

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**BRUNO ARRIELLO CHAGAS  
RAFAEL PIAZENTIN FREIRE GONÇALVES**

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE NAVEGAÇÃO  
PARA ROBÔ AUTÔNOMO TERRESTRE**

**CURITIBA**

**2022**

**BRUNO ARRIELLO CHAGAS**  
**RAFAEL PIAZENTIN FREIRE GONÇALVES**

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE NAVEGAÇÃO  
PARA ROBÔ AUTÔNOMO TERRESTRE**

**Development and Implementation of Navigation System for Autonomous Land  
Robot**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e Bacharel em Engenharia Eletrônica dos Cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Dra. Nastasha Salame da Silva.

Coorientador(a): Me. Daniel Rossato de Oliveira.

**CURITIBA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**BRUNO ARRIELLO CHAGAS**  
**RAFAEL PIAZENTIN FREIRE GONÇALVES**

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE NAVEGAÇÃO  
PARA ROBÔ AUTÔNOMO TERRESTRE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e Bacharel em Engenharia Eletrônica dos Cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 25/novembro/2022

---

Daniel Rossato de Oliveira  
Mestre  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Nastasha Salame da Silva  
Doutora  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Paulo Cícero Fritzen  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Gustavo Benvenuto Borba  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de concluir este ciclo. Agradeço também aos envolvidos, que de alguma maneira contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, sendo eles:

Aos professores orientadores que nos auxiliaram no processo construtivo deste documento e ao longo da nossa graduação.

Aos colegas e amigos, pelo incentivo e suporte técnico prestado, sem vocês nada disso seria possível.

Aos nossos pais, que nos incentivaram a continuar nadando contra a maré, independentemente da dificuldade.

Aos que participaram, mas que infelizmente perderam-se ao longo do caminho. Estarão para sempre em nossos corações.

“If I have seen further it is by standing on the  
shoulders of Giants”. (ISAAC NEWTON).

## RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem por objetivo apresentar o projeto e execução completos de um veículo autônomo, pertencente a categoria *Treking Pro*, em conformidade com as especificações previstas no certame da competição realizada pela *RoboCore*. A aplicação tem como premissa a capacidade de identificação e localização dos objetivos, de maneira totalmente autônoma, elaborando rotas e alterando-as quando necessário. Sabendo disso, este trabalho apresenta o processo completo de desenvolvimento do autômato, desde a relação de conhecimentos agregados no referencial teórico até a escolha dos componentes, montagem e desenvolvimento de *software* e os resultados obtidos ao final do processo construtivo. Desta forma, foram demonstrados os conhecimentos adquiridos no processo de graduação, obtendo êxito, tanto na elaboração do sistema de navegação, quanto na aplicação prática do projeto.

Palavras-chave: veículo autônomo; Trekking; sistema de navegação; aplicação prática; software.

## **ABSTRACT**

This undergraduate thesis, aims to present the complete design and execution of an autonomous vehicle, belonging to the Treeking Pro category, in accordance with the specifications provided for in the competition event held by RoboCore. The application is premised on the ability to identify and locate the objectives, in a totally autonomous way, elaborating routes and changing them when necessary. Knowing this, this work presents the complete process of development of the automaton, from the relation of aggregated knowledge in the theoretical framework to the choice of components, assembly and software development and the results obtained at the end of the construction process. In this way, the knowledge acquired in the graduation process was demonstrated, obtaining success, both in the elaboration of the navigation system, and in the practical application of the project.

**Keywords:** autonomous vehicle; Trekking; navigation system; practical application; software.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de partes.....	24
Figura 2 - Diagrama elétrico da placa de circuito impresso.....	28
Figura 3 - Modelo 3D da placa de circuito impresso .....	29
Figura 4 - Modelo cinemático do robô diferencial de duas rodas .....	30
Figura 5 - Movimento angular e linear infinitesimal .....	31
Figura 6 - Deslocamento infinitesimal .....	32
Figura 7 - Veículo em estágio intermediário.....	34
Figura 8 – Funcionamento de um sensor de ultrassom .....	37
Figura 9 - Raio de visão do sensor ultrassom .....	38
Figura 10 - Sensor de distância HC-SR04 .....	39
Figura 11 - Magnetômetro HMC5883L.....	40
Figura 12 - Funcionamento GPS.....	41
Figura 13 - Sensor de GPS .....	42
Figura 14 - Sistema de triangulação do GPS .....	42
Figura 15 - Ponte-h .....	43
Figura 16 - Sistema de indicação luminosa.....	44
Figura 17 - Bateria dos sistemas de potência .....	45
Figura 18 - Bateria dos sistemas de processamento e sensores.....	45
Figura 19 - Aba “Marvin” do aplicativo.....	48
Figura 20 - Aba “GPS” do aplicativo.....	49
Figura 21 - Aba “Controle” do aplicativo .....	50
Figura 22 - Aba “Sistema” do aplicativo .....	52
Figura 23 - Esp32.....	53
Figura 24 - Fluxograma de processamento.....	55
Figura 25 - Primeira placa de circuito em desenvolvimento .....	65
Figura 26 - Primeira placa de circuito desenvolvida .....	65
Figura 27 - Placa de circuito pintada .....	66
Figura 28 - Circuito impresso em negativo .....	66
Figura 29 - Estufa para iluminação UV.....	67
Figura 30 - Finalização da placa de circuito definitiva .....	67
Figura 31 - Sensor de distância <i>laser</i> .....	68

Figura 32 - Sensor óptico de odometria .....	69
Figura 33 - Discos para leitura de odometria.....	69
Figura 34 - Sensor acelerômetro e giroscópio.....	69
Figura 35 - Módulos GPS com defeito .....	71
Figura 36 - Montagem do teste de GPS em <i>ProtoBoard</i> .....	73
Figura 37 - Percurso realizado no teste de GPS .....	74
Figura 38 - Integração entre a ponte-h e os motores .....	75
Figura 39 - Integração completa da estrutura.....	76
Figura 40 - Campo de teste do BOPE/PMPR.....	77
Figura 41 - Realização da prova BOPE/PMPR .....	78
Figura 42 - Realização da prova no BIG .....	79
Figura 43 - Versão final da estrutura .....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tomadas de tempo asfalto.....	80
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	<i>Two Dimensions</i>
3D	<i>Three Dimensions</i>
ADS	<i>Automated Driving System</i>
CC	Corrente Contínua
C++	<i>C Plus Plus</i>
CPU	<i>Central Process Unit</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i>
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONSV	Observatório Nacional de Segurança Viária
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative</i>
PROM	<i>Programmable Read-Only Memory</i>
RAM	<i>Random-Access Memory</i>
ROM	<i>Read-Only Memory</i>
ROS	<i>Robot Operating System</i>
RPC	<i>Remote Procedure Call</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
BMW	<i>Bayerische Motoren Werke</i>
ESP-NOW	Protocolo de comunicação do ESP32
HC-SR04	Modelo do sensor de ultrassom
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
BOPE	Batalhão de Operações Especiais
LED	<i>Light emitter diode</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
HMC5883L	Modelo do Magnetômetro
BIG	Nome da rede do hipermercado
NEO-6-MV2	Modelo do GPS

PMPR	Polícia Militar do Paraná
UV	Ultravioleta
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$(x,y)$	Posição do referencial fixo no robô em relação ao referencial $xy$
$\theta$	Ângulo de orientação do robô em relação ao plano $xy$ , em função do tempo $t$
$b$	Comprimento do eixo
$r$	Raio de giro do robô
$r_D / r_E$	Raio da roda direita / esquerda
$\omega$	Velocidade angular do robô em função do tempo $t$
$\omega_D / \omega_E$	Velocidade angular da roda direita / esquerda em função do tempo $t$
$v$	Velocidade linear do robô em função do tempo $t$
$v_D / v_E$	Velocidade linear da roda direita / esquerda em função do tempo $t$
$d$	Distância percorrida
$t$	Tempo decorrido
$c$	Velocidade da luz no vácuo (aproximadamente 299,792,458 metros por segundo)
$\theta(t)$	Erro associado total
$\epsilon$	Erro <i>bias</i>
$d(t)$	Erro de posição associado
$u(t)$	Sinal de controle no domínio do tempo
$e(t)$	Erro associado ao domínio do tempo
$K_p$	Constante da componente proporcional
$K_i$	Constante da componente integral
$K_d$	Constante da componente derivativa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Tema .....</b>	<b>15</b>
1.1.1	Delimitação do tema .....	18
<b>1.2</b>	<b>Problemas e premissas .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>20</b>
1.3.1	Objetivos gerais .....	20
1.3.2	Objetivos específicos .....	21
<b>1.4</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>ESTRUTURA DO PROJETO .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Descrição do projeto .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Diagrama de partes .....</b>	<b>23</b>
2.3.1	Locomoção .....	25
2.3.2	Alimentação .....	25
2.3.3	Sistema de sensoriamento e sinalização .....	26
2.3.4	Sistema de processamento .....	26
2.3.4.1	Unidades de processamento .....	27
<b>2.4</b>	<b>Diagrama elétrico de montagem .....</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DO PROJETO .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Cinemática .....</b>	<b>30</b>
3.1.1	Arranjo e sistema motor .....	34
<b>3.2</b>	<b>Sensores .....</b>	<b>34</b>
3.2.1	Sensores de distância .....	36
3.2.1.1	Sensor ultrassônico .....	37
3.2.2	Magnetômetro .....	39
3.2.3	Sensor GPS .....	40
<b>3.3</b>	<b>Montagem .....</b>	<b>43</b>
<b>3.4</b>	<b>Microcontroladores .....</b>	<b>45</b>
3.4.1	Software .....	47
3.4.1.1	Aplicativo .....	47
3.4.2	Processamento .....	52
<b>3.5</b>	<b>Localização e planejamento de rotas .....</b>	<b>56</b>
3.5.1	Navegação .....	57

<b>3.6</b>	<b>Fundamentos de controle.....</b>	<b>59</b>
3.6.1	Controlador PID.....	60
3.6.2	Características de erro de um sensor MEMS.....	61
3.6.2.1	Erro constante bias.....	62
3.6.2.2	Erro de ruído branco.....	62
3.6.2.3	Erros de efeito de temperatura.....	63
3.6.2.4	Erros de calibração.....	63
3.6.2.5	Fator de escala.....	63
<b>3.7</b>	<b>Desafios e limitações.....</b>	<b>64</b>
3.7.1	Desafios e limitações de hardware.....	64
3.7.2	Desafios e limitações de software.....	71
<b>4</b>	<b>TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>73</b>
<b>4.1</b>	<b>Planejamento de testes.....</b>	<b>73</b>
<b>4.2</b>	<b>Testes de integração e montagem.....</b>	<b>75</b>
<b>4.3</b>	<b>Condições para a execução dos testes de campo.....</b>	<b>76</b>
4.3.1	Testes de campo.....	77
<b>4.4</b>	<b>Resultados obtidos.....</b>	<b>79</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES PRELIMINARES E PRÓXIMOS PASSOS.....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>
	<b>ANEXO A – REGRAS ROBÔ TREKKING (ROBOCORE).....</b>	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Esta sessão inicial tem como principal objetivo dispor acerca dos principais tópicos presentes nesta monografia, com a intenção de facilitar o entendimento desse trabalho de conclusão de curso, e destacar a importância dos temas abordados. Na sequência são apresentadas temáticas pertinentes à motivação para o desenvolvimento de veículos autônomos e a fundamentação teórica que a sustenta.

### 1.1 Tema

A “automatização é sinônimo de revolução” (LIMA, 2003, p. 1) e progresso. Num processo que vem desde os primórdios dos tempos, o homem procura uma forma de facilitar seu trabalho por meio do processo de automatização de tarefas, tornando-as mais rápidas e seguras, portanto, dentro deste contexto a mecanização dos meios de produção vem ganhando força a cada dia (LIMA, 2003).

Talvez, o que seja o primeiro passo dado em direção a automatização, foi feito a partir da criação de um relógio d’água desenvolvido em meados do século II a.C. (LIMA, 2003), mas o que realmente impulsionou esta mecanização de processos foi a revolução industrial, gerando uma evolução que se estende até os dias atuais, com ferramentas muito mais sofisticadas a mão. Por meio das tecnologias agregadas a estes processos de transformação, como, por exemplo, a *internet* e sensoriamento, notou-se uma série de benefícios à sociedade em praticamente todos os seguimentos, possibilitada pela utilização de sistemas eletrônicos inteligentes, acarretando inovações desde simples portas e portões ativados por sensores de presença, até complexas linhas de montagem e produção em setores industriais, em especial, o tema de interesse deste trabalho, a mobilidade urbana inteligente.

Com o intuito de promover maior compreensão no que se refere ao tema de interesse deste trabalho, devemos analisar os significados do termo “automação” e seu grau de utilização, no que concerne à de mobilidade e automação veicular. De acordo com divisão criada pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), ou em português, Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade, — órgão mundial composto por engenheiros, cientistas e profissionais de diversas áreas, visando desenvolver estudos ligados à setor automobilístico (SAE, [s.d.]) — existem seis níveis de

automatização veicular, descritos abaixo com base nas definições propostas por um órgão dentro Departamento de Transporte Americano, o NHTSA (*National Highway Traffic Safety Administration*):

- Nível 0 → **Sem automatização**: Nesta circunstância o motorista é incumbido por todas as tarefas relacionadas à direção;
- Nível 1 → **Assistência ao motorista**: Veículos desta categoria estão aptos à auxiliar o motorista no desempenho de suas funções, como a presença do câmbio automático, controle de velocidade ou frenagem e assistência de permanência na faixa (ALVES, 2018). É importante ressaltar que o veículo desta categoria ainda não está preparado para executar tarefas, como, controle de velocidade e frenagem, simultaneamente;
- Nível 2 → **Automatização parcial**: Automóveis desta categoria possuem ao menos dois sistemas de assistência ao motorista funcionando paralelamente. Os modelos mais comuns encontrados no mercado podem contar com controle de velocidade e direção, controle de velocidade e frenagem e frenagem de emergência (SUMMIT MOBILIDADE URBANA, 2019). Este nível de automação permite é o mais avançado no mercado atualmente, permitindo que o veículo assuma a direção por poucos segundos em situações pré-determinadas e extremamente restritas, cabe ao motorista intervir quando necessário e executar as demais tarefas da direção;
- Nível 3 → **Automatização condicional**: Nesta categoria o veículo preparado para assumir o controle total da direção, em condições específicas e, ainda, muito limitadas, desde que o condutor esteja presente para intervir quando necessário. Um automóvel desta classe foi lançado este ano (março de 2021) pela fabricante *Honda*, no Japão, modelo da categoria sedã, chamado de *Legend*, terá autonomia na direção apenas em locais de grande congestionamento e de tráfego lento, caso a situação se altere, o veículo solicitará que o motorista assuma o controle da direção imediatamente (ASIA, 2021);
- Nível 4 → **Alta automatização**: Este nível de automação veicular ainda não está disponível no mercado, permite que o veículo assuma total controle da direção em condições muito mais flexíveis que a anterior, exceto situações que incluam áreas não mapeadas, ambientes e climas com características

adversas (ALVES, 2018). Esta categoria ainda exige a presença do condutor, para assumir o controle quando necessário, porém este não precisa prestar atenção no ambiente a todo momento;

- **Nível 5** → **Automatização total**: No nível mais alto de automação, o automóvel consegue assumir total controle da direção, em qualquer situação. Neste cenário, mesmo que ainda distante, dispensa a necessidade de um condutor, até mesmo a presença de pedais e volante (ALVES, 2018). Projetos dessa natureza estão sendo desenvolvidos por empresas como a *Tesla*, *Google* e *BMW*, com expectativa de resultados comerciáveis em 2030 (BORGES, 2020);

A sociedade vem encontrando na automação veicular a alternativa ideal para um trânsito mais seguro. Apenas em 2020, uma pessoa faleceu a cada 15 minutos em decorrência de um acidente de trânsito, totalizando cerca de 30 mil mortes ao longo do ano (SARAGIOTTO, 2020). Além da perda humana, o estudo realizado pelo IPEA analisando as 479.857 mortes ocorridas entre 2007 e 2018, concluiu que os acidentes rodoviários custaram R\$ 1.567 trilhão aos cofres públicos, em média R\$ 132 milhões ao ano (FERREIRA, 2020). Um dos dados que mais chamam atenção vem do diretor-presidente da ONSV (Observatório Nacional de Segurança Viária), José Aurélio Ramalho, em entrevista à revista Quatro Rodas.

Um estudo da Organização Mundial da Saúde (OMS) aponta que praticamente 90% dos acidentes são causados por fator humano. Se você analisar, 100% deles são. Mesmo naqueles em que a rodovia tem falhas de sinalização ou de pavimentação, que correspondem a 5%, cada motorista, vendo essa situação, tem de reduzir a velocidade e se adequar às condições que a via oferece a fim de preservar sua integridade. Os outros 5%, relacionados ao carro, são responsabilidade do motorista. Cabe a ele manter o veículo em ordem. No recall, é o motorista que deve buscar a montadora — e sabemos que a busca por esses reparos no Brasil é baixa. Tudo remete ao fator humano (RUFFO, 2018).

Este cenário não é só encontrado no Brasil, mas em vários centros ao redor do mundo. Diante disso, o NHTSA, incentiva maior grau de automatização em veículos terrestres a fim de promover mais segurança nas estradas.

A evolução contínua da tecnologia automotiva visa oferecer benefícios de segurança ainda maiores e sistemas de direção automatizados (ADS) que — um dia — podem lidar com toda a tarefa de dirigir quando não queremos ou não podemos fazer nós mesmos. Carros e caminhões totalmente automatizados que nos conduzem, em vez de nós os dirigirmos, se tornarão uma realidade. Em última análise, esses veículos autônomos se integrarão às rodovias dos Estados Unidos, progredindo através de seis níveis de avanços na tecnologia de assistência ao motorista nos próximos anos (NHTSA, [s.d.], tradução própria).

Os benefícios para tal mecanização são extensos, diminuindo a ação do condutor na direção, podemos minimizar drasticamente os acidentes causados por falha humana, número de mortos e feridos, gastos provocados pela violência do trânsito, congestionamentos e até mesmo, reduzir o consumo de combustível, e emissão de gases poluentes, para, enfim melhorar aspectos de mobilidade urbana, como para serviços de entrega, transporte de pessoas portadoras de deficiência, entre outros (NHTSA, [s.d.]).

#### 1.1.1 Delimitação do tema

Quando levamos em consideração todos os aspectos relacionados à produção e utilização de veículos autônomos, devemos considerar a constante evolução deste modelo de negócio, que vem ganhando espaço no mercado global.

Entre os elementos que compõem o complexo montante de partes referentes ao projeto destas estruturas, veículos autônomos, o sistema de maior importância é o de navegação. Sendo assim, aqui é estabelecido a delimitação central do tema a que se refere esta obra. Resumindo-se a capacidade de um veículo se locomover em um ambiente (KLASER, 2014), os sistemas de navegação de um automóvel terrestre autônomo, se valendo de sistemas inteligentes, deve ser capaz não somente de traçar rotas, mas também realizar controle de velocidade e trajetória, desviando de obstáculos estáticos, além de promover segurança ao veículo e usuário ao lidar com problemas de perda de localização. Nesta conjuntura, foi desenvolvido — ao longo dos trabalhos de conclusão de curso 1 e 2 — um sistema de navegação para o robô da categoria *Trekking Pro*, seguindo as regras estabelecidas com base nos moldes da competição gerida pela *RoboCore* – organização responsável pela promoção de eventos de robótica.

O sistema mencionado anteriormente a um autômato é o que permitirá que este seja capaz de interagir com o ambiente (ROMERO et al., 2017), para um robô de características *outdoor*, esta interação é feita por meio da locomoção. Para isto, foi necessário projetar um sistema de navegação, para que o veículo tenha a capacidade de se localizar, e, no nosso caso, encontrar os objetivos demarcados pela prova, percorrer a trajetória calculada, desviando de obstáculos quando necessário.

Todo o processo de implementação do sistema a ser desenvolvido será feito através da combinação de sensores de GPS, magnetômetro, ultrassom, microcontroladores e ferramentas de *softwares*, que serão discutidas na sequência.

## 1.2 Problemas e premissas

Quando leva-se em consideração o grau de complexidade e os riscos envolvidos no processo de condução e locomoção de veículos, sejam eles aquáticos, aéreos ou terrestres, identificamos a necessidade de elevar os níveis e protocolos de segurança de utilização, de modo a reduzir os índices de acidentes gerados em sua grande maioria por falha humana. A alternativa de maior viabilidade para solucionar esse tipo de ocorrência encontra-se no processo de automatização total ou parcial dos sistemas de condução, através da utilização da robótica móvel.

A robótica móvel ocupa-se de estudar e desenvolver máquinas capazes de se locomover, em geral, em ambientes não controlados, ruidosos e desconhecidos. Para atender a estes objetivos, a multidisciplinaridade faz-se necessária. Mecânica fina, elétrica/eletrônica e computação são integradas para dar suporte a esta nova e importante área (PAZOS, 2002).

Partindo dessa primeira visão e motivados a desenvolver um projeto de pesquisa, que possibilitasse a aplicação dos conhecimentos conquistados ao longo da graduação e, também, diante da oportunidade de contribuir para o desenvolvimento de sistemas de navegação veiculares em geral, tomamos como objetivo central dedicar esta monografia ao projeto e implementação de um robô da categoria *Trekking Pro*.

Definindo em linhas gerais, as principais partes que compõem o desenvolvimento de um veículo autônomo da categoria *Trekking Pro* são: manipulador (partes integrantes da estrutura mecânica móvel da aplicação, definidas por seus

graus de liberdade), sensores (componentes do sistema responsável pela obtenção de dados relativos ao ambiente), atuadores (grupo de dispositivos responsáveis por interagir com o ambiente, através do processo de conversão de energia elétrica em mecânica), controladores (partes responsáveis pela tomada de decisão, o núcleo de processamento do robô).

Avaliando os autos referidos no descritivo da competição, regras e objetivos específicos, a implementação deste veículo terrestre, dispõem de um sistema de mapeamento do ambiente de prova, capaz de definir a rota até o objetivo, identificar e desviar de obstáculos estáticos, conseguir locomover-se em terreno irregular numa região de forma e área conhecidas e resistir a condições climáticas diversas, independentemente das interferências e intempéries que o cercam. Portanto, em decorrência dos fatores citados anteriormente, fica sugestivo supor a existência de muitos desafios inerentes ao desenvolvimento do projeto, no entanto ainda serão necessárias algumas ressalvas para se chegar em uma análise mais assertiva.

### **1.3 Objetivos**

O processo de desenvolvimento de uma aplicação depende veementemente da escolha dos objetivos gerais e específicos a serem atingidos. Ainda como parte integrante do processo devemos considerar a existência de uma metodologia responsável por assegurar a correta execução dos requisitos, para que se possa atender os objetivos centrais do projeto.

#### **1.3.1 Objetivos gerais**

Os objetivos gerais deste projeto de pesquisa, resume-se em desenvolver e implementar os sistemas de navegação, controle e processamento de dados de um robô na categoria *Trekking Pro*, com o auxílio de análises computacionais, através da utilização de *frameworks de software*.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos que compõem a estrutura deste projeto, podemos mencionar:

- Projetar os sistemas de navegação do veículo;
- Realizar a implementação do sistema em um veículo real, pertencente a categoria *Trekking Pro*;
- Num cenário após implementação do sistema veicular, promover a realização de testes em campo para aprimorá-lo;

## 1.4 Justificativa

Quando consideramos o desenvolvimento de um veículo autônomo, um dos maiores problemas existentes encontra-se na tarefa de prever os inúmeros acontecimentos que podem ocorrer durante a realização da prova. A partir disso é necessário conceber corretamente o sistema de tomada de decisão, a fim de assegurar a execução dos objetivos preestabelecidos. Para os casos em que existam uma ou mais circunstâncias não tratadas, podem existir erros que impliquem no mal funcionamento da estrutura como um todo.

Através do desenvolvimento de um veículo autônomo da categoria *Trekking Pro*, foram incorporados ao projeto diversos dos conhecimentos inerentes ao processo de graduação nas áreas de engenharia elétrica e eletrônica, para que fosse possível projetar e manufaturar um robô capaz de realizar o percurso delimitado pela competição, independentemente de ação humana, ou seja, apto a determinar os pontos de destino, dirigir-se até eles, desviar de obstáculos e percorrer terreno irregular, independente das interferências existentes ao seu redor. Desta forma, desenvolvemos – ao longo dos Trabalhos de Conclusão de Curso 1 e 2 — um sistema de navegação e possível aplicação para o robô da categoria, seguindo as regras estabelecidas, presentes no anexo 1, com base nos moldes de competição organizada pela *RoboCore*.

## 2 ESTRUTURA DO PROJETO

Este capítulo tem como principal objetivo dispor acerca dos tópicos abordados ao longo das próximas seções desta monografia, com a intenção de facilitar o entendimento da estruturação desse trabalho de conclusão de curso. Na sequência serão apresentadas temáticas pertinentes à cada uma das áreas de interesse envolvidas, bem como a sustentação teórica necessária para sua compreensão.

### 2.1 Introdução

De modo a entender um pouco mais sobre a causa motivadora desta pesquisa, deve-se considerar que o desenvolvimento de veículos autônomos é uma tendência real de mercado e uma realidade em nosso meio. Partindo dessa necessidade atual, seguem os pontos essenciais para a elaboração deste trabalho.

O processo de desenvolvimento criativo deste projeto possui como premissa a elaboração de um robô pertencente a uma categoria específica, portanto é fundamental fazer a leitura e a correta compreensão das regras estabelecidas pela *RoboCore* – principal patrocinadora e sediadora de eventos de robótica no Brasil – disponíveis no anexo 1.

Motivados pela vontade de competir na categoria e, após a realização de uma leitura cuidadosa das diretrizes estabelecidas pelo corpo técnico, iniciou-se o diagrama de partes. Por meio deste, é possível compreender o funcionamento geral da estrutura, avaliando principalmente aspectos relacionados ao funcionamento dos sistemas interligados do veículo. Outro benefício associado à utilização do diagrama é a divisão do projeto em grandes áreas de interesse, como, por exemplo, potência, navegação e controle, que facilitam a explicação dos conceitos relacionados à aplicação.

Considerando os aspectos a que se refere o escopo de desenvolvimento deste projeto, produção de um veículo autônomo da categoria *Trekking Pro* é fundamental compreender os principais pontos relacionados no processo criativo deste trabalho. Para isto expomos tais detalhes nas seções a seguir.

## 2.2 Descrição do projeto

Antes de aprofundar em cada uma das grandes áreas de conhecimento necessárias para explicar o processo criativo, deve-se compreender um pouco mais a respeito das motivações que levaram à escolha desta aplicação.

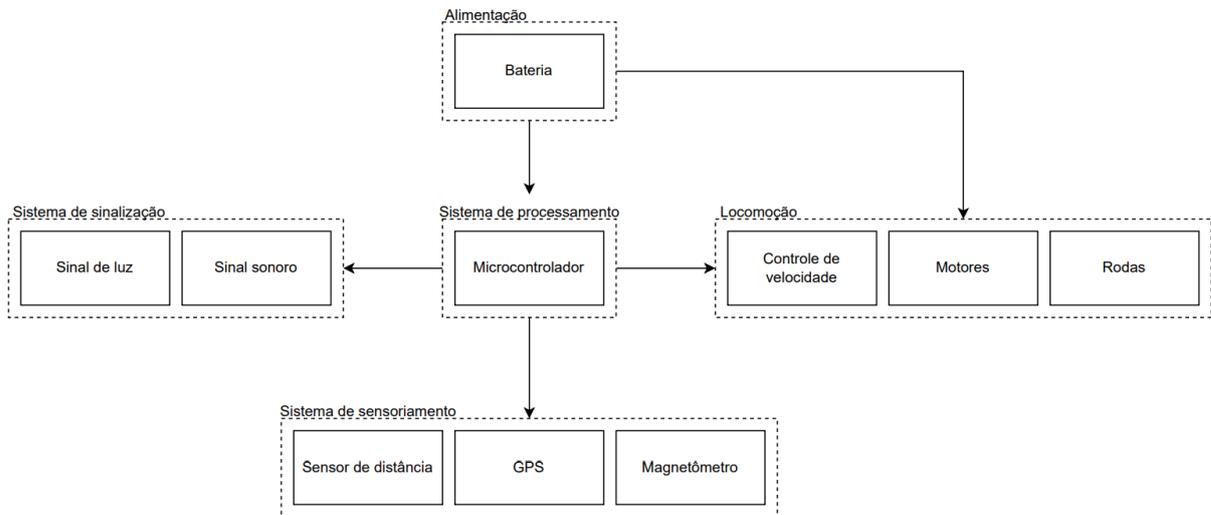
A utilização de mão de obra para a realização de atividades mecânicas de alto risco, e/ou, repetitivas está se tornando ultrapassado. Nesse contexto, tópicos relacionados à automatização de processos ganharam força nos últimos anos, chegando a compor parte da nossa realidade, como, por exemplo, em setores produtivos e de transporte (JÚNIOR; CHAGAS; FERNANDES, 2003). Nessa linha, fica relativamente fácil imaginar a crescente de mercado relacionada à produção de tecnologias independentes que reduzam a taxa de exposição humana a riscos, de qualquer natureza.

Partindo deste princípio, é interessante desenvolver um projeto relacionado a esse tipo de aplicação, uma vez que também possibilita a utilização do montante de conhecimento adquirido durante o processo de formação de um engenheiro.

Dentro deste contexto, surge a oportunidade de desenvolvimento de um projeto que consiste no desenvolvimento do sistema de navegação de um veículo autônomo, de uma categoria específica, e para tanto é imprescindível elencar as áreas de pesquisa pertinentes a este trabalho.

## 2.3 Diagrama de partes

A figura 1 apresenta o diagrama em partes do projeto. O robô autônomo desenvolvido é composto pelas seguintes partes: alimentação, locomoção e sistemas de processamento, sensoriamento e sinalização. A utilização desta abordagem produz uma visão ampla da aplicação e de todos os pontos que compõem o projeto, esse diagrama relaciona as estruturas do *Trekking* em sua totalidade.

**Figura 1 - Diagrama de partes**

**Fonte: Autoria própria**

Considerando as regras e requisitos de desenvolvimento de veículos autônomos para esta categoria, pode-se dividir o projeto em áreas específicas, como, por exemplo, sinalização, locomoção, sensoramento, processamento e potência. Como visto pelas características de competição, o robô deverá se deslocar até seu objetivo, de forma autônoma, desviando de obstáculos quando necessário.

Por meio da aplicação do diagrama de partes pode-se inferir algumas observações quanto às áreas de interesse. A primeira delas diz respeito aos sistemas de alimentação, responsável pelo funcionamento dos microcontroladores, motores, sensores, entre outros.

Outra esfera incumbida pelo funcionamento do conjunto reside nos sistemas de sensoramento do veículo, a estes componentes é atribuída a tarefa de captar as variáveis de ambiente e estado, e transmiti-las em uma forma que seja passível de interpretação pelo sistema de processamento, que no que lhe concerne será responsável pela tomada de decisão do robô.

A partir da coleta de informações realizadas anteriormente, o autômato está apto a se deslocar e interagir com os elementos presentes no ambiente de prova, por meio dos sistemas relacionados à parte de locomoção.

Por fim, como especificado no regulamento presente no anexo A, o robô deve possuir um sistema de sinalização, responsável por atuar ao atingir o objetivo deferido, bem como o término da prova.

Nas subseções a seguir, os itens abordados anteriormente são explorados detalhadamente, para se poder fornecer melhor entendimento acerca dos tópicos relacionados.

### 2.3.1 Locomoção

A locomoção refere-se à maneira como o corpo se desloca pelo espaço (MATARIC, 2014). Para esta aplicação, é fundamental que o autômato se locomova por diferentes tipos de terrenos.

Neste projeto, utiliza-se um sistema diferencial de 2 rodas atuantes e 1 roda livre, sendo esse sistema movido por um eixo onde o controle de movimento é feito por meio da diferença de velocidade nos atuadores (OLIVEIRA; FABRO, [s.d.]).

Por sua vez, para que a movimentação seja possível, o robô deve possuir mecanismos de atuação de locomoção, (ROMERO et al., 2017). Baseado nas características de deslocamento sobre rodas, o tipo de atuador presente no projeto é um motor de corrente contínua, também chamado de motor CC.

O motor CC permite giros nos dois sentidos, além de controle de velocidade, feito através de um *hardware* externo – denominado ponte-h – que por sua vez será conectado a um dos microcontroladores.

### 2.3.2 Alimentação

Para a grande maioria das aplicações em robótica móvel, é necessária a utilização de fontes de alimentação baseadas em bateria.

Descrito como um dispositivo que “converte energia química contida em seus materiais ativos diretamente em energia elétrica” (LINDEN; REDDY, 2002, p. 13, tradução nossa), a bateria será capaz, por meio de uma reação eletroquímica de redução de oxidação, de fornecer a energia necessária para alimentar os sistemas integrados de dispositivos móveis compreendidos no robô.

### 2.3.3 Sistema de sensoriamento e sinalização

O sistema de sensoriamento é incumbido de executar uma das tarefas mais importantes de qualquer sistema autônomo, adquirir conhecimento em relação ao ambiente ao seu redor (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004).

Esta informação é adquirida por um processo de medições periódicas, de modo a extrair informações importantes – como velocidade, distância e posição geográfica – para proporcionar melhor entendimento em relação ao ambiente em que o robô está inserido (ROMERO et al., 2017).

Com o intuito de desempenhar a tarefa proposta, foram utilizados os sensores abaixo para elaborar a odometria e o sistema de navegação do robô. Desta forma estaremos aptos a localizar, planejar rotas e se deslocar no espaço.

- Sensor de GPS para precisar sua localização geográfica;
- Magnetômetro com o objetivo de obter a orientação do veículo;
- Sensor de distância/obstáculos com o intuito de detectar eventuais obstáculos à frente e determinar a posição exata dos objetivos.

Com a combinação dos dados desses sensores, teremos o sistema de percepção do robô. Além da necessidade de se localizar no espaço, o veículo também deve sinalizar ao juiz de prova quando atingir um objetivo, e, também quando chegar ao término do circuito.

Esta tarefa está atribuída ao sistema de sinalização, que contará, como exige o regulamento, com um sinal luminoso ou sonoro para desempenhar tal feito.

### 2.3.4 Sistema de processamento

A navegação autônoma de veículos decorre da constante necessidade de tratamento de cada situação, permitindo que o veículo navegue em segurança, até alcançar uma ou mais posições pré-estabelecidas no ambiente. O desenvolvimento de sistemas autônomos torna-se mais complexo à medida que o modelo do mundo cresce. Para a interação de um robô em ambientes reais, o sistema deve ser capaz de contornar situações imprevistas e adaptar-se às mudanças (KERSCHBAUMER, [s.d.]).

Para que o veículo realize suas tarefas é necessário um sistema de processamento que o coordene, sendo os microcontroladores os responsáveis por essa tarefa. Isso é feito por meio da avaliação de dados obtidos a partir da leitura feita por sensores, baseando-se nas informações coletadas, é possível manter atualizada a sua posição no espaço, buscando a melhor forma de conduzi-lo ao próximo destino.

Ao passo que a rota é calculada e recalculada conforme a atualização de parâmetros, a movimentação em linha reta ou curva é realizada pelo controle de velocidade de rotação dos motores conectados às rodas.

#### 2.3.4.1 Unidades de processamento

Identificado como o *hardware* de processamento do projeto, o microcontrolador é um conjunto de “circuitos integrados que possuem em seu interior todos os componentes necessários ao seu funcionamento dependendo unicamente da fonte de alimentação externa” (KERSCHBAUMER, [s.d.], p. 10).

Esse equipamento é muito utilizado por sua versatilidade, visto que seu comportamento depende principalmente do tipo de aplicação que irá desempenhar, assim, pode ser utilizado para múltiplas atividades, bastando apenas mudar seu *software*. Outra vantagem é a possibilidade de atualização de um produto através da alteração do programa computacional, sendo que o mesmo comportamento não é possível para circuitos analógicos ou digitais tradicionais.

Esse equipamento é, portanto, o *hardware* que interliga o processamento de todos os sistemas centrais e periféricos do autômato (PENIDO; TRINDADE, 2013).

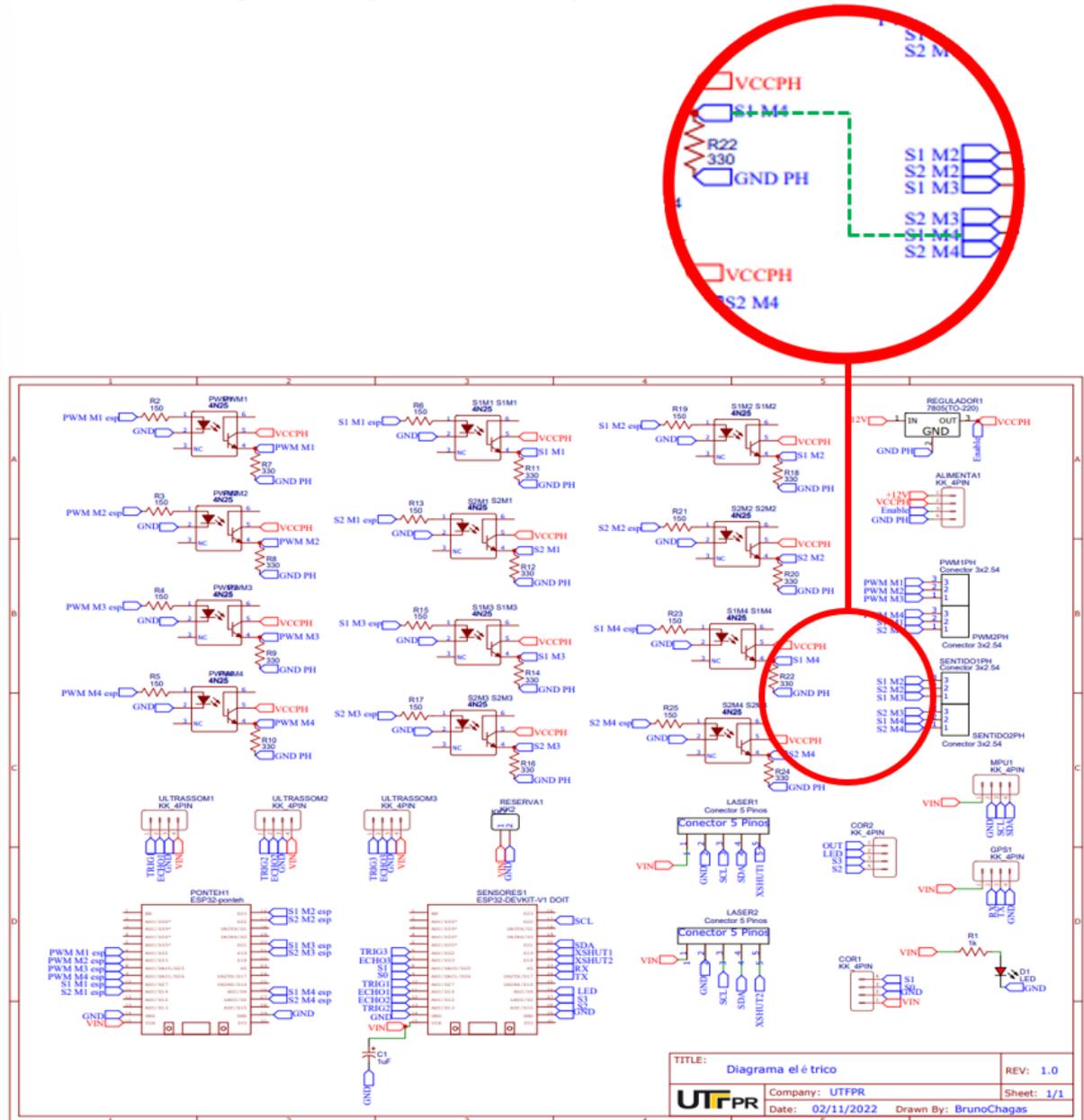
## 2.4 Diagrama elétrico de montagem

O desenvolvimento de diagramas elétricos que relacionam as partes envolvidas dentro de uma estrutura, possibilitam, não somente a conexão elétrica efetiva dos componentes, como também facilitam a observação e o entendimento do conjunto.

Tratando em linhas gerais, existem alguns pontos a respeito da montagem realizada que devem ser explorados. O diagrama da figura 2, desenvolvido com o software *EasyEDA* conta com a capacidade para inserção de vários dos sensores que

foram considerados ao longo do desenvolvimento deste trabalho e com a disponibilidade para a operação com até quatro motores.

Figura 2 - Diagrama elétrico da placa de circuito impresso

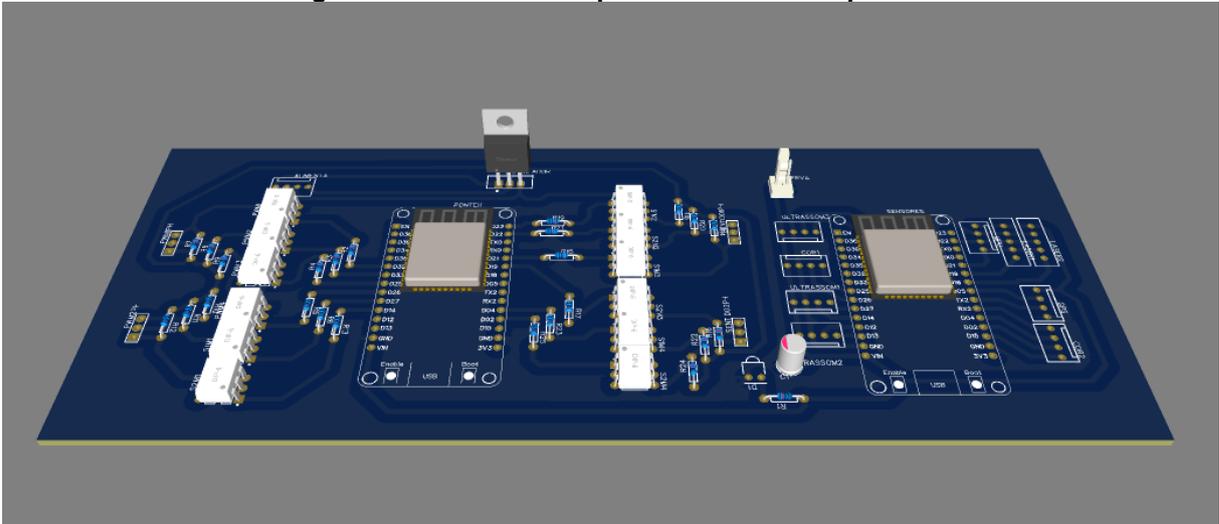


Fonte: Autoria própria

O diagrama elétrico apresentado na figura 2 pode ser melhor compreendido observando a expansão da área dentro do círculo vermelho. O circuito elétrico se dá pela conexão entre cada terminal com mesma nomenclatura. No exemplo da região aumentada, os terminais chamados de “S1 M4” foram conectados através da linha verde tracejada. Para que seja obtido o correto funcionamento da placa, todas as conexões devem ser realizadas, sendo que nenhuma trilha pode se cruzar.

A justificativa para a elaboração da placa, nesta configuração, foi a obtenção da melhor distribuição espacial dos componentes, organizar as conexões e a inclusão de conectores extras, possibilitando a utilização de diferentes trilhas em caso de falha. Outro fator determinante para a realização desse desenvolvimento é o auxílio para a realização de testes ao longo do processo, pela praticidade oferecida ao conectar e desconectar periféricos, conforme pode ser visto na figura 3 que apresenta a modelagem 3D da placa. Concomitantemente, a placa permite que sejam isolados os circuitos lógicos do circuito de potência, ao passo que optoacopladores foram incluídos, impedindo interferência entre essas partes do sistema, apontamento esse tratado adiante nesse trabalho.

**Figura 3 - Modelo 3D da placa de circuito impresso**



**Fonte: Autoria própria**

Considerando-se o escopo da representação gráfica e diagramação da estrutura elétrica do projeto, como parte fundamental para o entendimento completo do sistema, foram discutidos ao longo das próximas seções, as formas de ligação e quais os componentes utilizados na composição final da estrutura.

### 3 DESCRIÇÃO DO PROJETO

Os elementos a que se referem às etapas de projeto e desenvolvimento, dos sistemas de navegação e demais unidades do *Trekking*, como por exemplo, microcontroladores, sensores, alimentação e outros sistemas serão discutidos, cuidadosamente, ao longo das próximas seções. Vale lembrar que ao longo de cada capítulo serão descritas as regiões de interesse do projeto.

#### 3.1 Cinemática

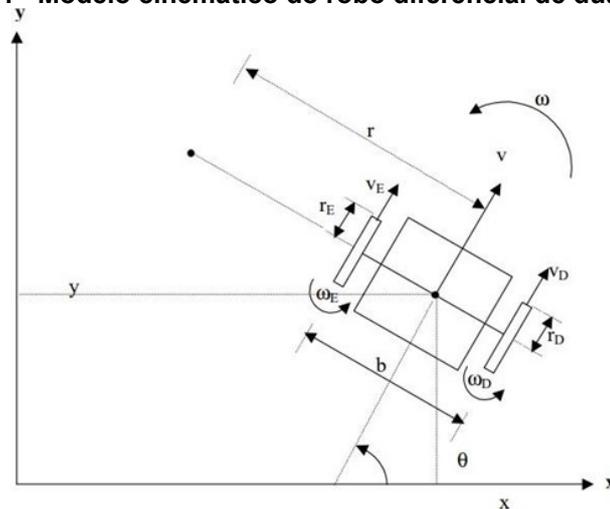
A cinemática é um estudo de como os sistemas mecânicos se comportam, observando o movimento dos corpos e como as forças agem sobre ele.

Na robótica móvel, precisamos entender o comportamento mecânico do robô para projetar robôs móveis apropriados para as tarefas e entender como criar um *software* de controle para cada tipo de hardware de robô móvel (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004, p. 47, tradução nossa).

Portanto antes de compreender como o autômato se desloca em dado espaço, é preciso entender a contribuição e restrições que cada roda impõe ao movimento (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004).

Para efeito de cálculo, iremos considerar o modelo cinemático de um robô não-holonômico, ou diferencial, de duas rodas, conforme mostrado na figura 4.

Figura 4 - Modelo cinemático do robô diferencial de duas rodas

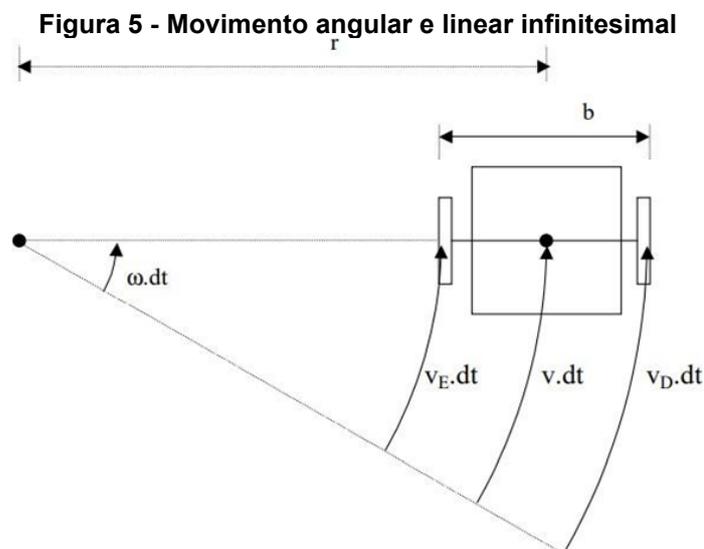


Fonte: ALSINA (2011, p. 1)

Para proporcionar melhor entendimento quanto aos cálculos feitos posteriormente, abaixo se encontra a descrição das variáveis utilizadas, de acordo com ALSINA (2011, p.2):

$(x,y)$	Posição do referencial fixo no robô em relação ao referencial $xy$ ;
$\theta$	Ângulo de orientação do robô em relação ao plano $xy$ , em função do tempo $t$ ;
$b$	Comprimento do eixo;
$r$	Raio de giro do robô;
$r_D / r_E$	Raio da roda direita / esquerda;
$\omega$	Velocidade angular do robô em função do tempo $t$ ;
$\omega_D / \omega_E$	Velocidade angular da roda direita / esquerda em função do tempo $t$ ;
$v$	Velocidade linear do robô em função do tempo $t$ ;
$v_D / v_E$	Velocidade linear da roda direita / esquerda em função do tempo $t$ ;

Veículos deste modelo são caracterizados por rodas de orientação fixa, com um eixo de liberdade, portanto seu controle de velocidade é feito por meio da diferença de velocidade de seus atuadores (OLIVEIRA; FABRO, [s.d.]), cujo modelo de movimentação pode ser visto na figura 5.



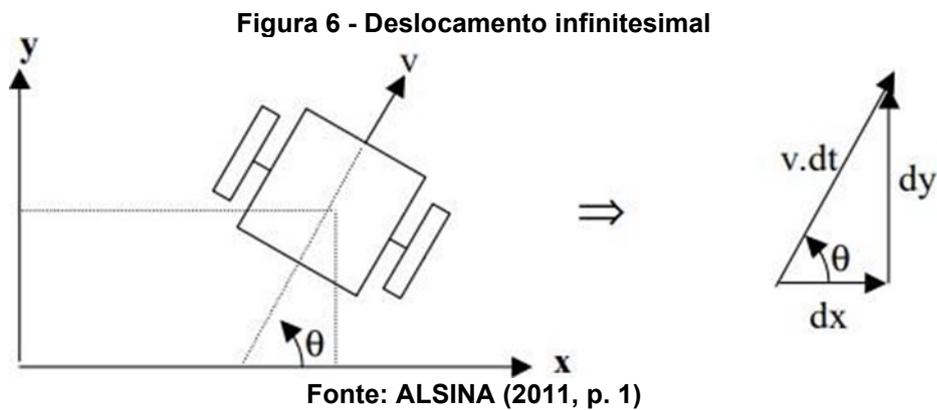
Fonte: ALSINA (2011, p. 1)

Para as velocidades lineares e angulares infinitesimais, expressas na figura 5, temos que as equações que descrevem movimento do autômato são:

$$\begin{cases} v_D \cdot dt = \omega \cdot \left(r + \frac{b}{2}\right) \cdot dt \\ v_E \cdot dt = \omega \cdot \left(r + \frac{b}{2}\right) \cdot dt \end{cases} \quad (01)$$

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_D}{2} & \frac{r_E}{2} \\ \frac{r_D}{2} & \frac{r_E}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_D \\ \omega_E \end{bmatrix} \quad (02)$$

Agora, tendo em mente que a direção do movimento é determinada pelo ângulo  $\theta$ , podemos determinar, com auxílio da figura 6, as equações que descrevem o movimento do robô.



Portanto as equações que descrevem o deslocamento infinitesimal do robô são:

$$dx = v \cdot dt \cdot \cos(\theta) \quad (03)$$

$$dy = v \cdot dt \cdot \sin(\theta) \quad (04)$$

$$d\theta = \omega \cdot dt \quad (05)$$

Logo podemos simplificar para:

$$\frac{dx}{dt} = v \cdot \cos(\theta) \quad (06)$$

$$\frac{dy}{dt} = v \cdot \text{sen}(\theta) \quad (07)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (08)$$

Combinando as equações mostradas acima podemos determinar o modelo cinemático do robô, mas antes é preciso fazer algumas considerações:

$$\dot{x} = v(t) \cdot \cos \theta(t) \quad (09)$$

$$\dot{y} = v(t) \cdot \text{sen} \theta(t) \quad (10)$$

$$\dot{\theta} = \omega(t) \quad (11)$$

Por fim, o modelo cinemático de um robô diferencial de duas rodas será:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \text{sen} \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (12)$$

Com as análises feitas acima podemos concluir que o “robô pode mover-se apenas na direção normal ao eixo das rodas motrizes” (MACHARET, 2021, p. 5), portanto as rodas impõem a restrições da equação (13) ao movimento do autômato.

$$\dot{x} \cdot \text{sen} \theta - \dot{y} \cdot \cos \theta = 0 \quad (13)$$

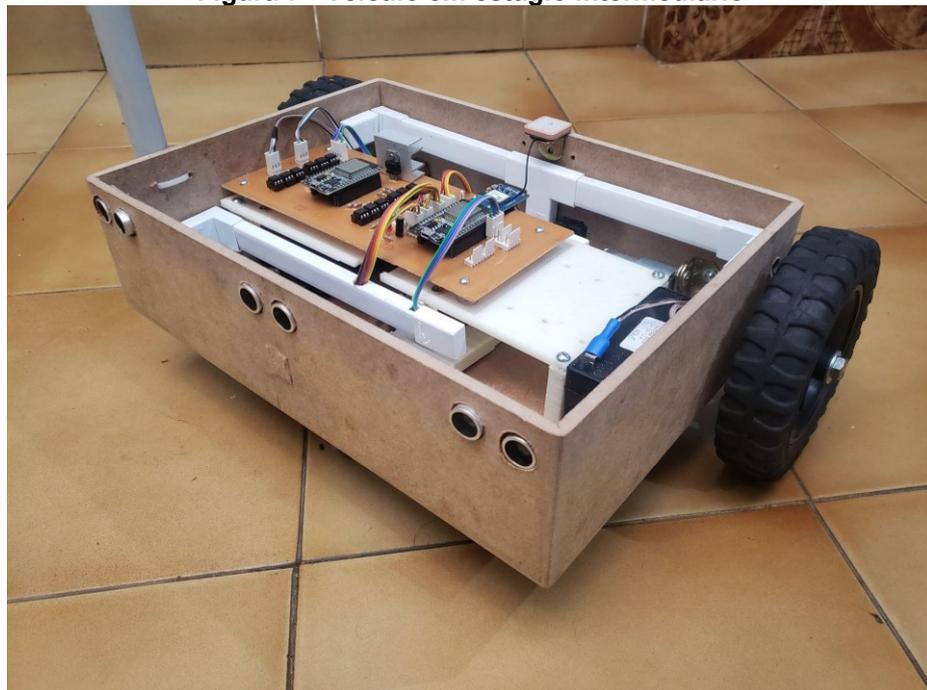
Como dito anteriormente, pela cinemática ser o estudo do movimento dos corpos, ela será de fundamental para a análise de deslocamento do robô, portanto irá influenciar as decisões relacionadas à escolha de motores, rodas e até mesmo na elaboração dos algoritmos ligados à navegação.

### 3.1.1 Arranjo e sistema motor

Essencialmente, existem diversas configurações possíveis para os arranjos de sistemas de locomoção de veículos terrestres, como por exemplo, sistemas diferenciais de duas ou quatro rodas, pernas e até mesmo sistemas híbridos. Alguns destes possuem maior complexidade de planejamento e execução do que outros, que em contrapartida são capazes de executar ações específicas.

Nesta aplicação, a opção de maior viabilidade foi a utilização de um sistema diferencial de duas rodas, como visto anteriormente. O motivo para escolha surgiu em função da avaliação das características do ambiente de prova e das dificuldades obtidas no processo de montagem. A escolha desta configuração facilitou, consideravelmente, a montagem da estrutura e na contenção de custos do projeto, conforme ilustra a figura 7.

**Figura 7 - Veículo em estágio intermediário**



**Fonte: Autoria própria**

## 3.2 Sensores

Sensores são dispositivos que, ao funcionarem em conjunto, formam o sistema perceptivo do robô, possibilitando o autômato extrair informações sobre si

mesmo e o ambiente que o cerca (ROMERO et al., 2017). Para que esse processo se torne possível, o dispositivo precisa receber um sinal de energia – como na forma de som ou luz – e transformá-lo em um sinal de natureza analógica ou digital passível de ser interpretado por um sistema de processamento (ROMERO et al., 2017).

Conforme a função exercida por cada sensor, podemos categorizá-los em dispositivos proprioceptivos e exteroceptivos, tal como também podem ser divididos em sensores ativos ou passivos, a depender de como sua leitura é feita.

Os dispositivos proprioceptivos são aqueles que têm como característica realizar medidas internas do sistema, como velocidade dos motores e nível de tensão na bateria (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004), para que o robô seja capaz de possuir informações acerca de si. Já os sensores exteroceptivos, de maneira oposta, tem como propriedade a leitura de grandezas externas ao autômato, como a intensidade de luz e som, com o intuito de se obter dados no que se refere ao ambiente ao seu redor (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004).

Agora no que se concerne a forma em que as informações são coletadas, distingue-se o sensor passivo como o que “realiza medidas a partir das informações externas disponíveis no ambiente” (ROMERO et al., 2017, p. 13), como, por exemplo, as medições de temperatura. Em contrapartida, os dispositivos ativos precisam fornecer energia - na forma de sinal ou estímulo - ao meio em torno do robô, para que a interação desse sinal com o ambiente possa ser mensurada (MATARIC, 2014). Sensores dessa natureza demandam um emissor e um detector, tais como sensor ultrassom e a laser.

Além das características mencionadas anteriormente, há outros atributos que compõem o funcionamento dos sensores, conforme expresso por Romero (2017), são elas:

- Campo de visão ou alcance: Diz respeito a região coberta pelo sensor, o primeiro é expresso em graus enquanto o segundo é em metros;
- Acurácia e repetibilidade: Este refere-se à confiabilidade do dispositivo, quantas vezes o sensor repetirá a mesma leitura para as mesmas condições de medição;
- Resolução: Este atributo corresponde ao menor valor lido ou diferença detectada entre dois valores lidos pelo sensor;
- Resposta no ambiente alvo: Condições propícias para se ter funcionamento

adequado do dispositivo;

- Consumo de energia;
- Confiabilidade do hardware: Refere-se ao nível de tensão necessária para garantir leituras satisfatórias;
- Frequência de Varredura: Dada em hertz, este atributo expressa a quantidade de leituras que o sensor consegue fazer por segundo;

Todas as propriedades apresentadas acima, particulares de cada modelo de sensor, são determinantes para garantir desempenho satisfatório do sistema de percepção, por consequência, do robô em si. Desse modo é de fundamental importância compreender o papel de cada dispositivo necessário para executar a tarefa apresentada, que decorrerá da explicação feita nas próximas seções deste trabalho.

### 3.2.1 Sensores de distância

Os sensores utilizados na “detecção de presença e estimativa da distância de obstáculos são muito importantes para a navegação, tendo um papel fundamental no desvio dos obstáculos e na detecção de marcos do ambiente usados para a localização” (ROMERO et al., 2017, p. 21).

Os sensores de alcance ativo continuam a ser os sensores mais populares na robótica móvel. Muitos modelos têm um preço baixo e, o mais importante, todos fornecem resultados facilmente interpretados: medições diretas da distância do robô aos objetos em sua vizinhança. Para detecção e prevenção de obstáculos, portanto a maioria dos robôs móveis dependem fortemente destes dispositivos (GROVES, 2013, p. 104, tradução nossa).

Muito além da detecção de obstáculos, portanto medições de distância, sensores desta natureza são de grande importância do mapeamento, fornecendo referências úteis à auto localização do autômato (GROVES, 2013).

Dispositivos deste gênero tem como base de funcionamento a relação entre tempo e velocidade de propagação de uma onda, seja ela, como veremos mais a seguir, composta por ondas de ultrassom ou de luz.

Sabendo que a distância percorrida por uma onda pode ser determinada pela multiplicação da sua velocidade de propagação pelo seu tempo de voo, utilizando-se

da propriedade de reflexão, é possível determinar a distância  $d$  presente entre um dado objeto e o emissor do sinal.

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (14)$$

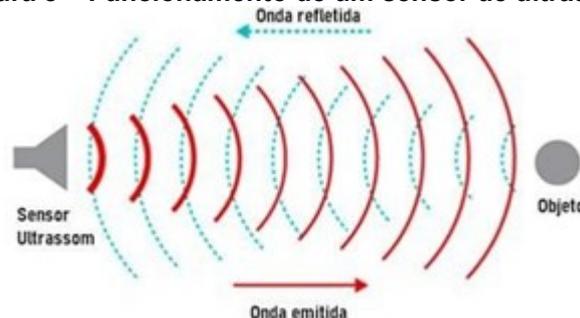
Portanto um sensor empregado para indicar a distância presente entre si e um objeto necessita conter um emissor e um receptor de sinal, o primeiro irá emitir sinais de onda numa determinada frequência, a partir do intervalo de tempo entre esta onda refletir no objeto e voltar para o receptor, por meio da equação 14, é possível determinar a distância existente entre este objeto e o sensor.

Para efeito desta monografia, nas seções a seguir foram discutidas as particularidades existentes em sensores que fazem uso de ondas ultrassom.

### 3.2.1.1 Sensor ultrassônico

O sensor de ultrassom tem propósito semelhante à ecolocalização, tática que morcegos usam para manobrar sem colidir com obstáculos (TOA; WHITEHEAD, 2019). Como o próprio nome indica, esse dispositivo utiliza ondas sônicas, na faixa de 20 kHz a 40 kHz, gerado por uma membrana magneto-resistiva, para medir a distância até um determinado objeto (ROSIQUE et al., 2019). Tal funcionamento é ilustrado na figura 8.

**Figura 8 – Funcionamento de um sensor de ultrassom**



**Fonte: Adaptado de TOA e WHITEHEAD (2019, p. 2)**

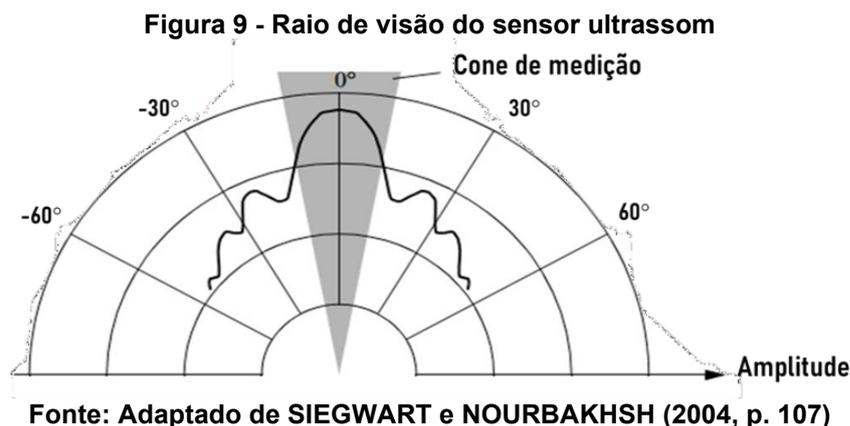
A onda de ultrassom pode ser refletida por materiais como “metal, plástico, vidro, madeira, pedras, areia, óleo e água” (TOA; WHITEHEAD, 2019, p. 2, tradução

nossa) e se propaga pelo ambiente em forma de cone, como é mostrado na figura 9, com um raio de abertura que varia de 20° a 40° (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004).

Porém a detecção deste sensor só é bem-sucedida quando há reflexões perpendiculares, em materiais acusticamente reflexivos (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004), ou seja, quando a onda atinge uma superfície com uma dada angulação é provável que o raio emitido sofra uma reflexão difusa. Também existe a situação em que esta onda irá incidir por matérias que tendem a absorver esse sinal, como esponjas, em todo caso o receptor irá receber uma onda de ultrassom de menor intensidade, podendo causar uma leitura falha (TOA; WHITEHEAD, 2019).

Outro fator que deve ser considerado ao se utilizar o sensor ultrassom, é seu tempo de resposta.

Por exemplo, medir a distância de um objeto que está a 3 m de distância levará ao sensor 20 ms, limitando sua velocidade de operação a 50 Hz. Mas se o robô tem um anel de vinte sensores ultrassônicos, cada um disparando sequencialmente e medindo para minimizar a interferência entre os sensores, então o tempo de ciclo do anel torna-se 0,4 segundos e a frequência geral de atualização de qualquer sensor é apenas 2,5 Hz. Para um robô conduzindo movimento em velocidade moderada, evitando obstáculos usando ultrassom, esta taxa de atualização pode ter um impacto mensurável na velocidade máxima possível enquanto ainda detecta e evita obstáculos com segurança (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004, p. 108, tradução nossa).



Dadas as vantagens encontradas na utilização do sensor de ultrassom, sendo um dispositivo de fácil manipulação e baixo custo, o seu emprego no projeto final foi avaliado. Na elaboração foram consideradas três unidades ultrassônicas, modelo HC-SR04 (figura 10), com a finalidade de possibilitar a identificação de obstáculos

posicionados no meio do campo de prova e também do objetivo, caso seja utilizado o cone na realização desta.

**Figura 10 - Sensor de distância HC-SR04**



**Fonte: Adaptado de MORGAN (2014, p. 1)**

### 3.2.2 Magnetômetro

Os magnetômetros, ou também conhecidos como bússolas, são instrumentos utilizados para medir e determinar a direção de campos magnéticos, tendo como referência o campo magnético da Terra (SIEGWART; NOURBAKSH, 2004). São compostos por uma fonte de corrente, eletroímã, sensor de campo magnético e sistema de movimentação da amostra, por medir o momento magnético de uma amostragem (FÉLIX ARAÚJO, 2009).

O funcionamento básico de um magnetômetro pode ser descrito da seguinte forma: a fonte fornece corrente elétrica para as bobinas do eletroímã que geram um campo magnético na região onde se encontra a amostra. A amostra é magnetizada e por sua vez produz um campo induzido que é lido pelo sensor. Através deste campo induzido e de um modelo teórico, obtemos o momento magnético da amostra para cada valor de campo aplicado (FÉLIX ARAÚJO, 2009, p. 29).

Combinando os dados fornecidos pelo sensor de GPS, que viabiliza a orientação espacial desejada do veículo – em função da posição geográfica atual e da posição de destino – podemos combinar os dados proporcionados pelo magnetômetro para dispor da orientação de deslocamento da estrutura. Porém, sensores dessa natureza fornecem algumas desvantagens, como a presença de

interferência nas leituras devido a presença de estruturas de metal ferromagnético próximas ao dispositivo e a limitação da largura de banda (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004).

Para o sistema de navegação, o magnetômetro (figura 11) tem como função determinar a orientação atual do veículo em graus, tendo o norte geográfico como zero graus, desta forma fornecendo um ponto de referência ao robô. Em combinação com o GPS, sensor que veremos na seção a seguir, tem-se informações suficientes para formular o sistema de navegação do robô.

**Figura 11 - Magnetômetro HMC5883L**



**Fonte: Adaptado de HONEYWELL (2010)**

### 3.2.3 Sensor GPS

A autolocalização de um autômato não é uma tarefa simples, para tal é preciso determinar sua posição e orientação espacial (ROMERO et al., 2017), seja ela 2D ou 3D.

Para tanto é indispensável o uso do GPS (figura 12), um sensor caracteristicamente passivo e exteroceptivo, a fim de se fornecer a localização do objeto no espaço, por meio da triangulação de sinais de satélites (ROMERO et al., 2017). Como este sensor (figura 13) não é capaz de estimar a orientação do objeto, para termos um sistema de navegação confiável, combina-se os dados do GPS com os fornecidos pelo magnetômetro.

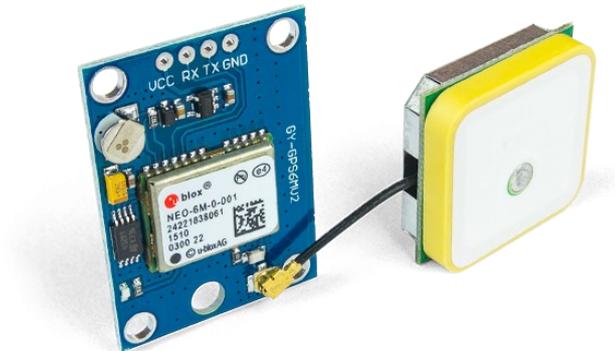
Existem pelo menos vinte e quatro satélites GPS operacionais em todos os momentos. Os satélites orbitam a cada 12 horas a uma altura de 20,190 km. Quatro satélites estão localizados em cada um dos seis planos inclinados 55 graus em relação ao plano do equador da Terra (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004, p. 104, tradução nossa).

**Figura 12 - Funcionamento GPS**



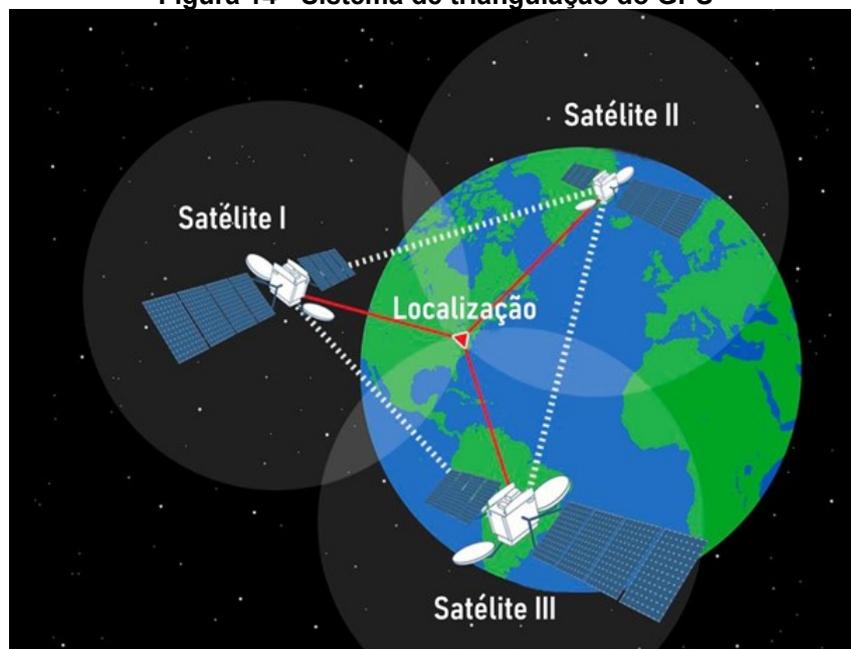
**Fonte: Adaptado de MATEMATICA.PT**

O GPS funciona por meio de um processo de triangulação (figura 14) feito por seu receptor, que combina as informações relacionadas ao tempo de chegada do sinal e localização dos satélites em órbita, para assim, poder aferir a sua própria. Apesar de três satélites serem suficientes para determinar a posição do sensor nos eixos  $x$ ,  $y$ , e  $z$ , adiciona-se a leitura de um ou mais satélites para corrigir a defasagem no tempo de chegada do sinal ao receptor do GPS.

**Figura 13 - Sensor de GPS**

Fonte: Adaptado de UBLOX NEO-6-MV2 (2011)

Com isso, o sensor de sistema de posicionamento global, irá determinar a latitude e longitude de um corpo, portanto a localização do robô, combinando os dados do GPS, com os do magnetômetro, teremos a localização e orientação do autômato.

**Figura 14 - Sistema de triangulação do GPS**

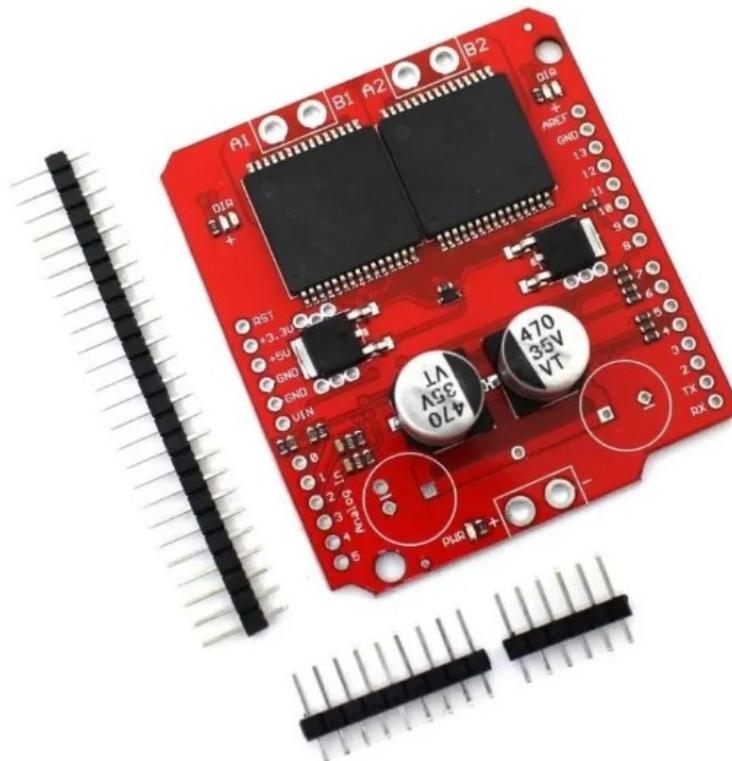
Fonte: Adaptado de GUNTHER ([s.d.])

### 3.3 Montagem

Além dos componentes descritos anteriormente, alguns outros elementos foram incorporados ao longo do processo e que, atualmente, compõem a versão definitiva da estrutura. Entre esses elementos, podemos citar, a “ponte-h”, elementos de sinalização luminosa e sonora, baterias e chassis.

Durante a etapa de planejamento foi verificada a necessidade de utilização de uma “ponte-h” (figura 15) para o controle dos motores da estrutura. Este componente tem como objetivo regular o sentido de rotação dos eixos dos motores e também fazer a entrega gradual de potência ao eixo. Estas duas funcionalidades foram fundamentais para a correta operação da estrutura e permitiram assim o desenvolvimento do veículo, seguindo os moldes impostos pelas regras da competição.

Figura 15 - Ponte-h



Fonte: Adaptado de STMICROELECTRONICS (2004)

Outro requisito de projeto previsto no regulamento oficial da competição é a existência de um ou mais sistemas de sinalização, sonora ou luminosa. Nesse sentido,

foi integrado ao projeto um sistema de sinalização luminosa, ilustrado na figura 16. Este sistema foi implementado através de um LED, anexado à carcaça do robô.

**Figura 16 - Sistema de indicação luminosa**



Fonte: Adaptado de GUNTHER ([s.d.]

O sistema de alimentação da estrutura do veículo passou por uma série de mudanças desde sua concepção inicial. Uma grande alteração veio através da decisão de separar os sistemas de alimentação, entre a parte de potência e eletrônica. A principal razão para essa separação deu-se em função do aparecimento de interferências no circuito eletrônico, geradas pelo funcionamento dos motores. Portanto, foram utilizadas duas fontes distintas de alimentação, sendo elas, uma bateria 12 V de 1,3 Ah (figura 17) para o atendimento dos motores e um *power bank* 5V de 5,0 Ah (figura 18) para os microcontroladores e demais periféricos pertencentes à eletrônica do conjunto. Paralelamente a isto foram utilizados optoacopladores, garantindo completo isolamento entre as partes do sistema.

Figura 17 - Bateria dos sistemas de potência



Fonte: Adaptado de UNIPOWER

Figura 18 - Bateria dos sistemas de processamento e sensores



Fonte: Adaptado de KNUP

O chassi de uma estrutura veicular tem como objetivo sustentar os demais elementos pertencentes ao conjunto, como por exemplo, a placa, microcontroladores, motores, sensores, baterias e demais unidades. Dessa forma, houve a necessidade de utilização de uma estrutura robusta que suportasse o peso de 4,132 kg do conjunto. Para isso, foi utilizada uma caixa de MDF (*Medium Density Fiberboard*) com as dimensões de 35 cm de comprimento, 25 cm de largura, 10 cm de altura e 6 mm de espessura, conforme observado na figura 7.

### 3.4 Microcontroladores

O termo microprocessado refere-se a um sistema composto por uma unidade central de processamento CPU e todo o conjunto de periféricos pertencentes ao conjunto da aplicação, portanto, algo indispensável ao projeto (PENIDO; TRINDADE, 2013).

O microcontrolador pode ser definido como *single-chip computer* (computador em um único *chip*), constituído por um circuito integrado que engloba elementos responsáveis pelo processamento e memória do dispositivo:

- **Registradores:** são a do funcionamento de uma CPU, sendo um grupo de elementos capazes de armazenar uma informação, e que funcionam juntos como uma unidade. Sua principal função é determinar os estados de entradas e saídas do microcontrolador (KERSCHBAUMER, [s.d.]);

- Memórias: caracteristicamente é constituído por algumas vias para gravação e/ou para leitura (podem ser as mesmas fisicamente), algumas vias para endereçamento, que seleciona qual registrador será lido/escrito, um pino que habilita ou não circuito e um pino de leitura/escrita, que habilita uma destas duas operações, dependendo do tipo de memória (KERSCHBAUMER, [s.d.]);

Mais especificamente, memória RAM é uma memória de leitura e escrita, que pode ser gravada com um determinado valor e posteriormente lida. Além disso, pode acessar qualquer registrador desejado aleatoriamente para ler ou escrever uma informação. Usualmente esse tipo de memória necessita de alimentação para manter a integridade de seus dados, portanto é classificada como volátil. Quanto à sua construção, as memórias RAM podem ser de dois tipos: estática ou dinâmica. Na memória RAM estática, os *bits* são armazenados em *flip-flop's* individuais e permanecem armazenados indefinidamente enquanto o circuito possuir alimentação. A memória RAM dinâmica armazena os *bits* através de carga em capacitores de escala muito pequena (PENIDO; TRINDADE, 2013).

Por outro lado, a memória ROM (*Read Only Memory*) é um tipo de memória no qual podemos ler, mas não escrever. Os conteúdos são fixos e inalteráveis, sendo estabelecidos normalmente na hora da fabricação. Existem circuitos de ROM que permitem que o usuário estabeleça as informações que serão armazenadas, ao invés do fabricante. Estas memórias são chamadas de memórias PROM (Memórias de leitura programáveis). Por fim existem as memórias ROM Programáveis e Apagáveis (EPROM's, EEPROMS's e FLASH), sendo possível executar um processo que limpa a memória, permitindo sua reprogramação. Nesse tipo de memória fica armazenado o *software* de funcionamento do próprio controlador (PENIDO; TRINDADE, 2013).

- Circuito de *clock*: responsável por gerar um sinal oscilatório, normalmente de onda retangular, sendo a periodicidade muito precisa e de frequência na ordem de milhares ou milhões por segundo. Com base nesse sinal são realizados inúmeros processos do controlador, além da contagem de tempo em diversos casos (KERSCHBAUMER, [s.d.]).
- Barramento: permite a transferência de sinais elétricos entre diferentes partes do microcontrolador (KERSCHBAUMER, [s.d.]).
- Portas de entrada e saída (I/O = *Input/output*): são acessadas através de pinos do circuito integrado do controlador e nas placas, possibilitando fazer ligações

de circuitos externos (KERSCHBAUMER, [s.d.]).

- Interface de comunicação assíncrona (UART): um periférico muito comum e está presente em quase todos os modelos de microcontroladores. Com esse circuito é possível a troca de mensagens entre duas CPUs interligadas através de suas respectivas interfaces seriais (KERSCHBAUMER, [s.d.]).

Por unificar e gerenciar todos os componentes mencionados, o microcontrolador é o “cérebro” do robô, realizando o processamento de dados e acionando atuadores, tomando as decisões conforme o *software* instalado. Neste trabalho, foram utilizados três microcontroladores para a operação conjunta do veículo, com o objetivo de fazer a leitura das variáveis do ambiente, realizar o processamento do sinal e tomada de decisão, e também promover o correto acionamento dos motores.

### 3.4.1 Software

*Softwares* relacionados à robótica envolvem diversas áreas de conhecimento e diferentes tecnologias, como controle e inteligência artificial (JOSEPH, 2017), “se um robô existe, suas capacidades como detecção e inteligência são possíveis por meio do uso de um *software*” (JOSEPH, 2017, p. 8, tradução nossa).

Na elaboração do projeto, foi utilizado como abordagem para a lógica de programação do veículo, um algoritmo em C++ que será explicado detalhadamente no decorrer do trabalho. Outro elemento, alheio ao *software* utilizado na automatização do robô, veio através do desenvolvimento de um aplicativo Android, responsável por criar a interface de acesso com o usuário. Este, permite não somente a calibração dos parâmetros de funcionamento do *hardware*, mas também a marcação dos pontos no ambiente de prova, entre outras funcionalidades.

#### 3.4.1.1 Aplicativo

Considerado como um dos requisitos fundamentais, inerentes a qualquer aplicação veicular semelhante, a interface de comunicação entre o dispositivo e o usuário é também uma porta de acesso muito útil no processo de desenvolvimento. A justificativa direta vem em função da praticidade e dinamismo durante utilização do

robô e das facilidades obtidas durante as etapas de testes, nas quais foi facilitada a obtenção de dados em tempo real, a regulação da estrutura e a verificação das funcionalidades desta.

A aplicação Android “Marvin” desenvolvida - nomeada dessa maneira por ser o apelido dado ao autômato - tem diversas funcionalidades e para melhor organizá-las, foram segregadas em diferentes abas.

Primeiramente há a aba “Marvin” (figura 19), sendo a tela de início, tendo como únicas funções realizar a conexão *Bluetooth* e o seu encerramento.

**Figura 19 - Aba “Marvin” do aplicativo**



**Fonte: Autoria própria**

Na sequência existe a aba “GPS” (figura 20), responsável principalmente por definir os objetivos a serem alcançados durante a prova. Para isso existem quatro possibilidades:

- Digitar as coordenadas latitude e longitude desejadas nos campos dedicados a isso.
- Pressionar sobre o mapa por 1 segundo no local desejado.

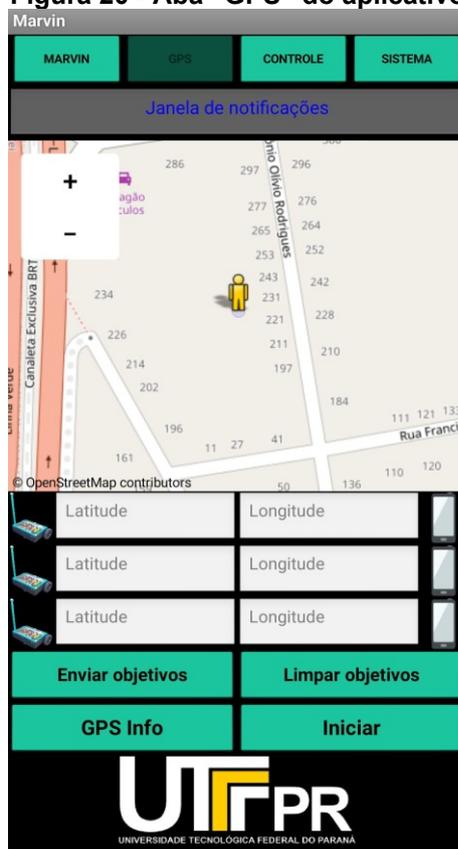
- Clicar no ícone com a imagem de um *smart phone* para definir o objetivo com as coordenadas obtidas com o GPS do celular.
- Clicar no ícone com a imagem do robô para definir o objetivo com as coordenadas obtidas com o GPS do veículo autônomo.

De maneira adicional, toda alteração realizada na definição dos destinos é apresentada graficamente no mapa. Também é possível arrastar os pontos definidos ou substituí-los.

Outras opções fornecidas nessa tela são:

- Clicar no mapa centraliza-o na localização atual do celular.
- “Janela de notificações” exibe informações para o usuário.
- O botão “Enviar objetivos” envia os objetivos escolhidos para o Autômato.
- “Limpar objetivos” remove todos os objetivos no aplicativo e no veículo.
- “GPS info” Coleta as informações do sensor de GPS do robô e exibe para o usuário;
- “Iniciar” inicia o funcionamento autônomo do veículo;

**Figura 20 - Aba “GPS” do aplicativo**



Fonte: Autoria própria

A terceira é a aba “Controle” (figura 21), tendo suas utilidades definidas por:

- “Janela de notificações” exibe informações para o usuário.
- “Frente” movimenta o robô para a frente;
- “Ré” movimenta o robô para trás;
- “Esquerda” gira o veículo em torno do próprio eixo, no sentido anti-horário;
- “Direita” gira o veículo em torno do próprio eixo, no sentido horário;
- “Parar” para o veículo;
- “Esquerda 90” gira o veículo em 90° no sentido anti-horário;
- “Direita 90” gira o veículo em 90° no sentido horário;
- “Meia volta” gira o veículo em 180°;
- “Calibrar PWM” faz a calibração dos motores;
- “Calibrar” faz a calibração da bússola;
- “Varredura” faz a verificação de funcionamento dos sensores de ultrassom;
- “Enviar” envia para o robô a velocidade selecionada;
- “Velocidade” barra de seleção do valor a ser definido para o PWM;
- “Ultrassom” liga e desliga os sensores de ultrassom;

**Figura 21 - Aba “Controle” do aplicativo**



Fonte: Autoria própria

Por fim, a aba “Sistema” (figura 22) possibilita ao usuário alterar alguns parâmetros, sendo eles:

- “Margem navegação” – Ao realizar navegação autônoma, o veículo altera sua direção apenas quando a direção desejada é diferente da direção atual, tendo como valor de tolerância essa margem em graus.
- “Margem direção” – Visando mesmo objetivo da margem de navegação, contudo utilizada para garantir a trajetória retilínea do robô.
- “Distância obstáculos” – Máxima distância em centímetros que um obstáculo deve se encontrar para ser detectado.
- “Distância varredura” – Máxima distância em centímetros que um objetivo deve se encontrar para ser detectado durante processo de varredura.
- “Distância Objetivos” – Distância entre o robô e objetivo após aproximação.
- “Confirmação varredura” – Número de vezes que haverá confirmação dos sensores de ultrassom durante a varredura para que seja considerado que um objetivo foi detectado.
- “Tempo desvio” – Durante o desvio de um obstáculo o robô deve virar e em seguida avançar para frente durante esse tempo em milissegundos.
- “Tempo avanço em X” – Durante a varredura, ao não encontrar o objetivo, o veículo passa a se deslocar e realizar novas varreduras. Esse parâmetro representa o tempo de deslocamento entre as varreduras.
- “Velocidade desvio” – Velocidade assumida pelo robô durante desvio de obstáculos.
- “Velocidade varredura” – Velocidade assumida pelo robô durante a varredura.

Além disso há a “Janela de notificações” para exibir informações para o usuário e o botão “Enviar parâmetros” que valida e envia os parâmetros definidos para o veículo.

**Figura 22 - Aba “Sistema” do aplicativo**

Parâmetros do sistema	
Margem navegação	15
Margem direção	5
Distância obstáculos	50
Distância varredura	250
Distância objetivos	30
Confirmação varredura	10
Tempo desvio	3000
Tempo avanço em X	2000
Velocidade desvio	180
Velocidade varredura	150

Fonte: Autoria própria

Objetivando maximizar a utilidade do aplicativo, procurou-se uma disposição de funcionalidades de maneira organizada, intuitiva e com muitos recursos além de apenas o necessário para a execução da competição. A estética também foi um ponto de grande preocupação durante o desenvolvimento da aplicação, buscando utilizar simetria e cores semelhantes às do robô.

Outro ponto que também deve ser mencionado é o fato de que o aplicativo ou qualquer interface gráfica não compõem nenhum dos itens necessários à execução da prova, não sendo previsto nas regras da competição, nem mesmo critérios propostos deste trabalho. Dessa forma, este entra como um bônus e agente facilitador tanto para o desenvolvimento quanto para a praticidade e dinamismo durante a utilização do robô.

### 3.4.2 Processamento

O sistema como um todo foi subdividido em duas unidades de processamento independentes, capazes de coordenar a execução das atividades em harmonia. A

primeira delas, composta por um *Esp32* (figura 23), tem como função principal a coleta de dados de todos os sensores e unidades periféricas, processamento e tomada de decisão. A segunda unidade de processamento, idêntica à anterior, é responsável pela operação do conjunto motor da estrutura.

**Figura 23 - Esp32**



**Fonte: Adaptado de ESPRESSIF (2022)**

O processo de comunicação entre as unidades foi feito por meio de um protocolo de comunicação denominado *ESP-NOW*. Este sistema realiza a comunicação entre dois ou mais destes componentes, sem a necessidade de acesso físico à estrutura, por meio de sinal *Wi-Fi*.

A rotina principal de funcionamento da estrutura tem como base um *loop* central, responsável por realizar a coleta de informações, o processamento de dados e tomada de decisão do veículo. Durante o funcionamento, o autômato é capaz de realizar a mudança de trajetória, quando necessário, de maneira completamente independente.

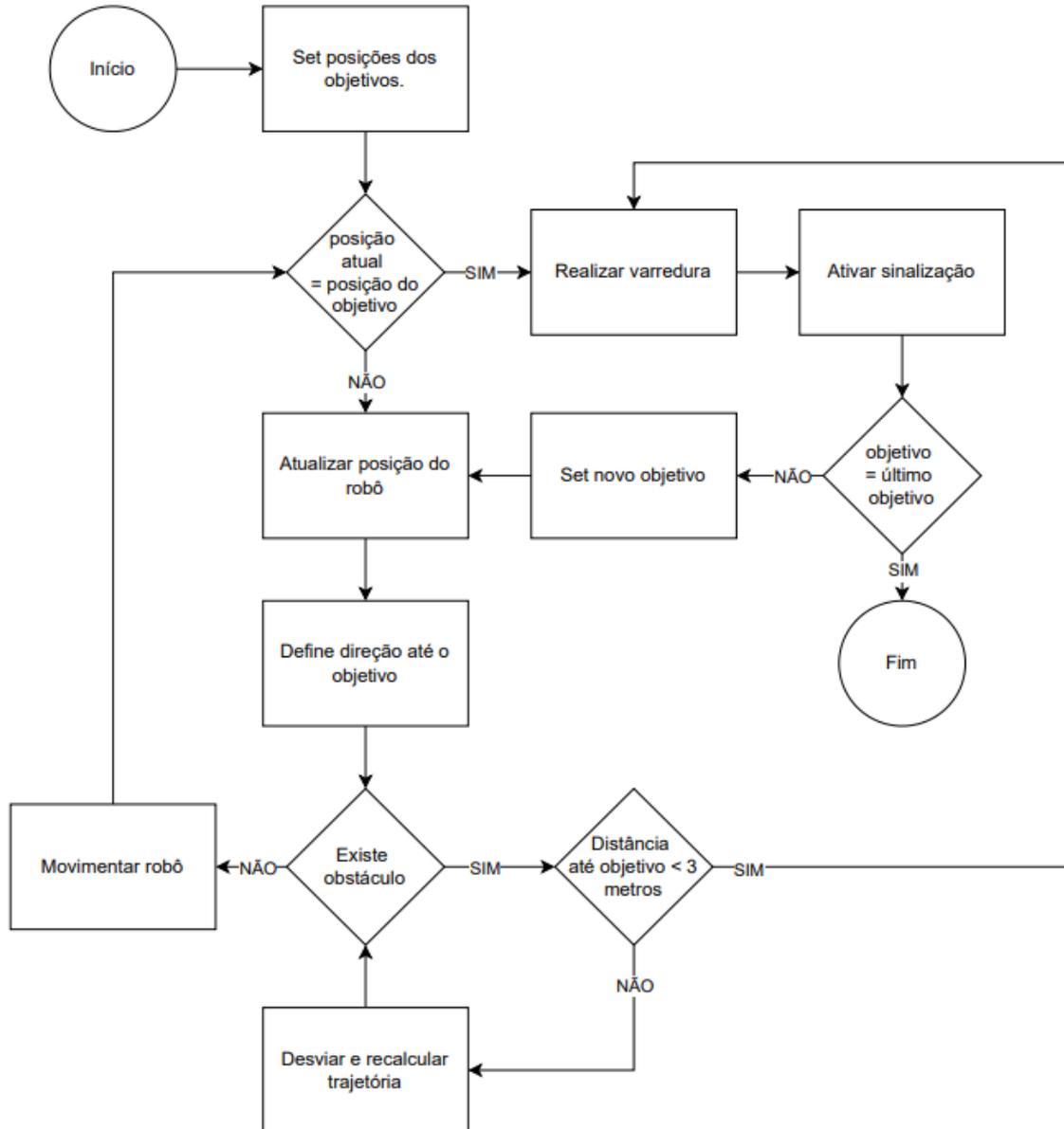
O correto funcionamento do veículo depende fundamentalmente da capacidade de coleta e processamento de informações em tempo hábil para a realização de tomada de decisão e execução das atividades, visando atingir o objetivo da prova. Para tanto, o processo de obtenção de dados dos sensores é realizado por meio da verificação da variação de tensão dos pinos designados para cada função que se deseja avaliar. Conforme visto, a estrutura conta com a presença de sensores

que atuam de maneira digital e outros de maneira analógica. Na sequência, o microcontrolador realiza o processamento do sinal (com base no *software* instalado), define as ações a serem tomadas e envia o sinal até os motores (passando pela segunda unidade de processamento), que de maneira independente, coordena a atuação dos motores.

A leitura dos sensores comumente sofre certa oscilação, gerando erro associado à sua medição, que pode ser prejudicial para o funcionamento adequado do sistema, “então, por exemplo, se você conectar um botão a um pino com uma interrupção externa ativada, você terá várias interrupções ao pressionar o botão uma única vez. Esse comportamento normalmente não é desejado” (SNIGELEN, 2015, p. 1, tradução nossa). Objetivando contornar essa situação indesejada, são empregadas técnicas de *debouncing* por *software*, de forma que o ruído seja desconsiderado, ao custo de uma maior complexidade algorítmica e um pequeno atraso de leitura que não causará redução de performance significativa para o resultado final.

Esta sequência de processamento pode ser melhor visualizada por meio do fluxograma apresentado na figura 24.

**Figura 24 - Fluxograma de processamento**



Fonte: Autoria própria

Conforme mencionado anteriormente, ao passo que a rota é calculada e recalculada, de acordo com atualização de parâmetros, a movimentação em linha reta ou curva é realizada pelo controle de velocidade e sentido de motores CC conectados às rodas embarcadas no veículo de *Trekking*, orientadas por comandos emitidos pela central de processamento.

A unidade de processamento é a parte responsável pela tomada de decisão, o que torna fundamental seu entendimento para a análise do sistema de navegação,

para isso apresentamos nas seções a seguir as características gerais da localização e planejamento de rotas.

### **3.5 Localização e planejamento de rotas**

Localizar-se trata-se de obter sua posição no espaço. Para o autômato da categoria *Trekking*, a localização faz parte dos itens necessários para o funcionamento correto, sendo preciso atualizá-la em tempo real a cada ciclo de verificação. Entretanto, obter essa informação de maneira precisa é uma tarefa tão difícil quanto é importante.

A execução desta foi realizada por meio do emprego conjunto do sensor de GPS, magnetômetro e demais unidades de medição. Essencialmente, o emprego isolado de cada um destes sensores inviabilizaria o sistema de localização do projeto, uma vez que a taxa de precisão fornecida é baixa. Dessa forma, as unidades foram colocadas em conjunto de modo que o sensor de GPS foi responsável por fornecer a posição aproximada do veículo até as imediações do ponto de interesse, o magnetômetro foi responsável por fornecer a orientação de deslocamento da estrutura e os sensores de presença por fazer a varredura nas imediações do alvo, a fim de encontrá-lo.

A ação conjunta destas unidades, dada uma elevada taxa de amostragem e um sistema de controle robusto para a atenuação de erros de percurso, foi capaz de fornecer um sistema de localização suficientemente bom para a execução da prova.

Além da localização do robô, a detecção de obstáculos também tem de ser levada em consideração, sendo ela obtida a partir de dados dos sensores de ultrassom e a localização do objetivo, obtida de acordo com a posição do veículo.

A localização é uma das informações necessárias para realizar o planejamento de rotas, sendo que dadas as posições inicial e final do robô, ele deve encontrar uma sequência de movimentos a ser executada para que saia da primeira e chegue à segunda sem colidir com obstáculos (ROMERO et al., 2017).

Uma das maiores dificuldades encontradas no problema de planejamento de rotas é que sua solução requer um tempo que cresce exponencialmente com o número de graus de liberdade (ROMERO et al., 2017, p. 84).

O robô em questão possui formato retangular no plano  $(x,y)$  e possui três graus de liberdade, sendo dois para translação e um para orientação. Dessa forma, seu espaço de configurações tem três dimensões  $(x,y,\theta)$ , e o espaço de trabalho em que ele se encontra é bidimensional.

Portanto, visando descobrir uma rota eficiente para cada destino, será preciso considerar diversas variáveis, diferentes formas de estimativa de localização, informações coletadas por sensores e erros intrínsecos a cada medida.

### 3.5.1 Navegação

Navegação pode ser marcada por pontos de latitudes e longitudes pré-definidas e que marcam um caminho a ser percorrido (LAWRENCE, 1998). A navegação é uma das competências mais desafiadoras exigidas de um robô móvel. Atingi-la requer sucesso nos quatro blocos de construção da navegação: percepção (o robô deve interpretar seus sensores para extrair dados significativos), localização (o robô deve determinar sua posição no ambiente), cognição (o robô deve decidir como agir para atingir seus objetivos) e controle de movimento (o robô deve modular suas saídas motoras para alcançar a trajetória desejada) (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004, p. 181).

São classificadas 5 formas distintas de navegação (GREWAL; WEILL; ANDREWS, 2001):

- Pilotagem: a posição e orientação atual são definidos por marcos;
- Dead Reckoning: a partir das coordenadas do local de partida, a orientação e uma estimativa de velocidade para atingir o objetivo;
- Navegação Celestial: se baseia em corpos celestiais para se localizar;
- Navegação via Rádio: por triangulação de fontes de rádio frequência com localização conhecida (navegação por GPS se dá da mesma maneira);
- Navegação Inercial: sistema que mensura o movimento linear e/ou angular pela interpretação de dados de um ou mais sensores inerciais (MORI, 2013). Sobre as informações obtidas dos sensores obtém-se a aceleração e variação angular para manter o objeto sobre o percurso predefinido. Com o uso das equações de movimento de Newton, é possível traduzir os dados em velocidade e deslocamento para definir uma trajetória até o objetivo.

Um robô móvel autônomo deve ser capaz de perceber o ambiente à sua volta, tomar decisões sobre a melhor ação a ser executada e realizá-la com o mínimo erro. Tendo como objetivo navegar de um ponto a outro do ambiente, o robô precisa detectar obstáculos próximos, evitá-los e alcançar o destino. Se o ambiente é conhecido, o problema pode ser resumido ao planejamento de uma trajetória, caso contrário, o robô reagirá às informações obtidas sensorialmente. Estas duas estratégias unidas permitem ao robô ter um conhecimento básico do ambiente e desviar-se dos obstáculos desconhecidos (MARCHI, 2001).

Cada sistema possui uma melhor maneira de realizar sua navegação, sendo essa escolha pautada por algumas variáveis do projeto em questão, como ambiente de utilização, tipos de sensores embarcados, precisão necessária, tamanho do robô, dimensões levadas em consideração (comprimento, largura e altura), valor disponível para investimento, entre outros. Optou-se então pela elaboração de um sistema de navegação baseado no funcionamento do GPS e do magnetômetro, uma vez que com a utilização de sensores de fácil obtenção e de baixo custo, com capacidade de retornar dados que permitem a rastreabilidade do veículo, sendo estes embarcados no protótipo, permitiu a montagem de uma estrutura adequada às regras da competição.

A navegação autônoma de uma estrutura traz a correlação imediata com a capacidade de processamento de dados e planejamento de rotas em tempo real do veículo, sendo esta baseada na análise de imagens coletadas pelo robô, odometria visual, ou pela obtenção de variáveis de ambiente através de outros sensores, como por exemplo, o odômetro (NISTÉR; NARODITSKY; BERGEN, 2004).

A abordagem utilizada nesse projeto para a realização da navegação é realizar leituras e análises independentes de forma consecutiva até que o objetivo seja atingido. Primeiramente, a posição do destino é conhecida e o sensor de GPS informa a posição atual do robô, porém ambas em coordenadas geográficas. Para descobrir a distância entre os pontos, subtraem-se as latitudes e longitudes. Na sequência é preciso converter os valores obtidos para a unidade “metro”, conforme as seguintes equivalências:

$$1^{\circ} \approx 1852 \text{ m}$$

$$1' \approx 30,87 \text{ m}$$

$$1'' \approx 0,51 \text{ m}$$

O triângulo retângulo destino, tem seus catetos dados pela diferença das latitudes e diferença das longitudes, e a hipotenusa representa a distância até o objetivo, podendo ser calculada utilizando o teorema de Pitágoras.

A reta entre a posição atual e o objetivo possui certa inclinação em relação à reta sul – norte da Terra, podendo ser calculada através do arco tangente da razão entre a diferença de longitudes e diferença de latitudes.

Para garantir que o veículo se direcione corretamente, o sensor magnetômetro embarcado informa o ângulo de sua direção, tendo como  $0^\circ$  a direção norte do planeta, assim como o GPS.

Dessa forma, para navegar, o autômato identifica a direção para a qual deve seguir, alinha-se paralelamente a ela e movimenta-se nessa trajetória. Esses passos são realizados uma vez a cada segundo até que a distância para atingir o destino seja de zero metros.

A navegação é um dos principais pontos tratados ao longo do trabalho, sendo abordado diversas vezes, dado o fato de que o principal objetivo do *Trekking* é fazer com que o robô atinja de maneira autônoma pontos de destino, com base em sua navegação automatizada. Portanto, fica evidente a necessidade de elaboração de um sistema robusto de navegação, que fornece grande precisão na localização e planejamento das rotas do veículo autônomo, sendo essas, partes cruciais das atividades a serem desempenhadas durante toda a prova de *Trekking*.

### **3.6 Fundamentos de controle**

Segundo definição (OGATA, 2010) a teoria de controle moderno baseia-se na análise direta do domínio do tempo em sistemas de equações diferenciais. Esta premissa possibilita a modelagem, análise e representação de sistemas reais existentes. A partir destas análises, torna-se possível avaliar os critérios de estabilidade, comportamento e condições de contorno de um sistema.

Tratando em linhas gerais fica notável a necessidade de avaliarmos alguns dos conceitos e definições básicas de controle, antes de abordarmos os sistemas de controle propriamente ditos. Entre os principais elementos que serão abordados nesta seção, podemos citar, variáveis de controle e sinal de controle, sistemas, distúrbios e controle com realimentação.

Usualmente as variáveis e sinais de controle dizem respeito a variável (objeto) de análise e a condição que já foi, ou será, modificada pelo controlador, respectivamente. Outra definição fundamental para o melhor entendimento de sistemas de controle, *sistemas*, diz respeito à combinação de componentes que agem de maneira integrada, voltado para um fim.

Um dos elementos de maior importância, tratado também em outras seções deste projeto, diz respeito aos distúrbios. Segundo (OGATA, 2010) um distúrbio é um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema. A existência desse fenômeno é parte fundamental para o aparecimento de erros durante todo o ciclo de operação. Além disso, podemos agrupar esse fenômeno em duas categorias distintas, caso o distúrbio tenha sido gerado no interior do sistema, será classificado como *interno*, caso a fonte seja de origem externa ao sistema, será classificado como *externo*. A presença deste elemento é uma das causas responsáveis diretas pela perda de referência do sistema, pelo aparecimento de erro na leitura e pelo erro acumulado do processo.

O último conceito mencionado, fundamental para o entendimento dos tópicos relacionados ao controle de sistemas, é referente ao controle com realimentação. Segundo (OGATA, 2010) controle com realimentação refere-se a uma operação que, na presença de distúrbios, tende a diminuir a diferença entre a entrada e a saída de um sistema e alguma entrada de referência e atua com base nessa diferença. Este último conceito é componente fundamental para o desenvolvimento de sistemas de controle PID, discutido nas seções a seguir.

### 3.6.1 Controlador PID

O estudo e a aplicação de sistemas de controle nos processos de análise e gerenciamento de sistemas compõem parte fundamental nos diversos segmentos da engenharia. Os exemplos mais recorrentes desses tipos de aplicação surgem quando observamos as áreas de sistemas robóticos, industriais e eletrônicos.

Considerando como uma das possíveis topologias de aplicação de sistemas de controle, podemos citar o grupo dos controladores Proporcional Integral e Derivativo (PID). Especialmente para o desenvolvimento do escopo deste trabalho, a

utilização de controladores de PID foi empregada para o estudo e análise da trajetória do robô.

Tratando em linhas gerais, existem três constantes fundamentais para a produção de controladores PID (NISE, 2008). A primeira delas diz respeito à constante da componente proporcional ( $K_p$ ), que cresce junto com o erro associado à variável de interesse. A segunda constante fundamental ( $K_i$ ) é associada ao termo integral do controlador, responsável por acumular a parcela de erro da realimentação do sistema. Por fim, a constante associada ao termo derivativo ( $K_d$ ) é a constante responsável por representar diretamente as variações bruscas do erro da realimentação do sistema.

Através do ajuste fino de cada uma dessas constantes é possível realizar o projeto e desenvolvimento de um controlador, dessa forma, podemos ainda avaliar a representação do sinal de controle a partir da equação abaixo.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

Na qual  $e(t)$  e  $u(t)$  representam o erro associado ao domínio do tempo e o sinal de controle no domínio do tempo, respectivamente.

### 3.6.2 Características de erro de um sensor MEMS

A utilização de qualquer equipamento mecânico e ou elétrico, possui como característica inerente ao seu funcionamento a presença de um erro associado ao equipamento e isso, obviamente, também se aplica ao magnetômetro. A partir de uma análise feita por (MORI, 2013) estabelece-se uma relação direta de causa e efeito, gerada entre a leitura dos dados de entrada, coletados pelo magnetômetro e a orientação do objeto no espaço. Considerando como uma das consequências diretas dos efeitos citados anteriormente (MORI, 2013) ainda identifica que os erros associados a estes afetam diretamente os resultados associados ao cálculo de posição do sistema.

### 3.6.2.1 Erro constante bias

Essencialmente, a medida do erro constante *bias* é associada a escala fundamental ou *offset* do equipamento, apresentando uma característica linear de crescimento ao longo do tempo de utilização do sistema. A maneira efetiva de observar a propagação do erro é através da interpretação direta da equação do erro associado, fornecido por:

$$\theta(t) = \epsilon \cdot t \quad (16)$$

Através dessa equação é possível avaliar o erro associado total  $\theta(t)$ , por meio da integração do erro *bias* no tempo  $t$ .

Avaliando em linhas gerais, o que efetivamente estimula a estudo e avaliação do erro total associado vem em decorrência das facilidades conferidas pelo processo. Segundo (WOODMAN, 2007) uma vez que o erro é conhecido, basta ser subtraído da saída do giroscópio, para sua compensação.

Outra possível forma de análise de erros estáticos de medição, dessa vez para o *bias* dos componentes, é obtida através do duplo processo integrativo do valor de *offset*. Este processo implica na avaliação do erro de posição, através de uma escala quadrática de tempo. A maneira efetiva de observar a propagação do erro é através da interpretação direta da equação do erro associado, fornecido por:

$$d(t) = \epsilon \cdot \frac{t^2}{2} \quad (17)$$

Através dessa equação é possível avaliar o erro de posição associado  $d(t)$ , por meio do erro *bias* integrado no tempo  $t$ .

### 3.6.2.2 Erro de ruído branco

Outro efeito muito comum associado à utilização de micro sensores de sistemas eletromecânicos embarcados, ocorre em decorrência do descompasso entre a frequência de oscilação e a de obtenção do sinal. A consequência direta do regime

de operação assíncrono existente é a aparição de um ruído branco aleatório, existente em toda a banda de operação do sistema (WOODMAN, 2007).

O processo de integração deste erro associado é responsável pelo aparecimento de um efeito denominado *Random Walk* (SANTANA; FURUKAWA, 2005). Este fenômeno gera um erro de posição na leitura do sistema, indicando a existência de deslocamento, mesmo com o veículo em repouso.

### 3.6.2.3 Erros de efeito de temperatura

A utilização de sensores mecânicos integrados fica sujeita às condições climáticas de prova e avaliação à que foram submetidas. Quando levamos em consideração as possíveis descompensações associadas a variação de temperatura, devemos atentar às alterações induzidas pelo período de medição que, caso existam, serão acrescentadas ao *bias*. Desta forma fica estabelecida a relação de causa e efeito entre a variação térmica e o erro propagado de posição do sistema ao longo do tempo (WOODMAN, 2007).

### 3.6.2.4 Erros de calibração

Os erros associados ao processo de calibração dos equipamentos, possuem em geral a causa associada aos fatores de escala e a linearidade dos componentes. Uma vez associados ao equipamento, já em estágio de operação, agregam à margem do *bias*, responsável pelo aparecimento de um erro associado a medição (WOODMAN, 2007).

### 3.6.2.5 Fator de escala

O erro relacionado a utilização indevida do fator de escala de medição, implica na propagação do erro de leitura dos sensores. Avaliando o padrão de comportamento de propagação de variações dessa natureza, fica perceptível o aparecimento de uma faixa de progressão linear, escalável, que ao longo do tempo se transforma em uma

variação sistemática, análoga ao padrão de comportamento das variáveis de estado (SANTANA; FURUKAWA, 2005).

### **3.7 Desafios e limitações**

Considerada como uma das características inerentes à execução de qualquer plano, projeto ou ideia, as dificuldades são parte integrante do processo. Através delas, enfrentamos nossos desafios e entendemos as limitações existentes.

Ao longo do desenvolvimento do projeto, inúmeras dificuldades foram encontradas e por diversas vezes os desafios e as limitações existentes quase se tornaram fator de desistência. Na sequência, são apresentadas e discutidas algumas dessas etapas, referentes a parte de *hardware* e *software*.

#### **3.7.1 Desafios e limitações de hardware**

Durante o curso de desenvolvimento do projeto diversos problemas foram enfrentados, resultando direta e indiretamente na escolha definitiva dos componentes. O primeiro grande desafio foi a criação da placa de circuito impresso. Nesta etapa, alguns cuidados devem ser considerados por conta de sua complexidade, como por exemplo, garantir a correta conexão entre os elementos e impedir o cruzamento das trilhas.

Após o projeto da placa ser concluído iniciou-se a etapa de confecção. A primeira tentativa deu-se por meio do processo de transferência térmica, mas não foi satisfatório, conforme ilustra a figura 25, devido a uma série de falhas na deposição de tinta.

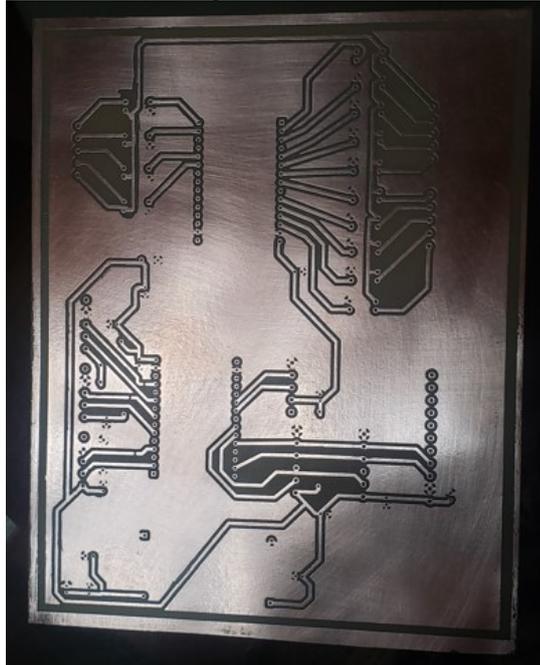
**Figura 25 - Primeira placa de circuito em desenvolvimento**



**Fonte: Autoria própria**

Visando contornar os problemas do primeiro modelo, a pintura foi corrigida utilizando uma “caneta atômica”. Na sequência foi realizado o processo de corrosão, gerando o resultado apresentado na figura 26.

**Figura 26 - Primeira placa de circuito desenvolvida**



**Fonte: Autoria própria**

Após a realização de uma análise detalhada e de alguns testes de implementação, foi constatada a incompatibilidade da placa de circuito impresso com os requisitos de projeto necessários. Dessa maneira, foi elaborada uma nova configuração.

Através do aparecimento de novas demandas, foi esquematizada uma terceira versão da placa de circuito. Nesta edição, foi utilizado um novo método de confecção, resultando numa versão definitiva do produto, conforme a figura 27. O processo de transferência foi realizado através da aplicação de uma camada uniforme de tinta reativa à luz ultravioleta e sua posterior exposição a esse tipo de iluminação.

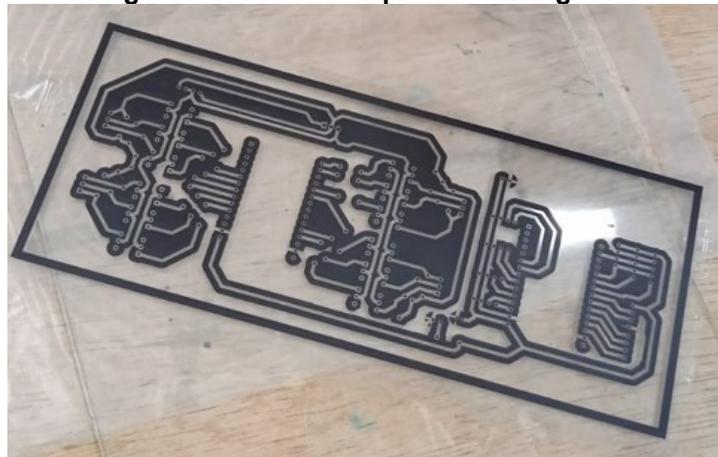
**Figura 27 - Placa de circuito pintada**



Fonte: Autoria própria

Em seguida é feita a impressão negativa do circuito desejado em plástico transparente, conforme figura 28.

**Figura 28 - Circuito impresso em negativo**



Fonte: Autoria própria

Na sequência, a impressão foi fixada sobre a placa e exposta a quantidades elevadas de luz ultravioleta, por um período 20 minutos, afim de promover a fixação da tinta sobre o anteparo. Para tanto, foi construída uma estufa com iluminação UV, conforme figura 29.

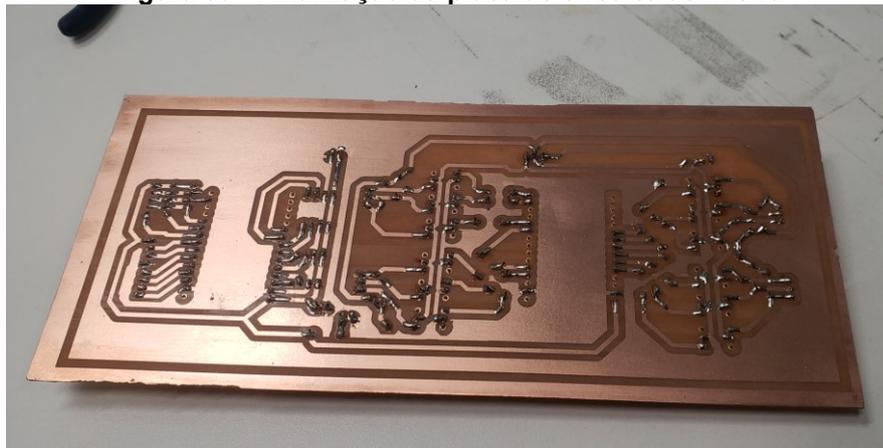
**Figura 29 - Estufa para iluminação UV**



Fonte: Autoria própria

Por fim, após a remoção da placa da estufa, foram realizados os processos de lavagem, corrosão e envernizamento, obtendo o resultado desejado. A finalização é apresentada na figura 30.

**Figura 30 - Finalização da placa de circuito definitiva**



Fonte: Autoria própria

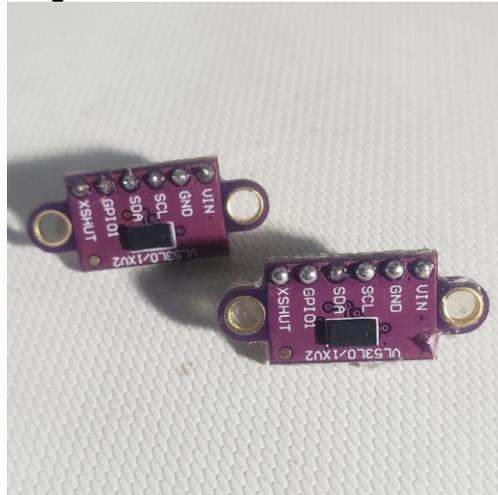
Após a obtenção do produto final, deu-se início aos testes de componentes, buscando entender como utilizá-los adequadamente, bem como seus níveis de precisão e aplicabilidade no projeto. Objetivando evitar “mau contato” nas conexões com os fios, os terminais de todos os sensores e atuadores foram soldados e a

extremidade dos condutores ligadas à placa foram montadas utilizando conectores com travas.

Ao longo dos testes durante o desenvolvimento, alguns dos componentes, como por exemplo, sensor *laser*, odômetro, acelerômetro e a própria unidade de medição inercial deixaram de figurar no projeto por motivos específicos.

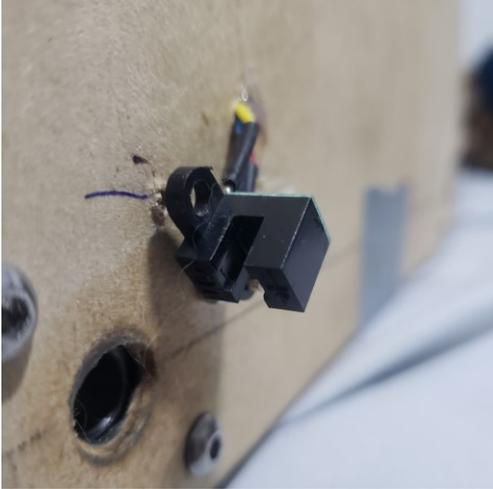
Segundo a proposta de desenvolvimento, a utilização *outdoor* do veículo configura motivo suficiente para inutilização do sensor *laser* (figura 31). A principal razão para isso é o fato de que a exposição à radiação solar reduz significativamente a precisão do sensor de distância, perdendo assim sua função.

**Figura 31 - Sensor de distância *laser***



**Fonte: Autoria própria**

Outros dois componentes que passaram por um processo de avaliação semelhante, sendo retirados da versão definitiva do projeto, foram o odômetro e o acelerômetro. Para o primeiro deles (figura 32) foram criados discos de plástico de tamanho adequado possibilitando sua utilização (figura 33). Contudo o sensor foi extraído, uma vez que nem sempre a leitura ocorre corretamente, o nível de imprecisão fornecido é elevado e o erro acumulado no processo o inviabilizou completamente.

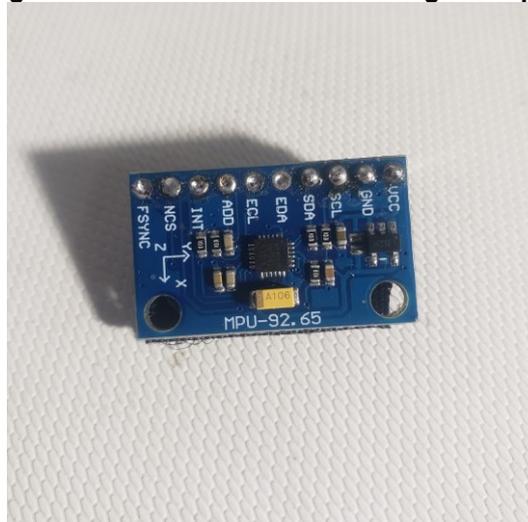
**Figura 32 - Sensor óptico de odometria**

Fonte: Autoria própria

**Figura 33 - Discos para leitura de odometria**

Fonte: Autoria própria

O acelerômetro (figura 34) por sua vez apresentou um excelente comportamento para a estimativa de pequenas distâncias, porém para estimativas maiores o nível de precisão também era muito reduzido. Ainda tratando de sensores inerciais, o giroscópio (figura 34) deixou de compor o projeto apesar de demonstrar elevada precisão, pois seu funcionamento depende de grande número de medições durante qualquer variação angular, tendo assim como o odômetro, o problema de gerar acúmulo de erros, ao passo que qualquer imprecisão na aferição é mantida, do momento de sua ocorrência em diante, somando-se com todas as demais ocorrências de erro até o fim da prova, ocasionando grande imprecisão ao sistema.

**Figura 34 - Sensor acelerômetro e giroscópio**

Fonte: Autoria própria

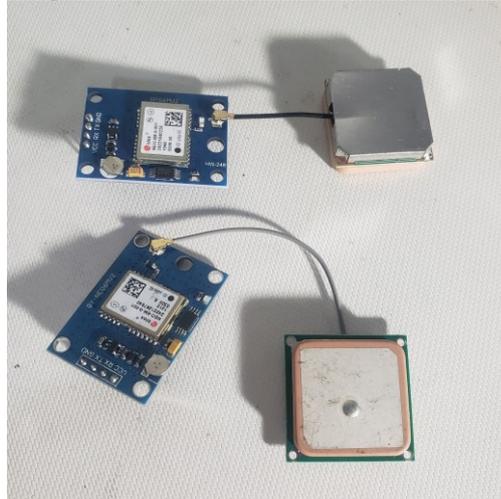
Seguindo ainda no processo de construção do veículo, outros problemas também foram identificados ao longo deste, como por exemplo, a utilização de um sistema diferencial de quatro rodas, o emprego de uma unidade de processamento central, os níveis de interferência eletromagnética sobre o magnetômetro e os problemas de conexão deste.

A utilização do sistema diferencial, em sua concepção original (quatro rodas), foi descartada, uma vez que eleva significativamente os custos e a complexidade do projeto, deixando-o mais suscetível a erros de medição e funcionamento.

O emprego de mais uma unidade de processamento, originalmente feita por um *Raspberry Pi 4 B+*, foi descartado uma vez que a demanda por processamento foi consideravelmente reduzida com o emprego da linguagem C++, em detrimento da utilização do *Robot Operating System*. Outro ponto fundamental para a remoção desta estrutura, foi o custo agregado ao equipamento.

A solução encontrada para a redução da interferência eletromagnética atuante sobre o magnetômetro foi encontrada, por meio da utilização de um suporte, na forma de antena, que afasta o sensor da estrutura metálica e motores, presente no corpo central. Esta nova configuração possibilitou o funcionamento ideal do magnetômetro e por consequência da estrutura do robô. A utilização deste sensor também apresentou problemas de conexão, gerados por interferência devido ao comprimento relativamente elevado dos fios e sua instalação vertical para cima, sendo somente corrigidos com a utilização de capacitores conectados em paralelo com os terminais do magnetômetro e pela substituição dos terminais de material ferromagnético por terminais de alumínio.

Por fim, deparamo-nos também diversas vezes com componentes comprados com algum defeito de fabricação, tendo como solução sua substituição, como foi o caso dos sensores de GPS, dos quais o primeiro comprado não funcionou, o segundo apresentou tempos superiores a dez minutos para conectar-se aos satélites em cada execução e somente no terceiro componente obtivemos os resultados desejados. Os equipamentos com defeito podem ser observados na figura 35.

**Figura 35 - Módulos GPS com defeito**

**Fonte: Autoria própria**

### 3.7.2 Desafios e limitações de software

Ao longo do desenvolvimento da estrutura algumas dificuldades relacionadas a parte de programação e aplicação de *software*, foram encontradas, incorrendo na necessidade de substituição da principal linguagem de programação utilizada.

A ideia original, fundamentava a integração da estrutura através da utilização da linguagem ROS - *Robot Operating System*, que em tese deveria simplificar o processo construtivo do robô. Os fatores impeditivos vieram em função da complexidade envolvida na etapa de programação e também pela crescente demanda por processamento, o que incorreria na necessidade de uma unidade de processamento central, elevando ainda mais os custos de projeto. Dessa forma, visando simplificar consideravelmente o conjunto, foi utilizada uma linguagem de programação mais simples e de fácil entendimento.

A linguagem escolhida, C++, possibilitou a realização da integração entre os microcontroladores, por meio de um protocolo integrado chamado *ESP-NOW*. A nova configuração possibilitou a integração da estrutura e o desenvolvimento completo de um sistema de navegação autônomo, capaz de coletar as variáveis de ambiente, realizar as etapas de processamento, tomada de decisão e planejamento de rotas, alterando-as quando necessário.

Outra dificuldade enfrentada durante a implementação do software foi a falta de praticidade e adaptabilidade do robô sobre diferentes aspectos. Primeiramente, cada local possui um campo magnético e inclinação diferentes, conseqüentemente a

calibração do magnetômetro é necessária a cada utilização. Nesse sentido, era preciso instalar no microcontrolador um programa para ler valores de *offset* nos eixos X e Y girando o veículo em torno do próprio eixo manualmente até que os valores se tornassem estáveis. Na sequência alterava-se o algoritmo original com os valores obtidos na etapa anterior e era realizado o *upload* novamente. Além disso, as coordenadas dos objetivos tinham de ser programadas no código fonte, assim como diversos parâmetros (distância para realizar varredura com o ultrassom, velocidade do robô, entre outros). Portanto para redefini-los o software era reescrito e recarregado no controlador.

A solução para esses problemas foi o desenvolvimento do aplicativo Android apresentado no tópico 3.4.1.2, que sofreu diversas alterações e melhorias ao longo do processo. Iniciou-se apenas como o conteúdo da aba “Controle” (figura 21) em preto e branco, seguindo para a inclusão das funções de definir objetivos, mas sem representação gráfica. Em seguida foi incluída a possibilidade de alterar alguns parâmetros do sistema, mas todos os botões e campos estavam em uma mesma tela que o usuário precisaria “rolar” para visualizar completamente. Por fim foi incluída a representação gráfica com o mapa, divisão de funções em abas, alteração de cores, apresentação de notificações, informações por voz e muito mais. Todas as funções e características da versão final do aplicativo, o tornam capaz de facilitar muito a execução de testes em diferentes condições, além de dinamizar muito a utilização do autômato através da interação bastante intuitiva com o usuário.

## 4 TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

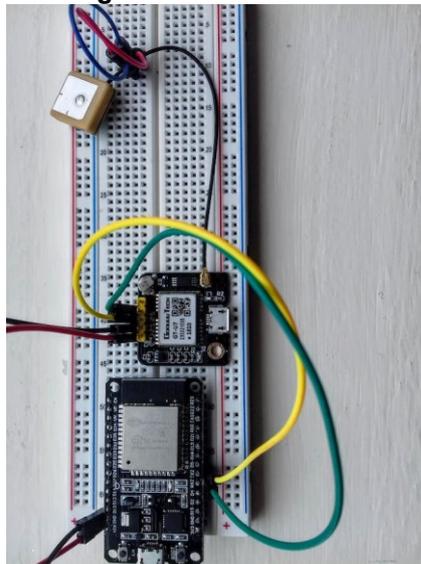
Testes servem para detectar as falhas no sistema, ou seja, as respostas do sistema que não estão de acordo com os requisitos estabelecidos anteriormente (FRAGA, 2017). Dessa forma, considera-se fundamental sua realização, durante e após o processo construtivo da estrutura. Assim como qualquer outra etapa desenvolvida anteriormente, é necessário planejamento. Na sequência, serão apresentados o planejamento dos testes, os testes de integração e montagem e as condições impostas para a execução de testes de campo.

### 4.1 Planejamento de testes

Inicialmente, um planejamento prévio foi elaborado a fim de facilitar a execução das atividades, reduzindo consideravelmente o número de tentativas de implementação e testagem. Os objetivos centrais desta etapa consistem na verificação de funcionamento físico da estrutura e também no funcionamento dos requisitos de *software*.

Na etapa inicial, foram montados individualmente, com o auxílio de uma *protoboard*, cada um dos circuitos que posteriormente foram integrados à estrutura central do robô. A montagem do circuito do módulo GPS é apresentado na figura 36.

**Figura 36 - Montagem do teste de GPS em *Protoboard***



**Fonte: Autoria própria**

Feita a montagem, o trajeto representado na figura 37 foi percorrido. Dessa forma, foi possível avaliar o desempenho individual da estrutura e também obter a garantia de funcionamento de cada uma, evitando possíveis falhas após a implementação.

**Figura 37 - Percurso realizado no teste de GPS**



**Fonte: Adaptado de GOOGLE MAPS**

Da mesma maneira, foram feitos testes para o magnetômetro utilizando uma *ProtoBoard* e um transferidor para verificar a precisão desse sensor que se demonstrou bastante adequado.

Originalmente, os sensores de ultrassom foram instalados na estrutura do veículo e testados diversas vezes, em ambientes diferentes. Os testes foram realizados com a utilização de objetos compostos de diferentes materiais e foi observado que, por se tratar de uma medição baseada na propagação e reflexão da onda sonora, objetos com maior taxa de absorção sonora, como tecidos ou espuma muitas vezes não são detectados. Utilizando materiais adequados, como cimento, madeira e alguns tipos de plástico, o sensor apresentou resultados satisfatórios para medições até 2,5 metros de distância. As posições dos sensores foram alteradas algumas vezes para se atingir leituras adequadas para a realização da prova.

Para validar o funcionamento da comunicação sem fio entre os controladores via *ESP-NOW* foi utilizada uma *ProtoBoard*, um botão e um LED, de forma que ao pressionar o botão conectado no primeiro microcontrolador, o LED conectado no segundo deveria acender. Foi percebido que nem sempre a informação era enviada.

A solução para isso foi criar uma estrutura em software para que toda informação fosse enviada e reenviada até que o *status* de envio fosse “sucesso”.

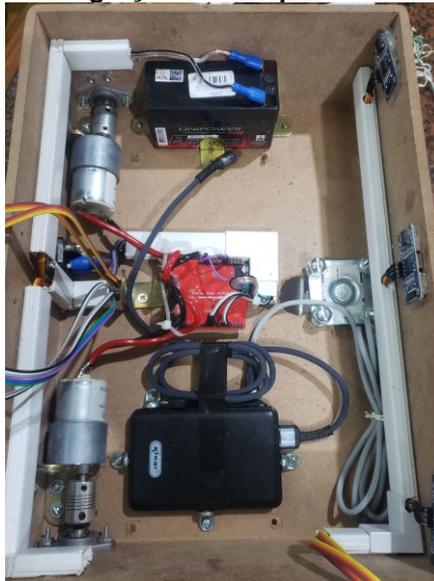
Além desses testes, muitos outros foram realizados, mas seus resultados insatisfatórios levaram à remoção de componentes do projeto e abandono de ideias. Esse tópico será melhor discutido adiante no trabalho.

Na segunda etapa, foram testados os programas utilizados para a integração da estrutura, desde a parte de leitura e coleta de dados, até a tomada de decisão do robô. Estes, foram desenvolvidos através da plataforma Arduino IDE e realizados em ambiente controlado.

## 4.2 Testes de integração e montagem

Testes relacionados a integração dos elementos de uma estrutura (figura 38), usualmente, são utilizadas para uma última verificação de funcionamento individual e também para garantir que os sistemas desenvolvidos sejam capazes de se comportar de maneira harmoniosa entre si. Dessa forma, foram realizados testes de funcionamento simultâneo dos elementos, por exemplo, a alimentação e controle dos motores através da ponte-h.

Figura 38 - Integração entre a ponte-h e os motores



Fonte: Autoria própria

A realização de testes dessa natureza, representam um maior nível de dificuldade, uma vez que envolvem o trabalho conjunto de várias das estruturas anexas ao projeto. Através da realização intermitente de testes desta natureza, vários componentes foram alterados, em virtude do mau funcionamento ou da incompatibilidade entre o objeto de análise e o restante da estrutura, resultando na estrutura apresentada na figura 39.

**Figura 39 - Integração completa da estrutura**



Fonte: Autoria própria

### **4.3 Condições para a execução dos testes de campo**

Para a realização dos testes de campo, foram feitas algumas considerações iniciais, porém fundamentais para a correta análise de desempenho da estrutura. A grande maioria dos testes foram realizados em ambiente controlado, visando avaliar exclusivamente as funções de mobilidade da estrutura. Os testes reais, simulando diretamente as condições descritas no certame da competição, foram realizados de maneira reduzida.

Entre as condições de teste, podemos citar:

- Realização da prova em ambiente aberto, preferencialmente em dias com baixa intensidade de nuvens - requisito fundamental para a melhor operação do módulo GPS;
- Limite mínimo de distância de três metros para o posicionamento de

obstáculos nas proximidades dos objetivos - fundamental para a correta identificação do alvo pelos sensores de distância;

- Ausência de chuvas de média e grande intensidade - essencial para o funcionamento, uma vez que os níveis de vedação da estrutura não são elevados;

#### 4.3.1 Testes de campo

Os testes de campo foram realizados dentro do Batalhão de Operações Especiais - BOPE/PMPR, localizado na Rodovia Deputado João Leopoldo Jacomel - Km 7,5 da PR-145, s/n - Planta Guarituba Pequena, Piraquara – PR (figuras 40) e também no pátio de estacionamento do hipermercado BIG, localizado na BR-116, 10000 - Jardim Botânico, Curitiba - PR.

Os que foram realizados em terreno pavimentado fogem originalmente da proposta inicial da realização da prova, por estar em desconformidade com o item 3.1 do Anexo A. Ignorando a obrigatoriedade de realização da prova em terreno irregular, fica evidente a margem de desempenho adquirida no asfalto, uma vez que na realização dos testes em gramado, o veículo apresentou dificuldades. Dessa forma, foram considerados os resultados obtidos no pátio do estacionamento.

**Figura 40 - Campo de teste do BOPE/PMPR**

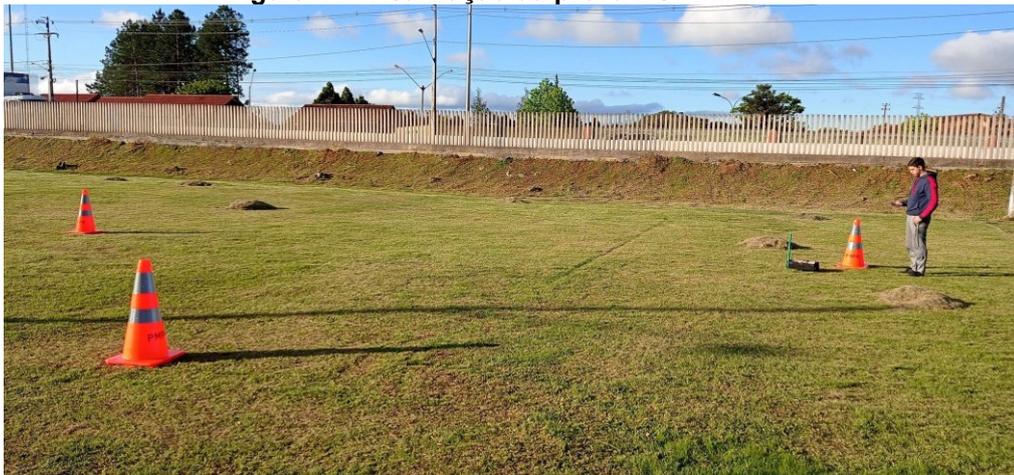


**Fonte: Autoria própria**

Para a realização dos testes em gramado, foram utilizados três cones distanciados aproximadamente 15 metros um do outro, simulando os objetivos a serem alcançados e alguns objetos aleatórios para a criação de obstáculos.

Inicialmente o autômato foi levado até cada um dos pontos de destino e através da utilização do aplicativo, foram definidas as coordenadas, utilizando o GPS integrado ao veículo. Na sequência, o veículo foi posicionado em um local aleatório do campo de prova e o comando para iniciar o percurso foi acionado. Nesta próxima etapa nenhuma interação com o usuário foi realizada e todas as ações foram executadas de maneira autônoma pela estrutura. Estes testes foram feitos respeitando as condições previstas para a execução dos testes de campo, descritas anteriormente, conforme pode ser visto na figura 41.

**Figura 41 - Realização da prova BOPE/PMPR**



**Fonte: Autoria própria**

Durante a realização dos testes de campo feitos no gramado do Batalhão de Operações Especiais – BOPE/PMPR, foram notadas algumas dificuldades operacionais. Entre estas, podemos citar o aparecimento constante de falhas de leitura no processo de varredura e o travamento do eixo do motor, geradas pela irregularidade excessiva do terreno.

Na realização dos testes em ambiente pavimentado (figura 42), foram utilizados três blocos de concreto, simulando os objetivos a serem alcançados e alguns objetos aleatórios para a criação de obstáculos. A realização das etapas de teste seguiu o padrão das provas realizadas no gramado, contudo além de testes utilizando coordenadas definidas com o GPS integrado ao robô, também houve a

realização de provas com os destinos definidos através do GPS do celular, conectado ao veículo via *bluetooth*. Estes foram realizados sem maiores dificuldades, possibilitando a avaliação de funcionamento e desempenho da estrutura.

**Figura 42 - Realização da prova no BIG**



Fonte: Autoria própria

#### **4.4 Resultados obtidos**

Após a realização de diversos testes, foram avaliados os resultados experimentais obtidos. Estes, foram bastante satisfatórios, verificando o atendimento dos objetivos, ainda dentro do limite máximo de execução da prova.

Entre os resultados obtidos ao longo de todo o processo, podemos citar:

- A construção de uma estrutura completamente funcional;
- Capacidade de leitura e identificação dos objetivos, realizado através dos sensores de presença;
- Capacidade de desviar de obstáculos;
- Capacidade de tomada de decisão e avaliação, durante a prova;
- Capacidade de locomoção em terreno irregular;
- Possibilidade de integração entre usuário e máquina, via interface;

Os testes iniciais do veículo completo, foram realizados em terreno irregular, conforme previsto no item 3.1 do Anexo A. Nestes, o veículo apresentou uma série de dificuldades. Entre elas, podemos citar, as obtidas no processo de varredura e locomoção, geradas pela presença de vegetação elevada e terreno úmido.

A caracterização de um teste bem-sucedido se dá pela navegação autônoma do veículo até o objetivo, seguido da varredura utilizando o ultrassom para detectar o ponto exato de destino, partindo para a aproximação do objetivo até atingir a distância de 30 cm, garantido que se encontra dentro da área de 1 metro quadrado (conforme regulamentação da competição) e por fim emite a sinalização luminosa no robô e sonora no aplicativo. Esse processo é repetido automaticamente até que todos os objetivos sejam alcançados, sendo que ao finalizar a prova o LED passa a acender de maneira intermitente e o aplicativo informa “Trajeto concluído”. Todo esse processo deve ocorrer em no máximo 10 minutos.

Durante a realização dos testes no gramado, foram feitas cinco tomadas de tempo, bem-sucedidas. Entre estas o melhor resultado obtido, respeitando as condições de contorno descritas anteriormente, foi de 7 minutos e 34 segundos. O veículo atingiu os objetivos conforme previsto, mesmo alheio as dificuldades.

Através da avaliação dos resultados obtidos na realização dos testes em gramado, foi observado que a melhora dos índices de desempenho de funcionamento do veículo, em terreno acidentado, depende diretamente do investimento monetário na estrutura, fator limitante à realização deste projeto. Dessa forma, também foram realizados e considerados os resultados obtidos em terreno pavimentado.

Conforme mencionado anteriormente, foram realizadas também tomadas de tempo em terreno plano. Nestas, o melhor tempo obtido foi de 2 minutos e 22 segundos. Este resultado, representa um ganho significativo de desempenho da estrutura quando colocada sob este método de avaliação de funcionamento. Dessa forma, foram priorizados os resultados obtidos nesta segunda etapa, apresentados na tabela 1.

**Tabela 1 - Tomadas de tempo asfalto**

<b>Testes de campo - Tomadas de tempo</b>	<b>Tempo</b>
Bateria 01	2 min 46 s
Bateria 02	2 min 58 s
Bateria 03	2 min 40 s
Bateria 04	2 min 22 s
Bateria 05	2 min 34 s

**Fonte: Autoria própria**

Os tempos obtidos na execução dos testes foram, em alguns dos casos, muito inferiores ao previsto para a realização da prova. Este fator, demonstra muito bem o nível de desempenho e competitividade da estrutura feita.

Além dos testes, os resultados obtidos em termos de construção do projeto, tanto da estrutura física (figuras 38 e 39) quanto do aplicativo (figuras 19 a 22) representam sucesso obtido, ao passo que é visível o planejamento, organização, qualidade de materiais e acabamento, robustez e preocupação com a estética de maneira geral. O resultado final, tratando de aspectos construtivos do veículo autônomo, é apresentado na figura 43.

**Figura 43 - Versão final da estrutura**



**Fonte: Autoria própria**

A obtenção destes resultados indica que o trabalho desenvolvido – ao longo dos Trabalhos de Conclusão de Curso 1 e 2 — foi bem-sucedido, colocando à prova os conhecimentos técnicos adquiridos ao longo do curso e possibilitando, não somente o desenvolvimento da estrutura, mas também o pessoal.

## 5 CONCLUSÕES PRELIMINARES E PRÓXIMOS PASSOS

O processo de desenvolvimento e utilização de veículos autônomos representa uma das maiores tendências de crescimento do mercado, o que nos fornece, de certa forma, uma alternativa mais segura, dinâmica e confiável de transporte.

Tratando em linhas gerais fica evidente que o objetivo último deste projeto de pesquisa incide no desenvolvimento e aplicação do sistema de navegação de um veículo autônomo, da categoria *Trekking*, a partir dos conhecimentos adquiridos no processo de graduação dos cursos de engenharia elétrica e eletrônica. Como descrito anteriormente, o veículo proposto para aplicação, deve primeiramente estar em conformidade com as regras da competição *Winter Challenge*, produzida e organizada pela *RoboCore*, e, portanto, deve ser capaz de definir e percorrer trajetórias de maneira autônoma, corrigindo quando necessário, por meio da leitura e processamento das variáveis do ambiente de prova.

Ao longo do processo construtivo diversas dificuldades foram encontradas, principalmente, nas etapas de integração das diversas estruturas existentes na aplicação. Outros dois pontos que também foram identificados ao longo do desenvolvimento, fazem menção a dimensão e aos custos envolvidos no projeto. Ambos muito elevados.

Mesmo com as dificuldades encontradas no curso da aplicação, os resultados obtidos foram de certa forma, muito satisfatórios. Na configuração atual, o veículo é composto por uma estrutura robusta, capaz de aferir, ler e identificar variáveis de ambiente, e também é capaz de realizar o processamento das variáveis coletadas, fazer o planejamento de rotas, desviar de obstáculos e deslocar-se até os pontos de interesse. Ainda dentro desse ponto, vale ressaltar que foram priorizados os testes realizados em asfalto, uma vez que, o desprendimento monetário necessário para ampliar a capacidade de operação do robô em terreno irregular, fica além do disponível pela equipe.

Considerando-se todas as etapas de desenvolvimento concluídas até o momento, um dos próximos passos a serem feitos, com o objetivo de melhorar os índices de desempenho do veículo, seria o aperfeiçoamento do sistema de localização, o que possibilitaria identificar o alvo com maior precisão e num menor espaço de tempo. Na configuração atual o veículo é capaz de identificar o alvo por

meio de uma leitura padronizada, realizada num polígono de interesse, gerado pela resolução de funcionamento do sistema de GPS associado à varredura espacial realizado por meio de sensores de ultrassom. A provável solução para isso seria por meio da implementação de sensores ópticos, o que elevaria consideravelmente o tempo necessário para a implementação e os custos financeiros envolvidos.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, V. DE. **Sensores Inerciais**. Disponível em: <http://www2.decom.ufop.br/imobilis/sensores-inerciais/>. Acesso em: 16 nov. 2021.
- ALSINA, P. J. **MODELO CINEMÁTICO DE UM ROBÔ MÓVEL**. Natal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011. Disponível em: [https://www.dca.ufrn.br/~pablo/FTP/sist\\_rob/cap02.pdf](https://www.dca.ufrn.br/~pablo/FTP/sist_rob/cap02.pdf). Acesso em: 25 nov. 2021
- ALVES, P. **Níveis de automação nos veículos**. São Paulo, Revista CESVI, 2018. Disponível em: <https://www.cesvibrasil.com.br/site.aspx/noticias-institucional/niveis-de-automacao-nos-veiculos>. Acesso em: 5 set. 2021
- AMERINI, I. et al. **Robust smartphone fingerprint by mixing device sensors features for mobile strong authentication**. IS and T International Symposium on Electronic Imaging Science and Technology, 2016.
- ASIA, N. **Honda lança primeiro carro autônomo de nível 3 do mundo**. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2021/03/05/honda-lana-primeiro-carro-autnomo-de-nvel-3-do-mundo.ghtml>. Acesso em: 20 set. 2021.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. v. 2
- BORENSTEIN, J. et al. Mobile Robot Positioning: Sensors and Techniques. **Journal of Robotic Systems**, v. 14, n. 4, p. 231–249, 1997.
- BORGES, R. **Carro Autônomo**. Disponível em: <https://www.uol.com.br/carros/reportagens-especiais/transporte-do-futuro---carro-autonomo/#page3>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- CHOSSET, H. et al. **Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation**. Londres, 2004.
- FÉLIX ARAÚJO, J. F. D. **Construção de um magnetômetro Hall para caracterização de partículas magnéticas utilizadas em ensaios imunológicos**. Rio de Janeiro: [s.n.].

FERNANDES, L. C. **Análise e implementação de algoritmos para localização de robôs móveis**. São Carlos: [s.n.].

FERREIRA, P. C. P. NT DISET 75 - Impactos Socioeconômicos dos Acidentes de Transporte no Brasil no Período de 2007 a 2018. **Notas Técnicas**, n. 75, 20 set. 2020.

GADIOLI, A. V. A.; SILVA, R. L. **ODOMETRIA: COMPORTAMENTO EM TRAJETÓRIA RELITÍNEA E CURVILÍNEA E A UTILIZAÇÃO REGRESSÕES COMO FORMA DE REDUÇÃO DE ERROS**. Mangueirinhos: [s.n.]. Disponível em: <http://sistemaolimpo.org/midias/uploads/048f8060e90df2d30a7540a8b88448dd.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global positioning systems, inertial navigation, and integration**. [s.l.] John Wiley, 2001.

GROVES, P. D. **Principles of GNSS, Inertial, and Multi-sensor Integrated Navigation Systems**. 2. ed. Boston : Artech House, 2013.

GUNTHER, T. **Triangulation**. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.org/photo/triangulation-sized/>. Acesso em: 28 nov. 2021.

JOSEPH, L. **ROS Robotics Projects**. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2017.

JOSEPH, L.; CACACE, J. **Mastering ROS for Robotics Programming**. 2. ed. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2018.

JÚNIOR, A. P. DE A.; CHAGAS, C. V. DAS; FERNANDES, R. G. **UMA RÁPIDA ANÁLISE SOBRE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**. Natal: [s.n.].

KERSCHBAUMER, R. **Microcontroladores**. Luzerna, Instituto Federal Catarinense, [s.d.]. Disponível em: <https://professor.luzerna.ifc.edu.br/ricardo-kerschbaumer/wp-content/uploads/sites/43/2018/02/Apostila-Microcontroladores.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2021

KLASER, R. L. **Navegação de veículos autônomos em ambientes externos não estruturados baseada em visão computacional**. São Carlos, [s.n.].

KVAM, J. **Time of Flight: Principles, Challenges, and Performance**. ST Technology Tour, 2017. Disponível em: [https://www.st.com/content/dam/technology-tour-2017/session-1\\_track-4\\_time-of-flight-technology.pdf](https://www.st.com/content/dam/technology-tour-2017/session-1_track-4_time-of-flight-technology.pdf). Acesso em: 19 nov. 2021.

LAWRENCE, A. **Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control**. 2. ed. [s.l.] Springer, 1998.

LIMA, F. S. DE. **A AUTOMAÇÃO E SUA EVOLUÇÃO**. Lagoa Nova: [s.n.].

LINDEN, DAVID.; REDDY, T. B. **Handbook of batteries**. 3. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2002.

MACHARET, D. G. **Robótica Móvel – Representação / Modelo**. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2021. Disponível em: <https://homepages.dcc.ufmg.br/~doug/cursos/lib/exe/fetch.php?media=cursos:introrobotica:2018-1:aula14-representacao-modelos-cinematicos.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2021

MARCHI, J. **NAVEGAÇÃO DE ROBOS MÓVEIS AUTONOMOS ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE BORDAGENS**. Florianópolis: [s.n.].

MATARIC, M. J. **Introdução à robótica**. São Paulo: Editora Unesp/Blucher, 2014.

MORI, A. M. **O USO DE SISTEMA INERCIAL PARA APOIAR A NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA**. São Paulo: [s.n.].

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Coriolis Effect**. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/coriolis-effect/>. Acesso em: 21 nov. 2021.

NHTSA. **Automated Vehicles for Safety United States Department of Transportation**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles-safety>. Acesso em: 20 nov. 2021.

NISE, N. S. **Control Systems Engineering**. 5. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2008.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. [s.l.] Pearson Universidades,

2010.

OLIVEIRA, A. S. DE; FABRO, J. A. **Movimentação, Localização, Odometria e Cinemática**. Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s.d.]. Disponível em:

[https://pessoal.dainf.ct.utfpr.edu.br/andreoliveira/lib/exe/fetch.php?media=robmov\\_aula1.pdf](https://pessoal.dainf.ct.utfpr.edu.br/andreoliveira/lib/exe/fetch.php?media=robmov_aula1.pdf). Acesso em: 31 out. 2021.

OLIVEIRA, A. S. DE; FABRO, J. A. **Introdução à Robótica Móvel através do Robot Operating System (ROS)**. Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s.d.]. Disponível em:

[https://pessoal.dainf.ct.utfpr.edu.br/andreoliveira/lib/exe/fetch.php?media=robmov\\_aula1.pdf](https://pessoal.dainf.ct.utfpr.edu.br/andreoliveira/lib/exe/fetch.php?media=robmov_aula1.pdf). Acesso em: 4 dez. 2021

OPEN ROBOTICS. **ROS - Robot Operating System**. Disponível em: <https://www.ros.org/>. Acesso em: 4 nov. 2021.

PAZOS, F. **Automação de Sistemas e Robótica**. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2002.

PENIDO, É. DE C. C.; TRINDADE, R. S. **Microcontroladores**. Ouro Preto: Rede e-Tec Brasi, 2013.

ROBOCORE. **Regras Robô Trekking**. In: ROBOCORE. Regras Robô Trekking. [S.l.]: Robocore, 2018. Disponível em:

[https://www.robocore.net/upload/attachments/regras\\_robotrekking\\_2018\\_05\\_06\\_172.pdf](https://www.robocore.net/upload/attachments/regras_robotrekking_2018_05_06_172.pdf). Acesso em: 1 nov. 2021.

ROMERO, R. A. F. et al. **Robótica Móvel**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

ROSIQUE, F. et al. **A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autonomous Vehicles Research**. Cartagena: MDPI AG, 2019.

RUFFO, G. H. **Maio Amarelo: “90% dos acidentes são causados por fator humano.”** Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/especial/maio-amarelo-90-dos-acidentes-sao-causados-por-fator-humano/>. Acesso em: 20 set. 2021.

SAE. **SAE Internacional**. Disponível em: <http://br.sae.org/about/>. Acesso em: 20 nov. 2021.

SANTANA, D. D. S.; FURUKAWA, C. M. **Estimação de Trajetórias Terrestres Utilizando Unidade de Medição Inercial de Baixo Custo e Fusão Sensorial**. São Paulo: [s.n.].

SARAGIOTTO, D. **Mortes no Trânsito: Tráfego brasileiro mata 1 pessoa a cada 15 minutos**. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-com-seguranca/mortes-no-transito-brasileiro-mata-1-pessoa-a-cada-15-minutos/>. Acesso em: 20 set. 2021.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R. **Introduction to Autonomous Mobile Robots**. London: The MIT Press, 2004.

SNIGELEN. **Software debouncing of buttons snigelen**, 2015. Disponível em: [https://www.avrfreaks.net/sites/default/files/forum\\_attachments/debounce.pdf](https://www.avrfreaks.net/sites/default/files/forum_attachments/debounce.pdf). Acesso em: 4 nov. 2021

SOUZA JÚNIOR, H. C. DE. **MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UM GIROSCÓPIO**. Rio de Janeiro: [s.n.].

ST TECHNOLOGY. **VL53L0X: World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor**. ST Technology, 2018. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2021

SUMMIT MOBILIDADE URBANA. **De 0 a 5: conheça os níveis de automação de um carro**. Disponível em: <https://summitmobilidade.estadao.com.br/carros-autonomos/de-0-a-5-conheca-os-niveis-de-automacao-de-um-carro/>. Acesso em: 26 set. 2021.

TOA, M.; WHITEHEAD, A. **Ultrasonic Sensing Basics**. Texas: [s.n.]. Disponível em: [https://www.ti.com/lit/an/slaa907c/slaa907c.pdf?ts=1638108064969&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/slaa907c/slaa907c.pdf?ts=1638108064969&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F). Acesso em: 14 nov. 2021.

TORRES, H. **Sensores Inerciais – Parte 2**. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/sensores-inerciais-parte-2/>. Acesso em: 17 nov.

2021.

WIKIPÉDIA. **Giroscópio.** Disponível em:  
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Girosc%C3%B3pio>. Acesso em: 27 nov. 2021.

WOODMAN, O. J. **An introduction to inertial navigation.** Cambridge: [s.n.]. Disponível em: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>. Acesso em: 19 out. 2021.

WORLD CHIPS. **MPU-9250.** Disponível em:  
<https://pt.aliexpress.com/store/2130127?spm=a2g0o.detail.100005.2.54f26751FnIbQz>. Acesso em: 13 jul. 2022.

INVEN SENSE. **MPU-9250 Product Specification Revision 1.1.** Disponível em:  
<https://3cfeqx1hf82y3xcoull08ihx-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2022.

MORGAN, E. J. **HC--SR04 Ultrasonic Sensor.** Disponível em:  
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132203/ETC2/HC-SR04.html>. Acesso em: 11 jul. 2022.

MAYERS, **Nathan. C + + no mundo real.** Acesso em: 12 jul. 2022.

AGUILAR Joyanes Luis. **C + +.** 1. ed. São Paulo:McGraw Hill, 2008.

STROUSTRUP, B. **Página oficial.** Disponível em: <http://www2.research.att.com/~bs/>. Acesso em: 12 jul. 2022.

NISTÉR, D.; NARODITSKY, O.; BERGEN, J. **Visual Odometry.** Disponível em:  
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.137.4025&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 17 jul. 2022.

HONEYWELL. **3 - Axis Digital Compass IC HMC5883L.** Disponível em:  
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/428790/HONEYWELL/HMC5883L.html>. Acesso em: 10 nov. 2022.

UBLOX. **u-blox 6 GPS Modules.** Disponível em:

[https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/976/NEO-6\\_DataSheet\\_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/976/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf). Acesso em: 7 ago. 2022.

STMICROELECTRONICS. **Automotive Fully Integratedh-Bridge Motor Driver**. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/100179/STMICROELECTRONICS/VNH2SP30.html>. Acesso em: 05 jul. 2022.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Series**. Disponível em: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf). Acesso em: 09 jul. 2022.

UNIPOWER. **Bateria Estacionária VRLA 12V 1,3Ah Mod.UP1213**. Disponível em: <https://unipower.com.br/produto/bateria-estacionaria-vrla-12v-13ah-mod-up1213/>. Acesso em: 02 jul. 2022.

BRAGA, B. **Desenvolvimento De Um Robô Móvel Para Navegação Autônoma E Busca De Alvos Em Ambientes Externos**. Disponível em: <https://docplayer.com.br/54209057-Desenvolvimento-de-um-robo-movel-para-navegacao-autonoma-e-busca-de-alvos-em-ambientes-externos-bruno-fraga.html>. Acesso em: 01 nov. 2022.

MAPS. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-25.4391647,-49.2316906,128m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 02 jun. 2022.

## **ANEXO A – Regras Robô Trekking (RoboCore 2018)**

## 1. Introdução

- Nome da Modalidade: Robô Trekking
- Número de Robôs por Partida: Um
- Duração da Partida: 10 minutos
- Classes Disponíveis: Pro
- Dimensões máximas dos Robôs: 500x500x500mm
- Especificações do Circuito: Verificar item 3: "O Ambiente"
- Especificações de Controle: Autônomo

**ATENÇÃO:** Cada robô poderá participar apenas de uma **única categoria durante o evento**, por exemplo: um robô inscrito na categoria de combate não poderá participar na categoria do hockey e vice-versa.

## 2. Especificações dos Robôs

- 2.1 O robô deve ser totalmente autônomo, terrestre e com todos os componentes embarcados, não podendo ser controlado externamente por fio, rádio ou qualquer outro dispositivo de comunicação, com exceção para ser iniciado ou para ser desativado em caso de pane;
- 2.2 Nenhuma adição, remoção ou alteração de *hardware* ou *software* poderá ser feita durante a partida.
- 2.3 O robô não pode exceder as dimensões de um cubo de aresta de 500 mm durante toda a partida.
- 2.4 O robô não pode conter pontas afiadas e/ou arestas cortantes, de modo que não machuque alguém em caso de colisão.
- 2.5 O robô deverá possuir um dispositivo de indicação luminosa, para sinalizar a chegada aos marcos.

## 3. O Ambiente

- 3.1 A competição será realizada em um gramado em ambiente aberto e sem cobertura com dimensões aproximadas a 44 m de comprimento por 25 m de largura. Por se tratar de um ambiente natural, a superfície do gramado pode apresentar imperfeições e obstáculos, como desníveis ou pedras que deverão ser superados pelos robôs. O robô deverá ser capaz de superar (sem qualquer intervenção humana) os desníveis causados pelos marcos, bem como pedras e outros desníveis do terreno;
- 3.2 O robô estará suscetível às condições climáticas do dia, sendo assim a competição não será adiada ou postergada em caso de chuva, com exceção de casos extremos que serão avaliados pelos juizes da competição;
- 3.3 O robô não precisará atravessar superfícies alagadas, porém devido às condições climáticas do dia da competição o solo poderá estar úmido e/ou conter trechos com poças d'água.
- 3.4 Haverão 3 marcos definidos por uma chapa de metal de cor branca de dimensões aproximadas: 1000mm x 1000mm x 2mm. O robô deverá ser capaz de subir e identificar tais marcos.
- 3.5 Poderá ser solicitado à organização a adição de cones de sinalização nas cores laranja e branca com altura de 50 cm, conforme Figura 1, no centro dos marcos descrito no item 3.4.



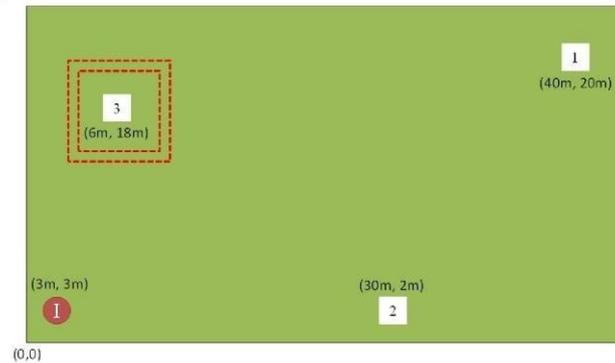
Figura 1: Cone de sinalização

- 3.6 No campo poderão haver linhas e/ou marcações brancas características de um campo de futebol.

- 3.7 O competidores deverão ficar afastados de, no mínimo, 2 metros do robô durante toda a execução do percurso. O juiz da prova poderá se aproximar a uma distância inferior a 2 metros caso ache necessário.

#### 4. A Partida

- 4.1 Haverão 3 marcos (conforme definido no item 3.4) posicionados pelo campo conforme a figura abaixo:



- 4.2 O robô deverá ser capaz de chegar até estes marcos de forma autônoma e na ordem definida (início para marco 1, marco 1 para marco 2 e marco 2 para marco 3);
- 4.3 Ao redor do marco 3 serão adicionados obstáculos com objetivo de dificultar o acesso ao marco, estes obstáculos estarão localizados a uma distância máxima de cinco metros do centro do marco 3. Estes obstáculos não possuem um tamanho pré-definido, porém, estes deverão ser contornados, não sendo permitido remover, arrastar ou transpor tais obstáculos;
- 4.4 O robô ao chegar em um marco, com pelo menos uma parte de sua estrutura tocando o marco, deverá sinalizar por meio de um dispositivo luminoso, visível e aparente, antes de prosseguir para o próximo marco;
- 4.5 Quando o robô chegar no último marco e sinalizar o tempo será parado;
- 4.6 O campo ficará disponível para testes, durante todos os dias de competição.
- 4.7 Cada robô terá o direito a três tomadas de tempo oficiais por dia de competição. Estas tomadas de tempo serão consecutivas caracterizando uma partida. Será gerada uma agenda com o cronograma das partidas. Cada robô terá seu horário previamente definido e deverá estar presente no horário marcado para as tomadas de tempo.
- 4.8 É considerada uma tomada de tempo oficial toda vez que o robô partir do marco inicial e o juiz da competição iniciar a contagem do tempo.
- 4.9 Caso seja solicitada uma tomada de tempo oficial e o robô não se movimenta após a sinalização do juiz, será fornecido uma tolerância de 30 segundos para que o robô inicie o movimento, se após este tempo o robô permanecer imóvel, a tomada de tempo será cancelada e o robô poderá tentar uma nova tomada de tempo, caso ainda lhe reste tentativas.
- 4.10 Durante a partida, caso o robô fique preso, tombe de tal maneira que não consiga se desvirar sozinho ou haja alguma intervenção manual, o robô será desclassificado da tomada de tempo em questão;
- 4.11 A partida terá duração máxima de 10 minutos;
- 4.12 A classificação será determinada segundo os seguintes critérios em ordem decrescente:
1. Tempo gasto para completar a sequência até o marco 3;
  2. Tempo gasto para completar a sequência até o marco 2;

3. Tempo gasto para atingir o marco 1.
- 4.13 Apenas será elegível a premiação os robôs que atingirem o primeiro marco.