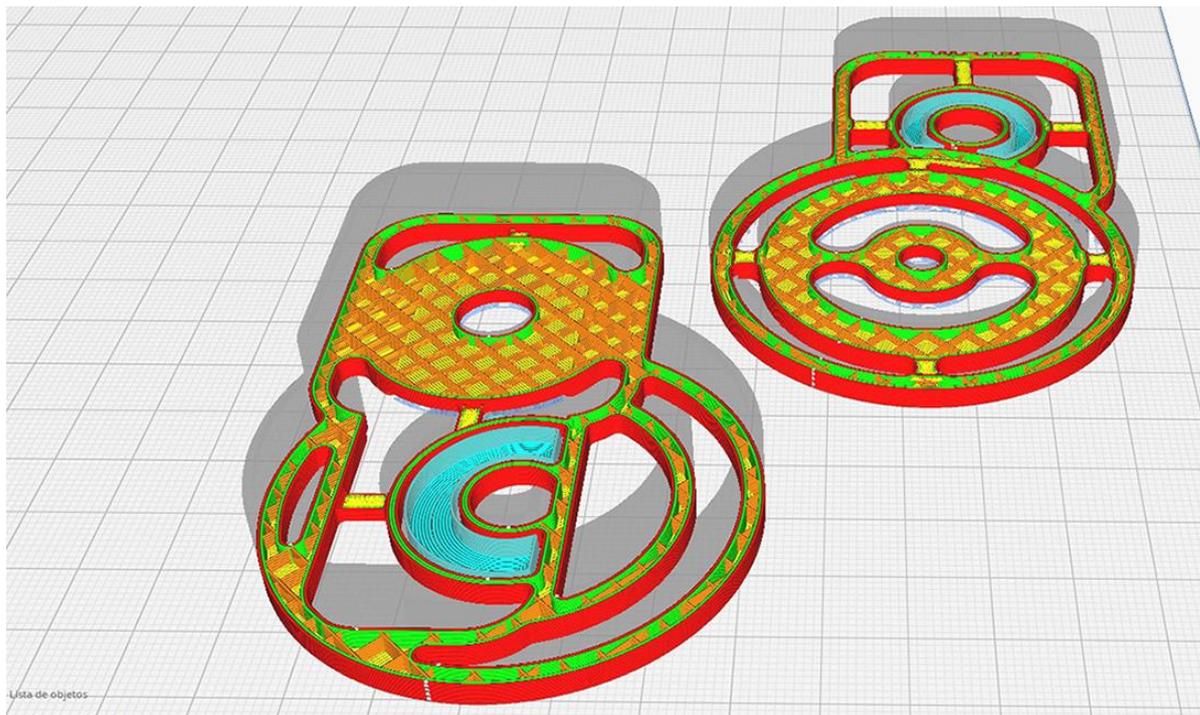
Habilitar Retração	<input checked="" type="checkbox"/>
Retrai em Mudança de Camada	<input type="checkbox"/>
Distância da Retração	3.5 mm
Velocidade de Retração	40.0 mm/s
Modo de Combing	Desligado
Salto Z Ao Retrair	<input type="checkbox"/>

### Velocidade

Velocidade de Impressão	50.0	mm/s
Velocidade de Preenchimento	50.0	mm/s
Velocidade da Parede	$f_x$ 60.0	mm/s
Velocidade da Parede Exterior	60.0	mm/s
Velocidade da Parede Interior	60.0	mm/s
Velocidade Superior/Inferior	25.0	mm/s
Velocidade de Percurso	$f_x$ 100.0	mm/s
Velocidade da Camada Inicial	40.0	mm/s

### Refrigeração

Habilitar Refrigeração de Impressão	<input checked="" type="checkbox"/>	
Velocidade da Ventoinha	$f_x$ 100.0	%
Velocidade Regular da Ventoinha	100.0	%
Velocidade Máxima da Ventoinha	100.0	%
Limite de Tempo para Mudança de Velocidade da Ventoinha	10.0	s
Velocidade Inicial da Ventoinha	0.0	%
Velocidade Regular da Ventoinha na Altura	0.6	mm
Velocidade Regular da Ventoinha na Camada	4	



### Suporte

Gerar Suporte

Estrutura de Suporte  Normal

Colocação dos Suportes  Tocando a Mesa

Ângulo para Caracterizar Seções  
Pendentes    $f_x$  50.0

Padrão do Suporte   Concêntrico

Densidade do Suporte   $f_x$  5.0

Expansão Horizontal do Suporte  0.0

Espessura de Camada do Preenchimento de  
Suporte  0.2

Passos de Preenchimento Gradual de Suporte  0

Habilitar Interface de Suporte

Habilitar Teto de Suporte

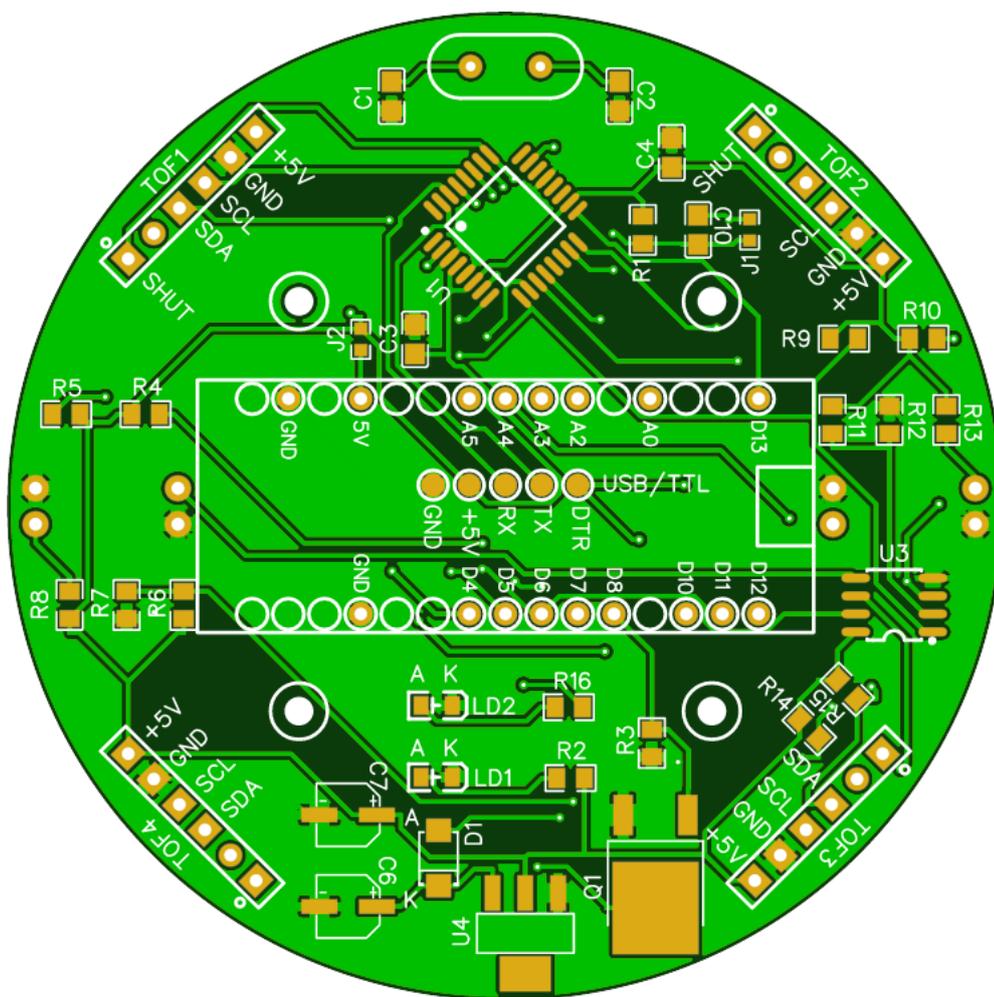
Habilitar Base de Suporte

### Aderência à Mesa

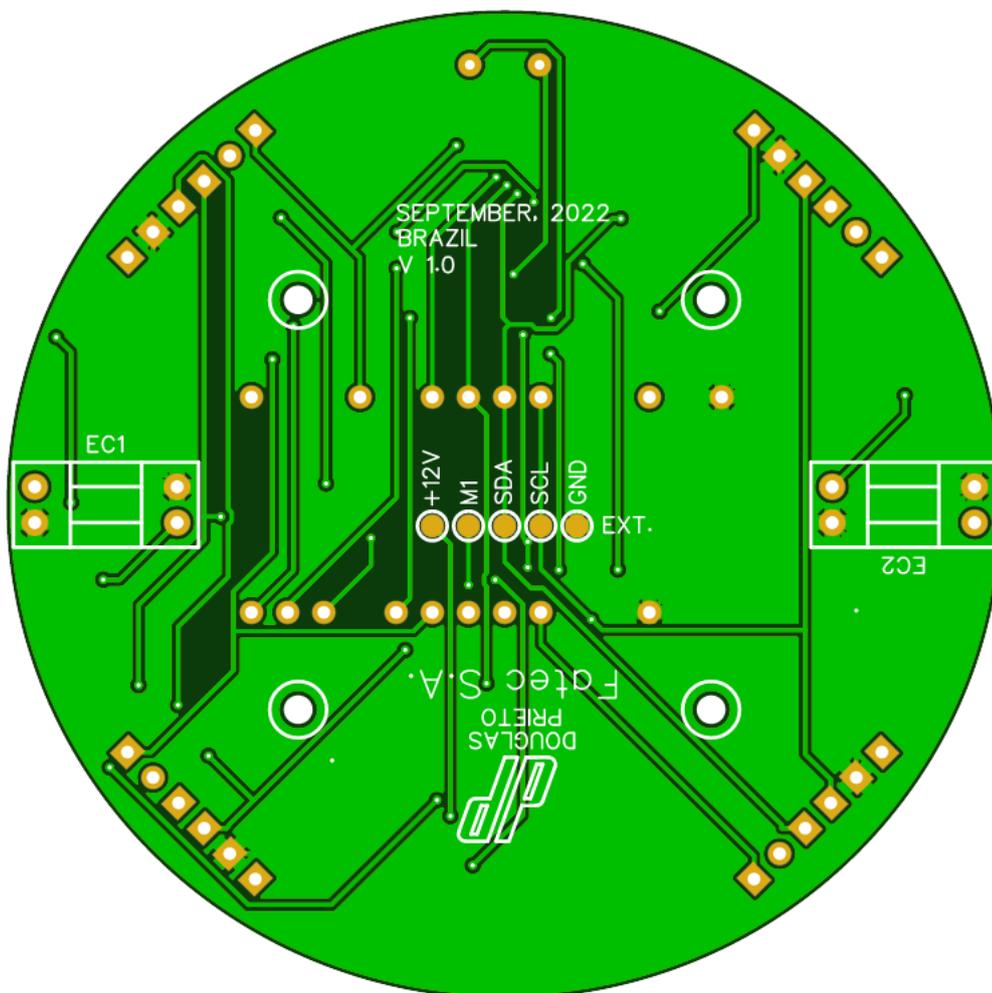
Tipo de Aderência da Mesa de Impressão  Nenhuma



APÊNDICE D - LAYOUT DA PCB DO LIDAR

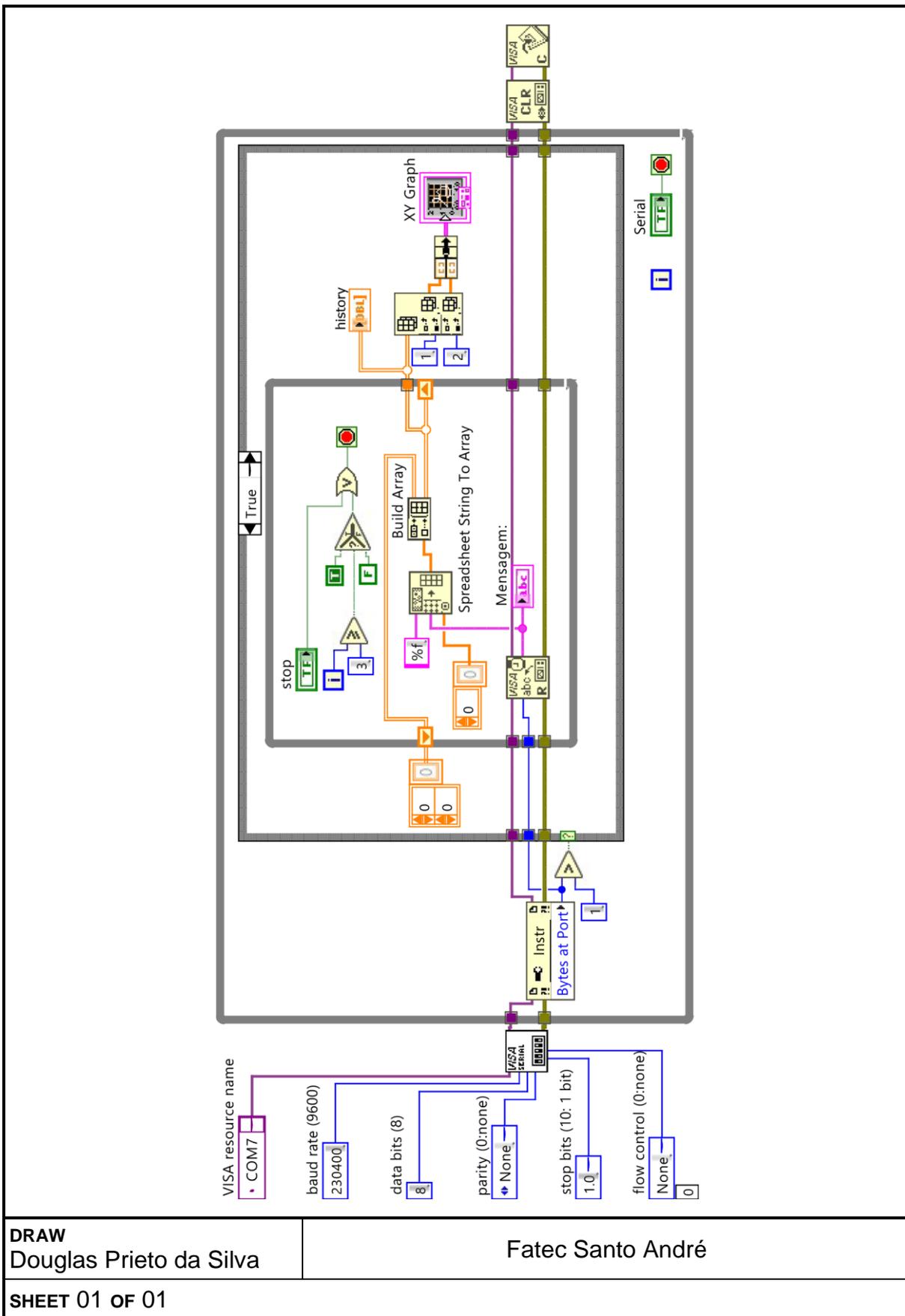


DRAW Douglas Prieto da Silva		Fatec Santo André	
DATE July 27, 2022		TITLE LIDAR - PCB Design - Top Side	
REVISION September 04, 2022	SIZE A4	DWG No 01	REV 02
SHEET 01 OF 02			



<b>DRAW</b> Douglas Prieto da Silva	Fatec Santo André		
<b>DATE</b> July 27, 2022	<b>TITLE</b> LIDAR - PCB Design - Bottom Side		
<b>REVISION</b> September 04, 2022	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG No</b> 02	<b>REV</b> 02
<b>SHEET 02 OF 02</b>			

APÊNDICE F - BLOCK DIAGRAM PARA COMUNICAÇÃO DO LIDAR



## APÊNDICE G - CÓDIGO DO SISTEMA LIDAR

```

/*****
INCLUDES
*****/
/* Sensor ToF *****/
#include <VL53L0X.h>
/*****

/*****
Definições
*****/
/* GERAL *****/
#define YES          1          //estado booleano
#define NO           0          //""
#define ENABLE       YES       //""
#define DISABLE      NO        //""
/* ESCALONADOR *****/
#define NUMBER_OF_TASKS 4      //número de tarefas - escalonador
#define TIME_TASK01_MS 1       //tarefa de PWM do motor [ms]
#define TIME_TASK02_MS 250     //tarefa blink [ms]
#define TIME_TASK03_MS 1       //tarefa de Encoder [ms]
#define TIME_TASK04_MS 40      //tarefa de ToF [ms]
#define TASK_TIMEOUT 15000     //time unit: ms
/* MOTOR *****/
#define PWMMOTOR     10        //% duty cycle - 0 a 10 (0 a 100%):
Frequência do Driver PWM = 0 - 20 kHz
#define MOTORPIN     DDRB |= (1 << DDD0) //configura saída pwm para motor
#define PWMLOW       PORTB &= ~(1 << PORTB0) //PWM LOW
#define PWMHIGH      PORTB |= (1 << PORTB0) //PWM HIGH
/* BLINK *****/
#define LD2PIN       DDRC |= (1 << DDD3) //configura saída blink para LD2
#define LD2LOW       PORTC &= ~(1 << PORTC3) //LD2 LOW
#define LD2HIGH      PORTC |= (1 << PORTC3) //LD2 HIGH
/* ENCODERS *****/
#define ENC1IN       DDRD &= ~(1 << DDD5) //configurar entrada de sinal do Encoder 1
- Incremento
#define ENC2IN       DDRD &= ~(1 << DDD6) //configurar entrada de sinal do Encoder 2
- Sincronismo
#define ENC1OUT      PIND &= (1 << PIND5) //leitura do estado do Encoder 1
#define ENC2OUT      PIND &= (1 << PIND6) //leitura do estado do Encoder 2
#define NCOUNT       11        //Resolução do Encoder
/* ToFs *****/
#define ToF1_offset  51        //Ajuste offset do ToF 1 >> +y
#define ToF2_offset  10        //Ajuste offset do ToF 2 >> +x
#define ToF3_offset   8        //Ajuste offset do ToF 3 >> -y
#define ToF4_offset  34        //Ajuste offset do ToF 4 >> -x
/*****

/*****
Variáveis Globais
*****/
/* ESCALONADOR *****/
unsigned int tempo_backup[NUMBER_OF_TASKS]; //Store task's times (time period to execute)
unsigned int tempo_tarefa[NUMBER_OF_TASKS]; //Stores recent task's times ("time to execute"
each task)
unsigned char sinaliza_int_timer;           //Tells if TIme0 interrupt has been generated
volatile char tarefa_em_execucao;         //Tells if a task in executing (used to check
task timeout validation)
unsigned int timeout_tarefa;              //Reset Microcontroller
/* PWM *****/
const uint8_t pwm = 10;                   //Período PWM 100Hz
unsigned char pwm_counter = pwm;          //Contador pwm - período 10ms
/* LD2 *****/
bool ld2_state = YES;                     //Estado do LD2
/* ENCODER *****/
uint8_t counter_angle_current = 0;        //Posição angular do encoder
uint8_t counter_angle_backup = 0;        //Posição angular do encoder
bool pulse_status_current = NO;          //Estado atual do enconder de incremento
bool pulse_status_backup = NO;           //Estado anterior do enconder de incremento
bool sync_angle_status_current = NO;     //Estado atual do encoder de sincronismo
bool sync_angle_status_backup = NO;     //Estado anterior do encoder de sincronismo
bool sum_operation = NO;                  //Modular operação de soma ou subtração (0, 1...
...14, 15, 14... ..1, 0)

```

```

/* CALCULO DOS PONTOS XY *****/
//matriz dos pontos xy calculados
float trigonometry_xy[2][20] = { { 0.000, 0.142, 0.282, 0.415, 0.541, 0.655, 0.756, 0.841,
0.910, 0.959, 0.990, 1.000 },
                                { 1.000, 0.990, 0.959, 0.910, 0.841, 0.756, 0.655, 0.541,
0.415, 0.282, 0.142, 0.000 } };

//matriz de leitura de sensor pointxy
int read_ToF[4] = {500, 500, 500, 500};

//matriz de pontos xy de cada pointxy calculados
int calculated_xy_point[4][2] = { { 0, 0 },
                                   { 0, 0 },
                                   { 0, 0 },
                                   { 0, 0 } };

//Dados para transmissão serial (Labview)
String str_data[4];

VL53L0X Read_ToF1;
VL53L0X Read_ToF2;
VL53L0X Read_ToF3;
VL53L0X Read_ToF4;

int Value_ToF1;
int Value_ToF2;
int Value_ToF3;
int Value_ToF4;
/*****/

/*****/
Protótipos das funções
*****/
void (*p_tarefas[NUMBER_OF_TASKS])(void); //Store function pointers of Task
void (*sw_reset)() = 0x00; //Function reset by SW
void pointxy_operation (void);
/*****/

/*****/
Configurações iniciais
*****/
void setup() {
//Serial.begin(9600);
Serial.begin(500000);
while (!Serial) delay(0x0A);

config_timer1(); //Configuração do TMR1 com interrupção interna para 1ms
inicializa_tarefas(); //Inicialização das tarefas
MOTORPIN; //Configuração da porta para o PWM do motor
ENC1IN; //Configuração da porta para o encoder de sincronismo
ENC2IN; //Configuração da porta para o encoder de incremento
LD2PIN; //Configuração da porta para o LD2 (Blink)

pinMode(16, OUTPUT);
pinMode(14, OUTPUT);
pinMode(7, OUTPUT);
pinMode(4, OUTPUT);

digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(7, LOW);
digitalWrite(14, LOW);
digitalWrite(16, LOW);

delay(5);
Serial.println("Resetting ToF 3...");
digitalWrite(7, HIGH);
delay(5);
Serial.println("Setting ToF 3...");
Read_ToF3.init(true);
delay(50);
Read_ToF3.setAddress((uint8_t)01);
}

```

```

delay(5);
Serial.println("Resetting ToF 4...");
digitalWrite(4, HIGH);
delay(5);
Serial.println("Setting ToF 4...");
Read_ToF4.init(true);
delay(5);
Read_ToF4.setAddress((uint8_t)02);

delay(5);
Serial.println("Resetting ToF 1...");
digitalWrite(16, HIGH);
delay(5);
Serial.println("Setting ToF 1...");
Read_ToF1.init(true);
delay(5);
Read_ToF1.setAddress((uint8_t)03);

delay(5);
Serial.println("Resetting ToF 2...");
digitalWrite(14, HIGH);
delay(5);
Serial.println("Setting ToF 2...");
delay(5);
Read_ToF2.init(true);
delay(5);
Serial.println("ToF's set!");

Read_ToF1.startContinuous();
Read_ToF2.startContinuous();
Read_ToF3.startContinuous();
Read_ToF4.startContinuous();

delay(1000);
}
/*****

Programa
*****/
void loop() {
//Verification: check if there's a task to be executed
if ((sinaliza_int_timer) && (NUMBER_OF_TASKS)) {
    sinaliza_int_timer = NO;
    escalonador();
}
}
/*****

Funcao:    ISR(TIMER1_OVF_vect)
Entrada:   Nenhuma (void)
Saída:     Nenhuma (void)
Descrição: Implementa a rotina de interrupcao
*****/
ISR(TIMER1_OVF_vect) {
    sinaliza_int_timer = YES;
    for (uint8_t cont = 0; cont < NUMBER_OF_TASKS; cont++) {
        if (tempo_tarefa[cont] > 0) tempo_tarefa[cont]--;
    }
    if (tarefa_em_execucao) {
        timeout_tarefa--;
        if (!timeout_tarefa) sw_reset(); //Timeout has reached (possibly a task has crashed.
Microcontroller must be reseted)
    }
    TCNT1 = 0xC180; //Restart TIMER1 0xC180
}

```

```

/*****
Funcao: void inicializa_tarefas(void)
Entrada: Nenhuma (void)
Saida: Nenhuma (void)
Descricao: Inicializa o ponteiro de função e as temporizações de cada umas
das tarefas
*****/
void inicializa_tarefas(void) {
    p_tarefas[0] = pwm_motor; //Tasks
    p_tarefas[1] = blinkld2; //""
    p_tarefas[2] = count_pulse; //""
    p_tarefas[3] = read_toF; //""

    /*init temporization values of each task.
    These values do no change during execution*/
    tempo_backup[0] = TIME_TASK01_MS;
    tempo_backup[1] = TIME_TASK02_MS;
    tempo_backup[2] = TIME_TASK03_MS;
    tempo_backup[3] = TIME_TASK04_MS;

    /*init recent temporization values of each task.
    They're used to decide which task must be executed*/
    tempo_tarefa[0] = TIME_TASK01_MS;
    tempo_tarefa[1] = TIME_TASK02_MS;
    tempo_tarefa[2] = TIME_TASK03_MS;
    tempo_tarefa[3] = TIME_TASK04_MS;

    tarefa_em_execucao = NO; //It indicates that there's no task executing
}

/*****
Funcao: void escalonador(void)
Entrada: Nenhuma (void)
Saida: Nenhuma (void)
Descricao: Executa as tarefas do sistema.
*****/
void escalonador(void) {
    unsigned char cont;
    for (cont = 0; cont < NUMBER_OF_TASKS; cont++) {
        if ((p_tarefas[cont] != 0) && (tempo_tarefa[cont] == 0)) { //Check if it's time to
execute a task
            tarefa_em_execucao = YES;
            timeout_tarefa = TASK_TIMEOUT;
            p_tarefas[cont](); //executes the task
            tarefa_em_execucao = NO;
            tempo_tarefa[cont] = tempo_backup[cont]; //reagendamento da tarefa
        }
    }
}

/*****
Funcao: void config_timer1(void)
Entrada: Nenhuma (void)
Saida: Nenhuma (void)
Descricao: Configura TIMER1 para lms
*****/
void config_timer1() {
    TCCR1A = 0; // configura TIMER1 para operação normal
    TCCR1B = 0; // limpa registrador
    TCCR1B |= (1 << CS10); // configura prescaler para 1: CS12 = 0 : CS11 = 0 : CS10 = 1
    TCNT1 = 0xC180; // Carga Inicial 49536 de 65536 - estouro ocorre em lms 0xC180
para lms
    TIMSK1 |= (1 << TOIE1); // habilita a interrupção do TIMER1
}

```

```

/*****
Funcao:    void pwm_motor(void)
Entrada:   Nenhuma (void)
Saida:     Nenhuma (void)
Descricao: PWM Motor
*****/
void pwm_motor(void) {
    pwm_counter > PWMMOTOR ? PWMLOW : PWMHIGH;
    pwm_counter--;
    if (pwm_counter == 0) pwm_counter = pwm;
}

/*****
Funcao:    void blinkld2(void)
Entrada:   Nenhuma (void)
Saida:     Nenhuma (void)
Descricao: blink para LD2 - indicacao visual de U1 ativo
*****/
void blinkld2(void) {
    if (ld2_state) {
        LD2HIGH;
        ld2_state = NO;
    }
    else {
        LD2LOW;
        ld2_state = YES;
    }
}

/*****
Funcao:    void count_pulse(void)
Entrada:   Nenhuma (void)
Saida:     Nenhuma (void)
Descricao: Leitura angular
*****/
void count_pulse (void) {
    //sincronismo
    sync_angle_status_current = ENC2OUT;
    if (sync_angle_status_current) {
        sync_angle_status_backup = YES;
        counter_angle_current = 0;
    }
    else {
        if (sync_angle_status_backup) {
            sync_angle_status_backup = NO;
            counter_angle_current = 1;
            sum_operation = YES;
            pulse_status_backup = ENC1OUT;
        }
    }
    //incremento
    if (sync_angle_status_current == 0) {
        if (counter_angle_current == NCOUNT) sum_operation = NO;
        else if (counter_angle_current == 0) sum_operation = YES;
        pulse_status_current = ENC1OUT;
        if (pulse_status_backup != pulse_status_current) {
            pulse_status_backup = pulse_status_current;
            sum_operation ? counter_angle_current++ : counter_angle_current--;
        }
    }
    if (counter_angle_backup != counter_angle_current) {
        counter_angle_backup = counter_angle_current;
    }
}

```

```

/*****
Funcao:    read_tof(void)
Entrada:   Nenhuma (void)
Saída:     Nenhuma (void)
Descrição: Lê os valores de distância de cada ToF
*****/
void read_tof(void) {
Value_ToF1 = Read_ToF1.readRangeContinuousMillimeters () + ToF1_offset;      //ToF1
Value_ToF2 = Read_ToF2.readRangeContinuousMillimeters () + ToF2_offset;      //ToF2
Value_ToF3 = Read_ToF3.readRangeContinuousMillimeters () + ToF3_offset;      //ToF3
Value_ToF4 = Read_ToF4.readRangeContinuousMillimeters () + ToF4_offset;      //ToF4

Value_ToF1 > 500 ? read_ToF[0] = 500 : read_ToF[0] = Value_ToF1; //Ponto máximo
Value_ToF2 > 500 ? read_ToF[1] = 500 : read_ToF[1] = Value_ToF2; // ""
Value_ToF3 > 500 ? read_ToF[2] = 500 : read_ToF[2] = Value_ToF3; // ""
Value_ToF4 > 500 ? read_ToF[3] = 500 : read_ToF[3] = Value_ToF4; // ""

pointxy_operation ();

send_labview();
}

/*****
Funcao:    pointxy_operation (void)
Entrada:   Nenhuma (void)
Saída:     Nenhuma (void)
Descrição: Calcula os pontos xy de acordo com a leitura do ToF e o ângulo
*****/
void pointxy_operation (void) {

    calculated_xy_point[0][0] = trigonometry_xy[0][counter_angle_current] * read_ToF[0] * (-1);
//ToF1
    calculated_xy_point[0][1] = trigonometry_xy[1][counter_angle_current] *
read_ToF[0]; //ToF1

    calculated_xy_point[1][1] = trigonometry_xy[0][counter_angle_current] *
read_ToF[1]; //ToF2
    calculated_xy_point[1][0] = trigonometry_xy[1][counter_angle_current] *
read_ToF[1]; //ToF2

    calculated_xy_point[2][0] = trigonometry_xy[0][counter_angle_current] *
read_ToF[2]; //ToF3
    calculated_xy_point[2][1] = trigonometry_xy[1][counter_angle_current] * read_ToF[2] * (-1);
//ToF3

    calculated_xy_point[3][1] = trigonometry_xy[0][counter_angle_current] * read_ToF[3] * (-1);
//ToF4
    calculated_xy_point[3][0] = trigonometry_xy[1][counter_angle_current] * read_ToF[3] * (-1);
//ToF4
}

/*****
Funcao:    send_labview(void)
Entrada:   Nenhuma (void)
Saída:     Nenhuma (void)
Descrição: Enviar os pontos xy calculados para Labview (gráfico de dispersão)
*****/
void send_labview(void) {
for (int i = 0; i < 4; i++) {
    str_data[i] = counter_angle_current;
    str_data[i] += "\t";
    str_data[i] += calculated_xy_point[i][0];
    str_data[i] += "\t";
    str_data[i] += calculated_xy_point[i][1];
    Serial.println(str_data[i]);
}
}

```