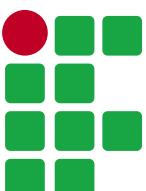


Trabalho de Conclusão de Curso

Felipe Huszcza Machado, João Victor Mello Ferrari, Rafael
Huszcza Machado

CONSTRUÇÃO DE UM LiDAR

Rio Grande(RS)
2021



INSTITUTO FEDERAL
Rio Grande do Sul
Campus Rio Grande

Técnico em Automação Industrial
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Rio Grande do Sul
Campus Rio Grande

Construção de um LiDAR

Felipe Huszcza Machado, João Victor Mello Ferrari, Rafael Huszcza Machado

Orientador: Prof Carlos Rodrigues Rocha

Coorientador: Prof Rogério Malta Branco

Resumo

O foco do projeto é a construção de um protótipo de LiDAR (*Light detection and ranging*) de custo reduzido e adequado para pequenos ambientes. De inicio, foi desenvolvido um modelo mecânico em CAD (Projeto Auxiliado por Computador) e prototipado em impressão 3D. Paralelamente, foi realizado o projeto eletrônico do dispositivo, responsável pela aquisição e transmissão de dados. Com a finalidade de mostrar o mapeamento realizado pelo sensor, foi desenvolvido um *software* que faz a análise dos dados correspondentes e os esboça de forma gráfica, com intuito de facilitar a compreensão do ambiente. Para validar o protótipo, foram realizados testes de mapeamento em espaços com dimensões conhecidas. Posterior à finalização do projeto, foi realizado um levantamento de hipóteses sobre os problemas no mapeamento, para que, no futuro, melhorias possam ser alcançadas.

Palavras Chave: LiDAR. SLAM (Localização e Mapeamento Simultâneos). Sensor Laser.

Abstract

The main purpose of this project is to build a LiDAR (Light detection and ranging) prototype of relative low cost and directed to shallow dimension ambients. Primarily, a CAD (Computer-aided design) mechanical model was developed, and prototyped by a 3D printer afterwards. simultaneously, an electric diagram is sketched, whose purpose is to perform data aquisition and transmission. In order to display the environment mapping performed by the sensor, a software was designed, which analyzes the correspondent data and disposes it in a graphical way, so the comprehension of the ambient will be facilitated. With the intention of validating de prototype, multiple tests are applied, in ambients with known dimensions. After the project had been finished, a survey about hipotetical mapping problems was developed, so that, in the future, improvements could be applied.

Keywords: LiDAR. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Laser Sensor.

1 Introdução

O LiDAR (*Light Detection and Ranging*) é um dispositivo que possui como base a medição de distância por meio de feixes luminosos, de modo a desenvolver varreduras não somente de ambientes internos, mas também de externos. Com isso, possibilita-se o mapeamento dessas regiões e detecção de diversos objetos ou obstáculos ao redor. Esse equipamento, por ser uma tecnologia de ponta, possui um elevado custo de aquisição. Nessas circunstâncias, o grupo busca desenvolver um protótipo LiDAR, com dimensões reduzidas e relativo baixo custo, com o intuito de possibilitar a aplicação da tecnologia de forma mais acessível e didática à população. O protótipo poderá trabalhar em conjunto com robôs móveis e projetos que envolvem mobilidade, de modo a proporcionar inteligência espacial às tecnologias, com ênfase nas de pequeno porte. Ainda, para que os dados de varredura adquiridos possam ser enviados a uma central de forma rápida e eficiente, será desenvolvida uma interface Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), a qual permite a comunicação remota com softwares gráficos. Em virtude de validar o mapeamento produzido pelo protótipo, será projetado um software no computador, de forma a possibilitar a visualização gráfica dos pontos correspondentes aos objetos contidos no ambiente.

1.1 Justificativa

Os rápidos avanços das tecnologias que envolvem inteligência espacial tornaram necessária a criação e utilização de novos equipamentos que possibilitam o conhecimento do ambiente ao redor. Dessa forma, a principal motivação do projeto é ampliar o acesso desse conhecimento a uma gama de pessoas que não teriam acesso, de maneira a viabilizar o projeto.

Outro ponto que fundamenta a escolha desse tema, é que os autores do projeto são formandos em automação industrial. Logo, a realização do projeto é vista como uma oportunidade não apenas para aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso, mas principalmente expandi-los e adentrar áreas que não foram trabalhadas durante a formação técnica.

1.2 Objetivos

Projetar e construir um protótipo de um equipamento de mapeamento de ambientes do tipo LiDAR de pequeno porte e relativo baixo custo, com capacidade de troca de dados por redes sem fio, para comunicação com softwares de mapeamento e navegação. Para atingir o objetivo geral proposto, foram definidos como objetivos específicos:

- Projetar a parte mecânica/estrutural do LiDAR, consistindo de base fixa, elemento giratório e conexão elétrica entre eles;

- Projetar o sistema eletrônico do LiDAR, envolvendo a questão de sensor laser de distância, aquisição e armazenamento sincronizados e comunicação de dados;
- Construir um protótipo do dispositivo, com base nos projetos realizados;
- Desenvolver o software de visualização do mapeamento do sensor LiDAR;
- Validar o projeto através de testes do protótipo, calibração e ajustes.

2 Fundamentação Teórica

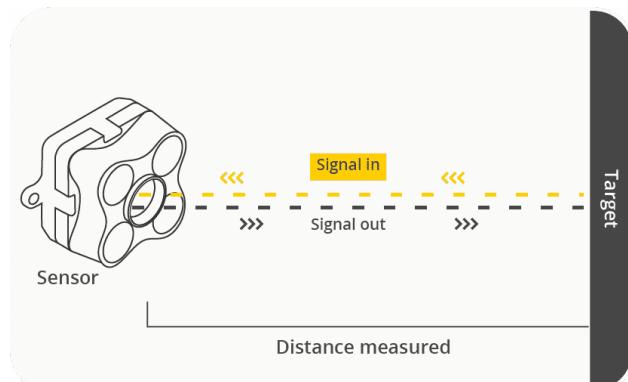
Uma parte da teoria e conceitos utilizados na construção do projeto será exposta nesta Seção, a fim de direcionar as ideias do trabalho e facilitar o compreendimento do mesmo.

2.1 Mapeamento com sensor laser

A ideia de mapear surgiu quando o ser humano teve a necessidade de conhecer, de maneira mais detalhada, o ambiente ao seu redor. Essa prática é utilizada em áreas como cartografia, geografia, aviação, navegação, entre outras ([ZANDONÁ et al., 2005](#)).

Dentre as diversas tecnologias utilizadas para obter o conhecimento do espaço, como por exemplo o uso de sonar e o escaneamento com luz estruturada, destaca-se o sensor laser, cujo funcionamento é baseado no princípio ToF - *Time of Flight*. Este princípio consiste na medição da diferença de tempo entre a emissão de um sinal e seu retorno ao sensor, após ser refletido por um objeto, tendo como resultado a distância entre o sensor e o objeto em questão. No caso do laser, esse sinal é emitido em forma de onda eletromagnética. Na Figura 1 é possível observar o princípio de seu funcionamento ([TERABEE, 2020](#)).

Figura 1 – Princípio ToF([TERABEE, 2020](#))



2.2 Mapeamento automatizado

A Automação surge em indústrias de controle de processos eletro-pneumáticos, em meados do século XX, com o intuito de efetivar e melhorar a produção de mercadorias ([ROSARIO, 2012](#)).

Uma das características desse tipo de sistema consiste em diversos equipamentos trabalhando de maneira integrada, de modo a substituir, pelo menos em parte, o trabalho humano. Cada componente apresenta uma função determinada, de maneira análoga a um grupo de pessoas trabalhando em prol de um objetivo.

O mapeamento utilizando LiDAR poderia ser efetuado de uma forma manual: um integrante do grupo é responsável por segurar o sensor laser e rotacioná-lo, outro membro fica encarregado de ler os valores, enquanto um terceiro, de organizar o resultado das medições.

Um método de mapeamento alternativo à metologia aplicada acima e mais eficiente consiste em integrar cada uma das tarefas e encarregar os próprios componentes de realizá-las. Em outros termos, é automatizar o processo. Conforme [Roggia & Fuentes \(2016\)](#), esse tipo de sistema apresenta como vantagens a compensação de erros, saída constante e resiliência, o que torna os resultados obtidos mais precisos e ideais, se comparado a sistemas não automatizados.

2.3 Princípio de funcionamento de um LiDAR

Esse tipo de sistema de mapeamento consiste no princípio ToF, aplicado de forma a cobrir uma área de 360 graus à sua volta, desta forma captando as informações obtidas por todos os lados do sistema de medição. A parte estrutural de um LiDAR consiste normalmente em uma base fixa e uma giratória, sendo nesta acoplado o sensor laser. Logo, para possibilitar a medição em diversos ângulos, é necessário que a base na qual o sensor está posicionado esteja rotacionando. Sendo assim, cada uma das medições de distância é efetuada em uma posição específica, sendo essa posição correspondente a um ângulo específico, como pode ser observado na Figura 2.

À coleta desses pontos, medidos de forma contínua no ambiente, é dado o nome de varredura. Cada um dos pontos coletados é um par de coordenadas formados pela posição da medição e dos dados obtidos pelo sensor. Ou seja, cada ponto possui um ângulo (correspondente a posição do sensor laser no momento de uma medição específica) e uma distância (relativa à distância do objeto medida pelo sensor). Após a coleta desses pares, também conhecidos como coordenadas polares, é possível montar um ambiente virtual em 2 dimensões, que representa o local mapeado ([MUNDOCONECTADO, 2020](#)), como é possível observar na Figura 3.

Figura 2 – Obtenção de dados através de ângulos específicos (*SLAMTEC, 2016*)

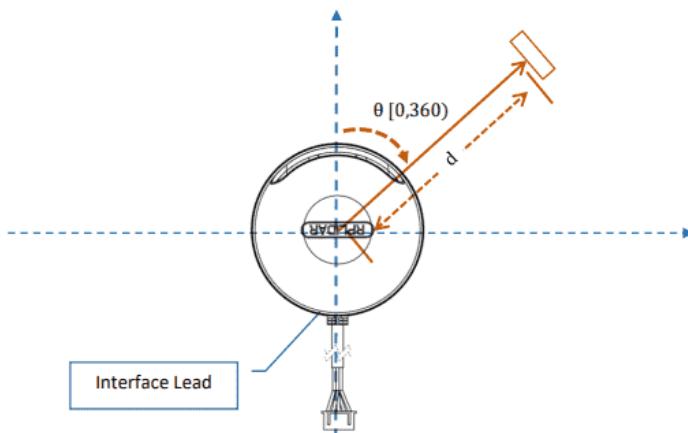
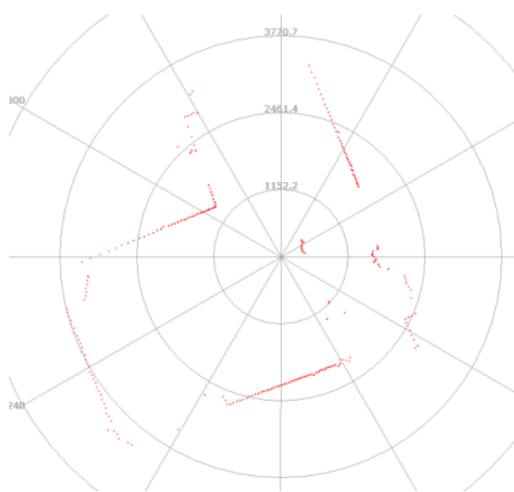


Figura 3 – Ambiente virtual formado através de pontos coletados (*SLAMTEC, 2016*)



2.4 Robótica móvel

O desenvolvimento de robôs foi iniciado no século XX, com intuito de substituir a atuação do ser humano em atividades de alta periculosidade. Esses dispositivos eram, em sua maioria, braços manipuladores estáticos, o que pode ser visto como uma limitação, visto que não têm a capacidade de se locomover no ambiente (*COUTINHO, 2014*).

Com o avanço dos sistemas de controle robótico, foi possível que esses dispositivos estáticos agora pudessem operar em atividades mais complexas, como em veículos autônomos, dispositivos de limpeza domésticos, guias de museus, entre outros. Ao ramo dos robôs que se movimentam pelo ambiente, foi dado o nome de robótica móvel.

Porém essa nova área trouxe um desafio para os desenvolvedores de dispositivos móveis: para que um robô seja capaz de se locomover, de maneira inteligente, em um local específico, é indispensável o uso de um sistema que reconheça não somente a forma física

do ambiente ao redor, mas também qual a posição ocupada por si próprio neste ambiente. Essas informações necessárias para a movimentação podem ser obtidas através da integração do robô com diversos sensores, entre eles o LiDAR.

2.5 O problema de SLAM (*Simultaneos Location and Mapping*)

Quando um ser humano se insere em um ambiente desconhecido, ele rapidamente começa a integrar-se a ele, através de mecanismos como visão e audição. Dessa forma, um local que antes era incógnito passa a ser, ao poucos, reconhecido pelo indivíduo, o que permite que ele se move de maneira precisa e sem se perder. Esse processo de tomar conhecimento do mundo ao redor, que pode ser facilmente realizado por uma pessoa, no contexto da robótica móvel é conhecido como problema de SLAM.

A discussão sobre SLAM começou na Conferência de Robótica e Automação do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) em São Francisco, no ano de 1986. Desde então, os inúmeros projetos envolvendo SLAM foram capazes de proporcionar aos robôs considerável inteligência espacial, sobretudo em situações estáticas. No entanto, no momento em que o robô adentra novos ambientes, o que é resultado de sua locomoção, o processo de mapear o ambiente e compreender sua localização atual se torna mais complexo, ao ponto de não se ter uma resposta definida para a questão do SLAM (BIGHETI, 2011).

Dentre as tecnologias utilizadas que trabalham de maneira integrada para buscar uma resposta para o problema de SLAM, destacam-se os dispositivos que detectam a localização dos obstáculos ao redor. Um desses é o LiDAR, foco deste projeto.

2.6 Comunicação de componentes através do Protocolo I²C (*Inter-Integrated Circuit*)

Um dos protocolos de conexão entre dispositivos eletrônicos é o I²C, cuja principal característica é o uso de apenas dois fios. Cada um dos desses possui um nome específico: o primeiro é chamado de SDA, e é por onde fluem os dados, enquanto o segundo se chama SCL, cuja função é controlar a linha SDA.

A base da comunicação é a transmissão de dados de forma serial, ou seja, cada bit que forma o dado é transmitido, de forma individual. Há dois tipos de componentes que constituem uma rede I²C: o dispositivo chefe e o(s) dispositivo(s) que obedece(m) ao chefe. Cada componente possui um endereço específico, que é formado por um número binário. Quando o chefe deseja se comunicar a um dos componentes, ele escreve esse endereço binário na linha SDA, cujos bits são intercalados por pulsos de clock (pulsos na linha SCL). Os componentes leem os bits e reconhecem se o dispositivo chefe deseja realizar uma comunicação com eles próprios ou não.

A troca de dados entre o chefe e o dispositivo obediente ocorre pela SDA (pela mesma linha do endereço) e cada bit que forma o dado é, da mesma forma, disponibilizado individualmente e intercalado por um pulso na SCL.

2.7 A transferência de dados sem fio

Ao longo da história da humanidade, atividades como a manufatura e o artesanato eram processos demorados e individualizados. A partir do momento em que a automação passa a ser incorporada às atividades, obtém-se melhores resultados em tempos mais curtos, o que tornou-se tendência.

Por conta disso e do contínuo avanço no desenvolvimento de tecnologias, ao adentrar à quarta revolução industrial, momento em que a Internet se populariza, a ideia de automatizar tarefas recebe uma nova dinâmica, apresentando muitas melhorias, no que tange à da troca de dados entre componentes. Surge, nesse contexto, a comunicação Wi-Fi, de maneira a possibilitar a obtenção de informações de uma malha de controle à distância sem a necessidade de fios ([ZEILMANN, 2002](#)). A partir do uso de ondas de rádio comuns, sincronizadas em frequências anteriormente definidas, como por exemplo 2.4GHz e 5GHZ, os dispositivos se comunicam sem ao menos usar um único fio entre eles. Popularmente conhecido como Wi-Fi, o protocolo 802.11 torna possível que todos os dispositivos conectados a rede e localizados a uma distância limite, consigam receber e interpretar as informações passadas a eles ([BRPHONIA, 2019](#)).

Dessa forma, é comum que o uso da comunicação sem fio seja aplicada em processos em que há uma relativa distância física entre os componentes, visto que o sistema torna-se mais flexível, conforme ([JUNIOR; MENDES, 2019](#)).

3 Projeto do protótipo

Para iniciar o desenvolvimento do protótipo, um LiDAR profissional foi analisado e utilizado como referência, o qual é mostrado na Figura 4.

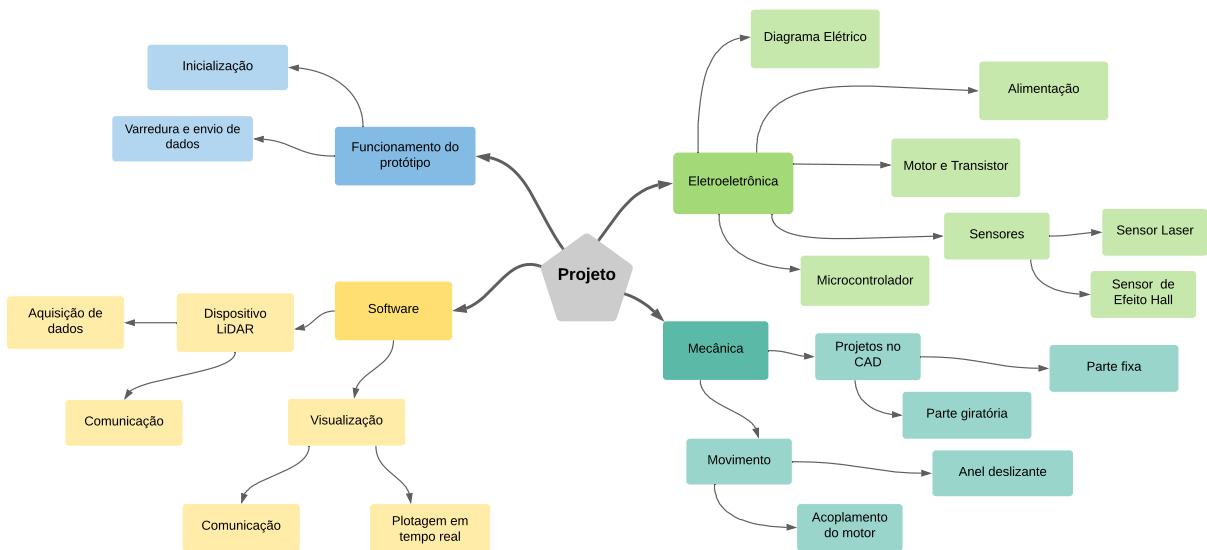
Agora que já se tem conhecimento dos conceitos que fundamentam um LiDAR, é possível introduzir não somente os componentes utilizados na confecção do sistema de medição, mas também como é realizada cada etapa da projeção do equipamento. Na Figura 5 é apresentada a divisão do protótipo em módulos específicos, que são abordados individualmente a seguir.

3.1.1 Alimentação

Figura 4 – LiDAR profissional (YOUYEETOO, 2021)



Figura 5 – Mapa mental do projeto



3.1 Eletroeletrônica

O funcionamento do protótipo é proporcionado pela integração de diversos componentes, como motores de corrente contínua e o sensor laser. Dessa forma, a projeção do sistema eletrônico e também a escolha dos componentes é o que vai determinar, em parte, a performance do LiDAR.

Para a confecção do dispositivo foi elaborado um diagrama base, representado na Figura 6, a fim de auxiliar a compreensão dos componentes eletroeletrônicos utilizados, assim como as conexões entre eles. Posteriormente, foi elaborado um diagrama contendo todos os componentes do LiDAR, representado na Figura 7.

Figura 6 – Diagrama eletroeletrônico

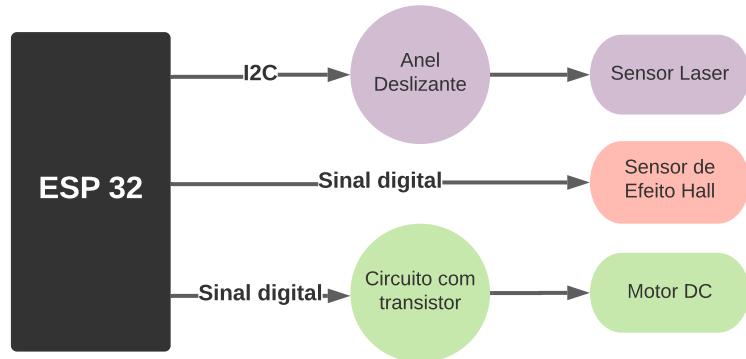
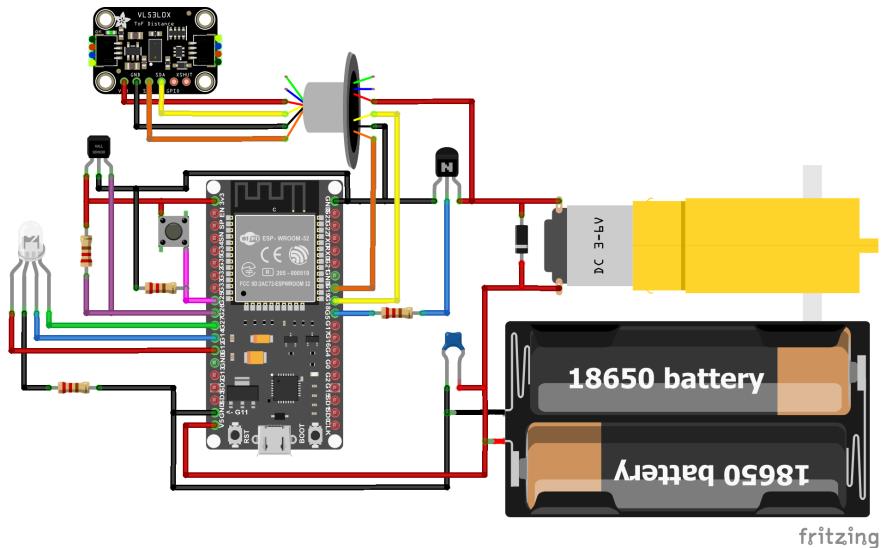


Figura 7 – Diagrama eletroeletrônico completo



3.1.1 Alimentação

O protótipo funciona à base de energia elétrica, uma vez que seus componentes são eletroeletrônicos. Como possibilidades de alimentação, há a utilização de uma fonte reguladora, a qual é ligada à tomada, ou então o uso de baterias. A segunda opção é a escolhida, pois promove ao protótipo mais flexibilidade, visto que não é necessário conectá-lo, por cabos, a um ponto fixo externo a ele (tomada).

Dentre as baterias disponíveis, foram escolhidas as de íon-lítio, devido ao fato de serem compactas (se comparadas às pilhas comuns). Cada bateria tem tensão de 3.7 Volts, e fornece aproximadamente 3.800 mAh. Para o protótipo, foram utilizadas essas, ligadas em série, resultando em um conjunto de 7.4 Volts.

Essa ligação é necessária devido à tensão de operação mínima de alguns componentes, como o sensor laser, o qual necessita de no mínimo 5 Volts para funcionar. Porém, a tensão necessária para o funcionamento dos componentes não é 7.4 Volts. No caso do LiDAR, nenhum componente possui tensão de operação superior à 5.0 Volts, o que torna

necessário reduzir esse valor fornecido pelas baterias, ligadas em série.

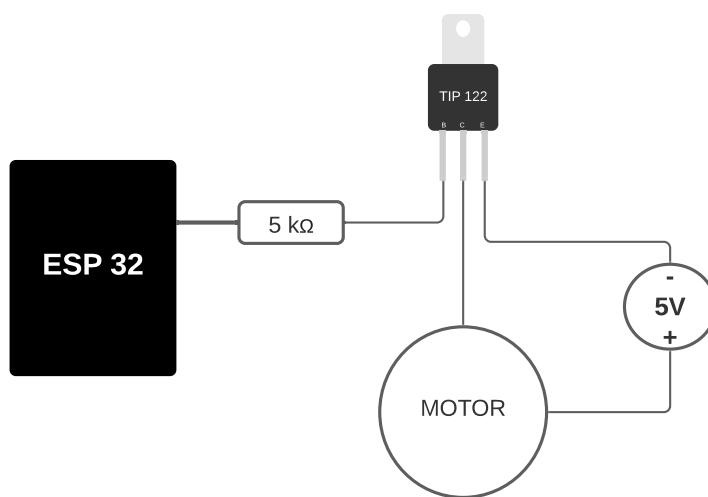
Com intuito de diminuir o valor da tensão disponível ao protótipo, será utilizado um regulador de tensão. Esse componente possui quatro terminais, de modo que dois são de entrada (onde se conecta a saída das baterias) e dois de saída (onde se obtém a tensão de saída, já reduzida). Para o protótipo, é utilizado o regulador de tensão XL6009, o qual limita a saída entre 1.25 e 6 Volts. Esse dispositivo foi escolhido pois possui um fácil ajuste de tensão de saída: para alterá-la, basta girar um parafuso que está na parte externa do componente.

3.1.2 Motor de Corrente Contínua com transistor

Para que o mapeamento seja efetuado ao redor de todo o ambiente, é necessário que o módulo giratório entre em rotação. Com intuito de promover essa rotação, é utilizado um motor de corrente contínua. A questão é que a maioria dos motores possuem velocidade de rotação no eixo muito altas para o protótipo. Logo, é utilizado um motor com caixa de redução, a qual diminui a velocidade de rotação do eixo.

Uma vez que se decidiu o motor utilizado, é necessário definir o seu circuito de acionamento, ou seja, como ele será energizado e controlado. Para tanto, é utilizado um circuito com transistor (TIP 122), mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Circuito de acionamento do motor



O funcionamento do circuito representado na Figura 8 é simples: O componente responsável por acionar o motor é o microcontrolador ESP32. Através da liberação de tensão na base (terminal mais à esquerda) do transistor(TIP 122), esse passa a "fechar" o seu circuito interno. Dessa forma, os pinos emissor(E) e coletor(C) são curto-circuitados, e o terminal negativo da bateria de 5 Volts é ligado ao motor, de forma a colocá-lo em operação.

3.1.3 Sensor Laser

É o componente responsável por captar dados do ambiente ao redor e informar ao ESP32 a distância entre o LiDAR e os objetos do meio externo. Seu princípio de funcionamento se baseia no conceito ToF, explicado no Seção 2.1.

Para o protótipo, foram analisados os sensores VL53L0X e Tof0120, os quais possuem especificações praticamente idênticas, do ponto de vista de comunicação com demais componentes, dimensões externas e capacidade de processamento. Por motivos de custo e disponibilidade no mercado, toma-se por preferência a primeira opção.

O VL53L0X é um sensor que se comunica via protocolo I²C, o qual é explicado no Tópico 2.6. Suas principais características de funcionamento são sua tensão de operação (5.0 Volts) e sua distância de medição absoluta de dois metros ([STMICROELECTRONICS, 2018](#)).

3.1.4 Sensor Hall

É um dispositivo que, na presença de um campo magnético mínimo, estipulado pelo fabricante, emite um sinal de saída. No caso desse projeto, o sensor de efeito hall é utilizado para indicar o fim de uma revolução da base móvel.

Algumas das principais características do sensor escolhido, o US 1881 são: a proteção contra inversão de polaridade e a sua tensão de operação variando de 3,5 à 24 Volts. ([MELEXIS INSPIRED ENGINEERING, 2019](#)). Além disso, ele foi escolhido não somente por ser compacto, mas também devido ao relativo baixo custo de aquisição e disponibilidade no mercado.

3.1.5 Microcontrolador

É o componente responsável por administrar, do ponto de vista lógico, uma aplicação. Os microcontroladores são carregados com um código, escrito pelo operador, e a partir da execução desse, o microcontrolador passa a realizar as tarefas propostas.

Os microcontroladores analisados são o ATmega328 e o ESP32. Ambos os dispositivos são eficientes, no que tange à capacidade de processamento e recursos. Para o projeto, foi escolhido o ESP32, o qual é adquirido já com uma placa de prototipação, o que torna muito conveniente a sua integração com os demais componentes do protótipo.

O ESP32 é um microcontrolador *Dual Core* com alta capacidade de processamento, o qual é capaz de operar a 240 MHz. Ele detém, também, de duas portas que trabalham com protocolo I²C ([ESPRESSIF SYSTEMS, 2021](#)), o que é essencial para o projeto. Entretanto, o grande diferencial do ESP32 é o módulo de interface Wi-Fi integrado, o que

possibilita com que os dados armazenados na memória do ESP32 possam ser transmitidos a outros dispositivos sem o uso de fios. Além das funcionalidades já citadas, outro motivo para a escolha desse microcontrolador é a possibilidade de execução de códigos escritos em linguagem interpretada.

3.2 Mecânica

Para dispor os componentes eletroeletrônicos utilizados no projeto é necessário desenvolver uma estrutura mecânica, responsável por proporcionar sustento ao LiDAR. Além disso, é de responsabilidade do corpo físico organizar os dispositivos e mantê-los fixos ao protótipo, com intuito de garantir que o projeto não irá se desestruturar.

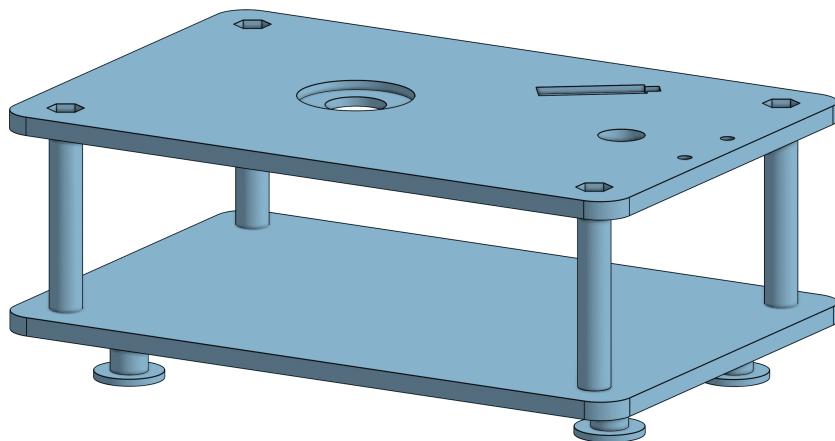
O primeiro passo para projetar os módulos físicos do protótipo é iniciar o desenvolvimento das peças em um *software CAD* (Projeto Assistido por Computador). Na sequência, é abordado o modo de integração entre cada uma das peças construídas, o que possibilita que a parte giratória possa rotacionar e atingir a plenitude no seu funcionamento.

3.2.1 Projetos no CAD

A parte mecânica em si é dividida em dois grandes módulos: a parte fixa (ou estática) e a parte móvel (ou giratória). A primeira fica em contato com o solo, e não se move em relação a este, ao passo que a segunda é rotacional.

Para projetar esses módulos, foi utilizado o *software* de desenho 3D OnShape ([ONSHAPE, 2014](#)). No primeiro momento, é introduzido o módulo estático, seguido da parte móvel. As Figuras 9 e 10 mostram as vistas dessas partes, respectivamente.

Figura 9 – Projeto da parte estática

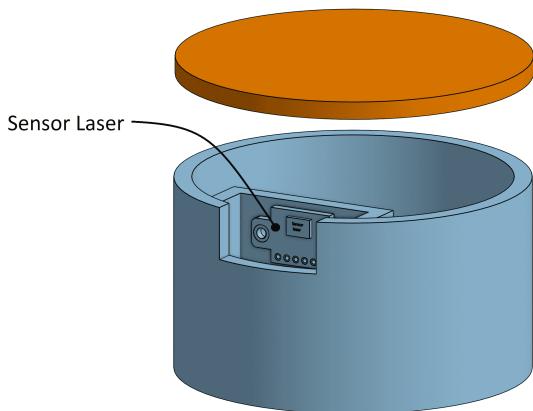


A parte fixa é composta por duas plataformas de quatro milímetros de espessura, espaçadas por pilares de 40 milímetros de comprimento, conforme a Figura 9. Para elevar

a placa inferior e promover o contato do protótipo com a superfície em que será instalado, serão colocados 4 pés, sendo dispostos um em cada extremidade inferior da chapa.

A placa superior possui em sua superfície, uma série de depressões e furos, que servem, respectivamente, para a alocação de componentes e para fixação de outras peças que compõem o projeto, como o motor e os pilares.

Figura 10 – Projeto da parte giratória



A parte giratória é responsável por sustentar o sensor laser, e é acoplada acima da base fixa. Conforme a Figura 10, seu corpo é cilíndrico e oco, o que garante economia de material de impressão 3D e, principalmente, baixo peso. Para completar a estrutura da base móvel, há uma tampa, responsável por proteger o sensor laser e sua fixação e permitir fácil acesso a ele, para caso de manutenção.

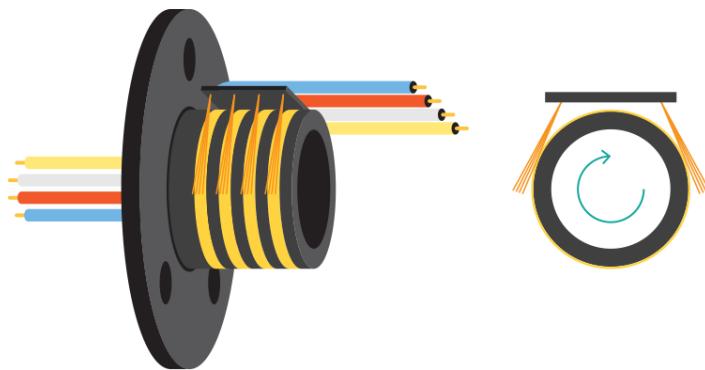
3.2.2 Movimento

Conforme explicado no início da Seção 3, o sensor laser deve efetuar medições de distância entre ele mesmo e os objetos ao redor em diversas angulações. Para isso, é necessário que a base giratória, mostrada na Figura 10, adquira rotação. Há dois principais sistemas que devem ser explicados, no que tange ao movimento da base giratória: o primeiro é a comunicação entre sensor laser e microcontrolador por meio do anel coletor e, o segundo, a transmissão de movimento.

A comunicação entre o microcontrolador e o sensor laser, fixos às bases estática e giratória, respectivamente, é um desafio. Dado que esses componentes eletrônicos trocam dados por meio de fios, e que os módulos nos quais eles estão acoplados rotacionam um em relação ao outro, não é possível realizar uma simples ligação elétrica entre eles. Caso houvesse essa conexão, os fios, no decorrer de poucos segundos, torcer-se-iam, ao ponto de se romperem. Logo, é utilizado um anel deslizante, o qual permite a conexão elétrica entre dois dispositivos que possuem relação de rotação entre eles.

Esse componente é dotado de um rolamento interno e pistas tubulares de um material condutor de eletricidade. Internamente ao anel deslizante, há uma chapa onde os fios (do lado estático) são fixados e cada um deles é ligado indiretamente a uma pista tubular. Na outra extremidade (do lado giratório) é conectado um fio à parte interna de cada pista tubular, de modo os fios da mesma cor compartilhem a mesma pista (isso é o que garante o contato elétrico entre fios de extremidades opostas). A Figura 11 mostra o corpo externo do anel deslizante.

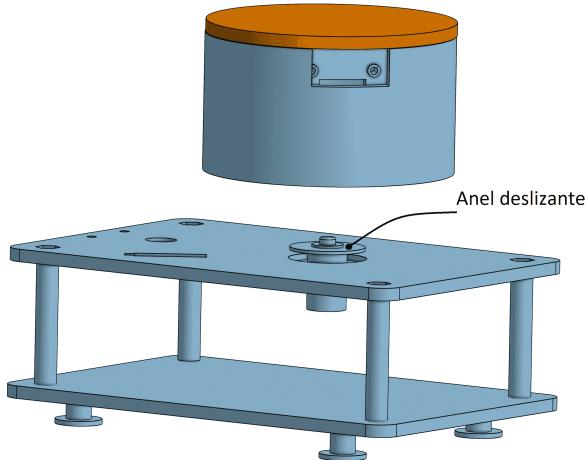
Figura 11 – Anel deslizante *adaptado de (WIKIMEDIA, 2017)*



No LiDAR, o anel deslizante é também utilizado, para energizar o sensor laser, dado que a fonte de alimentação do protótipo está presente na base fixa, assim como o microcontrolador. Dessa forma, com apenas um componente, é possível promover a comunicação e energização do dispositivo laser. Além disso, é possível fixar a base giratória no anel deslizante, de maneira a utilizá-lo como rolamento e não necessitar adquirir um rolamento a mais para integrar as bases.

A integração das bases fixa e dinâmica utilizando o anel deslizante é apresentada na Figura 12.

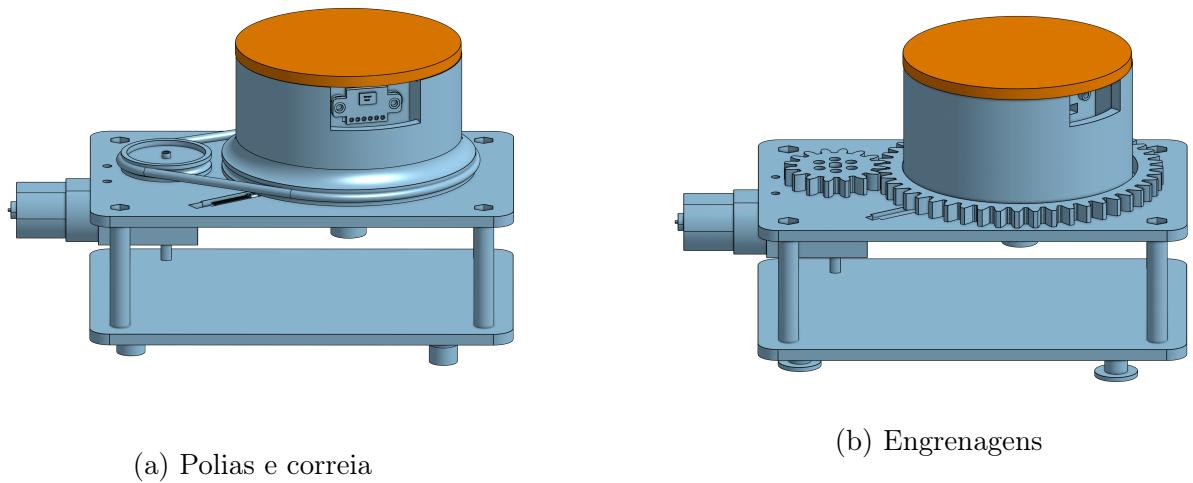
Figura 12 – Junção das bases com o anel deslizante



Para a transmissão de movimento do motor para a base giratória, foi projetado um sistema de polias e correia, conforme a Figura 13a. Como opção alternativa, se desenvolveu um sistema por engrenagens, sendo este o escolhido para o LiDAR, por motivos de simplicidade de confecção.

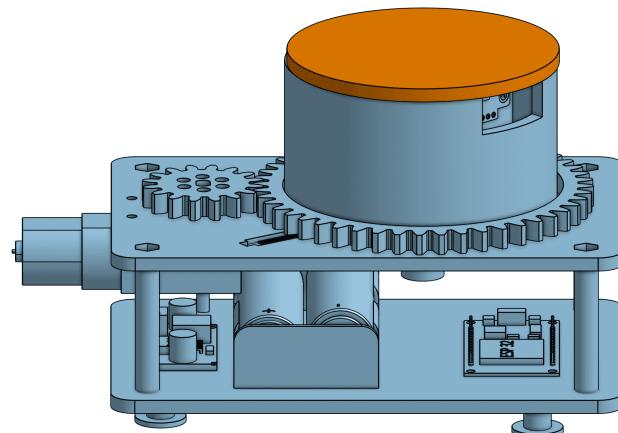
As engrenagens projetadas possuem, respectivamente, 16 e 48 dentes, o que configura uma relação de transmissão de 1:3, servindo como redutor de frequência e aumento do torque, para que possua a força necessária para movimentar a base. Logo, a base giratória rotaciona com frequência três vezes menos do que o eixo do motor, conforme a Figura 13b.

Figura 13 – Sistemas de transmissão



Na Figura 14, é mostrada a imagem do LiDAR completo, com todos os dispositivos eletroeletrônicos (que foram criados para fins ilustrativos) e as partes que, de fato, são impressas.

Figura 14 – Protótipo completo



3.3 Software

No LiDAR, os componentes eletroeletrônicos são os responsáveis por captar informações do ambiente, tomar decisões e realizar ações. Porém, esse dispositivos não possuem capacidade lógica por natureza própria, o que torna necessário o desenvolvimento de um código que tenha a responsabilidade de proporcionar essa capacidade ao sistema.

Esse código, no caso do protótipo, é armazenado na memória *flash* do microcontrolador e este é responsável por interpretar o código e determinar qual ação deve ser tomada e qual componente deve realizá-la. Os códigos que são executados em microcontroladores costumam ser elaborados em IDEs - *Integrated Development Environment*, que são editores de texto com funcionalidades que auxiliam o desenvolvimento.

Para escrever uma lógica, é necessário escolher uma linguagem de programação, que determina quais frases/palavras devem ser escritas para realizar determinada ação. Mais à frente, o programa escrito na linguagem escolhida será convertido para um código que o microcontrolador compreenda.

A parte de *software*, além de incluir o código lógico do sistema, abrange também a parte de comunicação entre os componentes, e de que maneira essa é realizada.

Neste tópico, é comentado o modo como funciona o código executado no microcontrolador e como ocorre a comunicação dos dados entre os componentes do LiDAR e entre este e o *software* gráfico.

3.3.1 Dispositivo LiDAR

Neste tópico é abordada a lógica executada entre os componentes para que seja realizada a varredura propriamente dita.

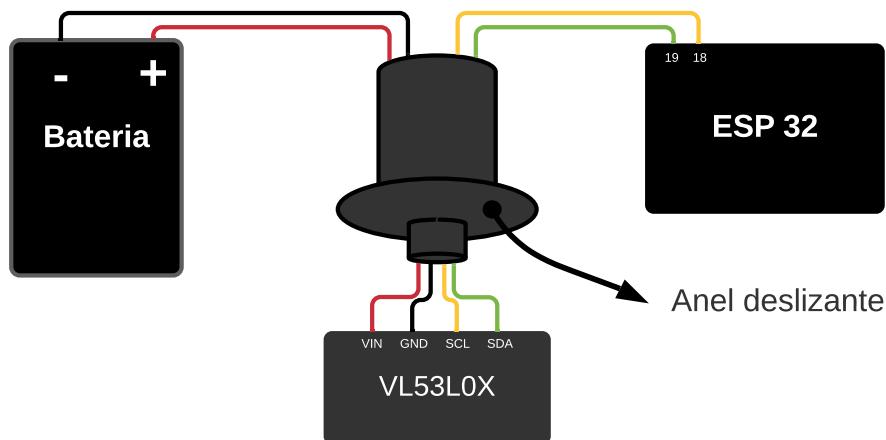
O código executado pelo microcontrolador é escrito em MicroPython ([MICROPYTHON, 2014](#)), e como IDE é utilizada a Thonny ([THONNY, 2014](#)). O motivo da escolha dessa linguagem é a presença de bibliotecas compactas e o grande leque de funcionalidades que podem ser utilizadas, e o ambiente de desenvolvimento foi definido devido a fácil integração com o microcontrolador e a possibilidade de escrever códigos em MicroPython.

As duas principais lógicas que são executadas pelo microcontrolador ESP32 é a de coleta de dados (ou pontos) e a da identificação do fim de uma revolução da base giratória. Na sequência, é abordado, de maneira simplificada, como é a escrita dos códigos acima citados, além de sua importância e seu modo de funcionamento.

Para o início da coleta de pontos, é necessário que, através do código implementado,

o ESP32 receba os dados de distância obtidos pelo sensor laser, de modo que cada ponto seja recebido individualmente, e armazenado em uma lista. O envio de dados do sensor para o microcontrolador é realizado através de fios, com o uso do anel deslizante, conforme o circuito da Figura 15.

Figura 15 – Comunicação do ESP32 com o VL53L0X utilizando anel deslizante



Porém, somente com conexão elétrica os componentes não são capazes de trocar informação, e é nesse momento que o protocolo de comunicação é utilizado. No caso do ESP32 e do VL53L0X (sensor laser), o protocolo aplicado é o I²C, explicado na Seção 2.6. O pseudocódigo escrito para realizar essa integração é mostrado na Listagem 1.

Listagem 1 – Comunicação do ESP32 com o VL53L0X utilizando I²C

```

01 importar o protocolo I2C
02 importar a biblioteca para comunicar com o sensor laser
03
04 i2c = I2C(padrao)
05 sensorLaser = classeSensorLaser(i2c)
06
07 enquanto verdadeiro, execute:
08     sensorLaser.leitura()

```

Nas duas primeiras linhas, são importados os objetos do protocolo I²C e do sensor laser, respectivamente, responsáveis por proporcionar o uso do protocolo e a comunicação com o sensor. Nas linhas quatro e cinco, são instanciados os objetos do protocolo e do sensor, necessários para que se possa, mais à frente, fazer a medição de distância. Por fim, na linha sete é iniciado um *loop*, dentro do qual é implementada a lógica para se comunicar com o sensor laser e receber o valor de distância captado por ele. É importante destacar que o código de verdade não é escrito dessa forma, ou seja, com essas palavras. Porém, para

facilitar o compreendimento da lógica, foi criado um pseudocódigo, equivalente ao código real.

Após analisar a lógica responsável pela coleta de pontos, é preciso compreender como o fim de uma revolução da base dinâmica é identificado, a nível de software. Neste caso, é utilizado o sensor de efeito hall US1881 e um ímã, de forma que este é fixado abaixo da parte externa da base giratória e aquele é preso à base estática. Com a base dinâmica em rotação, a medida que o sensor hall chavear - por conta do campo magnético provindo do ímã, o microcontrolador recebe esse sinal e identifica que a base dinâmica realizou uma revolução.

O compreendimento do fim de uma revolução é essencial, pois, a cada volta da base giratória, os dados coletados são enviados ao *software* gráfico, e um novo ciclo de medição se inicia, ou seja, é esse processo que divide uma revolução de outra e indica o momento de enviar os dados ao programa de visualização. O sensor hall e o ESP32 se comunicam por meio de fios, mas, como ambos estão presos à base estática, não há necessidade de se utilizar o anel deslizante. Ademais, a troca de dados entre esses componentes é realizada através de sinais digitais, ou seja, estados lógicos alto e baixo. O pseudocódigo escrito para realizar essa funcionalidade é mostrada na Listagem 2.

Listagem 2 – Lógica de detecção de revolução

```
01 importar a classe para utilizar os pinos do microcontrolador
02
03 funcao enviarDados():
04     (logica ainda nao implementada)
05
06 sensorHall = pino(8, entrada)
07 sensorHall.interrupcao(quando chavear, chamar a funcao: enviarDados)
```

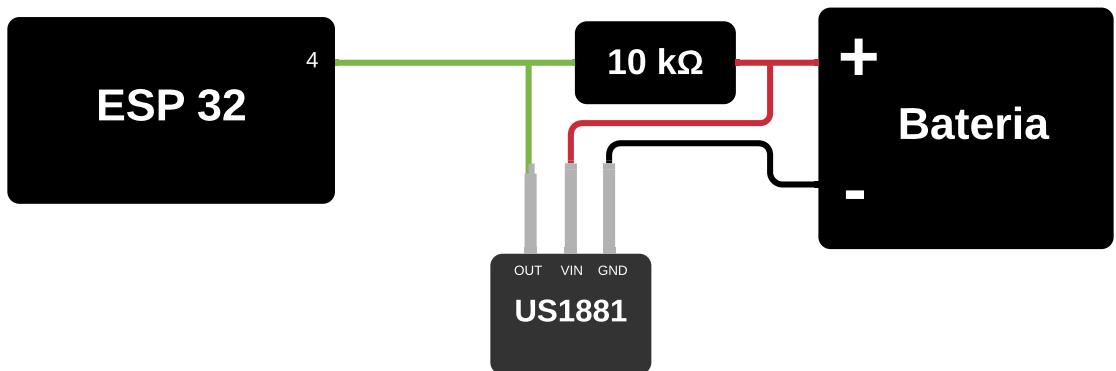
Na linha um é importada a classe que permite acessar o *hardware* do microcontrolador. Na linha três, é definida uma função (que no momento não está implementada, mas que é responsável por enviar os dados ao *software* gráfico). Essa função, de nome "enviarDados", é chamada quando o ESP32 receber um chaveamento do sensor hall US 1881. Na linha seis, é instanciado o pino do microcontrolador que está vinculado ao pino de saída do sensor hall e, por fim, na linha sete, é criada a funcionalidade de, no momento em que o sensor US 1881 enviar um sinal de nível baixo à entrada do ESP32, a função definida na linha três deve ser disparada. É importante ressaltar que a função em questão, opera em paralelo com o *loop* citado na Listagem 1, ou seja, as duas lógicas podem ser executadas simultaneamente.

Após compreender o funcionamento do software, mostrado na Listagem 2, é importante entender o circuito físico que conecta os componentes. À entrada do microcontrolador

é colocado um resistor *pull up*, responsável por manter o nível lógico da entrada alto e, conforme o sensor hall chavear, essa mesma entrada recebe um pulso de nível baixo.

A Figura 16 mostra como é o circuito que comunica os componentes em questão.

Figura 16 – Circuito do sensor hall



3.3.2 Visualização

Uma vez que os dados foram captados pelo sensor VL53L0X e recebidos no microcontrolador, este estabelece a comunicação com o dispositivo de visualização. Esse sistema é um programa que é interpretado no navegador do computador, o qual torna possível a análise visual do mapeamento realizado. Nesta seção, portanto, é comentado como esses dados são transferidos e qual a lógica utilizada para apresentá-los.

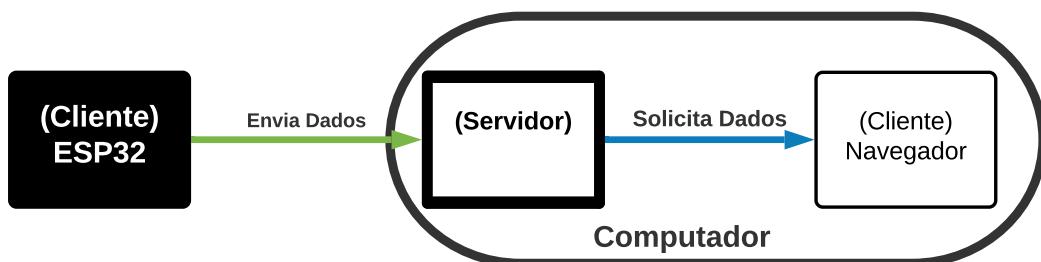
O microcontrolador envia os dados via Wi-Fi, e para que ele e o *software* gráfico troquem informações, é necessário estabelecer o protocolo de comunicação. Neste caso, o protocolo escolhido é o HTTP - *Hypertext Transfer Protocol*. Antes de explicar o funcionamento deste modo de comunicação, é importante compreender que a lógica responsável pelo funcionamento do *software* gráfico é armazenada em um servidor local do computador. Assim, no momento em que se deseja visualizar o mapeamento, é necessário abrir o navegador e acessar esse servidor.

A respeito do funcionamento do protocolo HTTP, destaca-se que esse utiliza a denotação de cliente e servidor. A comunicação entre o cliente (que consome os dados) e o servidor (que armazena os dados) é realizada através de requisições HTTP.

Essas requisições são escritas no formato de URLs (*Uniform Resource Locator*), e nelas são incluídos o servidor que se deseja acessar e qual a informação se deseja receber ou enviar.

No caso deste projeto, o servidor será o lugar responsável por armazenar o código do *software* gráfico, conforme dito anteriormente. E os clientes são dois: o primeiro é o navegador, responsável por interpretar a lógica armazenada e exibir o gráfico em tela e o segundo é o microcontrolador ESP32, cuja função é enviar os dados coletados para o servidor. Dessa forma, o servidor é responsável por armazenar a lógica do *software* gráfico (e enviá-la ao navegador quando este requisitar) e também receber os dados do ESP32. A Figura 17 exemplifica o esquema acima explicado.

Figura 17 – Esquema da comunicação HTTP do projeto



Para que o ESP32 possa enviar os dados ao servidor, é necessário, primeiro conectá-lo a mesma rede do computador. A partir desta conexão, é possível, através do protocolo HTTP, enviar os dados. Porém, com intuito de enviar os pontos coletados, é preciso escrever um bloco de código, responsável por realizar essas funcionalidades. Essa lógica é anexada aos outros códigos, explicados anteriormente.

3.3.2.1 Plotagem em tempo real

Uma vez compreendido o modo que os dados são enviados ao *software* gráfico, é possível, agora, compreender como este é elaborado. O programa de visualização é escrito com o uso de três linguagens distintas: o HTML (*Hyper Text Markup Language*), o CSS (*Cascading Style Sheets*) e o JavaScript, responsáveis, respectivamente, por mostrar os elementos e textos em tela, estilizá-los e torná-los funcionais.

Essa combinação das linguagens é necessária pois para construir um software de visualização que é executado a partir de um navegador do computador, não basta apenas ler e interpretar dados, o que é proporcionado pelo Javascript, mas também exibir essas informações na tela e de maneira apresentável, o que é responsabilidade do HTML e CSS, respectivamente.

A escolha dessa metodologia de programação e do uso das linguagens citadas tem como motivo a utilização de diferentes linguagens no projeto, de modo a mostrar como elas podem ser integradas para resultar em uma aplicação bem feita. Além desse motivo, os integrantes do grupo buscam novos conhecimentos e, nesse contexto, aplicar linguagens de programação distintas em um mesmo projeto é uma forma de adquirir novas experiências.

Como ambiente de desenvolvimento, é utilizado o Visual Studio Code ([MICROSOFT, 2015](#)), o qual possui uma interface funcional, na qual é possível programar em variados tipos de linguagens simultaneamente (com atalhos e configurações que auxiliam na escrita dos códigos), além da existência de um terminal integrado, o que permite testar o código e instalar bibliotecas de uma maneira rápida.

3.4 Funcionamento do protótipo

Uma vez que se tem compreendimento de quais são as partes e componentes que compõem o projeto, bem como o modo que cada módulo é interligado um ao outro, é possível iniciar a análise do funcionamento detalhado do protótipo. Neste momento, portanto, é abordado o passo-a-passo de operação do LiDAR, desde o momento no qual ele é energizado até o instante da visualização dos pontos no *software* gráfico.

3.4.1 Inicialização

Para que ocorra a inicialização do processo de mapeamento, é necessário que primeiro o protótipo seja posicionado no local escolhido para se realizar o mapeamento. O estado inicial do LiDAR é *stand-by*, ou seja, de forma que o microcontrolador fica à espera de um sinal de controle por parte do operador, através de um aperto de botão.

Uma vez que o dispositivo é iniciado, o microcontrolador realiza algumas configurações necessárias para o funcionamento do programa escrito, como importações de módulos, definições de pinos externos e a sua conexão na rede, por meio do Wi-Fi.

Após as configurações inciais, o sistema aciona o motor de corrente contínua e, na sequência, o processo de varredura em si se inicia.

3.4.2 Varredura e Envio de dados

O processo de varredura consiste na essência do princípio de sistema de mapeamento giratório, conforme explicado na Seção [2.3](#). Contudo, existe uma modificação: no processo que será realizado, a posição (grau) de cada medição, não será medida juntamente com a distância, ou seja, não será formado um par distância-posição. O modo que se atribui a posição é explicado mais à frente.

Com intuito de facilitar a compreensão do processo de varredura e do envio de dados, será apresentado o pseudocódigo geral do LiDAR, conforme a Listagem 3. Na sequência, serão feitas observações sobre essa lógica.

Listagem 3 – Pseudo código do funcionamento do protótipo

```
01 realizar importacoes
02
03 i2c = I2C(padrao)
04 sensorLaser = classeSensorLaser(i2c)
09 listaDePontos = listaVazia
10
11 funcao enviarDados():
12     listaProvisoria = listaDePontos
13     listaDePontos.esvaziar()
14
15     enviarPontosAoComputador(listaProvisoria)
16     listaProvisoria.esvaziar()
17
18 sensorHall = pino(8, entrada)
19 sensorHall.interrupcao(quando chavear, chamar a funcao: enviarDados)
20
21 enquanto verdadeiro, execute:
22     valorDoPontoAtual = sensorLaser.leitura()
23     listaDePontos.adicionar(valorDoPontoAtual)
```

Com a base dinâmica em rotação, é iniciado um *loop*, que pode ser observado na linha 21 da Listagem 3. Dentro desse ciclo, o sensor laser fará, de maneira contínua, medições de distâncias e as alocará em uma lista de valores.

Após o sensor hall chavear, o ESP32 tem conhecimento de que uma revolução é completada, de modo a disparar a função de envio de dados. Essa função é responsável não somente por enviar os dados ao *software* gráfico, mas também por esvaziar a lista de valores da revolução que acabou de finalizar, de modo que as coletas de pontos da revolução seguinte (realizadas no *loop*) sejam armazenadas em um vetor vazio.

Conforme a Listagem 3, na linha 11, a referida função acessa os valores da lista que está sendo preenchida com os valores de distâncias no *loop*, copia esses dados a uma lista provisória e esvazia a primeira. Isso é realizado pois o método "enviarPontosAoComputador", definido na linha 15, demora alguns centésimos de segundos para executar, e algumas das medições da revolução seguinte seriam armazenadas na lista ainda com os dados antigos (da última volta). Então, a lista provisória, após o envio dos pontos, também é esvaziada, para que no próximo chaveamento (fim de revolução) do sensor de efeito hall, todo esse processo seja repetido.

Após a análise da lógica de coleta e envio de dados acima descrita, observa-se que

não é possível determinar em qual posição (ou ângulo) cada ponto ocorreu. A explicação disso é que o LiDAR apenas capta um determinado número de pontos por revolução (que pode variar de volta a volta) e, após o fim desta, todos esses dados são enviados ao *software* gráfico.

Logo, a posição de cada ponto será calculada por meio de uma fórmula, que consiste na divisão do número de pontos obtidos em uma rotação, pelo ângulo total de uma volta (360°). Dessa maneira, os pontos estarão dispostos com proporções iguais de distâncias entre eles. Esse cálculo considera como fixa a velocidade angular da base giratória, o que explica a necessidade de se ter um movimento de rotação uniforme.

Destaca-se, portanto, a relação de dependência entre a precisão das medições e a constância da velocidade angular da base giratória, uma vez que o cálculo da distância entre as posições de medição considera esse cenário. Portanto, caso esta não seja estável, a distância real entre as medições não será exata, porém o software desenvolvido ainda tratará como verdadeira, de forma a elaborar um mapeamento falso e impreciso.

4 Construção

Após compreender não apenas o princípio de funcionamento básico do protótipo, mas também quais materiais o compõem, é possível, então, descrever as etapas de construção. Nelas, são explicadas o passo a passo da montagem do protótipo, junto das integrações necessárias entre suas partes constituintes.

4.1 Impressão e integração das peças

O primeiro estágio para a construção propriamente dita é impressão das bases estática e dinâmica, dos suportes e também das engrenagens que compõem o sistema de transmissão de movimento. Esses módulos, desenvolvidos no software OnShape, são convertidos em um arquivo no formato .STL e fatiados em camadas, gerando os Gcodes para a fila da impressora 3D.

Uma vez que os esses componentes foram confeccionados, é necessário realizar uma inspeção cujo objetivo é identificar falhas na produção. Além disso, ainda é necessário polir os módulos, visto que a impressão deixa resíduos. Após o polimento das peças, pode-se avançar à etapa de organização e integração das partes estruturais, respectivamente.

Para integrar as chapas da base estática, são utilizadas porcas e varões rosados, além dos suportes impressos. A Figura 18 representa a primeira versão de todas as peças impressas, ao passo que a Figura 19 mostra a junção das chapas impressas.

Figura 18 – Peças impressas

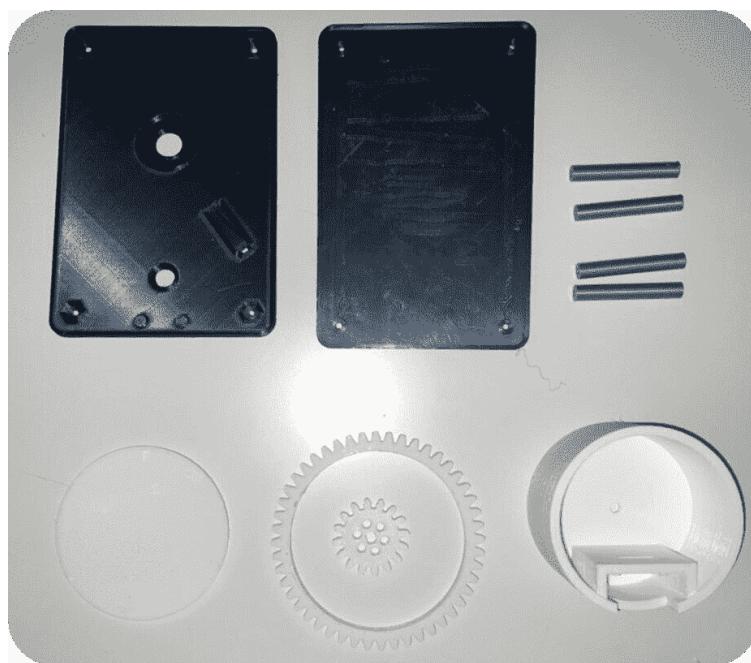


Figura 19 – Base fixa montada



De acordo com o projeto, a base móvel seria incorporada à base fixa por meio do anel deslizante, conforme explicado na Seção 3.2.2. Para isso, seria realizado um sistema de encaixe por pressão, o que torna desnecessário o uso de colas para a fixação dos componentes. Entretanto, após a impressão das peças e a montagem prévia da primeira versão do protótipo, foi identificado problemas físicos relacionados ao encaixe da base dinâmica e no balanceamento da mesma. Tendo isso em vista, foi necessário alterar algumas características da base fixa e da base móvel para integração de um rolamento axial, conforme mostra as Figuras 20 e 21.

Figura 20 – Rolamento axial



Figura 21 – Bases novas com alterações para o rolamento



Como observado na Figura 21, são realizadas duas depressões, uma na parte inferior da base giratória e outra na parte superior da base estática. Essas servem ao mesmo propósito: garantir que o rolamento axial fique preso e acoplado às duas bases. Por conta das dimensões do rolamento, o qual possui 14 mm de espessura, a altura das depressões é calculado de maneira precisa: na base fixa, a profundidade é de 2 mm, enquanto na base móvel o valor é 10 mm. Dessa forma, o rolamento mantém as bases afastadas de 2 mm, para que não haja atrito entre elas durante o movimento.

Com a parte da junção das bases móvel e fixa concluída (já com as alterações), ainda é necessário encaixar a engrenagem da base móvel à base móvel propriamente dita, peças que podem ser vista na Figura 18 (na cor branca). O que se constatou, após a realização de testes, é que esse encaixe manual dos dois módulos não é válido, pois a engrenagem fica descentralizada e dificulta a rotação da base. Tendo em vista esse empecilho na primeira versão de impressão, a integração da engrenagem e da base giratória foi realizada no software

OnShape, de forma que os módulos fossem impressos já juntos, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Bases móvel com engrenagem integrada

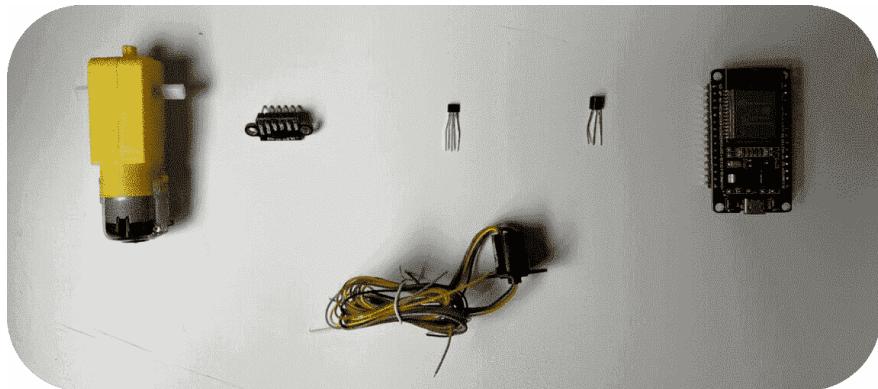


Uma vez que já se preparou os módulos impressos, ainda falta fixar as duas engrenagens do sistema para que a rotação ocorra conforme o planejado. Porém, a alocação do sistema de transmissão de movimento é posicionada quando o LiDAR estiver próximo da finalização, com os componentes eletroeletrônicos já posicionados.

4.2 Confecção do circuito dos componentes eletroeletrônicos

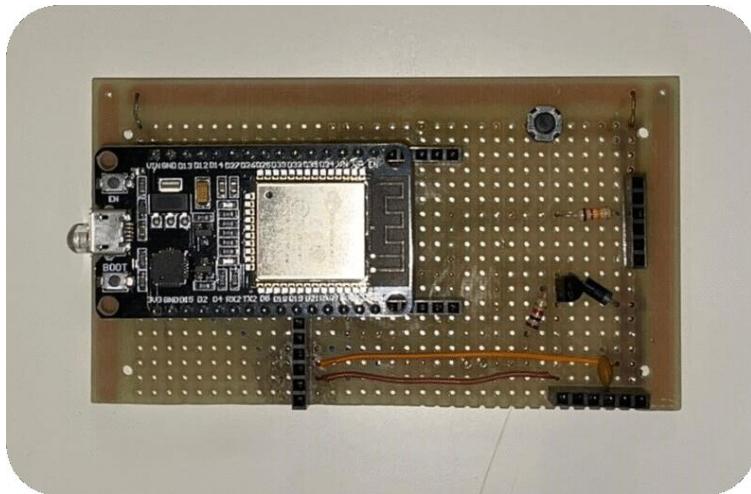
Para a compra de componentes foi feita uma análise de preços de mercado, através do acesso a sites de venda de componentes eletroeletrônicos e até mesmo o uso de alguns aplicativos que buscam na Internet os melhores preços disponíveis. Após a aquisição desses dispositivos, mostrados na Figura 23, um processo de testes foi realizado, pois, alguns componentes poderiam apresentar defeitos de fabricação, além da possibilidade de danos causados no transporte.

Figura 23 – Componentes eletroeletrônicos



Após os testes realizados separadamente em cada componente, foi confeccionada uma placa de prototipação, responsável por conectar os componentes eletroeletrônicos ao microcontrolador, cujo resultado final é mostrado pela Figura 24.

Figura 24 – Placa de prototipação



A placa de prototipação tem como base uma placa perfurada, e é projetada para tornar possível conectar e desconectar os componentes eletroeletrônicos de maneira rápida e simples. Na Figura 24, é possível observar esse sistema de encaixe flexível (fêmeas), além de alguns componentes secundários, como resistores e *jumpers*. São adicionados, também, um LED RGB, cuja função é indicar o estado do LiDAR (*stand-by*, em operação ou erro) e um botão pulsador responsável por iniciar e parar o processo de mapeamento. Outro componente colocado no circuito é um capacitor cerâmico, cuja função é reduzir ruídos e interferências geradas pelo motor e demais componentes.

4.3 Calibração do sensor laser

Antes de juntar os módulos impressos com o circuito, é preciso realizar um procedimento de calibração no sensor laser. Esse processo visa compensar, em parte, os erros de medição do dispositivo. Para implementá-lo, o primeiro passo é posicionar o sensor no início de uma escala e, na sequência, realizar diversas medições de distância, em pontos pré-determinados. É interessante realizar um conjunto de medições para cada ponto escolhido e, posteriormente calcular a média aritmética desses valores.

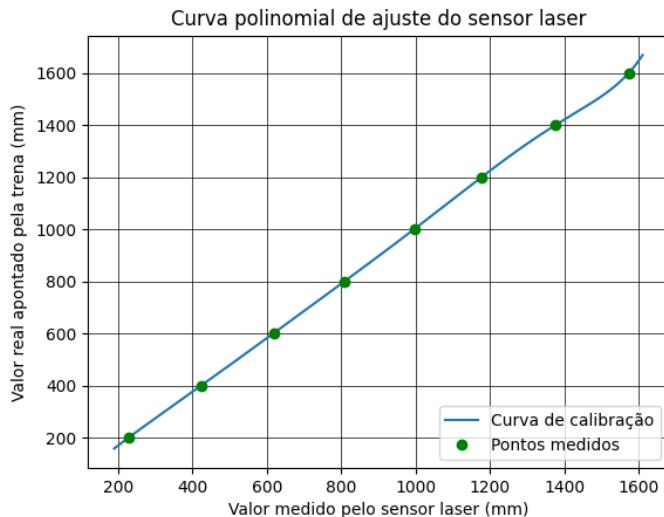
Em seguida, se compara o valor médio de cada ponto com o respectivo valor real da grandeza, sendo este indicado pelo instrumento padrão. Após essa etapa, tem-se dois grupos de dados: o primeiro conjunto é o dos valores apontados pelo sensor, e o segundo corresponde aos valores indicados pelo padrão.

A próxima etapa envolve programação, tendo sido utilizada a Thonny IDE, Python

e uma biblioteca chamada numpy para determinar a curva de ajuste. Com os conjuntos dos pontos, cria-se uma função polinomial, que relaciona cada ponto do conjunto do sensor com cada ponto do conjunto do padrão. Com esse polinômio, é possível compensar, em parte, os erros de medição do sensor laser, e ele será aplicado no *software* gráfico, que apresenta os pontos já corrigidos.

Com intuito de visualizar o resultado do procedimento de calibração, é criado um gráfico em Python, o qual utiliza como suporte as bibliotecas numpy e matplotlib. No eixo das abscissas, são colocados os valores do sensor e, no eixo das ordenadas, as medidas do padrão (valor real da grandeza). O gráfico de calibração, montado com auxílio da função polinomial de ajuste, pode ser visualizado abaixo, na Figura 25.

Figura 25 – Gráfico de calibração do sensor laser



Como se observou durante a calibração, por o sensor possuir erros aleatórios, encontrou-se resultados diferentes para a mesma medição, quando realizada continuamente. Esses erros não são compensados totalmente pela curva de calibração, porém se tem um ajuste nos valores finais. Já em relação a erros sistemáticos, foi possível detectá-los com o aumento da distância medida, como exemplo, entre 1400 e 1600 mm. Sendo assim, no range em questão o sistema apresenta um erro previsto.

4.4 Integração do circuito à parte estrutural

Após a confecção da placa definitiva e da calibração do sensor, o último passo da construção do protótipo é associá-la aos módulos impressos.

Por se tratar de um protótipo, o ideal é que os componentes sejam alocados na base fixa de forma a ter uma fácil remoção/manutenção. Portanto, essa fixação é realizada com

o auxilio mínimo de cola quente, somente para que as peças não caiam com o movimento e transporte do equipamento. Com todas as etapas da construção já realizadas, o resultado final do protótipo alcançado pode ser visualizado na Figura 26.

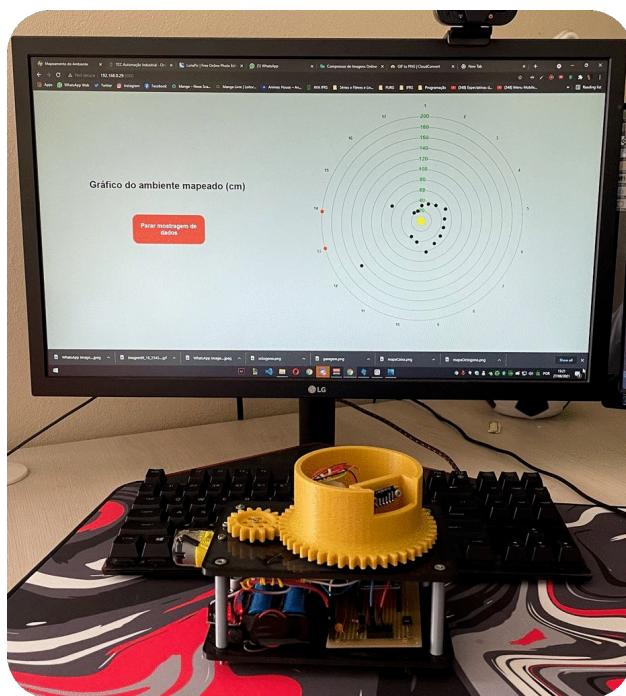
Figura 26 – Protótipo finalizado



5 Experimentação e Resultados

Com o dispositivo LiDAR já completo e com a parte de software já finalizada, é possível visualizar o mapeamento do ambiente no software desenvolvido pelo grupo, conforme mostra a Figura 27.

Figura 27 – LiDAR e gráfico do mapeamento realizado



No gráfico, a parte central amarela representa o dispositivo LiDAR, de forma que seu intuito é promover a aproximação com a realidade. Na cor verde, há uma escala que indica o valor aproximado da medição (distância) para cada ponto, a qual inicia em 0 cm e tem fundo de escala de 200 cm. Na parte externa do gráfico, é mostrado o índice para cada ponto coletado, que começa em um e vai até o número de medições para aquela volta em específico.

Como pode-se observar, a cada revolução da base giratória são coletados cerca de 20 pontos, o que resulta em uma resolução de, aproximadamente, 18 graus. Se considerarmos que a velocidade angular alcançada é próxima de 1 Hz, as 20 medições por volta representam um número pequeno de pontos, o que resulta em um mapeamento com relativo distanciamento da realidade.

Essa baixa frequência de medição pode ser explicada por fatores como o protocolo utilizado na comunicação com o sensor e o sensor propriamente dito. Somado a essa questão, o VL53L0X (sensor laser) é um componente que, apesar da relativa boa capacidade de processamento, tem seus limites, de forma a impedir a realização de 20 medições por segundo, de maneira consistente.

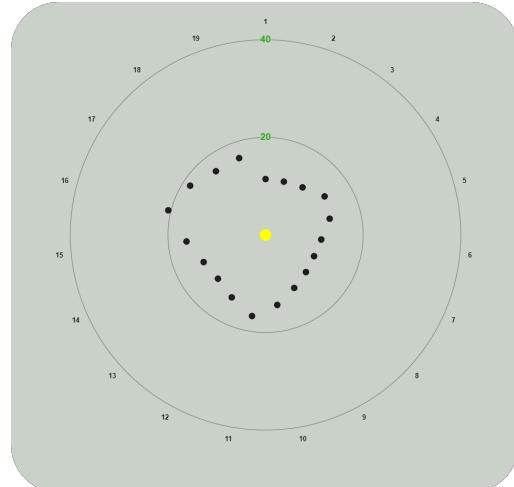
Após a visualização do gráfico de maneira ampla, foram realizados testes em espaços com dimensões conhecidas, com o intuito de observar o quanto o resultado se aproxima do formato do ambiente.

O primeiro teste consistiu em colocar uma caixa retangular, com os lados medindo 25.0 cm de comprimento por 23.2 cm de largura. As Figuras 28a e 28b mostram o experimento acima descrito.

Figura 28 – Experimento com caixa retangular



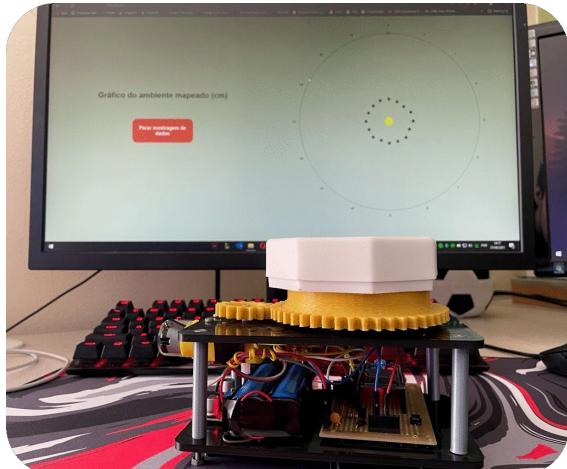
(a) LiDAR com a caixa



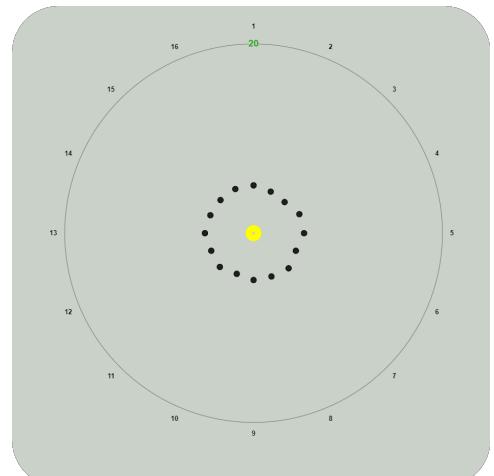
(b) Gráfico

Para o segundo teste, foi posicionado um objeto com forma octogonal regular, com lado igual a 3.6 cm. Esse experimento pode ser visualizado abaixo, nas Figuras 29a e 29b.

Figura 29 – Experimento com peça octogonal



(a) LiDAR com a peça octogonal



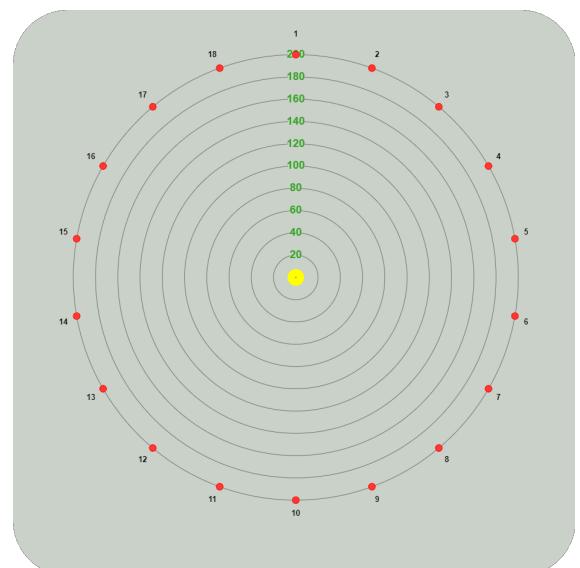
(b) Gráfico

No último caso, foi testado como o gráfico se comporta em um ambiente com dimensões superiores a dois metros. Como se sabe, o sensor VL53L0X possui *range* de medição de 1.5 a 200 cm, ou seja, se alguma distância captada for superior a esse limite, a medição será incorreta. Nesse sentido, é aplicado um filtro no *software* gráfico, o qual observa o valor dos pontos captados, inclusive os fora de alcance, sendo este(s) mostrado(s) na cor vermelha e, os dentro do *range*, na cor preta. Nas Figuras 30a e 30b pode-se visualizar o resultado da terceira experimentação.

Figura 30 – Experimento em ambiente amplo



(a) LiDAR em ambiente amplo



(b) Gráfico

Após os testes, pode-se concluir que o dispositivo desenvolvido apresenta resultados mais próximos da realidade em alguns cenários. Na primeira situação, na qual é colocada uma caixa retangular, o resultado visual atingido foge um pouco do formato do ambiente, uma vez que não se assemelha tanto a um retângulo. Porém, o que se observou é que as dimensões do objeto foram preservadas, uma vez que os valores que formam o gráfico têm magnitude entre 10 e 20 cm.

Já no segundo cenário, no qual é posicionado um corpo de forma octogonal, observa-se que o resultado do gráfico apresenta uma verossimilhança maior com o formato da peça e com seu tamanho, tendo em vista a demonstração de pontos muito próximos do dispositivo no gráfico gerado.

No último experimento, percebe-se que o filtro aplicado às medições superiores a dois metros funciona corretamente, de forma que como não há obstáculos dentro do alcance do LiDAR, todos os pontos são dispostos na cor vermelha.

Após uma análise dos preços de mercado dos LiDAR's profissionais de porte similar ao desenvolvido, constatou-se que o sistema de medição construído apresenta, aproximadamente, orçamento 5 vezes menor. Apesar do custo inferior, é possível constatar que o protótipo foi capaz de atingir resultados próximos dos sistemas em comparação.

Para concluir os experimentos realizados, são elaboradas hipóteses sobre os possíveis motivos relacionados às falhas nos testes. O principal fator que torna o mapeamento não exato é o modo como é atribuído o ângulo de cada ponto captado, o qual necessita, idealmente, que a velocidade da base giratória seja constante. Embora seja difícil comprovar, é muito provável que haja variação de velocidade ao longo do movimento e das rotações, devido a existirem pequenos atritos gerados pelo desalinhamento do sistema de engrenagens.

Outro fator que dificulta a obtenção de um resultado mais próximo do ideal é a limitação da frequência de transmissão dos dados do sensor laser para o microcontrolador, o que limita a quantidade de pontos coletados por revolução. Soma-se a isso possíveis ruídos gerados pelo anel coletor, que devido a impossibilidade de se realizar testes em laboratório, não puderam ser analisados e, eventualmente, diminuídos.

Por fim, há questões que envolvem a precisão dos sensores laser e de efeito hall, de forma que, apesar de filtros e ponderações realizadas a nível de *software*, ainda restam traços de falhas.

6 Conclusão

Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um sensor LiDAR, cuja principal motivação foi a aplicação dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso técnico e a disseminação dessa tecnologia em um formato com custo reduzido.

Com relação aos objetivos propostos inicialmente, pode-se afirmar que os cinco foram atingidos de maneira sucessiva. As projeções mecânica e eletrônica do dispositivo foram realizadas com êxito, apesar de ter sido necessário aplicar modificações, sobretudo nos módulos estruturais. Na sequência, a construção do LiDAR foi feita de maneira consistente e sem grandes imprevistos, tal qual o desenvolvimento do *software* gráfico e validação do protótipo. Dessa forma, os resultados foram atingidos como planejado.

Como proposta para a expansão deste projeto, o grupo sugere, principalmente, a tentativa do desenvolvimento de um código mais eficiente para a comunicação com o sensor laser, de forma a permitir que mais medições sejam realizadas no mesmo intervalo de tempo. Outra sugestão é refazer o sistema de transmissão de movimento, a fim de tornar a velocidade do sistema constante. Ainda, é interessante o desenvolvimento de um anel coletor próprio, ou ainda analisar se há uma frequência de transmissão de dados que se enquadra melhor às características do anel coletor, com intuito de reduzir possíveis ruídos.

O grupo não pode deixar de agradecer ao apoio fornecido pelo orientador e co-orientador, uma vez que muito do que foi produzido partiu de sugestões e conhecimentos compartilhados por eles. Também fica o agradecimento aos familiares dos membros do grupo, que proporcionaram auxílio nos momentos mais inoportunos do trabalho.

Por fim, destaca-se que a realização deste projeto foi de grande utilidade para a vida profissional, pessoal e acadêmica dos integrantes. Conclui-se a importância do planejamento e dedicação colocadas no trabalho, com destaque para o trabalho em equipe, o que indubitavelmente potencializou o resultado atingido pelo grupo.

Referências

BIGHETI, Jeferson André. Navegação de robôs em ambientes internos usando slam. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2011.

BRPHONIA. *COMO FUNCIONA O WIFI*. 2019. Disponível em: <<https://brphonia.com.br/sem-categoria/como-funciona-o-wifi/>>. Acesso em: 25/05/2021.

COUTINHO, César Valentino Ribeiro. *Robótica móvel: sistema de condução autónoma*. Tese (Doutorado) — Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.

ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series Datasheet*. [S.I.], 2021. Rev 3.6.

JUNIOR, Alcir Rodrigues de Melo; MENDES, Luís Augusto Mattos. Transmiss Ao de dados por plc: Um estudo comparativo entre as tecnologias cabeadas e wi-fi. 2019.

MELEXIS INSPIRED ENGINEERING. *Hall Latch – High Sensitivity*. [S.l.], 2019. Rev. 0.19.

MICROPYTHON. *MicroPython*. 2014. Disponível em: <<https://micropython.org/>>. Acesso em: 20/08/2020.

MICROSOFT. *Code editing.Redefined*. 2015. Disponível em: <<https://code.visualstudio.com/>>. Acesso em: 13/08/2021.

MUNDOCONECTADO. *Sensores Lidar - Entenda o que são e como funcionam!* 2020. Disponível em: <<https://mundoconectado.com.br/artigos/v/15382/sensores-lidar-entenda-o-que-sao-e-como-funcionam>>. Acesso em: 24/05/2021.

ONSHAPE. *Connect, Collaborate e Create*. 2014. Disponível em: <<https://www.onshape.com/>>. Acesso em: 20/08/2020.

ROGGIA, Leandro; FUENTES, Rodrigo Cardozo. Automaç ao industrial. *Rede e-Tec Brasil, Colégio T'ecnico e Industrial de Santa Maria-RS*, 2016.

ROSARIO, Joao Mauricio. *Automação industrial*. [S.l.]: Editora Baraúna, 2012.

SLAMTEC. *RPLIDAR A2 Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner*. [S.l.], 2016. Rev 0.1.

STMICROELECTRONICS. *World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor*. [S.l.], 2018. Rev. 2.

TERABEE. *Time of Flight principle*. 2020. Disponível em: <<https://www.terabee.com/time-of-flight-principle/>>. Acesso em: 24/05/2021.

THONNY. *Thonny,Python IDE for beginners*. 2014. Disponível em: <<https://thonny.org/>>. Acesso em: 13/08/2021.

WIKIMEDIA. *File:Slip-rings-fiber-brush.png*. 2017. Disponível em: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Slip-rings-fiber-brush.png>>. Acesso em: 04/06/2021.

YOUYEETOO. *RP LIDAR A1*. 2021. Disponível em: <<https://youyeetoo.com/products/slamtec-rplidar-a1-2d-360-degree-12-meters-scanning-radius-lidar-sensor-scanner-for-bstacle-avoidance-and>>. Acesso em: 14/09/2021.

ZANDONÁ, Daniele Felix et al. Avaliação da precisão altimétrica do mapeamento digital a laser em áreas de cobertura vegetal densa. *Anais, XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil*, p. 16–21, 2005.

ZEILMANN, Rafael Pereira. Uma estratégia para controle e supervisão de processos industriais via internet. 2002.