

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ**

HIGOR ADRIANO GUILARDICCI DE FRANÇA

**SISTEMA DE MAPEAMENTO DE BAIXO CUSTO
PARA VEÍCULOS AUTÔNOMOS**

Santo André – São Paulo
2018

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ**

HIGOR ADRIANO GUILARDICCI DE FRANÇA

**SISTEMA DE MAPEAMENTO DE BAIXO CUSTO
PARA VEÍCULOS AUTÔNOMOS**

Monografia de Conclusão de Curso apresentada na Faculdade de Tecnologia de Santo André como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Eletrônica Automotiva.

Orientador: Prof. Dr. Edson C. Kitani

Santo André – São Paulo
2018

LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 30 de Junho de 2018

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA: "SISTEMA
DE MAPEAMENTO DE BAIXO CUSTO PARA VEÍCULOS AUTÔNOMOS"
DO ALUNO DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:
PROF. EDSON CAORU KITANIMEMBROS:
PROF. PEDRO ADOLFO GALANI

PROF. FERNANDO GARUP DALBO

PROF. EMILIO GRANO JUNIOR

ALUNO:

HIGOR ADRIANO GUILARDICCI DE FRANÇA 

F814s

França, Higor Adriano Guillardicci de
Sistema de mapeamento de baixo custo para veículos
autônomos / Higor Adriano Guillardicci de França. - Santo
André, 2018. – 59f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Edson Caoru Kitani

1. Eletrônica. 2. Veículos autônomos. 3. Desenvolvimento. 4.
Sistema. 5. Sensor. 6. Mapeamento. I. Estudo de sistemas de
mapeamento de baixo custo para veículos autônomos.

621.389

AGRADECIMENTOS:

Gostaria de agradecer a todos os meus familiares que me deram incentivo e força para que este projeto se tornasse realidade, em especial minha avó Vera Lucia Guillardicci.

Ao professor Dr. Edson Caoru Kitani pela orientação durante este projeto, passando conhecimento nos aspectos técnico e pessoal e, principalmente, sendo um exemplo nos dois quesitos.

Ao Centro Paula Souza por conceder materiais e por disponibilizar uma bolsa de estudos referente ao programa de Iniciação Tecnológica da FATEC Santo André para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao conjunto de professores da Fatec Santo André que alavancaram meu desenvolvimento durante o tempo em que permaneci como aluno da instituição.

RESUMO

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema de mapeamento de ambientes para veículos autônomos de baixo custo através da união entre um sensor do tipo LIDAR e uma câmera. A fusão é realizada graficamente de forma que o valor que representa as distâncias entre os objetos mais próximos em diversas direções no ambiente é sobreposto nas imagens dos mesmos fornecidas pela câmera. Os resultados indicam que a qualidade da fusão e dos resultados está bastante dependente da resolução do LIDAR utilizado. Neste trabalho o equipamento tem baixa resolução o que exigiu algumas alterações nos objetivos iniciais.

Palavras chaves: Veículos Autônomos, Mapeamento.

ABSTRACT

The present work consists of an environment mapping system development for autonomous vehicles aiming low cost through the fusion of a sensor LIDAR and a camera. The merge is performed graphically so that the value representing the distances between the closest objects in various directions in the environment is superimposed on the images of the objects provided by the camera. The results indicate the quality of the fusion and of the results is quite dependent on the resolution of the LIDAR used. In this work the equipment has low resolution which required some changes in the initial objectives.

Keywords: Autonomous Vehicles, Mapping.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES.

Figura 1-Ilustração da detecção por meio do sensor LIDAR de um ambiente urbano. .	18
Figura 2 - Ilustração da área representada por cada ponto no espaço.	18
Figura 3 - As três dimensões que cada ponto representa ilustradas graficamente.	20
Figura 4 - Representação da oclusão do objeto em segundo plano quando apenas um ponto de vista é aplicado.	20
Figura 5 - Três sensores da linha Velodyne.	22
Figura 6 - Representação da atuação do sensor aplicado ao projeto e do aumento da área em função da distância medida considerando sua resolução angular.....	23
Figura 7 – Representação de algumas formas de movimentação do sensor bem como a disposição espacial dos pontos de representação do ambiente.....	24
Figura 8 - Leddar™ Sensor Evaluation Kit.....	25
Figura 9 - representação dos pontos detectados em duas formas diferentes de movimentação.....	26
Figura 10- Ilustração dos campos em que uma mensagem é dividida no protocolo Modbus.	27
Figura 11 - Diagrama de estado do dispositivo mestre em comunicações baseadas no protocolo Modbus.....	28
Figura 12 - Diagrama de estado dos dispositivos escravos em uma rede que obedece ao protocolo ModBus.	29
Figura 13 - Padrão geral em que cada byte é transmitido no modo RTU de comunicação no protocolo ModBus.	30
Figura 14 - Ilustração do modo em que os bytes são transmitidos dependendo da seleção da presença ou ausência dos bits de paridade.....	30
Figura 15 - Código responsável por calcular o campo CRC da mensagem de solicitação do dispositivo mestre ao Leddar.	32
Figura 16 - Layout físico de uma rede que trabalha com três fios sob o protocolo RS-485.	33
Figura 17 - Layout físico de uma rede que trabalha com cinco fios sob o protocolo RS-485.	33
Figura 18 - Efeito do ground plane estimation no número de pontos.	35
Figura 19 - imagem que representa o servomotor utilizado neste projeto para movimentação do sensor Leddar.	37
Figura 20 - Placa de desenvolvimento utilizada para comandar o servomotor por meio de pulsos "PWM", em destaque na parte inferior os botões b1, b2 e b3.....	38
Figura 21 - Fluxograma geral do funcionamento do sistema de comando.....	39
Figura 22 - Imagem do conversor de protocolos utilizado nesse projeto bem como as indicações das portas utilizadas como entrada e saída.	41
Figura 23 - janelas de configuração das palavras da comunicação tanto do computador pessoal como do Windows.	41
Figura 24 - Sequência de bytes de uma solicitação na mensagem 0x41.	42
Figura 25 - Representação das informações transmitidas no início da resposta do sensor de acordo com a função ou mensagem 0x41.....	43

Figura 26- Representação das medidas físicas para cada medição e da distância considerada em cada medição.	44
Figura 27 - Resposta referente a mensagem 0x11 que traz de algumas características fixas do sensor.	45
Figura 28 - Exemplo da separação de bytes em uma sequência de bytes real para facilitar a interpretação da mensagem.	46
Figura 29 - Barras na SubVi de comunicação com o sensor que representam as distâncias de cada segmento.	46
Figura 30 - Tela de uma medição com as distâncias medidas pelo sensor sobrepostas na imagem gerada pela câmera.	47
Figura 31-Ilustração da tela do SDK do leddar. Na esquerda vemos uma região ampliada e na direita a mesma região, mas reduzida. As linhas verdes indicam a presença de algum objeto na direção de algum dos 16 feixes.	48
Figura 32-Na imagem abaixo vemos o menu com o comando iniciar e parar o Data Logging.....	49
Figura 33 - Gráfico de superfície ligando os pontos detectados pelo sensor no teste em questão.	49
Figura 34- Ambiente de testes para o Leddar. O carrinho de ferramentas está à 6 metros do sensor e o teste procurou avaliar a capacidade do sensor em representar esse ambiente.	50
Figura 35 - A tabela indica qual o nível de luminosidade na base do cartaz em cada medição realizada longitudinalmente neste experimento, estes parâmetros são importantes para que a análise de funcionamento do leddar em diferentes condições seja possível.	51
Figura 36 - Exemplo de medição da distância entre o sensor e o cartaz no ambiente estabelecido, pode-se observar a variação de luminosidade ao longo do corredor.	52
Figura 37 - Teste do sistema combinado com uma intensidade de 183 Lux.....	53
Figura 38 - Segundo teste realizado com uma luminosidade do ambiente menor, correspondente a 38 Lux.....	54
Figura 39 - Terceiro teste do sistema com alteração de luz do ambiente, nesse caso a intensidade luminosa era de 2 Lux.	55

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Contexto do Projeto	13
1.2 Objetivos do Projeto	15
1.3 Resultados Esperados	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Veículos Autônomos e o Mapeamento de Ambientes	16
2.2 Sensores Lidar e a Detecção de Distâncias	16
2.3 Transferência de dados do sensor <i>Leddar</i> para o computador pessoal	26
2.3.1 Protocolo Utilizado e Formas de Comunicação.	26
2.3.2 Descrição do <i>frame</i> e as ações tomadas para comunicação entre dispositivos.	27
2.3.3 Modo de Transmissão Serial.	29
2.3.4 Checagem de Erros.....	31
2.3.5 Meio Físico.....	32
2.4 Tratamento de sinais.....	34
3. METODOLOGIA	36
3.1 Mecanismo de movimentação do sensor <i>Leddar</i>	36
3.1.1 Efeito da movimentação do sensor.....	36
3.1.2 Servomotor e Placa de Controle.....	36
3.1.3 <i>Software</i> para Controle do Servomotor.	38
3.2 Aquisição de Dados e Representação.	39
3.2.1 Configurações das portas seriais e <i>hardware</i> adicional.	39
3.2.3 Tratamento de Dados.	44
3.2.4 Representação Gráfica das Medições do Sensor <i>Leddar</i>	45
4. RESULTADOS E TESTES.	48
4.1 Plataforma de Ensaio com o <i>Leddar</i>	48
4.2 Relação entre as distâncias medidas pelo <i>Leedar</i> e as reais.....	51
4.3 Necessidade da União entre câmera e <i>Leedar</i>	52
5. CONCLUSÃO	56
5.1. Observações finais.....	56
5.2 Propostas Futuras.....	57
6. REFERÊNCIAS	58

LISTA DE SIGLAS

CAN	<i>Controller Area Network</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
IHM	Interface Homem-Máquina
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
SMV	<i>Support Vector Machine</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VA	Veículo Autônomo

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Projeto

A densidade do trânsito em grandes cidades como São Paulo, que possui no DENATRAN (Departamento Nacional de Trânsito) cerca de 8 milhões de veículos registrados (Kitani, 2016), é um fator negativo com relação à fluidez do tráfego. Influencia negativamente na qualidade de vida urbana devido ao tempo de exposição dos motoristas e pedestres ao *stress*. Além disso, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), 1,25 milhão de pessoas morrem nas vias de tráfego anualmente no mundo (nacoesunidas.org, 2017). No Brasil, em 2016, 34.850 pessoas morreram vítimas de acidentes de trânsito, e em 2015, foram 38.651 mortes (G1, 2017)

Estes são os principais fatores que criaram demanda para tecnologias que reduzam o número de acidentes no trânsito como também para otimizar a utilização das vias. Partindo desse ponto, diversas tecnologias foram surgindo nos últimos anos fazendo parte do conceito ADAS (*Advanced Driving Assist System*) que é o nome dado a um gênero de sistema que auxilia na condução do veículo. Alguns exemplos são: prevenção de colisão ou *Adaptive cruise control* (Junqing Wei, 2013), detecção do nível de combustível (Chaudhari Priyanka Ramnath, 2015), etc.

O estado da arte das tecnologias para otimização e segurança da condução são os veículos autônomos. Esses veículos são meios de transporte não tripulados que se deslocam de forma autossuficiente por trajetos pré-determinados. Atualmente, o sistema de condução autônoma tem tido destaque na mídia, em grandes corporações tecnológicas, pesquisadores e principalmente governos, devido aos possíveis benefícios com a sua implementação (Kitani, 2016).

São projetos que visam à segurança dos ocupantes e pedestres, visto que em grande parte dos acidentes os erros têm sua origem nos condutores. A inclusão social é outro aspecto importante, considerando que pessoas com incapacidade física para direção manual podem adquirir veículos com essa tecnologia. É também proposto a promoção de maior conforto e qualidade de vida para os proprietários e para a sociedade em geral, assim como diminuir o consumo de combustível e a emissão de poluentes através de uma

condução otimizada. Além disso, são úteis no transporte de carga e no plantio e colheita de grãos, visto que poderiam operar num regime de 24 horas por 7 dias por semana. Em aplicações militares, o sistema pode ajudar a reduzir o número de baixas em missões de suprimento e reconhecimento (Habermann, 2016).

O sistema eletrônico de condução deve reproduzir as ações de um condutor de forma autônoma. Para tal, é necessário um controle sobre sistemas de: frenagem, aceleração, direção, sinalização, entre outros. Além disso, o sistema seria responsável por reproduzir ações complexas referentes a cognição humana tais como: tomadas de decisão em situações adversas, capacidade de localização geográfica e mapeamento e interpretação do ambiente.

Levando-se em consideração que todas as ações tomadas pelos sistemas de direção autossuficiente dependem de como ele interpreta o espaço externo ao veículo, que possui extrema complexidade, dinâmica e imprevisibilidade. O mapeamento e percepção de objetos são fundamentais para o sistema de gerenciamento da condução autônoma.

Os sistemas de mapeamento são responsáveis por reconhecer objetos comuns ao trânsito tais como pedestres, árvores, faixas de sinalização na via e até outros veículos. O mapeamento destes últimos tem maior complexidade devido ao fato de que são componentes extremamente dinâmicos, ou seja, veículos parados, em movimento ou que estão prestes a se movimentar devem ser identificados pelo sistema para servir de base para a predição de cenários futuros (Michael S. Darms, 2009).

Os sistemas atuais de mapeamento têm extrema complexidade de projeto e custo elevado. Como exemplo, temos o sensor VELODYNE HDL-64E utilizado em diversos projetos, como o da Google, que pode custar cerca de 75 mil dólares (AMADEO, 2017). Assim, é possível concluir que um sistema eficiente e de baixo custo para representação do meio externo tem alto potencial de mercado e em estudos ou projetos acadêmicos.

Este projeto teve como meta o desenvolvimento de um estudo de sistemas de mapeamento, trazendo a base teórica dos principais tipos de sensores utilizados em sistemas de mapeamento veiculares e a construção de um sistema de representação gráfica dos dados por meio de sensores com baixo custo.

1.2 Objetivos do Projeto

Este projeto tem como objetivo desenvolver um sistema que combine dois sensores, câmera e *Leddar*, combinando as melhores características de cada um. Será utilizado um sensor LIDAR 2D (*Light Detection and Ranging*) da Leddar com dezesseis feixes e uma câmera. Adicionalmente, o *Leddar* será também movimentado por um pequeno servomotor para aumentar o volume de detecção. Essa estratégia permite um aumento significativo do número de pontos coletados pelo sensor, passando de dezesseis para até mil novecentos e vinte; além de proporcionar uma visão ampla do ambiente. A consequência é um sistema com grande número de pontos e com baixíssimo investimento capital, quando comparado aos aplicados pelas grandes empresas.

Toda aquisição e análise dos dados será feita na plataforma Labview 2015, fundindo as informações vindas dos dois sensores através das portas de comunicação USB (Universal Serial Bus). Assim, será possível identificar os objetos no ambiente e a qual distância estes se encontram. Essas informações são primordiais para que a unidade de controle de condução consiga tomar decisões em ambientes automotivos, que tem como características alto grau de dinâmica e imprevisibilidade. Espera-se com este projeto, desenvolver uma plataforma de desenvolvimento de baixo custo para os estudos sobre VAs (Veículos Autônomos).

1.3 Resultados Esperados

Como resultados esperados para este projeto estão:

- Informar visualmente ao operador de um *software* desenvolvido a condição do ambiente, obtendo a imagem de uma câmera com o valor que representa as distâncias de cada objeto sobrepostos na imagem;
- Informar numericamente as distâncias dos objetos mais próximos em diversas direções para uma central de condução autônoma.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Veículos Autônomos e o Mapeamento de Ambientes

Acidentes envolvendo veículos ferem pelo menos dez milhões de pessoas a cada ano, com dois ou três milhões dessas pessoas gravemente feridas (ASIRT, s.d.). Para resolver esse problema, sistemas avançados de assistência de condução (ADAS) são usados tanto no auxílio da condução como na disponibilização de informações para o motorista (Bhuiyan, 2018).

Segundo (Bhuiyan, 2018), um veículo que pode dirigir-se “sentindo” seu ambiente é chamado de veículo autônomo ou veículo sem motorista. Um condutor pode escolher o destino, mas não é necessário fazer qualquer operação no sentido de coordenar sistemas do veículo. Avanços na tecnologia de veículos autônomos apoiaram o surgimento do interesse público e discussão recentemente. Segundo (SIVAK, 2014) veículos autônomos - particularmente o auto gerenciado da Google - tornaram-se um tema popular na mídia (BBC, 2014; CNN, 2014; Forbes, 2014; Los Angeles Times, 2014 apud Kitani,2016). Esses meios de transporte são comumente relacionados com a incorporação final e completa do veículo conectado com a tecnologia (SIVAK,2014 apud NHTSA, 2013).

Um veículo autônomo navega para o destino por meio de vários sensores (Bhuiyan, 2018), envolvendo autonomia sobre diversos sistemas como direção, freios, transmissão, motor, entre outros. Um destes sistemas é o de detecção e rastreamento de ambientes, que envolve a compreensão do meio em que o veículo se encontra. Para tal, a detecção de distâncias é uma componente crucial para qualquer sistema autônomo (Krotkov, Martial Hebert and Eric, 1992). Essa operação é feita a partir de um conjunto de sensores e processamento que tenha capacidade de captar informações e analisá-las a fim de compreender o ambiente em que o sistema se encontra.

2.2 Sensores Lidar e a Detecção de Distâncias

Tradicionalmente, os sensores implementados na detecção de distâncias atuavam com técnicas passivas (sem emissão de sinal) como visão *stereo* ou em forma de ‘x’ (Krotkov, 1992). Com relação à confiabilidade e velocidade, essas abordagens clássicas são inferiores aos sensores ativos que geram sua própria luz em detrimento de aproveitar a disponibilizada pelo ambiente. Este tipo de sensor é denominado LIDAR, que também pode ser chamado de sensor de imagem a LASER. Estes detectores realizam medições de

distância com relação às superfícies mais próximas em diversas direções e fornecem essas informações por meio de algum protocolo de comunicação selecionado pelo fabricante, como será abordado posteriormente.

Esses dispositivos são empregados na detecção de objetos em diversas aplicações, dentre elas: digitalização 3D de obras de arte, sensoriamento remoto da topografia do solo, medição da estrutura tridimensional das copas da vegetação para predição dos atributos da estrutura do suporte florestal (Lefsky, Michael A; Cohen, Warren B; Parker, Geoffrey G; Harding, David J, 2002) e principalmente na detecção e mapeamento do ambiente de trânsito em projetos de veículos autônomos (M. Himmelsbach).

O princípio básico de um radar a LASER é medir o tempo entre a liberação de um fluxo a LASER e o retorno do mesmo a partir do contato com a superfície do alvo (Krotkov, 1992). Existem três técnicas internas ao sensor para realização destas medições:

- I. Detecção de pulsos: mede o “tempo de voo” de pulsos discretos;
- II. Detecção coerente, que mede esse período de forma indireta através da medição da periodicidade de pulsos de uma frequência modulada em um sinal contínuo;
- III. AM-CW (detecção direta) , mede por sua vez a diferença de fase entre o sinal gerado e o recebido após o contato com uma superfície.

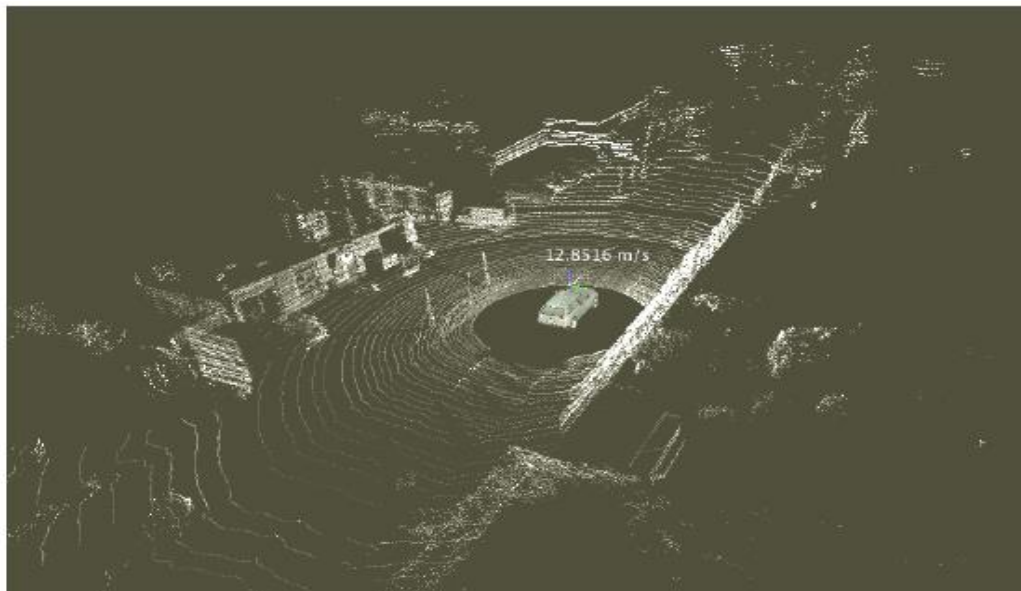
Dentre as três citadas, a técnica de detecção direta é a mais amplamente empregada nos sensores (Krotkov, 1992). Nessa técnica, a distância do alvo é proporcional à diferença de fase entre o sinal do feixe gerado e o recebido.

Considerando que r é o comprimento de onda correspondente a distância entre o sensor e o objeto e que a máxima distância é representada por uma defasagem de metade do comprimento da onda, o que a **Equação 1** define a partir do quociente $\lambda/(2.2\pi)$ ou $\lambda/4\pi$ é a mínima distância perceptível, separando um comprimento de onda para cada unidade de radiano. Além disso, a equação indica que o comprimento de onda é inversamente proporcional a resolução do sinal. Quando a resolução é multiplicada pela defasagem entre o sinal enviado e o recebido, é obtido o comprimento de onda proporcional a distância entre a superfície detectada e o sensor.

$$r = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)\Delta\varphi \quad \text{(Equação 1)}$$

na qual r é o comprimento de onda que representa a distância do sensor com relação ao alvo detectado, $\Delta\varphi$ é a diferença de fase e λ é o comprimento de onda do sinal modulado.

Figura 1-Ilustração da detecção por meio do sensor LIDAR de um ambiente urbano.



Fonte: (M. Himmelsbach).

Os sensores utilizados em detecções de ambientes ou objetos disponibilizam uma grade de pontos à central eletrônica na qual cada um possui uma direção ou segmento correspondente.

Em tese, um dispositivo AM-CW teria uma abordagem perfeita considerando que os feixes do laser descrevessem um único ponto no espaço, sem abertura angular (Krotkov, 1992). Na prática, cada ponto mapeia uma área levando em consideração a menor distância dentro desse espaço como a distância equivalente a essa célula.

Figura 2 - Ilustração da área representada por cada ponto no espaço.



Fonte: (Krotkov, 1992) adaptado.

A área na qual cada ponto mapeia é dada por uma resolução angular, ou seja, existe um ângulo que representa a “altura” e outro o “comprimento” da área detectada. Dessa forma, à medida que a distância de medição aumenta, a área física mapeada procede da mesma forma, como é possível observar na Figura 6. Para identificação da área em metros quadrados a partir da distância de medição, basta utilizar a **Equação 3**.

Para indicar um comprimento de um arco de acordo com o ângulo correspondente e o raio da circunferência na qual o arco se encontra, uma regra de três pode ser utilizada para se obter a seguinte expressão:

$$\frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180} = c \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde α é o ângulo de abertura, r o raio da circunferência e c o comprimento de arco correspondente.

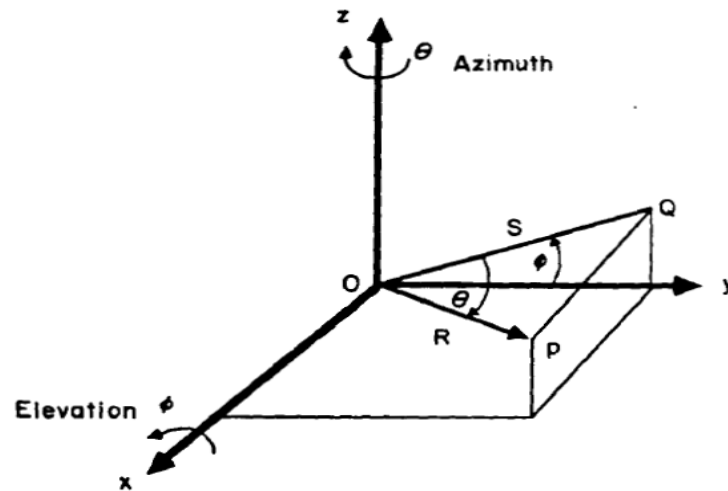
Como a área mapeada por ponto é dada em relação a dois ângulos, altura (h) e largura (L), a área mapeada em função da distância da medição é obtida realizando um produto de duas equações semelhantes à **Equação 2** onde em uma o ângulo aplicado é o de altura e em outra, o de largura. Dessa forma:

$$A = (\pi^2 \cdot r^2 \cdot h \cdot L) / 180^2 \quad \text{(Equação 3)}$$

na qual r é a distância de medição, h o ângulo denominado “altura”, L o ângulo denominado largura e A é a área mapeada. De uma maneira geral, a medida que os ângulos de altura e largura forem menores, melhor é a resolução do sensor LIDAR. A Figura 3 ilustra os dados disponibilizados em cada ponto dos sensores LIDAR, onde y , x e z são as coordenadas de cada ponto considerando o sensor como a referência.

Na Figura 3, Θ e Φ indicam a rotação sobre o eixo z e x respectivamente. Há a realização da conversão de coordenadas polares para cartesianas afim de que os dados possam ser dispostos nas matrizes para o processamento de dados posterior.

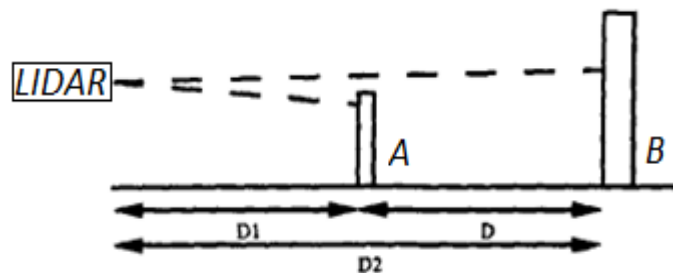
Figura 3 - As três dimensões que cada ponto representa ilustradas graficamente.



Fonte: (Krotkov, 1992).

Um problema causado devido ao princípio de funcionamento desses sensores é que eles obedecem a ordem de planos prioritários, de forma que se um objeto A se encontra em primeiro plano, mas na mesma direção de um que esteja em segundo plano, o objeto B ocluído só pode ser representado parcialmente, o que dificulta etapas de caracterização ou classificação. Em aplicações altamente dependentes da caracterização de objetos, existe a alternativa de utilizar mais de um sensor para que seja possível realizar medições de diferentes pontos de referência. Dessa forma, uma maior quantidade de pontos que informam sobre o segundo objeto pode ser obtida.

Figura 4 - Representação da oclusão do objeto em segundo plano quando apenas um ponto de vista é aplicado.



Fonte: (Krotkov, 1992) adaptado.

Idealmente, os sensores atuariam de forma equivalente em diferentes superfícies, porém, as medidas ainda são influenciadas pelas propriedades de reflexão dos alvos observados.

Os sistemas que possuem esses sensores como entrada de dados principal identificam objetos a partir de classes conhecidas, ou seja, o desenvolvedor escolhe padrões ou distribuições de pontos características para cada aplicação. Em utilizações automotivas, essas classes representam outros veículos, pedestres, casas, construções ou árvores levando em consideração que estes são comuns ao ambiente veicular.

Como muitos pontos podem ser disponibilizados pelos sensores de mapeamento, não é uma prática comum acumular dados por longos períodos através de qualquer estratégia de *software*. Um exemplo da proporção de pontos é a do LIDAR Velodyne-64 que, em apenas uma revolução fornece 100.000 pontos de mapeamento do meio ambiente (M. Himmelsbach).

Devido à prática de armazenamento de dados ser incomum é imprescindível a sincronização de tempos entre a aquisição de dados e o processamento posterior dos mesmos. Caso a detecção do ambiente seja ininterrupta e mais rápida do que a interpretação, modificações no ambiente podem não ser observadas. Esse comportamento poderia ser extremamente perigoso tendo em vista que a medida que ocorresse um aumento considerável de velocidade, grandes mudanças passariam despercebidas nessas lacunas causadas pela não sincronização mencionada.

É importante salientar que toda interpretação do ambiente possui um atraso com relação ao que realmente está acontecendo, uma das metas principais do desenvolvedor é diminuir esse *delay*. É aconselhável realizar a análise do meio a partir da mudança do mesmo, de forma a evitar que repetidas vezes o mesmo ambiente seja informado a central, desperdiçando tempo e capacidade lógica em algo invariável.

Devido a necessidades específicas, existem projetos em que mais de um sensor possa ser utilizado, como é o caso do experimento proposto por (Nobili, Dominguez, Garcia, & Martinet., 2015) na qual há uma comparação entre um LIDAR VLP-16 e três LIDARs planares aplicados numa mesma função, para avaliar questões de qualidade do mapa, robustez, facilidade de instalação, precisão e preço.

Segundo (Nobili, Dominguez, Garcia, & Martinet., 2015) em 2007 durante o DARPA *Urban Grand Challenge*, uma competição em área urbana com tarefas a serem realizadas por veículos autônomos, diversas universidades competiram e muitas utilizaram o sistema com apenas um LIDAR 3D ou com três LIDARs planares

distribuídos no veículo para mapeamento do ambiente. Além dessas, a Google desenvolveu uma arquitetura de *hardware* e *software* para um *self-driving*, e o coração do sistema é baseado em um LIDAR VLP-64 que gera um mapa 3D com alta resolução.

Dentre os diversos modelos, para que seja realizada a melhor escolha, é interessante analisar as restrições do projeto quanto a custo, precisão, facilidade de instalação, confiabilidade das medições, entre outros (Nobili, Dominguez, Garcia, & Martinet., 2015). Os modelos mais populares pertencem a linha Velodyne de sensores LIDAR que foi desenvolvida de forma a atender o mercado de mapeamento de ambientes. Existem três modelos desta linha de sensores (Habermann, 2016), descritos abaixo:

- Velodyne HDL-64: Desenvolvido exclusivamente de forma a atender as necessidades para sistemas de veículos não tripulados, proporciona 64 feixes a LASER de leitura do ambiente com uma amplitude de 360 graus, disponibilizando cerca de 1,3 milhões de pontos de representação do meio por revolução.
- Velodyne HDL-32: a diferença básica com relação ao anterior é o número de feixes que passa a ser 32. A partir disso gera até 700 mil pontos de mapeamento do meio por revolução com uma amplitude de varredura de 360 graus.
- Velodyne VLP-16: Possui 16 feixes para mapeamento do meio, proporcionando informações de forma menos detalhada. Como vantagens possui um encapsulamento robusto, sendo mais resistente a ambientes com poeira ou alta umidade e é consideravelmente mais barato do que os dois sensores descritos anteriormente.

Figura 5 - Três sensores da linha Velodyne.

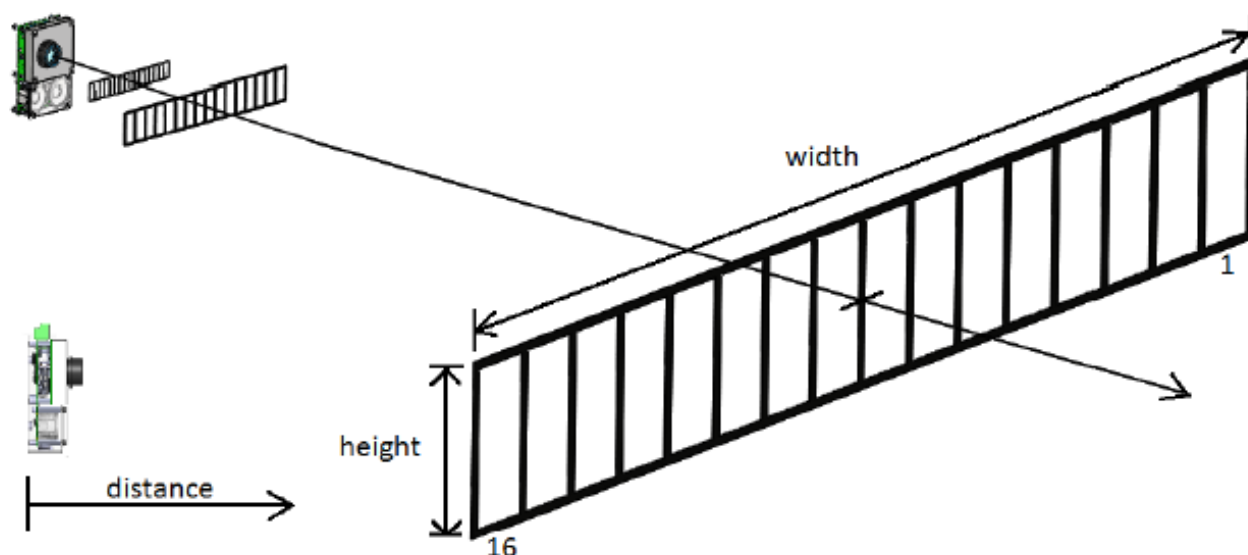


Fonte: (Habermann, 2016).

Apesar da presença desse tipo de componente em diversos sistemas de percepção de ambientes e de sua considerável robustez e facilidade de instalação (Nobili, Dominguez, Garcia, & Martinet., 2015), os sensores empregados no mercado atual de veículos autônomos têm um custo elevado, tornando-se inviáveis na produção em série.

Partindo dessa premissa, foi pensada a utilização do Leddar™ Sensor Evaluation Kit 2D de baixo custo, associado a um atuador mecânico que movimenta o sensor de forma a coletar um maior número de pontos do ambiente. Esse dispositivo, por definição, emite 16 feixes dispostos em aproximadamente 45° , sendo que cada feixe é responsável por uma área de 2,8 graus de largura e 7,5 graus de comprimento.

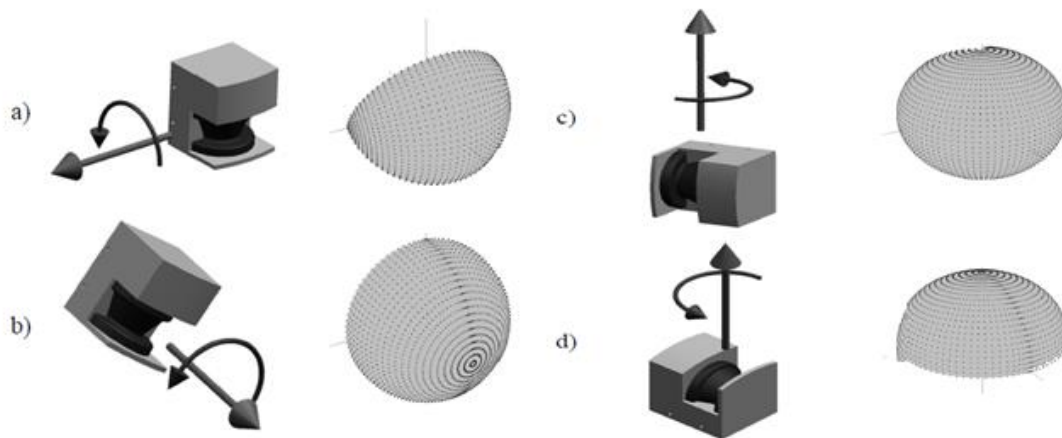
Figura 6 - Representação da atuação do sensor aplicado ao projeto e do aumento da área em função da distância medida considerando sua resolução angular.



Fonte: Datasheet “Leddar™ Sensor Evaluation Kit”.

A partir da combinação do detector com o servomotor, inúmeras formas de aquisição de dados podem ser realizadas. Algumas delas estão ilustradas na Figura 7. É importante notar que diferentes combinações entre o *drive* de rotação e o detector levam a diferentes alocações de pontos e que estes não são distribuídos uniformemente na superfície detectada (Oliver Wulf, 2003).

Figura 7 – Representação de algumas formas de movimentação do sensor bem como a disposição espacial dos pontos de representação do ambiente.



Fonte: (Oliver Wulf, 2003).

A operação do dispositivo de movimentação do sensor pode ser classificada de duas formas: contínua e por ciclos.

- Na movimentação contínua há um menor desgaste do componente de deslocamento, aumentando a vida útil, o que é importante em aplicações comerciais. É apropriado para sistemas de detecção que interpretam todo o ambiente (devido a uma amplitude máxima de movimentação que corresponde a 360 graus).
- Na movimentação por ciclos o desgaste do componente de movimentação é maior devido a acelerações e desacelerações constantes durante o ciclo de operação. Apesar disso, é apropriado para sistemas de interpretação que detectam parte do ambiente (devido a uma amplitude intermediária de leitura).

A partir da detecção dos pontos no ambiente em que o sensor se encontra, diferentes formas de absorção das informações podem ser realizadas, para posterior representação ortogonal. As principais estão descritas abaixo:

- Realização da leitura da posição do servomotor a cada novo escaneamento disponibilizado pelo sensor. É uma forma de tratamento relativamente simples, porém, como existe um tempo para leitura dos dados que informam a posição do servomecanismo, os pontos de leitura absorvidos previamente estarão defasados e, portanto, não serão associados a posição exata em que se encontram no

ambiente. Isso gera um erro sistemático de leitura extremamente indesejável em sistemas que exigem certa precisão para seu funcionamento adequado.

- Realização de leitura constante da posição do servo mecanismo e, em posições previamente estabelecidas, promover identificação e associação entre os pontos lidos e a posição do servomotor. Possui maior precisão com relação ao método anterior e exige um sistema adequado para aquisição de dados a partir da identificação de ângulos de posicionamento do servomecanismo, caracterizando um sistema do tipo “*event trigger*”.

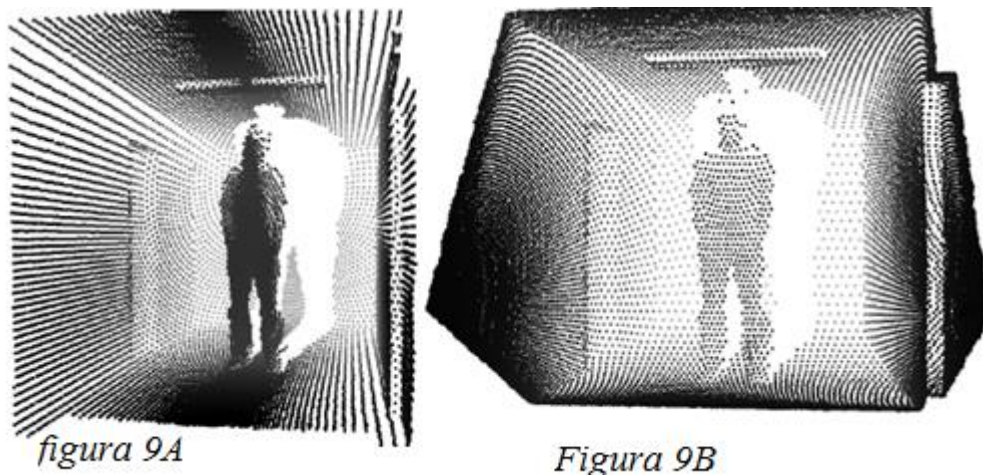
Figura 8 - Leddar™ *Sensor Evaluation Kit*.



Fonte: *Datasheet* “Leddar™ Sensor Evaluation Kit”.

É importante salientar que a densidade de pontos é alterada ao longo da superfície representada e está diretamente relacionada com a proximidade do conjunto de pontos com o eixo imaginário sobre o qual o sensor está sendo movimentado. Portanto, essa característica deve ser levada em consideração para etapas de identificação de componentes no meio. A ilustra essa particularidade de distribuição na detecção de uma mesma imagem para dois tipos de movimentação do sensor (Oliver Wulf, 2003). Na figura 9A é possível observar que a densidade de pontos foi maior no centro da imagem em uma perspectiva vertical e na figura 9B, horizontal.

Figura 9 - representação dos pontos detectados em duas formas diferentes de movimentação.



Fonte: (Oliver Wulf, 2003).

2.3 Transferência de dados do sensor *Leddar* para o computador pessoal

Após a seleção do detector a ser utilizado e realização da montagem física do sistema, o próximo passo consiste na aquisição de dados. Para isso, é necessário conhecer os possíveis modos de comunicação do sensor e escolher a opção mais viável. No sensor aplicado a esse projeto, duas normas de comunicação são possíveis. A primeira é baseada no protocolo CAN de comunicação, já a segunda, no protocolo Modbus. Como a segunda opção foi selecionada, abaixo está a teoria do funcionamento de sistemas de comunicação baseados nesse protocolo.

2.3.1 Protocolo Utilizado e Formas de Comunicação.

Modbus é um protocolo de comunicação que define os padrões de transferência de informações relacionados a segunda camada do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*). Exige apenas um mestre e um ou mais escravos, esses limitados a 247. Toda comunicação é iniciada pelo mestre, e todo envio de dados pelos escravos só é possível após a recepção de uma solicitação do mestre. Os *slaves* não se comunicam entre si e só é permitida uma comunicação por vez entre mestre e escravo(s) (MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.2, 2006).

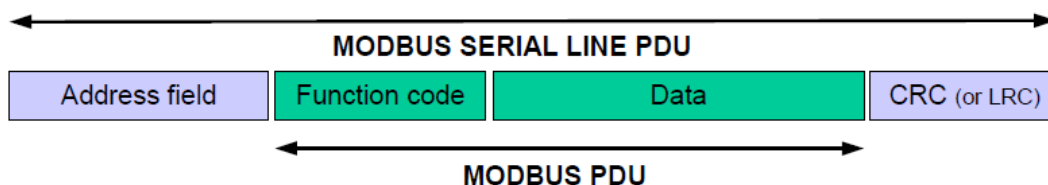
Existem duas formas de comunicação entre o mestre e os escravos:

- *Unicast mode*: Onde o mestre se comunica individualmente com cada escravo através de seu endereço específico (cada escravo tem um endereço específico).
- *Broadcast mode*: Onde o mestre se comunica com todos os escravos ao mesmo tempo. Geralmente, o endereço zero é reservado para este tipo de comunicação. Nesse modo não há resposta dos escravos. Geralmente é uma mensagem característica para escrita de comandos ou configurações gerais. O mestre não tem um endereço específico.

2.3.2 Descrição do *frame* e as ações tomadas para comunicação entre dispositivos.

Toda comunicação normatizada pelo protocolo ModBus obedece a uma distribuição das informações no *frame* de uma forma definida. A Figura 10 ilustra essa distribuição.

Figura 100 - Ilustração dos campos em que uma mensagem é dividida no protocolo Modbus.



Fonte: (MODBUS *over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02*).

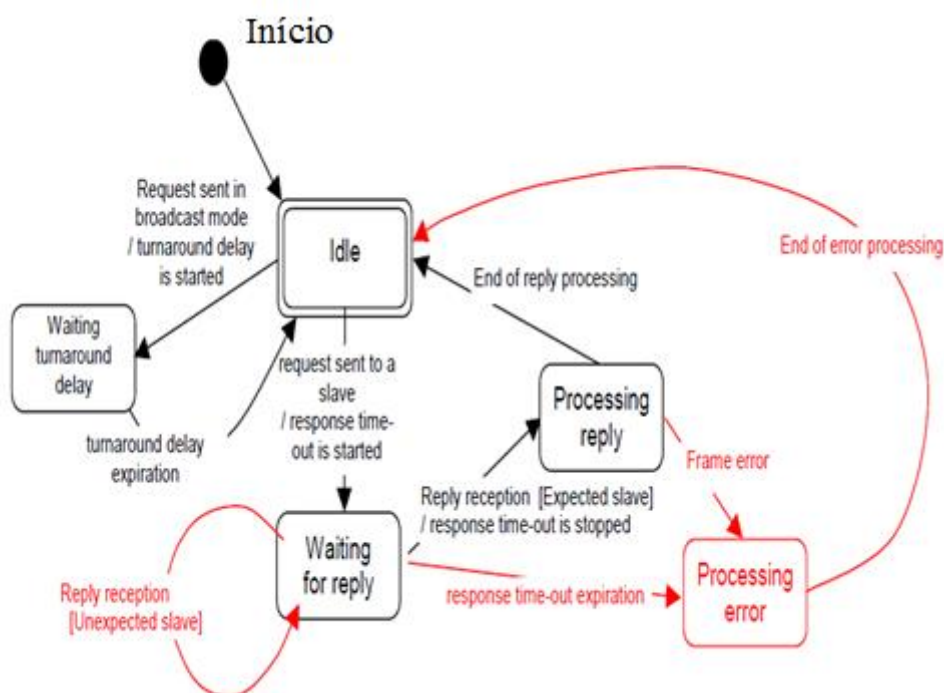
O campo *Address field* contém o endereço do escravo que está interagindo na comunicação. Na resposta dos escravos, cada um coloca seu endereço nesse campo para que o mestre identifique qual está enviando informações. O campo *function code* indica qual tipo de ação o escravo executou ou qual tipo de ação o mestre está solicitando que o escravo execute. O campo *data* carrega parâmetros para resposta ou pedido e está presente apenas quando necessário. O campo de CRC (*Cyclic Redundancy Check*) é obtido de duas formas diferentes, dependendo da forma de comunicação, que pode ser do tipo RTU ou ASCII e é o campo que possui informações para confirmação de que a mensagem circulando no barramento é a correta.

A condição de *idle* é a primeira em que o mestre se coloca assim que é energizado e se mantém dessa forma até que uma solicitação seja necessária. A partir do envio de um pedido, o mestre deixa esse estado e não pode enviar qualquer nova solicitação na rede enquanto não retornar a este. Esta estratégia é adotada para que duas comunicações não sejam feitas ao mesmo tempo no barramento.

Quando o mestre envia um pedido, passa para o estado *Waiting for reply* e inicia a contagem para o tempo de resposta do *slave*. Caso o tempo de resposta ultrapasse um determinado limite inicia-se a sequência para tratamento de erros.

Antes de passar para o estado de processamento da resposta, é realizada uma checagem da mesma. Erros devem ser gerados quando, por exemplo, uma resposta de um escravo inesperado aparece, quando há um erro na mensagem enviada ou quando o tempo de resposta é ultrapassado. Independente da recepção de uma mensagem de um *slave* inesperado o tempo de resposta continua sendo incrementado.

Figura 11 - Diagrama de estado do dispositivo mestre em comunicações baseadas no protocolo Modbus.

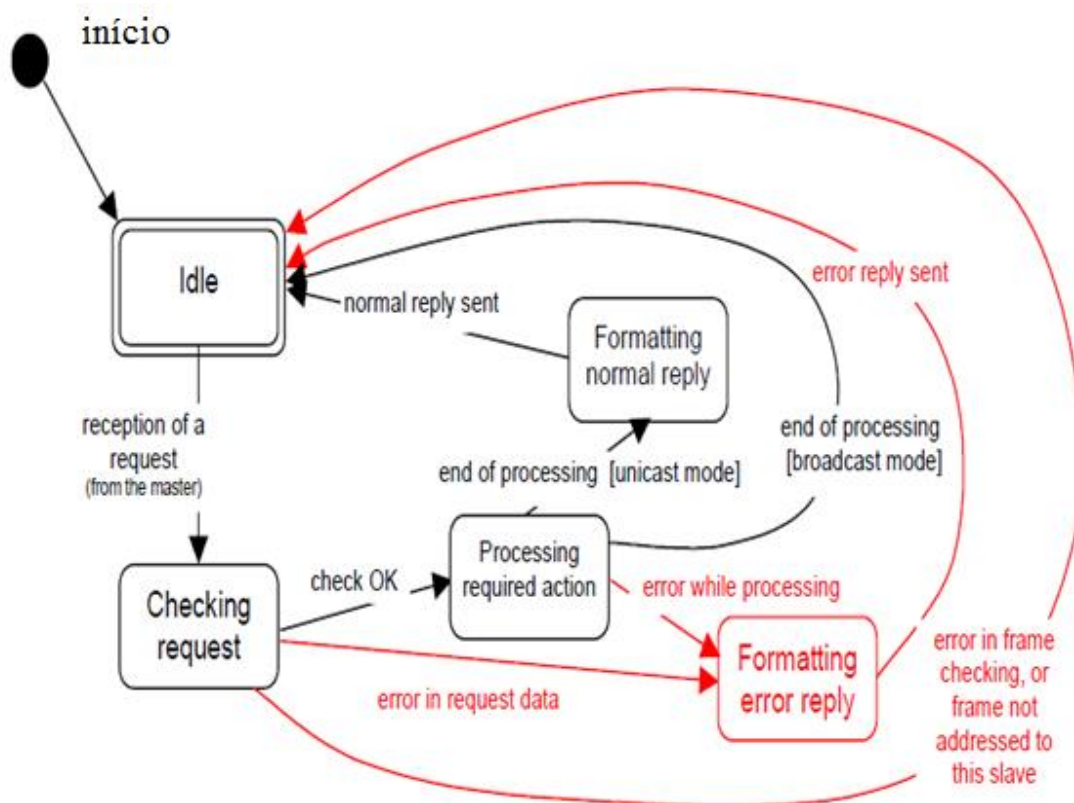


Fonte: (MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02)

Quando a comunicação é feita em *broadcast mode* nenhum dos escravos envia uma resposta, mesmo assim, o mestre respeita um intervalo de tempo denominado *Turnaround delay* para permitir que os escravos processem o *request* enviado.

A condição inicial do escravo, quando energizado e enquanto não recebe qualquer *request*, é denominado de *idle*. Antes de processar a ação requerida, o escravo realiza uma checagem da mensagem. Uma vez que a ação requerida é completada, uma resposta deve ser enviada para o mestre. Caso ocorra algum erro na recepção do pedido, o escravo não retorna qualquer resposta.

Figura 12 - Diagrama de estado dos dispositivos escravos em uma rede que obedece ao protocolo ModBus.



Fonte: MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02.

2.3.3 Modo de Transmissão Serial.

Os dois modos de comunicação possíveis e determinadas pelo protocolo MODBUS são: modo ASCII e RTU (MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.2, 2006). Esses modos definem como as informações são distribuídas nos campos do *frame* e como cada *bit* é alocado na *char* transmitida. Como o modo utilizado no projeto é o RTU, modo definido pelo fabricante, a teoria estudada foi voltada para o mesmo. Nesse modo, cada *byte* contém dois caracteres hexadecimais de 4 bits. Além disso, a mensagem deve ser transmitida com um fluxo contínuo de bytes.

Figura 13 - Padrão geral em que cada *byte* é transmitido no modo RTU de comunicação no protocolo ModBus.

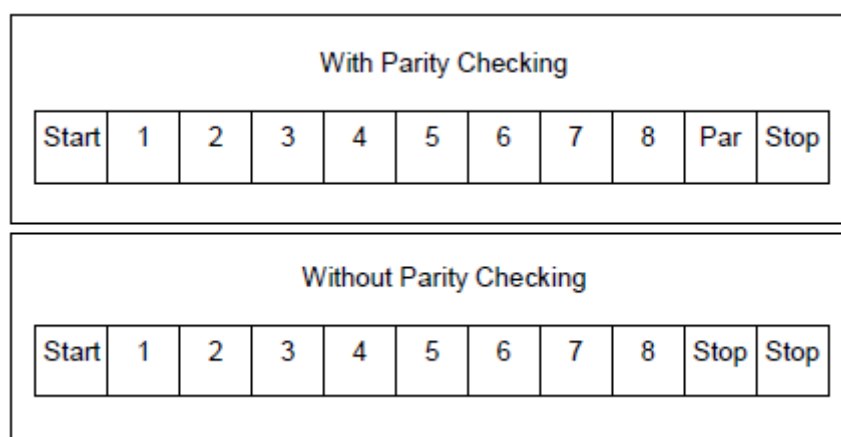
The format (11 bits) for each byte in RTU mode is :

Coding System: 8-bit binary
Bits per Byte: 1 start bit
 8 data bits, least significant bit sent first
 1 bit for parity completion
 1 stop bit

Fonte: MODBUS *over Serial Line Specification and Implementation Guide* V1.02.

Os *bytes* são transmitidos como ilustrado na Figura 13. No modo RTU os *bytes* podem ser transmitidos com ou sem checagem de paridade sendo que no segundo caso um *stop bit* adicional é implementado, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Ilustração do modo em que os *bytes* são transmitidos dependendo da seleção da presença ou ausência dos *bits* de paridade.



Fonte: MODBUS *over Serial Line Specification and Implementation Guide* V1.02.

O início e o fim das mensagens devem ser identificados pelos dispositivos de recepção para que identifiquem quando o início da mensagem está presente ou quando a mesma termina. Mensagens parciais devem ser identificadas e gerar mensagens de erros quando recebidas. Nesse modo, as mensagens são transmitidas com intervalos de no mínimo 3,5 caracteres. Para saber qual é o tempo correspondente basta seguir a **equação 4**:

$$t(n) = \left(\frac{1}{\text{baud rate}} \right) * 11 * n \quad \text{(Equação 4).}$$

na qual n é o número de caracteres a serem transmitidos e *baud rate* a taxa em que os *bits* são transmitidos serialmente.

Caso um tempo maior do que 1,5 caracteres ocorra em algum trecho da mensagem, essa mensagem deve ser descartada e um erro deve ser gerado. Além do descarte, os tempos devem ser estritamente seguidos para taxas de 19200 *bits/seg.* ou menos. Para taxas maiores existem valores padrão de 750 μ s para o tempo entre caracteres e 1,75 ms para o tempo entre *frames*.

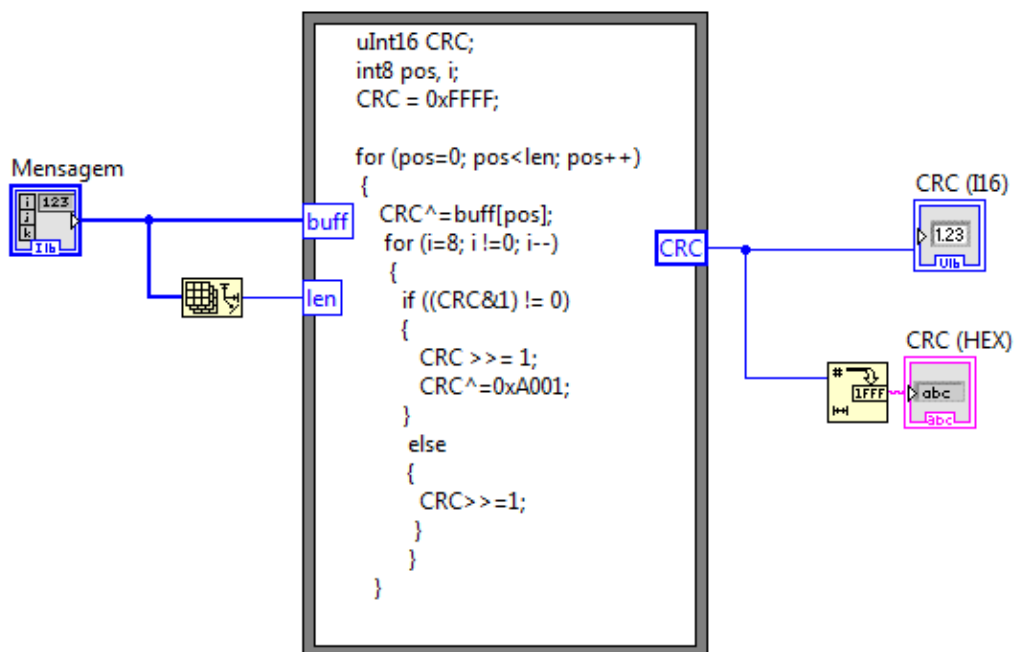
2.3.4 Checagem de Erros.

Existem duas formas principais para checagem de erros. Por paridade, aplicada a cada caractere transmitido, e a CRC (modo RTU) ou LRC (modo ASCII) analisando a transmissão da mensagem completa. Existe ainda um gerenciamento do tempo de resposta dos escravos. O mestre é configurado para abortar qualquer transação quando o dispositivo escravo leva um tempo maior que o pré-determinado para responder à mensagem.

A paridade pode ser configurada como sendo ímpar, não existente ou par e a referência sempre é a quantidade de *bits* “1” no *byte*. Quando é configurado como par e o número de bits ‘1’ é par, esse *bit* de paridade tem como valor zero. Basta aplicar o raciocínio inverso quando a paridade é configurada como ímpar. Quando não é aplicada a paridade, este *bit* é inexistente, dando lugar a um segundo *bit* de parada.

O campo de CRC é calculado por um método descrito no manual de aplicação ModBus (MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.2, 2006). Esse método é redundante e leva em consideração todos os *bytes* do *frame*. O *software* em Labview a seguir é o responsável pelo cálculo do campo CRC.

Figura 15 - Código responsável por calcular o campo CRC da mensagem de solicitação do dispositivo mestre ao *Leddar*.

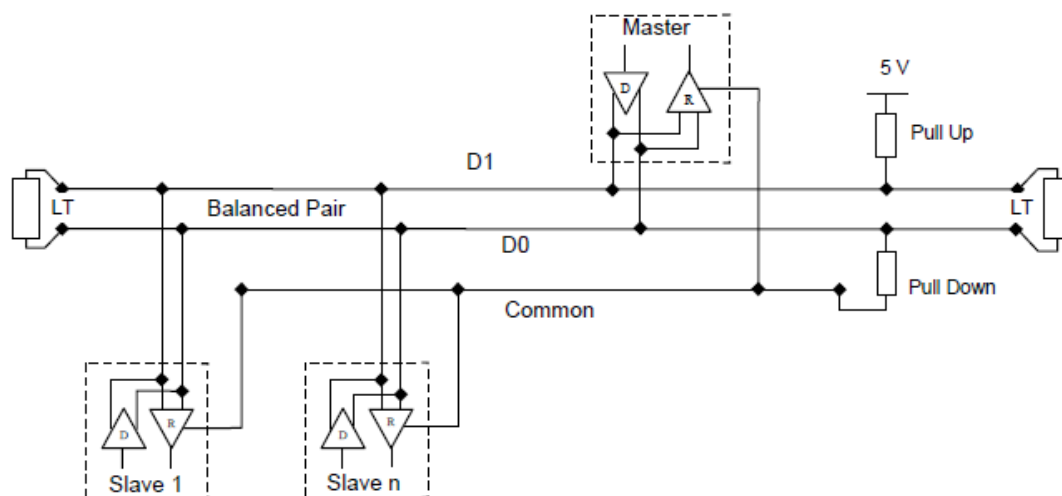


Fonte: O autor.

2.3.5 Meio Físico.

O meio físico em que uma mensagem MODBUS trabalha pode ser regido a partir de dois protocolos, RS-485 e RS-232. Em um protocolo MODBUS que trabalha com RS485, os dispositivos são ligados em um barramento principal constituído por três condutores. Dois destes são um par trançado. A linha de transmissão de dados é bidirecional. São necessárias impedâncias de fim de linha para casamento de impedâncias.

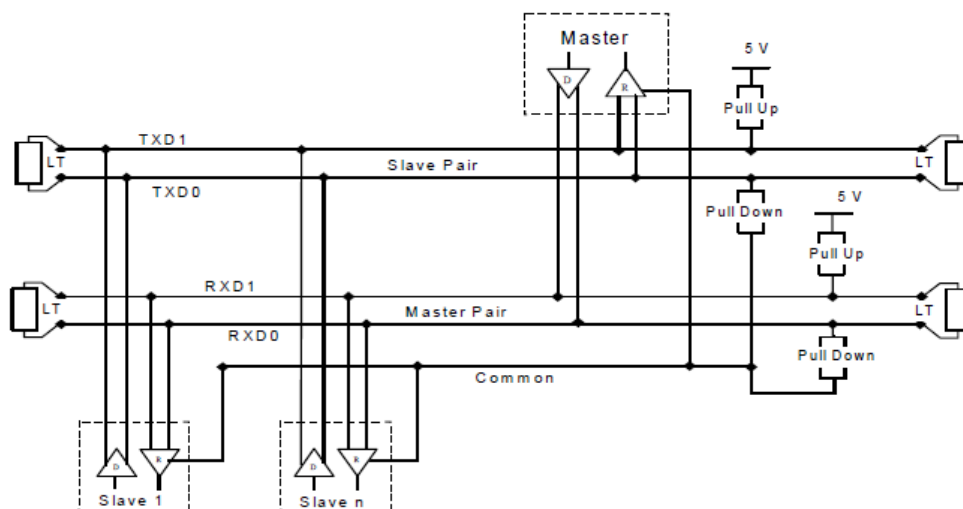
Figura 16 - *Layout* físico de uma rede que trabalha com três fios sob o protocolo RS-485.



Fonte: MODBUS *over Serial Line Specification and Implementation Guide* V1.02.

A Figura 16 ilustra como é a conexão física em sistemas com dois fios que obedecem ao protocolo RS-485 para transmissão de dados. Os *bits* são transmitidos de maneira diferencial e ainda existe um terceiro fio que interliga todos os dispositivos, o *common*. Existe a opção sob o mesmo protocolo que permite a ligação dos dispositivos em quatro fios, como ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - *Layout* físico de uma rede que trabalha com cinco fios sob o protocolo RS-485.



Fonte: MODBUS *over Serial Line Specification and Implementation Guide* V1.02.

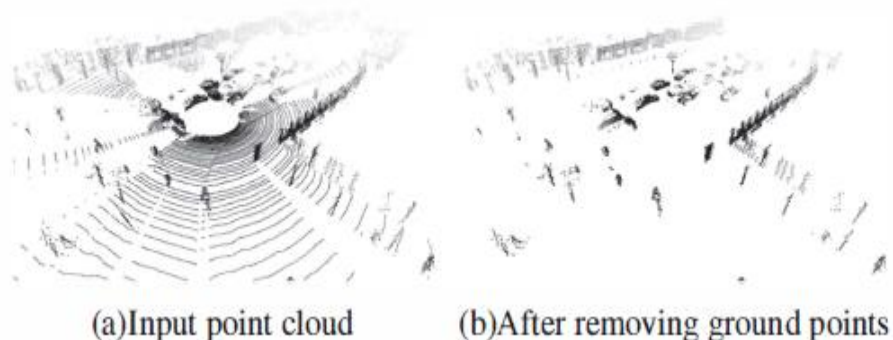
Nesse caso, duas linhas com transmissão de dados unidirecional são montadas de forma que em uma, só o mestre se comunique com os escravos e em outra só os escravos se comuniquem com o mestre formando uma comunicação do tipo *half-duplex*. Da mesma forma que na ligação de dois fios, um condutor interliga todos os dispositivos (fio *common*).

2.4 Tratamento de sinais.

Após a seleção do detector a ser utilizado, realização da montagem física do sistema e estabelecimento de uma comunicação entre o sensor e uma unidade para processamento lógico o próximo passo é a interpretação dos sinais. Um sistema de detecção e rastreamento de objetos múltiplos é constituído basicamente de quatro funções principais: Sensoriamento, segmentação, detecção e rastreamento (Hwang, Kim, Choi, Lee, & Kweon, 2016). O sensoriamento é a etapa construída fundamentalmente pela aquisição de dados fornecidos pelo sensor LIDAR. A etapa de segmentação consiste no tratamento dos sinais recebidos, na rejeição de pontos indevidos e na organização dos pontos fornecidos pelo detector. Dentre as diversas etapas que constituem a função de segmentação existem duas que merecem destaque:

- *Ground plane estimation*: Esse procedimento constitui-se na rejeição de todos os pontos que representam o solo para se obter uma facilidade de processamento, otimização de recursos e melhor compreensão do ambiente detectado.
- Organização de pontos recebidos: Tendo em vista que uma representação em três dimensões de alguma imagem ou objeto nada mais é do que a superposição de diversos planos em duas dimensões, os pontos são classificados em diferentes planos “G(i)” onde o índice ‘i’ representa um grupo de pontos relativamente próximos, esses planos são organizados de forma sequencial para dar forma ao ambiente.

Figura 18 - Efeito do *ground plane estimation* no número de pontos.



Fonte: (Hwang, Kim, Choi, Lee, & Kweon, 2016).

Para realizar o agrupamento de pontos em planos distintos, são aplicados algoritmos específicos. No caso de (Hwang, Kim, Choi, Lee, & Kweon, 2016) foi utilizado um algoritmo denominado DBSCAN (*Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) que como parâmetro de entrada recebe a distância mínima necessária para o plano de pontos mais próximo e o número de pontos mínimos para que um conjunto seja classificado como um plano.

A etapa de detecção é responsável por distinguir objetos dentro de uma mesma leitura, ou seja, após o agrupamento dos planos em duas dimensões esse procedimento realiza as distinções entre componentes pré-estabelecidos. Além disso, são retiradas as características dos objetos captados em forma de nuvem de pontos. Para discriminar esses objetos de interesse, um algoritmo de classificação baseado no SMV (*Support Vector Machine*) pode ser treinado e implementado no projeto (M. Himmelsbach).

Finalmente, o rastreamento de objetos é uma etapa que tem por função realizar a leitura de movimentos de um objeto de acordo com diferentes *frames*, ou seja, essa etapa liga diversas “imagens” sequenciais disponibilizadas pela etapa de detecção e realiza a interpretação do movimento de múltiplos objetos situados no meio externo ao veículo.

3. METODOLOGIA

Entre as diversas maneiras de aquisição de dados a movimentação *Leddar* por um servomecanismo e representação do ambiente pelos pontos capturados é um dos métodos possíveis. Neste capítulo serão apresentadas as maneiras selecionadas para este projeto.

3.1 Mecanismo de movimentação do sensor *Leddar*.

3.1.1 Efeito da movimentação do sensor.

O sensor *Leddar* aplicado a este projeto é uma alternativa aos sensores da linha *Velodyne* devido ao seu baixo custo. No entanto, foi projetado de forma a atuar de maneira estática e possui dezesseis feixes, ou seja, poucos pontos de mapeamento do ambiente em relação a sensores mais sofisticados. A solução encontrada foi a implementação de um servomotor, para movimentar o sensor e aumentar consideravelmente os pontos de representação do meio no qual ele se encontra. O novo número de pontos é obtido através da **Equação 5**.

$$p = 16 * \alpha, \quad \text{(Equação 5)}$$

onde: p = número de pontos de mapeamento e α é a abertura angular do servomotor.

Além de elevar o número de pontos, o deslocamento angular do conjunto é essencial para um sistema de mapeamento de veículos autônomos durante a condução em curvas. Este recurso direciona a visão para a via nessas situações ao passo que em um sistema fixo a visão estaria voltada para o mapeamento do ambiente fora da estrada o que levaria a um determinado número de informações processadas sem uso prático para a condução e ao não-mapeamento do trajeto.

3.1.2 Servomotor e Placa de Controle.

Um servomotor é um motor elétrico com um controle eletrônico interno que, a partir do contato com um pulso classificado como PWM (*Pulse Width Modulation*) característico em seu pino de controle, faz com que o servomotor seja movimentado para uma determinada posição angular. Esse sinal de entrada é retangular e possui dez milissegundos de período, na qual o tempo em nível lógico alto varia de um a três

milissegundos. O tempo de largura do pulso em alto varia de acordo com a posição angular desejada.

Figura 19 - imagem que representa o servomotor utilizado neste projeto para movimentação do sensor *Leddar*.



Fonte: <https://robu.in/product/towerpro-mg995-metal-gear-servomotor/>.

A amplitude de movimentação para o sensor foi de 120° . Essa foi escolhida devido ao número de pontos de coleta do ambiente e abertura angular aceitáveis inicialmente.

Os pulsos de controle do servomotor são gerados por um microcontrolador PIC18F4550. Toda IHM (interface homem-máquina) é realizada por meio de três botões e um *display* de LCD. Os botões B1, B2 e B3 estão posicionados de forma sequencial da esquerda para a direita na parte inferior da placa.

Figura 20 - Placa de desenvolvimento utilizada para comandar o servomotor por meio de pulsos "PWM", em destaque na parte inferior os botões b1, b2 e b3.



Fonte: O autor.

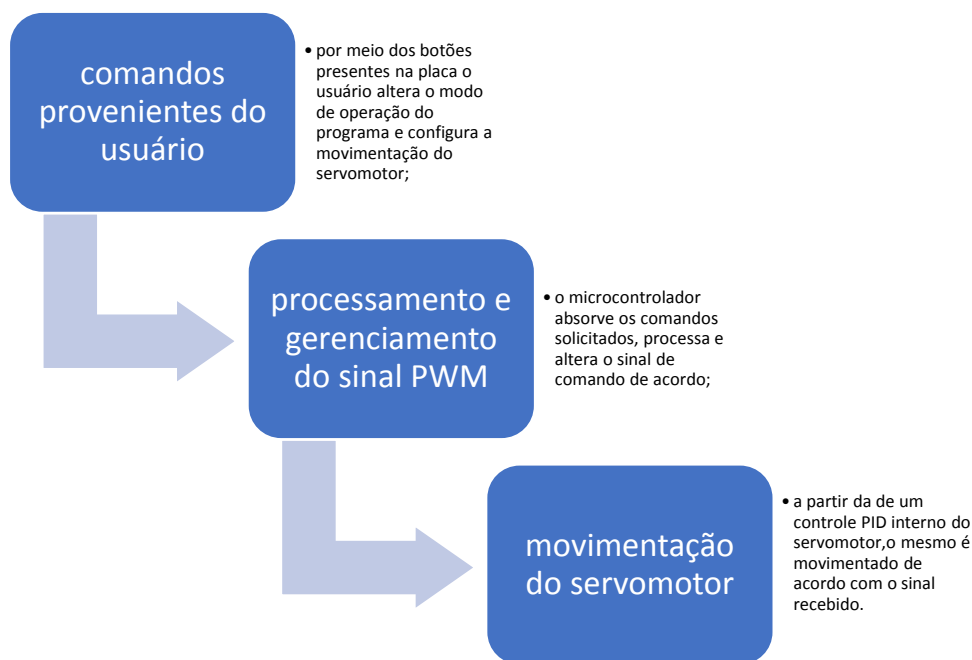
3.1.3 *Software* para Controle do Servomotor.

Existem quatro funcionalidades e suas respectivas páginas no *software* para controle do servomotor apresentadas no *display*. A troca das mesmas é realizada através do botão b3, e cada função está descrita abaixo:

- Primeira: O sistema possui uma funcionalidade manual sendo que a posição do servomotor é alterada pelo usuário a partir de comandos nos botões b1 e b2, ou seja, é possível modificar a posição do servomotor através de comandos originários do utilizador;
- Segunda: Quando o *display* está em segunda página, indica a funcionalidade automática. Nesta, o movimento do servomotor é constante e limitado em dois ângulos fixos. Nesse caso, o utilizador não altera a posição do servomotor e o conjunto se movimenta ciclicamente após a seleção de dois ângulos determinados nas duas próximas páginas.

- Terceira e quarta páginas: Nas duas últimas páginas são configurados os ângulos que limitam o movimento do servomotor no modo automático denominados “ângulo inicial” e “ângulo final”. A Figura 21 mostra o conceito do sistema de movimentação do servomotor:

Figura 21 - Fluxograma geral do funcionamento do sistema de comando.



Fonte: O autor.

3.2 Aquisição de Dados e Representação.

A partir do momento em que a implementação da movimentação do sensor se encontrou finalizada, a próxima etapa consistiu em estabelecer uma comunicação entre o *Leddar* e um *software*, baseado na plataforma *Labview*.

Os próximos subítens mostram como a aquisição de dados e sua posterior representação gráfica foram possíveis.

3.2.1 Configurações das portas seriais e *hardware* adicional.

O sensor *Leddar* utilizado neste projeto foi desenvolvido de forma a se comunicar com dois protocolos de comunicação possíveis, o protocolo CAN (*Controller Area Network*) e o protocolo Modbus. Neste trabalho a opção selecionada foi a segunda.

De uma maneira geral, o protocolo Modbus é utilizado para padronizar a ordem dos *bytes* e a informação presente em cada um deles, atuando na camada de enlace do modelo ISO/OSI. Com isso, se faz necessário a utilização de um protocolo que defina e padronize a camada física, o RS-485.

Como não há uma entrada no computador pessoal utilizado que tenha as características para identificar informações sob o protocolo RS-485, um conversor se fez necessário.

Sua função é transformar os níveis de tensão presentes nos pinos de comunicação do sensor para os níveis de tensão passíveis de leitura através de uma porta USB e vice-versa.

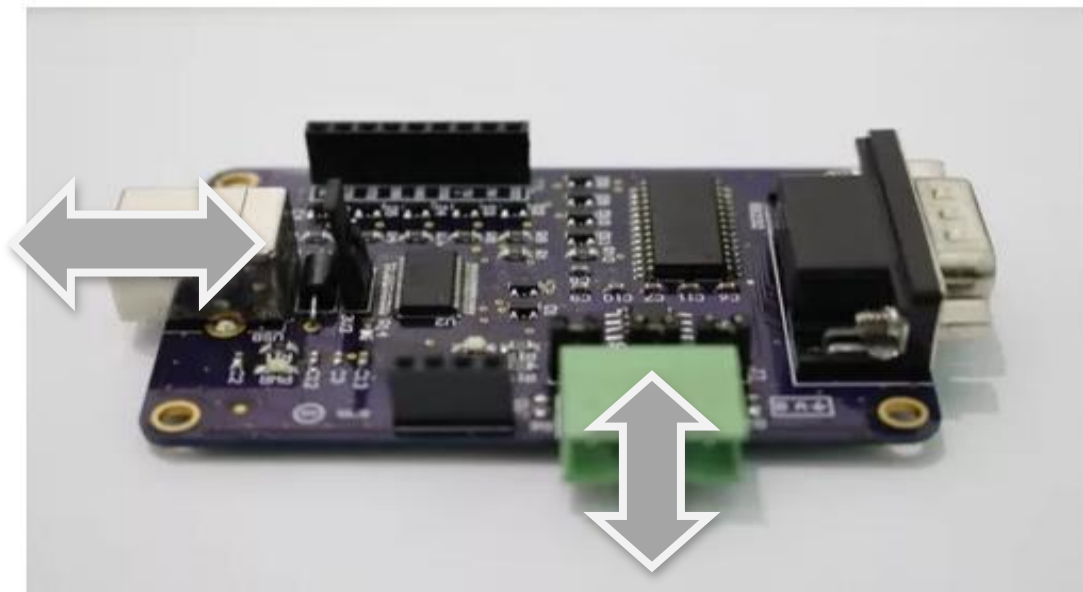
O conversor possibilita a troca entre os dois protocolos mencionados e mais alguns, de forma que apenas dois conectores foram utilizados, como ilustrado na Figura 22.

A partir disso se fez necessário a configuração de como os *bytes* seriam alocados em cada palavra na comunicação com o sensor *Leddar*. É importante salientar que as formatações de como os *bits* estão alocados nessas palavras devem obedecer às exigências do modo de comunicação RTU, definidos no capítulo de revisão bibliográfica, devendo ser idênticas tanto no sensor como na configuração da porta serial do computador.

A configuração dos *chars* pelo sensor foi possível através de um *software* disponibilizado pelo fabricante e as configurações nas portas seriais do computador são acessadas pelo gerenciador de dispositivos no painel de controle (considerando um computador com sistema operacional *Windows*), como ilustrado na Figura 23.

Só com as configurações padronizadas foi possível o recebimento ordenado das informações com cada *byte* em posições pré-estabelecidas na mensagem disponibilizada pelo sensor.

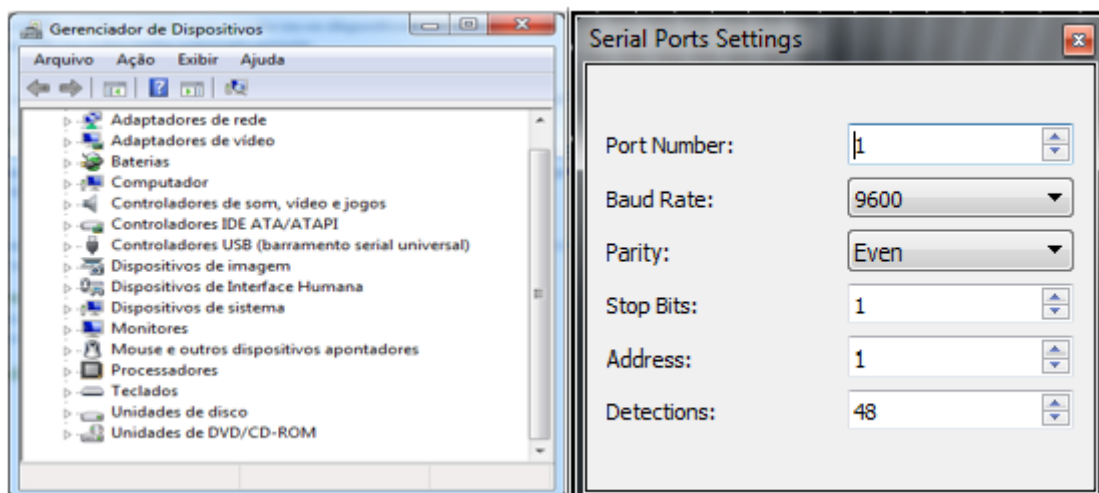
Figura 22 - Imagem do conversor de protocolos utilizado nesse projeto bem como as indicações das portas utilizadas como entrada e saída.



Fonte: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-906623476-conversor-usb-p-rs232-rs485-ttl-5v3v3-3-em-1--_JM (adaptado).

A resposta do sensor contém diversas informações sobre as distâncias dos objetos mais próximos em determinadas direções no ambiente, sobre a própria confiabilidade das informações passadas, checagem de erros na comunicação, entre outras. A descrição da informação de cada *char* que compõe a mensagem está presente no item subsequente.

Figura 23 - janelas de configuração das palavras da comunicação tanto do computador pessoal como do *Windows*.



Fonte: Autor. (Adaptado SDK).

3.2.2 Descrição dos *Frames* na Comunicação com o Sensor *Leddar*.

Existem três possíveis mensagens estabelecidas pelo fabricante para comunicação com o sensor. A escolhida foi a “0x41” para trazer as informações das distâncias detectadas por cada feixe de uma maneira organizada e de fácil interpretação quando comparada com a mensagem 0x04.

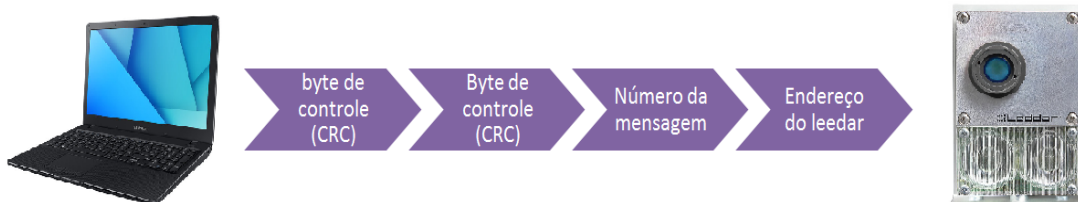
Como descrito no capítulo “revisão bibliográfica”, toda comunicação neste protocolo é composta de uma solicitação a partir do mestre e de uma resposta vinda do dispositivo escravo.

Nesse caso, o computador pessoal passa a realizar *requests* e receber as devidas respostas do sensor. A solicitação é composta pela seguinte sequência de *bytes* invariáveis para a mensagem 0x41:

- Primeiro: Traz o endereço do dispositivo que foi configurado como 0x01.
- Segundo: Traz o número 0x41, solicitando ao *slave* uma resposta quanto às distâncias detectadas por cada segmento.
- Terceiro e quarto: compõem o *check* da mensagem completa, calculado através de um algoritmo padrão, apresentado anteriormente. Os caracteres desses bytes são: 0xC0 e 0x10, respectivamente. Essa sequência é representada na Figura 24.

É importante salientar que não existem parâmetros a serem fornecidos no campo de dados, sendo este simplesmente ignorado neste caso.

Figura 24 - Sequência de bytes de uma solicitação na mensagem 0x41.



Fonte: Autor. (*evaluation kit user guide* e <http://www.samsung.com/br/pc/notebook-expert-x23-np300e5m-xd1br/> adaptado).

A resposta do sensor fornecida após a solicitação, contém a seguinte sequência de *bytes*:

- Primeiro: contém o endereço do sensor padronizado com o número: 0x01.
- Segundo: contém a função ou ação solicitada caracterizada pela identificação da mensagem, nesse caso 0x41.
- Terceiro: contém o número de detecções presentes na mensagem, geralmente dezesseis.

A partir do quarto *byte*, existem sequências de cinco *bytes*. Cada *byte* dessa sequência contém as informações referentes à detecção de um feixe em específico. As informações de cada sequência estão dispostas da seguinte maneira:

- Dois primeiros *bytes*: contém a distância em centímetros detectada por um determinado segmento.
- Terceiro e quarto *bytes*: contém os “*amplitude times*”.
- Quinto *byte*: os quatro *bits* mais significativos desse *byte* indicam o número do segmento de ‘0’ a ‘15’ e o *bit* menos significativo é colocado em ‘1’ sempre que a detecção é válida.

A Figura 25 ilustra as informações presentes no início da resposta do *Leddar*. Geralmente, a mensagem completa tem cerca de 90 *bytes*. Como o padrão se repete ao longo da mensagem, está representado até o envio da segunda sequência de cinco *bytes*.

Figura 25 - Representação das informações transmitidas no início da resposta do sensor de acordo com a função ou mensagem 0x41.



Fonte: Autor. (*evaluation kit user guide* e <http://www.samsung.com/br/pc/notebook-expert-x23-np300e5m-xd1br/> adaptado).

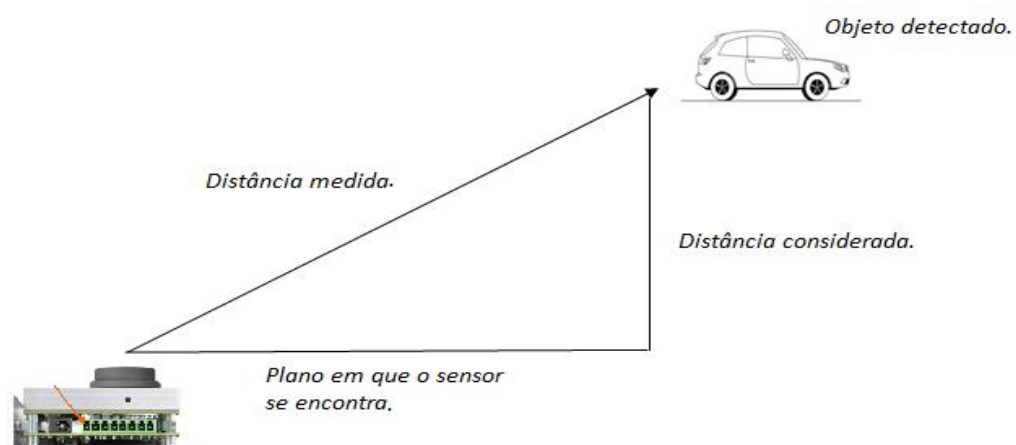
3.2.3 Tratamento de Dados.

Como o sensor *Leddar* é composto por apenas um emissor e vários segmentos de feixe de luz, a estratégia adotada foi dispersar os feixes de maneira circular, todos tendo em comum o ponto de partida na parte central do sensor. Considerando essa característica, caso os dados fossem processados sem nenhuma espécie de adequação ou tratamento, um objeto plano detectado teria diferentes medidas de distância para cada feixe o que causaria distorções na representação do ambiente. Na prática, foram consideradas as distâncias entre a linha que representa o plano imaginário em que o sensor se encontra e o objeto detectado, dessa forma o valor considerado após essa adequação de distâncias será fiel ao meio em que o veículo se encontrará durante a medição.

Para realizar essa correção, a principal fonte de recursos foi a trigonometria. São disponibilizados dezesseis feixes dispostos de maneira horizontal enumerados de zero a quinze de forma circular partindo do centro do emissor. O feixe 'zero' forma um ângulo de 67,5 graus com relação ao plano e cada feixe tem esse valor incrementado em 2,8 graus.

Para a correção da distância basta considerar que o valor fornecido, parte do plano imaginário em que o sensor se encontra e a distância da linha do plano imaginário para o objeto em cada medição são a hipotenusa e os dois catetos de um triângulo retângulo, respectivamente.

Figura 26- Representação das medidas físicas para cada medição e da distância considerada em cada medição.



Fonte: O autor. (<https://soloinfantil.com/desenhos/desenhos-de-carros-para-colorir-35-modelos-incriveis/> e *evaluation kit user guide*).

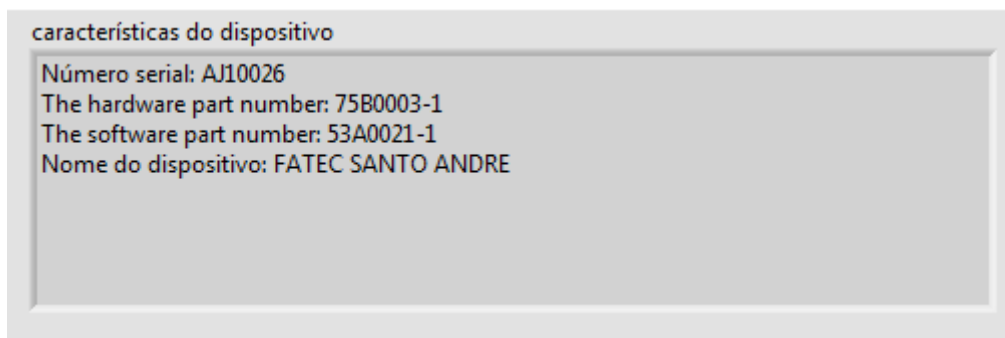
Como o ângulo de cada feixe é conhecido e a distância do sensor para o objeto é captada, basta multiplicar o seno trigonométrico do ângulo pelo valor detectado para obter-se a distância a ser considerada para que não ocorram distorções na representação do meio.

3.2.4 Representação Gráfica das Medições do Sensor *Leddar*.

O programa utilizado para analisar a mensagem do sensor *Leddar* que trafega via porta USB foi o *Labview*, devido à quantidade e facilidade de recursos presentes nesta plataforma para aquisição, análise e representação de dados.

No desenvolvimento do *software* além da mensagem 0x41, a comunicação baseada na mensagem 0x11 também foi desenvolvida. Essa mensagem caracteriza-se pela transferência de algumas características técnicas do dispositivo: número serial, um número associado ao *hardware* e outro ao *software* e o nome dado ao dispositivo como ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Resposta referente a mensagem 0x11 que traz de algumas características fixas do sensor.

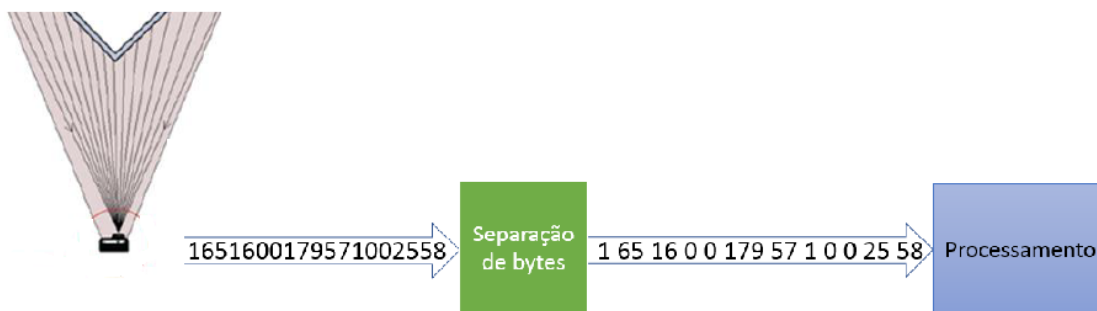


Fonte: O autor.

Assim que uma resposta é identificada, faz-se um pequeno teste com o primeiro *byte* para analisar se o mesmo carrega o valor 0x01 que é o endereço do dispositivo. Logo após este passo, a função solicitada é identificada pelo segundo *byte* da resposta que, nesse caso, pode ser 0x11 ou 0x41.

No caso da resposta 0x41, todos os *bytes* são transformados em caracteres e alocados em uma variável do tipo *string* em uma única linha. É colocado um caractere neutro entre cada *byte* para que todos estejam separados, facilitando a interpretação posterior da mensagem.

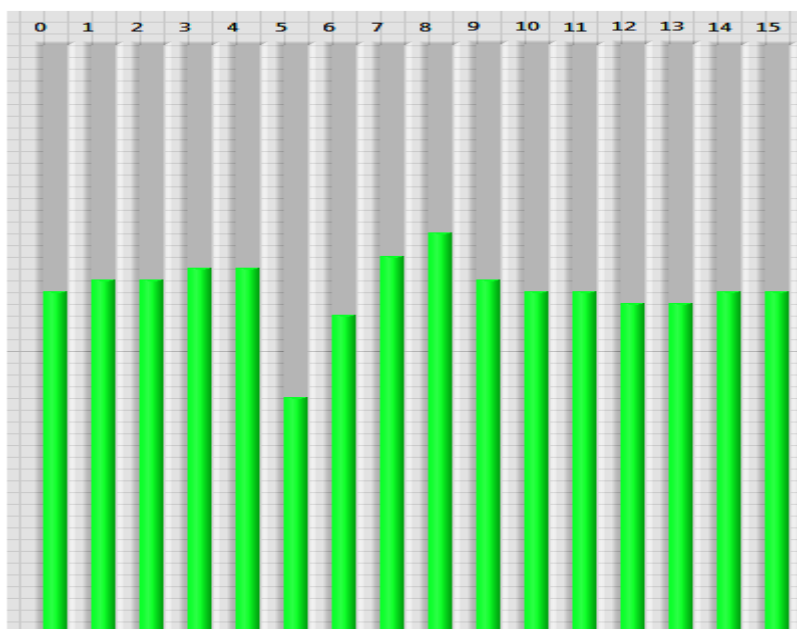
Figura 28 - Exemplo da separação de bytes em uma sequência de bytes real para facilitar a interpretação da mensagem.



Fonte: O autor.

Em seguida, essa linha de *bytes* é transformada em um texto padrão onde cada informação é alocada em uma posição específica facilitando a identificação das informações. Esse texto padrão é tratado e as informações de cada distância são alocadas em um vetor que é representado por dezesseis barras após o tratamento de dados discutido no capítulo anterior. Assim, quanto mais distante o objeto estiver com relação ao plano que o sensor se encontra maior é o valor indicado em cada barra para cada segmento.

Figura 29 - Barras na SubVi de comunicação com o sensor que representam as distâncias de cada segmento.



Fonte: O Autor.

Finalmente, essas informações são utilizadas pelo programa principal. Este é responsável por realizar a leitura de uma câmera acoplada ao computador e unir graficamente a imagem com as informações de distância dos segmentos.

Essa reunião é feita de forma que as imagens que a câmera captura sejam mostradas pelo *software* e os números que indicam as distâncias de cada objeto em posições pré-definidas são sobrepostos na imagem.

De acordo com a distância expressa em cada direção, o tamanho do número é alterado dinamicamente de forma que quanto mais próximo o objeto maior é o número sobreposto na tela como pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 - Tela de uma medição com as distâncias medidas pelo sensor sobrepostas na imagem gerada pela câmera.



Fonte: o autor.

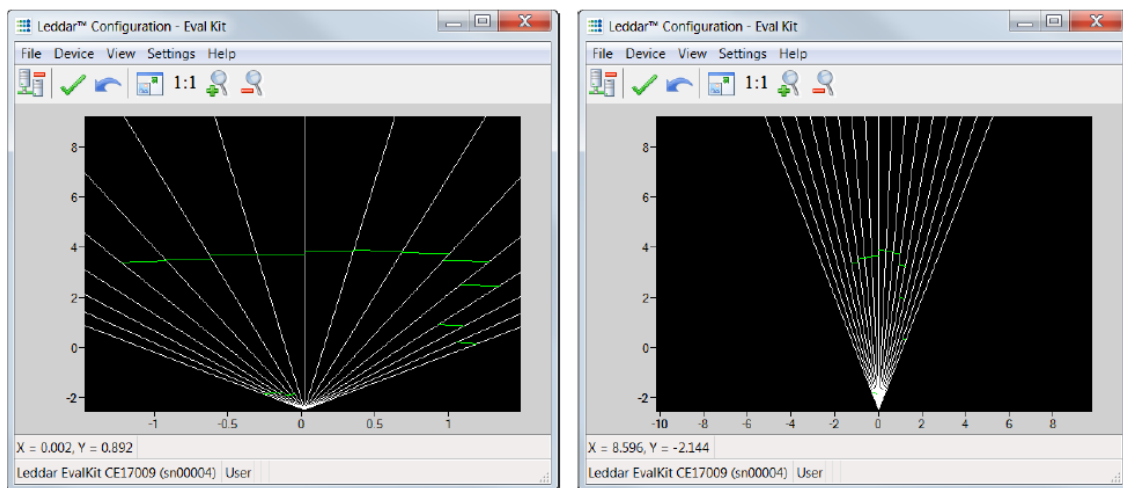
4. RESULTADOS E TESTES.

4.1 Plataforma de Ensaio com o *Leddar*.

Alguns experimentos foram realizados para avaliar a resolução e a qualidade dos pontos fornecidos.

Porém, como ainda não havia uma forma automática de troca de dados entre algum *software* de representação e o detector, a coleta de informações foi feita a partir de anotações manuais e foi possível através da utilização do *software* SDK da *Leddar*tech. Abaixo vemos uma ilustração da plataforma do SDK.

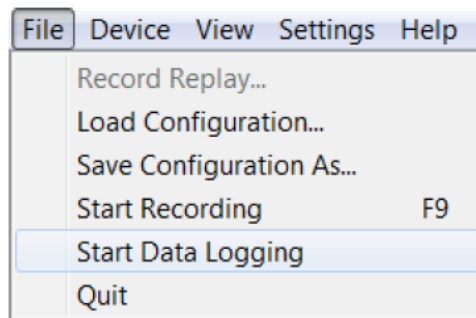
Figura 31-Ilustração da tela do SDK do *leddar*. Na esquerda vemos uma região ampliada e na direita a mesma região, mas reduzida. As linhas verdes indicam a presença de algum objeto na direção de algum dos 16 feixes.



Fonte: o autor

Os pontos foram coletados a partir de um sistema de *Data Logging* existente no SDK. A operação de *start* e *stop* da coleta foi manual e a partir dos arquivos gerados os dados foram exportados para uma planilha Excel. A Figura 32 ilustra o menu de ativação e parada do processo de coleta de dados e salvamento em arquivo.

Figura 32-Na imagem abaixo vemos o menu com o comando iniciar e parar o Data Logging.



Fonte: SDK

Para realização dos primeiros testes o sensor foi colocado em uma bancada e deslocado axialmente de dez em dez milímetros. A distância que cada feixe captou em cada medição foi gravada em um arquivo do *Data Logging*. No total foram feitas trinta medições no teste. Após essa etapa inicial as informações foram dispostas em tabelas e representadas em gráficos de superfície, para efeito de comparação entre o ambiente real e a superfície que liga a nuvem de pontos fornecida pelo dispositivo.

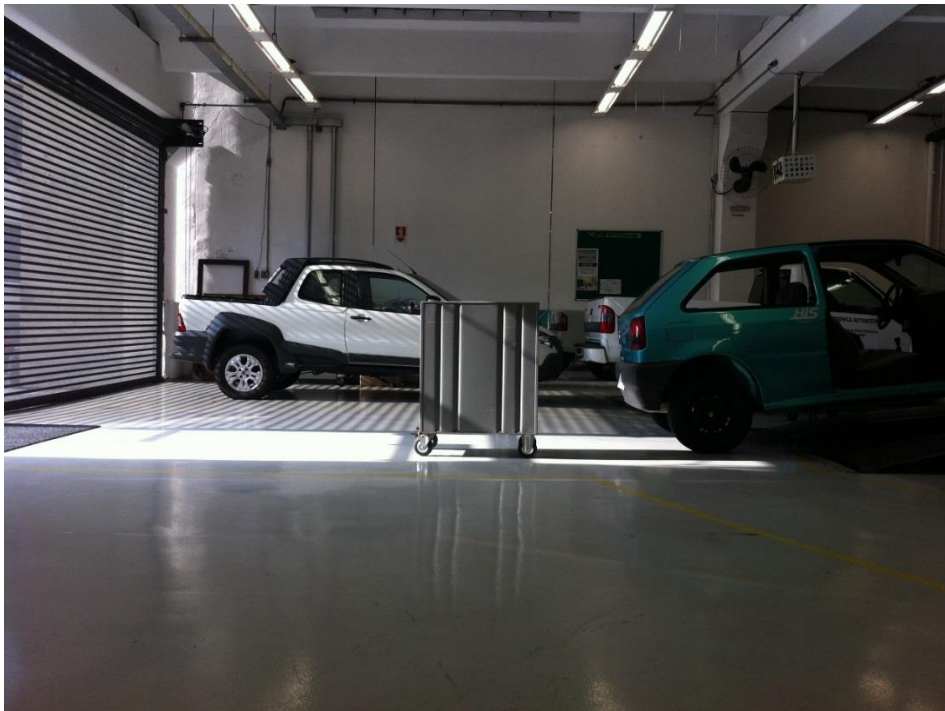
O gráfico da **Figura 33** representa os pontos coletados pelo *Leddar* a partir de uma leitura do ambiente demonstrado na **Figura 34**. Esse tipo de gráfico 3D além de considerar a posição dos pontos em um espaço tridimensional, liga eles através de uma superfície e por isso são denominados “gráficos de superfície”.

Figura 33 - Gráfico de superfície ligando os pontos detectados pelo sensor no teste em questão.



Fonte: O autor.

Figura 34- Ambiente de testes para o *Leddar*. O carrinho de ferramentas está à 6 metros do sensor e o teste procurou avaliar a capacidade do sensor em representar esse ambiente.



Fonte: O autor

Considerando que o ideal para a nuvem de pontos de um sensor *Leddar* é revelar formas semelhantes com os objetos detectados no ambiente, as características do sensor aplicado a este projeto levam a uma situação indesejada, de maneira que o contorno dos objetos não é exposto de acordo, como observado na relação do gráfico com o ambiente detectado.

Partindo dessas limitações presentes, a solução para um melhor mapeamento do ambiente foi a implantação de uma câmera em conjunto, de forma que os dados do sensor *Leddar* serão utilizados para determinar as distâncias dos objetos mais próximos em determinadas direções e os dados fornecidos pela câmera serão tratados de forma a caracterizar objetos, ou seja, os conjuntos de pixels serão tratados para que cada objeto comum ao trânsito seja identificado e os dados do sensor serão utilizados para indicar a distância desses objetos.

Contudo, são necessários testes para comprovar a relação das informações fornecidas pelo *Leddar* e as distâncias reais. O próximo subitem representa o teste feito para a comprovar essa relação.

4.2 Relação entre as distâncias medidas pelo *Leedar* e as reais.

Para comprovar o quanto as distâncias fornecidas pelo sensor *Leedar* estão próximas das distâncias reais dos objetos no ambiente um cartaz foi colocado em diversas posições em um ambiente com razoável variação de luminosidade, para que os feixes centrais captassem a distância do objeto com relação ao *Leedar*.

Algumas medições foram feitas com um deslocamento lateral do cartaz para assegurar o funcionamento dos demais feixes. Cada distância foi medida previamente, bem como os deslocamentos angulares nas medições laterais. Em cada posição do cartaz o nível de luminosidade foi medido em sua base. Os níveis estão relacionados na Figura 35.

Figura 35 - A tabela indica qual o nível de luminosidade na base do cartaz em cada medição realizada longitudinalmente neste experimento, estes parâmetros são importantes para que a análise de funcionamento do *Leedar* em diferentes condições seja possível.

Distância (metros)	luminosidade(Lux)
9	540
8	222
7	128
6	110
5	98
4	107
3	94
2	103
1	97

Fonte: O autor.

No total foram onze medições. Em nove delas, o cartaz foi deslocado de maneira longitudinal em passos de um metro, já nas outras duas o cartaz foi deslocado em dez graus pra esquerda e dez graus para a direita da linha de centro do sensor, com quatro e dois metros de distância, respectivamente. Um exemplo de medição está representado na Figura 36:

Figura 36 - Exemplo de medição da distância entre o sensor e o cartaz no ambiente estabelecido, pode-se observar a variação de luminosidade ao longo do corredor.



Fonte: O autor.

Considerando uma resolução em metros, todas as medições realizadas pelo sensor *Leedar* corresponderam exatamente com as distâncias entre o sensor e o cartaz previamente medidas independentemente do estado luminoso do ambiente, comprovando a eficácia do sensor em diferentes condições ambientais.

4.3 Necessidade da União entre câmera e *Leedar*.

É importante salientar que todo tratamento dos dados fornecidos por uma câmera, como a aplicada a este projeto, é baseado na tonalidade dos pixels presentes na imagem fornecida, de maneira que toda separação dos objetos na imagem bem como sua caracterização futura, será baseada na continuidade ou não de um determinado conjunto de cores. As limitações do sensor *Leedar* aplicado a este projeto já foram demonstradas nos testes do subitem 4.1 mas, a necessidade de um complemento as informações fornecidas pela câmera será evidenciada neste subitem.

Para comprovar a necessidade de um *Leedar* como complemento as informações da câmera, colocamos o cartaz mencionado anteriormente em um ambiente em que a intensidade luminosa pudesse ser alterada, para que o comportamento da câmera fosse analisado. Foram realizados três testes: no primeiro, a intensidade luminosa do ambiente era considerável. Como representado na Figura 37:

Figura 37 - Teste do sistema combinado com uma intensidade de 183 Lux.



Fonte: O autor.

Nota-se que, visualmente, as cores no cartaz são facilmente identificadas, a cor branca do cartaz se destaca com relação as outras no ambiente, facilitando uma possível separação do objeto com relação ao ambiente em uma implementação futura.

Já na segunda condição, o ambiente sofreu uma leve alteração de luminosidade, passando a um nível médio, como ilustrado na Figura 38.

Figura 38 - Segundo teste realizado com uma luminosidade do ambiente menor, correspondente a 38 Lux.



Fonte: O autor.

No segundo teste, nota-se uma pequena alteração na tonalidade branca do cartaz, mas ainda se destacando com relação aos outros objetos no ambiente, de forma que em uma implementação futura, ainda seria possível separá-lo dos outros objetos ou caracterizá-lo através de um tratamento de imagem.

Já na terceira condição estabelecida, a luminosidade do ambiente foi forçada ao mínimo possível. Como ilustrado na Figura 39:

Figura 39 - Terceiro teste do sistema com alteração de luz do ambiente, nesse caso a intensidade luminosa era de 2 Lux.



Fonte: O autor.

No terceiro teste, a tonalidade do cartaz não se destaca com relação as outras no ambiente de forma que uma caracterização ou separação do objeto no ambiente através das diferentes tonalidades dos *pixels* ficaria dificultada devido à condição luminosa imposta.

De uma forma geral, em todas as condições de luminosidade, as distâncias em relação ao cartaz informadas pelo sensor *Leedar* mantiveram-se. Esse fato leva à compreensão de que o complemento de informações entre o sensor e a câmera é necessário para o sistema de mapeamento de forma que as limitações de ambos são, até certo ponto, supridas pela combinação.

5. CONCLUSÃO.

Nos subítens abaixo são destacadas, resumidamente, as contribuições relevantes do projeto quanto a implementação de sensores do tipo LIDAR, bem como sua união com câmeras, para o mapeamento de ambientes.

5.1. Observações finais.

Neste trabalho foi apresentado um sistema de mapeamento de ambientes, com foco em veículos autônomos, baseado em dois sensores; um *Leddar*, sensor responsável por medir distâncias com relação as superfícies mais próximas em diversas direções; e uma câmera, responsável pelo fornecimento de imagens que representam o ambiente.

A primeira contribuição deste projeto foi a implementação de uma movimentação do sensor *Leddar* baseado através de um servomotor. Esse sistema de deslocamento foi pensado para uma futura aplicação em curvas para veículos autônomos. Este atuará de forma a manter a visão do sistema de mapeamento na via à qual o veículo se deslocará mesmo em situações com uma movimentação lateral.

Foi comprovado o quanto as características de um sensor do tipo LIDAR podem influir na forma dos objetos representados por sua nuvem de pontos. Apesar de ser um sensor com menor custo para aquisição, as características do sensor aplicado a este projeto levam a uma situação indesejada, principalmente devido a sua resolução angular, de maneira que os objetos não são expostos de uma forma em que suas silhuetas sejam representadas.

Esse nível de resolução exigiu uma solução na qual as limitações do sensor fossem compensadas. Pensou-se na utilização de uma câmera com a responsabilidade de caracterizar objetos a partir de um tratamento de seu conjunto de *pixels*. Foi mostrado a necessidade do complemento de um sensor ativo à câmera de forma a fornecer informações sobre o ambiente quando o mesmo se encontrasse em uma condição adversa, principalmente com relação a condições de baixa iluminação. Os testes do sistema mostraram que mesmo quando os *pixels* fornecidos pela câmera ficassem com tonalidades parecidas tornando a caracterização inviável, as distâncias dos objetos seriam informadas pelo sensor.

Finalmente, foi desenvolvido um sistema que combina graficamente as informações de uma câmera com um sensor do tipo LIDAR, de forma que a imagem do ambiente gerada pela câmera tem, sobreposta, a distância de cada objeto com relação ao sistema de mapeamento.

Há o detalhe gráfico de que quanto maior a distância do objeto com relação ao sistema, menor será o tamanho do número que representa a distância do mesmo. Essa informação fica sobreposta na imagem para dar maior destaque.

5.2 Propostas Futuras.

Como sugestões para propostas futuras de desenvolvedores interessados estão:

- Desenvolver um sistema de mapeamento com uma rotação de 360° de amplitude de maneira a realizar o mapeamento da via na qual o veículo se encontrará tanto com relação aos próximos metros a serem percorridos como aos que já se passaram;
- Alternativamente ao proposto no item acima, outra solução técnica viável é construir um sistema de came ou biela para que o giro do motor fosse sempre num único sentido e o sistema mecânico faria a inversão do sentido, assim como ocorre nos limpadores de para-brisas. Um sensor do tipo *encoder* poderia sincronizar a posição do *Leddar* em relação ao giro do motor.
- Realizar um tratamento dos dados vindos da câmera com o objetivo de destacar objetos, uns com relação aos outros na imagem;
- Realizar a classificação de objetos comuns ao trânsito com os dados fornecidos pela câmera, ou seja, pessoas, árvores, faixas de pedestres, etc.;
- Realizar o rastreamento de objetos como um passo após a classificação, isto é, depois que um objeto for classificado obter-se uma análise de sua trajetória.

6. REFERÊNCIAS

- (5 de 5 de 2017). Fonte: nacoesunidas.org: <https://nacoesunidas.org/oms-recomenda-limite-de-50kmh-para-reduzir-mortes-no-transito-velocidade-alta-causa-um-terco-de-obitos-por-acidentes/>
- (22 de 12 de 2017). Fonte: G1: <https://g1.globo.com/carros/noticia/numero-de-mortes-por-acidente-de-transito-cai-10-diz-ministerio-da-saude.ghtml>
- AMADEO, R. (1 de 9 de 2017). Fonte: arstechnica: <https://arstechnica.com/cars/2017/01/googles-waymo-invests-in-lidar-technology-cuts-costs-by-90-percent/>
- ASIRT. (s.d.). Fonte: Association for safe international road travel: <http://asirt.org/Initiatives/Informing-Road-Users/Road-SafetyFacts/Road-Crash-Statistics>
- Bhuiyan, I. K. (2018). LiDAR Sensor for Autonomous Vehicle.
- Chaudhari Priyanka Ramnath, P. (Outubro de 2015). Advanced Driver Assistance System (ADAS).
- Habermann, D. (2016). Localização topológica e identificação de obstáculos por meio de sensor laser 3D (LIDAR) para aplicação em navegação de veículos autônomos terrestres.
- Hwang, S., Kim, N., Choi, Y., Lee, S., & Kweon, I. S. (2016). Fast Multiple Objects Detection and Tracking Fusing Color Camera And 3D LIDAR for intelligent vehicles.
- Junqing Wei, J. M. (2013). Towards a Viable Autonomous Driving Research Platform.
- Kitani, P. D. (2016). Construção de uma Plataforma de Hardware e Software para Implementação de um Veículo Elétrico Autônomo.
- Krotkov, M. H. (Abril de 1992). 3D measurements from imaging laser radars : how good are they?
- Krotkov, Martial Hebert and Eric. (1992). 3D measurements from imaging laser radars: how good are they?
- Lefsky, Michael A; Cohen, Warren B; Parker, Geoffrey G; Harding, David J. (2002). Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies.
- M. Himmelsbach, A. M.-J. (s.d.). LIDAR – based 3d object detection.
- Michael S. Darms, P. E. (2009). Obstacle Detection and Tracking for the Urban Challenge.
- MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.2. (2006).
- Nobili, Dominguez, Garcia, & Martinet. (2015). 16 channels Velodyne versus planar LiDARs based perception system for Large Scale 2D-SLAM.
- Oliver Wulf, B. w. (2003). FAST 3D SCANNING METHODS FOR LASER MEASUREMENTS SYSTEMS.

SIVAK, B. S. (2014). A SURVEY OF PUBLIC OPINION ABOUT AUTONOMOUS AND SELF-DRIVING VEHICLES IN THE U.S., THE U.K., AND AUSTRALIA.