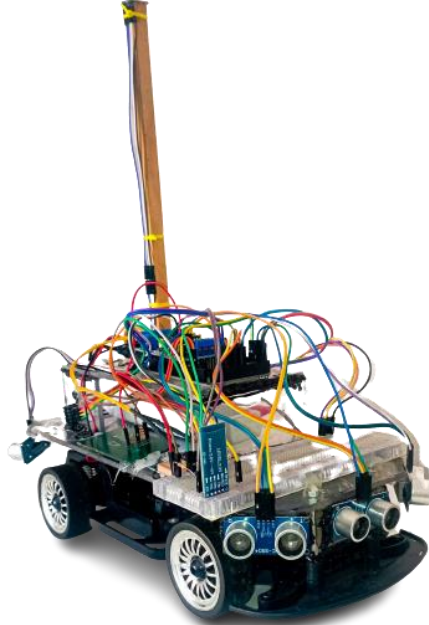




**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**



## **Desenvolvimento de um protótipo de veículo autónomo a partir de um carro telecomandado**

**RICARDO MIGUEL NUNES MARÇAL**  
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Trabalho de projeto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes  
Doutor Fernando Paulo Neves da Fonseca Cardoso Carreira

Júri:

Presidente: Doutor André Rui Dantas Carvalho

Vogais:

Doutora Maria Graça Vieira Brito Almeida  
Doutor Fernando Paulo Neves da Fonseca Cardoso Carreira

**Dezembro de 2023**





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

# **Desenvolvimento de um protótipo de veículo autónomo a partir de um carro telecomandado**

**RICARDO MIGUEL NUNES MARÇAL**  
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Trabalho de projeto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes  
Doutor Fernando Paulo Neves da Fonseca Cardoso Carreira

Júri:

Presidente: Doutor André Rui Dantas Carvalho

Vogais:

Doutora Maria Graça Vieira Brito Almeida  
Doutor Fernando Paulo Neves da Fonseca Cardoso Carreira

**Dezembro de 2023**



## Agradecimentos

Quero agradecer a toda a minha família por me acompanharem nesta caminhada, mas em especial gostava de agradecer ao meu pai e à minha mãe que sempre me encorajaram a não desistir, sendo eles os protagonistas desta jornada da minha vida e sem o apoio deles isto nunca seria possível. Agradeço também à minha namorada que me apoiou e mostrou-se sempre empenhada em me ajudar em tudo o que necessitava, ao meu padrinho que me incentivou a ir para a faculdade, à minha avó Gracinda pelo apoio e por fim à minha avó Esmeralda que infelizmente já não se encontra presente fisicamente, mas que sempre acreditou em mim.

Aos meus amigos e colegas fica também o agradecimento por todo o incentivo à concretização do meu percurso académico, no qual destaco o Eng.º Alexandre Goulão e o Eng.º André Santos demonstrando sempre lealdade e companheirismo.

Não posso deixar de agradecer aos meus orientadores, Doutor Mário Mendes e Doutor Fernando Carreira, que me deram a oportunidade de realizar este Trabalho Final de Mestrado e abdicaram do seu tempo para me ajudar. Deixo um agradecimento especial a um professor e amigo, Doutor Fernando Duarte, Diretor do IPLUSO, por me dar a conhecer o mundo da robótica incentivando que seria capaz de realizar o tema em questão.

Gostava também de agradecer ao Sr. Luís Nunes da empresa Thyssenkrupp Automotive Body Solutions por ter aceite a minha candidatura como programador de robôs e me ter concedido mais algum tempo para terminar o presente Trabalho Final de Mestrado.

Por último, mas não menos importante, gostava de agradecer ao ISEL (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa), por me ter dado a oportunidade de ingressar no Mestrado em Engenharia Mecânica, sabendo que não tinha qualquer formação nesta área. Agradeço também a todos os docentes que tornaram possível o percurso até aqui.



## Resumo

Desde a origem dos automóveis até aos dias de hoje, sempre existiram acidentes rodoviários, sendo a principal causa o ser humano. Com o intuito de diminuir a sinistralidade rodoviária, tem-se aplicado ferramentas desenvolvidas pelo homem, sendo a robótica uma delas. A aplicação desta tecnologia aos automóveis passa por tornar os veículos totalmente autónomos, tendo a capacidade de comunicar entre si, com a finalidade de serem mais seguros e cómodos para os seus utilizadores.

No presente trabalho de projeto, será desenvolvida uma réplica à escala de um veículo autónomo com funcionalidades parciais, tendo por base um carro telecomandado. Para garantir a sua autonomia, o veículo terá de ter a capacidade de se deslocar entre várias coordenadas geográficas, evitando a colisão com quaisquer obstáculos que surjam no seu percurso.

Para a realização deste protótipo, recorreu-se à utilização de um sistema composto por diversos sensores, como: os ultrassónicos que garantem que o veículo não colida com obstáculos; um magnetómetro que funciona como uma bússola, onde orientará o veículo para a posição pretendida; um módulo *Bluetooth* que poderá ser utilizado como intermediário entre um computador/*smartphone* e o veículo; e por fim, um sistema GPS que permite guiar o veículo para as coordenadas previamente definidas.

Durante o funcionamento do veículo, este recorrerá a uma unidade de processamento Arduino Mega para analisar toda a informação recolhida pelos sensores. Para provar a autonomia do veículo serão realizados vários ensaios, onde se alterará a orientação do veículo, o número de coordenadas geográficas e o número de obstáculos a intersetar. Para que seja possível analisar o percurso realizado pelo veículo, será utilizado o *software* MATLAB® no qual traçará o trajeto efetuado pelo veículo, tendo por base as coordenadas geográficas que este intersetou.

## Palavras-chave

Robô Móvel, Carro autónomo, Arduino, Carro contorna obstáculos, Carro guiado por GPS.



## Abstract

*From the origins of automobiles to the present day, there have always been road accidents, the main cause being humans. To reduce road accidents, tools developed by man have been applied, robotics being one of them. The application of this technology to automobiles involves making vehicles fully autonomous, having the ability to communicate with each other, with the aim of being safer and more comfortable for their users.*

*In this project work, a scale replica of an autonomous vehicle will be developed, based on a remote-controlled car. To guarantee its autonomy, the vehicle must be able to move between various geographic coordinates, avoiding collision with any obstacle that may arise on its route.*

*To create this prototype, we used a system made up of several sensors, such as: ultrasonic sensors that ensure that the vehicle does not collide with obstacles; a magnetometer that works like a compass, which will guide the vehicle to the desired position; a Bluetooth module that can be used as an intermediary between a computer/smartphone and the vehicle; and finally, a GPS system that allows the vehicle to be guided to previously defined coordinates.*

*During vehicle operation, it will use an Arduino Mega processing unit to analyze all the information collected by the sensors. To prove the vehicle's autonomy, several tests will be carried out, where the vehicle's orientation, the number of geographic coordinates and the number of obstacles to intersect will be changed. In order to analyze the route taken by the vehicle, the MATLAB® software will be used, which will trace the route taken by the vehicle, based on the geographic coordinates that it crossed.*

## Keywords

*Mobile Robot, Autonomous Car, Arduino, Car goes around obstacles, GPS-guided car.*



# Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo.....	iii
Palavras-chave.....	iii
<i>Abstract</i> .....	v
<i>Keywords</i> .....	v
Lista de Símbolos.....	xv
Símbolos relativos à navegação baseada em coordenadas GPS.....	xv
Símbolos relativos ao estudo do erro do módulo GPS.....	xv
Lista de acrónimos e siglas .....	xvii
1. Introdução .....	1
1.1 Enquadramento e Motivação.....	3
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Organização do Documento.....	5
2. Revisão bibliográfica .....	7
2.1 Robótica .....	7
2.1.1 Robôs vs. Humanos .....	8
2.1.2 Robótica Móvel .....	10
2.1.2.1 Sensores .....	13
2.1.2.2 Atuadores .....	17
2.1.2.3 Tipos de Locomoção.....	19
2.2 Veículos .....	25
2.2.1 Veículos Inteligentes .....	26
2.2.2 Veículos Autónomos .....	26
2.2.2.1 História dos Veículos Autónomos .....	27
2.2.2.2 Classificação de Veículos Autónomos .....	28
2.2.2.3 Vantagens e Desvantagens da utilização de veículos autónomos .....	29
2.2.2.4 Funcionamento de um veículo autónomo .....	30
2.2.2.5 Tecnologias utilizadas nos veículos autónomos.....	31
2.2.2.6 Primeiro veículo autónomo a circular em Portugal .....	35
2.3. Estado da Arte .....	36
2.3.1 Veículos autónomos produzidos por fabricantes de automóveis.....	36
2.3.1.1 General Motors® / Cruise Origin .....	37
2.3.1.2 Amazon Zoox .....	38
2.3.2 Protótipos de veículos autónomos desenvolvidos academicamente .....	39

2.3.2.1	Protótipo de veículo autónomo desenvolvido para recolha lixo .....	40
2.3.2.2	Protótipo de veículo autónomo que segue uma trajetória baseado numa marcação no chão e contorna obstáculos .....	41
2.3.2.3	Veículo autónomo que realiza uma trajetória autonomamente sabendo a sua posição inicial e a posição final.....	41
2.3.2.4	Veículo autónomo controlado por voz, capaz de detetar obstáculos para auxiliar pessoas com deficiências físicas.....	42
2.3.2.5	Veículo autónomo para combate de fogos num cenário de simulação.....	43
3.	Caso de estudo .....	45
3.1	Protótipo .....	46
3.1.1	Desmontagem do veículo telecomandado .....	48
3.1.2	Montagem do protótipo .....	49
3.1.2.1	Protótipo Virtual.....	49
3.1.2.2	Protótipo Físico .....	50
3.1.3	Componentes do protótipo.....	51
3.1.3.1	Chassis .....	52
3.1.3.2	Hardware.....	53
3.1.3.3	Software .....	64
3.1.3.4	Circuitos elétricos.....	67
3.1.3.5	Estudos preliminares.....	73
3.2	Sistemas de navegação .....	82
3.2.1	Cinemática do veículo .....	83
3.2.2	Navegação baseada em Coordenadas Geográficas .....	85
3.2.2.1	Azimute .....	85
3.2.3	Algoritmos de controlo .....	88
3.2.3.1	Método A – Navegação entre Coordenadas Geográficas .....	88
3.2.3.2	Método B – Desvio de obstáculos.....	91
4.	Validação experimental e resultados obtidos.....	93
4.1	Calibração dos parâmetros do robô.....	93
4.1.1	Magnetómetro .....	94
4.1.2	Velocidade do sistema de tração e direção .....	94
4.2	Ensaios.....	95
4.2.1	Navegação ao longo de uma reta entre duas coordenadas geográficas .....	96
4.2.1.1	Veículo parte orientado para a coordenada objetivo .....	97
4.2.1.2	Veículo parte com a direção oposta para a coordenada objetivo .....	98
4.2.1.3	Navegação com desvio de obstáculos.....	99
4.2.1.4	Veículo confrontado com redução da área admissível .....	101

4.2.2	Navegação com várias coordenadas geográficas.....	103
4.2.2.1	Navegação com várias coordenadas – Percurso sem obstáculos .....	104
4.2.2.2	Navegação com várias coordenadas – percurso com obstáculos.....	106
5.	Conclusão e trabalhos futuros .....	109
5.1	Conclusões gerais .....	109
5.2	Limitações do protótipo .....	111
5.3	Trabalhos Futuros.....	113
	Bibliografia .....	115
	Anexos.....	121
	Anexo 1 – Precisão do módulo GPS .....	121
	Código Arduino.....	121
	Código MATLAB® .....	122
	Anexo 2 – Ensaios.....	126
	Código Arduino.....	126
	Código MATLAB® .....	132



## Índice de Figuras

Figura 1.1 – Número de mortes por ano em Portugal [3].....	1
Figura 1.2 – Evolução dos veículos.....	2
Figura 2.1 – Vantagens da utilização de robôs [7] .....	9
Figura 2.2 – Desvantagens da utilização de robôs [7].....	9
Figura 2.3 – Sistema de controlo de um robô móvel. Adaptado de: [5].....	12
Figura 2.4 – Conceito de navegação robotizada. Adaptado de: [8] .....	12
Figura 2.5 – Mecanismos de locomoção usados em sistemas biológicos. Adaptado de: [14] ...	19
Figura 2.6 – Comparação entre um polígono com 6 e 12 lados .....	20
Figura 2.7 – Configurações de pernas. Adaptado de: [14].....	21
Figura 2.8 – Movimentação de um robô com rodas Omnidirecionais.....	24
Figura 2.9 – Esquema representativo do funcionamento do LIDAR .....	32
Figura 2.10 – Mapa 3D construído tendo por base o ambiente em torno do LIDAR. Fonte [25]	32
Figura 2.11 – Método de funcionamento do sistema de GPS. Fonte: [32].....	33
Figura 2.12 – Veículo autónomo desenvolvido pela General Motors. Fonte: [39].....	37
Figura 2.13 – Veículo autónomo desenvolvido pela Zoox. Fonte: [38].....	38
Figura 2.14 – Protótipo de veículo autónomo destinado à recolha de lixo. Fonte: [40] .....	40
Figura 2.15 – Trajetória a realizar sabendo os pontos de intersecção. Fonte [42].....	42
Figura 2.16 – Veículo autónomo para combate de fogos num cenário de simulação. Fonte: [44] .....	43
Figura 3.1 – Etapas no desenvolvimento do protótipo .....	45
Figura 3.2 – Protótipo em estudo com os vários componentes .....	46
Figura 3.3 – Carro telecomandado utilizado para o desenvolvimento do protótipo.....	48
Figura 3.4 – Eletrónica presente no carro telecomandado.....	49
Figura 3.5 – Protótipo virtual: a) sem componentes eletrónicos; b) com componentes eletrónicos.....	50
Figura 3.6 – Protótipo físico: a) sem componentes eletrónicos; b) com componentes eletrónicos.....	51
Figura 3.7 – Chassis do protótipo .....	52
Figura 3.8 – Protótipo - Dimensões do chassis .....	53
Figura 3.9 – Alguns dispositivos da família Arduino.....	54
Figura 3.10 – Vantagens da utilização do Arduino.....	55
Figura 3.11 – Desvantagens da utilização do Arduino .....	55
Figura 3.12 – Unidade de processamento - Arduino Mega. ....	56
Figura 3.13 – Motor presente no sistema de direção .....	57
Figura 3.14 – Módulo GPS.....	57
Figura 3.15 – Placa de ensaio .....	59
Figura 3.16 – Sensor ultrassónico .....	59
Figura 3.17 – Controlador de motores.....	60
Figura 3.18 – Magnetómetro .....	61
Figura 3.19 – Fonte de alimentação.....	62
Figura 3.20 – Módulo Bluetooth .....	63
Figura 3.21 – Ordem para extração e análise de dados.....	64
Figura 3.22 – Ligação do controlador de motores à unidade de processamento .....	67
Figura 3.23 – Ligação dos Motores ao Controlador de Motores. ....	68

Figura 3.24 – Ligação do módulo GPS à unidade de processamento .....	69
Figura 3.25 – Ligação do sensor ultrassónico à unidade de processamento .....	70
Figura 3.26 – Ligação do magnetómetro à unidade de processamento.....	71
Figura 3.27 – Ligação do módulo Bluetooth à unidade de processamento.....	72
Figura 3.28 – Representação em SolidWorks do posicionamento dos sensores Ultrassónicos .	74
Figura 3.29 – Cone de medição do sensor ultrassónico. Ângulo da base de 85° .....	74
Figura 3.30 – Cone de medição do sensor ultrassónico. Ângulo da base de 67,5°.....	75
Figura 3.31 – Processo de Otimização do Cone .....	75
Figura 3.32 – Determinação do ângulo da base.....	76
Figura 3.33 – Otimização dos cones gerados pelos sensores ultrassónicos .....	76
Figura 3.34 – Amostra recolhida pelo módulo GPS .....	77
Figura 3.35 – Conversão da amostra de graus para metro.....	78
Figura 3.36 – Exatidão vs. Repetibilidade .....	79
Figura 3.37 – Desvio da amostra ao longo do tempo .....	79
Figura 3.38 – Zona de maior concentração de valores da amostra .....	81
Figura 3.39 – Descrição das rodas do veículo em estudo .....	83
Figura 3.40 – a) modelo em estudo; b) modelo empírico do modelo em estudo .....	84
Figura 3.41 – Demonstração do ângulo de Azimute .....	86
Figura 3.42 – Conversão de coordenadas geográficas.....	86
Figura 3.43 – Critério de viragem: a) Direita; b) Esquerda.....	89
Figura 3.44 – Fluxograma – Método A – Navegação entre coordenadas geográficas.....	90
Figura 3.45 – Fluxograma – Método B – Desvio de obstáculos .....	92
Figura 4.1 – Calibração do sensor magnetómetro .....	94
Figura 4.2 – Representação das posições objetivo - uma coordenada.....	96
Figura 4.3 – Posição inicial e final - Medida vs. Real .....	96
Figura 4.4 – Ensaio com uma coordenada – veículo parte orientado para o destino .....	97
Figura 4.5 – Ensaio com uma coordenada – Orientado para o destino – Variação da distância a percorrer ao longo do tempo.....	97
Figura 4.6 – Ensaio com uma coordenada – veículo parte desorientado para o destino.....	98
Figura 4.7 – Ensaio com uma coordenada – Desorientado para o destino – Variação da distância a percorrer ao longo do tempo.....	99
Figura 4.8 – Ensaio com uma coordenada – Desvia obstáculos.....	100
Figura 4.9 – Ensaio com uma coordenada – Desvia obstáculos – Variação da distância a percorrer ao longo do tempo.....	101
Figura 4.10 – Ensaio com uma coordenada – Redução área admissível.....	102
Figura 4.11 – Ensaio com uma coordenada – Redução área admissível – Variação da distância a percorrer ao longo do tempo.....	102
Figura 4.12 – Representação das posições objetivo - várias coordenadas.....	103
Figura 4.13 – Posições do trajeto - Medida vs. Real .....	104
Figura 4.14 – Ensaio com várias coordenadas – Sem obstáculos .....	104
Figura 4.15 – Ensaio com várias coordenadas – Sem obstáculos – Distância a percorrer.....	105
Figura 4.16 – Ensaio com várias coordenadas – Com obstáculos.....	106
Figura 4.17 – Ensaio com várias coordenadas – Com obstáculos – Manobra .....	107
Figura 4.18 – Ensaio com várias coordenadas – Com obstáculos – Distância a percorrer .....	108

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades dos sensores: Externos vs. Internos .....	13
Tabela 2.2 – Propriedades dos sensores: Visuais vs. Não visuais .....	13
Tabela 2.3 – Propriedades dos sensores: Ativos vs. Passivos .....	13
Tabela 2.4 – Classificação dos vários sensores de acordo com as suas propriedades.....	14
Tabela 2.5 – Diferença entre giroscópio mecânico e ótico .....	16
Tabela 2.6 – Diferença entre um codificador de eixo absoluto e incremental .....	17
Tabela 2.7 – Diferença entre um motor de passo-a-passo e um motor DC .....	18
Tabela 2.8 – Vantagens e desvantagens dos humanoides.....	22
Tabela 2.9 – Níveis SAE de Condução Autónoma. Fonte: [30].....	28
Tabela 3.1 – Propriedades da unidade de processamento .....	56
Tabela 3.2 – Propriedades do Módulo GPS.....	58
Tabela 3.3 – Propriedades da placa de ensaio .....	59
Tabela 3.4 – Propriedades do sensor ultrassónico .....	60
Tabela 3.5 – Propriedades do Controlador de Motores .....	61
Tabela 3.6 – Propriedades do magnetómetro .....	62
Tabela 3.7 – Propriedades da fonte de alimentação .....	62
Tabela 3.8 – Propriedades do módulo Bluetooth .....	63
Tabela 3.9 – Pinos de ligação - Controlador de Motores.....	68
Tabela 3.10 – Pinos de ligação - Motores .....	68
Tabela 3.11 – Pinos de ligação - Módulo GPS .....	69
Tabela 3.12 – Pinos de ligação - Sensores Ultrassónicos .....	70
Tabela 3.13 – Pinos de ligação - Magnetómetro.....	71
Tabela 3.14 – Pinos de ligação - Módulo Bluetooth .....	72



## Lista de Símbolos

### Símbolos relativos à navegação baseada em coordenadas GPS

$\phi_1$	Latitude da coordenada inicial;
$\phi_2$	Latitude da coordenada final;
$\lambda_1$	Longitude da coordenada inicial;
$\lambda_2$	Longitude da coordenada final;
$\Delta\phi$	Diferença de latitudes;
$\Delta\lambda$	Diferença de longitudes;
$d$	Equação de <i>Haversine</i> ;
$aux$	Cálculo auxiliar da Equação de <i>Haversine</i> ;
$\theta$	Equação de Azimute (radianos);
$\theta_{graus}$	Conversão do ângulo resultante da Equação de Azimute.

### Símbolos relativos ao estudo do erro do módulo GPS

$\bar{x}$	Média;
$n$	Número de elementos da amostra;
$x_i$	Dado da amostra;
$s^2$	Variância;
$s$	Desvio Padrão.



## Lista de acrónimos e siglas

AGV	<i>Automated Guided Vehicle;</i>
CPU	<i>Central Processing Unit;</i>
DC	<i>Corrente Contínua;</i>
ECU	<i>Eletronic Control Unit;</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems;</i>
GPS	<i>Global Position System;</i>
IA	<i>Inteligência Artificial;</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment;</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit;</i>
ISEL	<i>Instituto Superior de Engenharia de Lisboa;</i>
JIRA	<i>Japan Industrial Robot Association;</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging;</i>
PPS	<i>Precise Position Service;</i>
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging;</i>
RIA	<i>Robotics Institute of America;</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers;</i>
SPS	<i>Standard Position Service;</i>



# 1. Introdução

Desde sempre, os acidentes rodoviários causam inúmeras mortes em todo o mundo, no qual Portugal não é exceção. Esses acidentes são originados grande parte por erros humanos ou falhas nos componentes mecânicos dos veículos.

Os fabricantes de automóveis trabalham constantemente para reduzir os acidentes rodoviários, implementando sistemas de segurança nos seus veículos podendo estes ser divididos em dois grupos: os ativos e os passivos.

Neste contexto, o sistema de segurança ativo abrange todos os sistemas que auxiliam o veículo na prevenção de acidentes, como por exemplo, o sistema de travagem, a suspensão, a direção, entre outros [1]. Em contrapartida, o sistema de segurança passiva, contém vários mecanismos que diminuem ou eliminam os impactos sentidos pelos ocupantes da viatura em caso de acidente, como por exemplo os *Airbags*, pré-tensores e estruturas da carroçaria com zonas de deformação programada [2].

Os fabricantes de automóveis têm aplicado nos seus veículos métodos onde o objetivo é diminuir a sinistralidade rodoviária. De acordo com os dados disponibilizados por Pordata – Base de Dados Portugal Contemporâneo [3], é possível visualizar na figura 1.1 o número de óbitos ao longo do tempo.

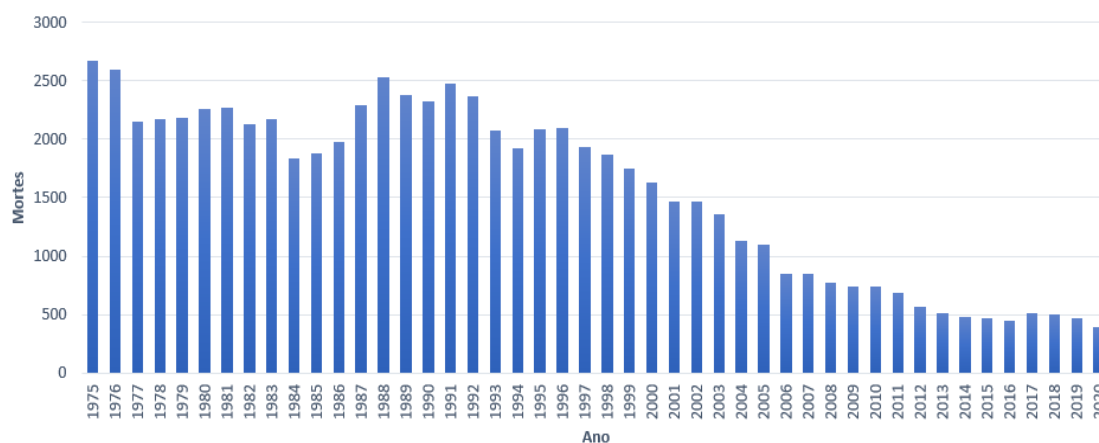


Figura 1.1 – Número de mortes por ano em Portugal [3]

Com a observação da figura 1.1, é notório que o número de óbitos por acidente rodoviário tenda a diminuir, tratando-se de uma consequência do aumento das regras de trânsito, bem como da implementação de novas tecnologias nos sistemas de segurança dos veículos. Apesar do número de mortos do ano 2020 ter sido bastante reduzido quando comparado com o ano de 1975, este número ainda é bastante elevado, pois trata-se de vidas humanas.

No passado, os automóveis não possuíam qualquer tipo de eletrónica ou automação, sendo eles totalmente mecânicos (ver figura 1.2). Mas com o evoluir dos tempos, a indústria automóvel tem aprimorado as tecnologias integradas nos veículos, tornando-os cada vez mais simples, cómodos e de fácil utilização.

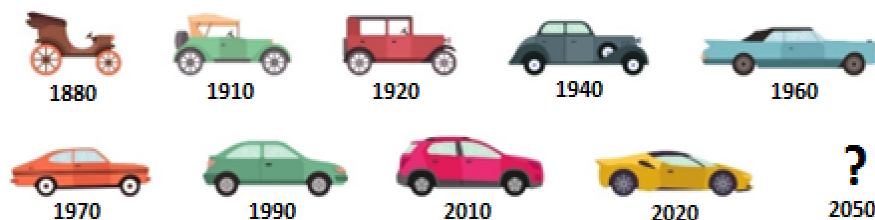


Figura 1.2 – Evolução dos veículos

Antigamente, o automóvel era considerado como um membro da “família” e as pessoas conduziam para proporcionar prazer. Contudo, atualmente o automóvel é utilizado como um meio de transporte para se deslocar de um sítio para outro, de forma cómoda e rápida. No futuro, à semelhança do que acontece atualmente com as bicicletas e trotinetes, as pessoas não terão veículo próprio, mas sim veículos partilhados.

É espectável ainda que no futuro, exista bastante automação nos veículos, pois os seus fabricantes trabalham diariamente no desenvolvimento de soluções para que os veículos possam ser mais seguros. Esta tendência é espectável uma vez que o ser humano sempre procurou desenvolver algumas ferramentas e ciências que o auxiliassem nas tarefas diárias com o intuito de as tornar mais rápidas, seguras, precisas e simples.

Neste contexto, o ser humano desenvolveu a robótica. Esta ciência permite auxiliar os humanos de forma eficaz e eficiente. Normalmente, um sistema robótico é composto por sensores que recolhem informações sobre o meio envolvente, um controlador que analisa o conteúdo recolhido e atuadores para interagirem com o exterior. Existe uma grande variedade de fins onde esta ciência pode ser aplicada, no qual os veículos não são exceção.

Em suma, os automóveis têm revolucionado a forma como o ser humano se desloca de um ponto para o outro, contudo, com o passar dos anos os seus fabricantes têm mostrado bastante interesse de os tornar cada vez mais seguros. Para isso desenvolvem mecanismos que auxiliam a condução, tornando esta mais acessível e mais cómoda. Com o passar dos anos é notória a presença de automação nos veículos, pois no passado os veículos eram totalmente mecânicos e no futuro é expectável que sejam totalmente autónomos.

## 1.1 Enquadramento e Motivação

Os automóveis revolucionaram a forma de como o ser humano se desloca de um local para o outro. Os primeiros automóveis eram muito rudimentares, pois não possuíam tecnologias ou mecanismos que auxiliassem a condução. No entanto, com a evolução da sociedade vários investigadores e fabricantes de automóveis têm trabalhado no desenvolvimento de novas tecnologias capazes de tornar a condução mais agradável para os condutores.

A implementação da robótica tem-se diversificado por várias áreas, sendo os automóveis uma dessas áreas de aplicação. A sua utilização nos veículos oferece aos ocupantes vários benefícios, como: mais comodidade, segurança, entre outras. Apesar do avanço tecnológico já ser notório nos automóveis fabricados atualmente, existe um grande interesse em desenvolver novas tecnologias. Para o futuro é espectável que a presença de veículos totalmente autónomos seja mais frequente, pois a sua utilização oferece vários benefícios quer para o ocupante do veículo, quer para o ambiente.

Neste contexto, no presente trabalho de projeto será desenvolvido um protótipo à escala de veículo autónomo com funcionalidades parciais, tendo por base um carro telecomandado. Para isso, o carro original será totalmente desmontado, retirada toda a eletrónica presente e serão adicionados sensores, atuadores e um controlador. O objetivo final deste protótipo é navegar num ambiente desconhecido entre coordenadas geográficas, evitando que colida com quaisquer obstáculos que este detete no seu caminho e ainda representar num ambiente virtual a sua trajetória. O desenvolvimento deste trabalho de projeto para além do objetivo descrito anteriormente, pretende inspirar outros autores a desenvolverem outras soluções de mobilidade para além daquelas que já existem.

## 1.2 Objetivos

No presente trabalho de projeto pretende-se que seja desenvolvido um protótipo à escala de um veículo autónomo com funcionalidades parciais. Este protótipo irá ser construído tendo como base um veículo telecomandado, onde terá de ser removida toda a eletrónica que permitem o veículo ser telecomandado e adicionada tecnologia para o tornar autónomo.

Para validar a sua autonomia, serão fornecidas ao veículo coordenadas geográficas e este terá de as alcançar. Durante os ensaios, o veículo recorrerá aos sensores que possui para analisar o ambiente ao seu redor e aos atuadores para interagir com o meio ambiente. Durante as trajetórias efetuadas, o veículo deparar-se-á com obstáculos, terá de alcançar várias coordenadas geográficas no mesmo ensaio e será analisado o seu comportamento quando este é confrontado a atingir com bastante precisão uma coordenada geográfica. Para observar o desempenho do veículo, será utilizado o *software* MATLAB® para esse fim.

Neste contexto, para se atingirem os objetivos deste trabalho, é importante cumprir as seguintes etapas:

1. Desmontagem do carro telecomandado e a devida montagem dos diversos componentes para que o veículo se torne autónomo;
2. Implementação de um algoritmo de controlo para que o veículo cumpra os requisitos propostos;
3. Representação das várias trajetórias efetuadas no *software* MATLAB®. É importante salientar que a representação da trajetória não será em tempo real devido a complexidades de *hardware* e *software*.

## 1.3 Organização do Documento

A organização do trabalho de projeto por capítulos é bastante importante, pois permite ao leitor compreender a sequência do desenvolvimento do protótipo. Neste contexto, a sequência será a seguinte:

**Capítulo 1 – Introdução** – Este capítulo será utilizado para introduzir o tema em desenvolvimento, realizar um enquadramento e motivação, e por fim referenciar quais são os objetivos para este trabalho de projeto.

**Capítulo 2 – Revisão bibliográfica** – No segundo capítulo do presente trabalho de projeto serão abordados de forma breve algumas tecnologias que estão por detrás do protótipo desenvolvido, como a robótica e os veículos autónomos. Neste capítulo serão ainda retratados alguns projetos desenvolvidos por fabricantes de automóveis ou estudantes/investigadores cujo objetivo se enquadra no tema em desenvolvimento.

**Capítulo 3 – Caso de estudo** – Este capítulo será dedicado ao desenvolvimento do veículo, sendo que foi repartido em dois subcapítulos: o Protótipo e os Sistemas de navegação.

- **Protótipo** – O primeiro subcapítulo será dedicado à montagem física do veículo, indicando quais as alterações realizadas no *chassis*, o *hardware* e o *software* utilizado. Será realizado ainda um estudo preliminar a alguns dispositivos presentes no veículo.
- **Sistemas de navegação** – O segundo subcapítulo fará referência à lógica utilizada no veículo. É neste subcapítulo que serão apresentados os fluxogramas que descrevem o seu comportamento perante as várias adversidades.

**Capítulo 4 – Resultados obtidos** – No penúltimo capítulo serão apresentadas algumas calibrações necessárias antes de se realizar os ensaios, assim como a apresentação das trajetórias efetuadas durante os vários ensaios.

**Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros** – Por fim, existirá um capítulo onde será realizada a discussão dos resultados obtidos, assim como as limitações que foram observadas durante os ensaios e ainda sugestões para trabalhos futuros.



## 2. Revisão bibliográfica

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um protótipo de veículo autônomo. Para se entender melhor o seu funcionamento é importante analisar as suas tecnologias. Assim sendo, no presente capítulo será apresentada uma revisão das tecnologias que o protótipo incorpora. Neste sentido, o presente capítulo será dividido por subcapítulos, sendo eles:

- **Robótica móvel** – será abordada a história da robótica, assim como os benefícios da sua utilização. Haverá uma breve descrição do funcionamento de alguns atuadores e sensores. Por fim, serão descritos os vários tipos de locomoção que se podem aplicar num robô móvel;
- **Veículos autônomos** – o segundo subcapítulo será dedicado aos veículos, em especialmente aos inteligentes e aos autônomos. Para isso existirá uma análise das suas vantagens e desvantagens, assim como uma descrição das tecnologias presentes;
- **Estado da arte** – pequena demonstração de alguns protótipos de veículos autônomos desenvolvidos por fabricantes de automóveis, assim como de investigadores/estudantes.

### 2.1 Robótica

Foi no século XX que esta área ganhou mais ênfase, contudo, desde sempre que na cultura ocidental existiu o desejo de desenvolver máquinas capazes de substituir o ser humano na realização de tarefas. A primeira referência que mostra o desejo de criar estas máquinas foi exposta por Aristóteles no século IV a.C., onde cita “se os instrumentos pudessem realizar as suas próprias tarefas, obedecendo ou antecipando o desejo das pessoas...”[4].

A palavra “robô” surgiu pela primeira vez em 1921 pelo dramaturgo Karel Capek. Este dramaturgo baseou-se na palavra checa “*robot*” para denominar “trabalho forçado”. Alguns anos mais tarde, em 1942, o cientista e escritor americano Isaac Asimov apresentou a palavra “robótica” [5]. Segundo J. Linert e P. Kopacek, a robótica resulta da união entre duas culturas: a “Ciência” e a “Humanidade” [6].

De acordo com a JIRA (*Japan Industrial Robot Association*), os robôs podem estar divididos em várias classes, sendo elas:

- Classe I: Dispositivo de manipulação manual;
- Classe II: Robô de sequência fixa;
- Classe III: Robô de sequência variável;
- Classe IV: Robô de reprodução;
- Classe V: Robô de controlo numérico;
- Classe VI: Robô Inteligente.

O RIA (*Robotics Institute of America*), determina como robô uma máquina que esteja pelo menos na Classe III. Segundo este mesmo Instituto, um robô é caracterizado como “um manipulador ou dispositivo reprogramável e multifuncional que foi construído com o intuito de mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especializados através de movimentos programados variáveis para a execução de uma variedade de tarefas” [5].

Um robô pode auxiliar ou mesmo dispensar o trabalho de um ser humano. Para um robô funcionar terá de ter um processador para realizar instruções, sensores para captarem o meio que o rodeia e ainda atuadores, para que possa fornecer uma ação. Para que ele execute uma tarefa, terá de ser programado por um humano. Os robôs poderão funcionar sem a supervisão dos humanos para realizar tarefas e ainda tomar decisões pré-programadas dependendo das informações recolhidas pelos sensores. O “cérebro” de um robô é um microprocessador, no qual são instalados programas concebidos para seu controlo [7].

### 2.1.1 Robôs vs. Humanos

Os humanos sempre tentaram encontrar mecanismos que os auxiliassem. A utilização de robôs revolucionou a forma como executamos tarefas, pois são realizadas de forma simples, seguras e eficientes. Os robôs podem ser utilizados para vários fins, quer eles sejam profissionais, como por exemplo aplicados na indústria, quer sejam para fins educacionais. Diariamente, aparecem na sociedade robôs novos capazes de realizar tarefas que no passado eram imagináveis. O autor M. R. Miller, et al., cita que apesar de o uso dos robôs ainda ser pouco significativo comparado com o esperado para daqui a 10 ou 20 anos, já se consegue notar alguns dos benefícios quando se utiliza estas máquinas para desenvolver tarefas.

Algumas dessas vantagens podem ser analisadas na figura 2.1 [7].



Figura 2.1 – Vantagens da utilização de robôs [7]

A utilização de robôs tende a ser crescente ao longo dos anos, contudo, nem sempre apresentam benefícios para a sociedade (ver figura 2.2). Antes de se utilizar um robô para desempenhar uma função, é necessário ter em consideração alguns fatores como [7]:

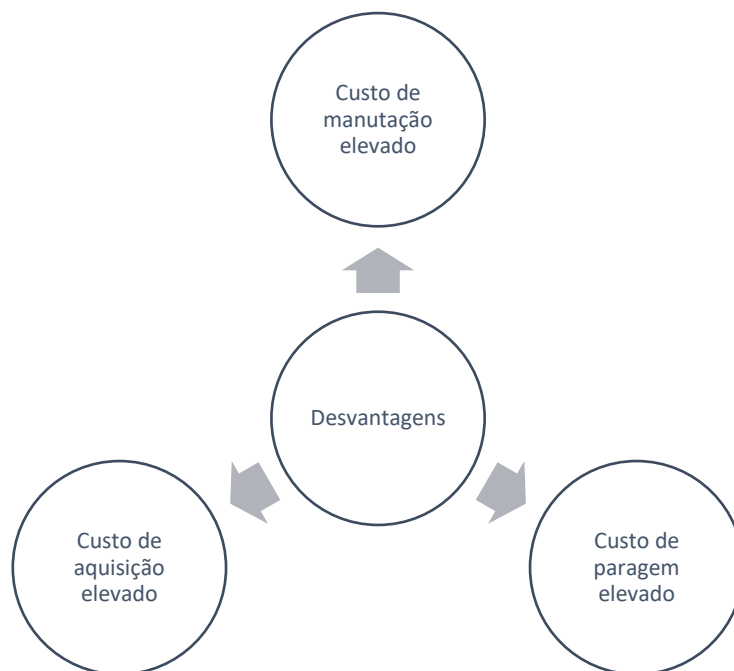


Figura 2.2 – Desvantagens da utilização de robôs [7]

Os autores M. R. Miller, et al., referem que é importante analisar bem cada caso quando se pretende trocar o posto de trabalho de um humano por um robô. Tanto o trabalho executado por um humano como por um robô apresentam vantagens, sendo notória as suas diferenças [7].

A utilização de robôs permite que uma tarefa seja realizada 24 horas por dia, durante 7 dias por semana, garantindo sempre o mesmo desempenho e o mesmo nível de qualidade. A sua manutenção requer técnicos altamente qualificados para os manter em condições ideais de funcionamento. Uma avaria num robô pode afetar toda a cadeia de produção de uma indústria, sendo prejudicial para uma empresa. Alguns robôs podem ser utilizados em diversas tarefas, podendo ser facilmente adaptados a outra tarefa. Outra característica é a necessidade da existência de um vasto *stock* de peças de reposição, o que levará a um investimento extra quer nas peças, assim como de um local para as armazenar.

Por outro lado, a utilização de humanos para realizar certas tarefas pode não ser a opção mais adequada, pois apresenta várias desvantagens. Os funcionários podem adoecer e a sua produtividade durante o trabalho pode ser afetada por várias causas. No entanto, a sua utilização permite dispensá-los caso já não cumpram os requisitos necessários para a sua função ou em momentos de enfraquecimento económico.

Em suma, tanto a utilização de humanos como a de robôs oferecem vantagens e desvantagens, sendo que estas devem de ser estudadas antes de se definir qual dos dois vai executar a tarefa. De acordo com os autores M. R. Miller, et al., várias indústrias realizaram um estudo tendo em conta as características apresentadas anteriormente e concluíram que apesar das desvantagens apresentadas, a utilização de robôs apresenta muitos benefícios, sendo que no futuro a sua utilização será muito mais frequente [7].

### 2.1.2 Robótica Móvel

Desde a segunda metade do século passado que a robótica móvel e a inteligência artificial (AI) têm sido cada vez mais desenvolvidos e melhorados. Em 1950, William Grey Walter desenvolveu vários robôs móveis capazes de contornar obstáculos. Contudo, só em 1956 após a conferência de *Dartmouth College*, outros cientistas da altura como Marvin Minsky denominado de “pai” da inteligência artificial e John MacCarthy mostraram interesse na área. Ao longo do tempo, a sua vasta área de

aplicação tem evoluído de forma gradual, sendo possível observar robôs móveis para uso industrial, doméstico e educacional.

A robótica móvel levou ao surgimento de vários robôs, sendo o mais comum o AGV (*Automated Guided Vehicle*). Este tipo de robô é uma excelente opção para operar em ambientes especificamente modificados para executarem rotas fixas, apresentando assim as seguintes desvantagens:

- Fragilidade;
- Inflexibilidade.

No passado, este tipo de robô era bastante utilizado, contudo, atualmente tornou-se pouco apelativo, uma vez que o custo de alterar a sua rota é bastante elevado assim como a sua incapacidade de ultrapassar alterações imprevistas ao longo do seu percurso [5].

Neste contexto, e de modo a contornar a situação descrita anteriormente, tem-se estudado e desenvolvido robôs móveis autónomos. Este tipo de robôs para além de executarem tarefas para as quais foram desenvolvidos, têm ainda de se deslocar num ambiente que para ele é totalmente desconhecido. Para isso, utilizam os sensores para “imaginar” como será o ambiente ao seu redor, estimar a sua orientação e posição, com o objetivo de se deslocarem para as posições pretendidas.

Têm sido desenvolvidos vários métodos para aumentar a eficiência do robô, sendo um deles a cartografia. Este método está a gerar algum interesse por parte dos cientistas, porque dependendo do algoritmo aplicado para se obter a localização e a navegação de um robô móvel, é possível aumentar, ou não, a autonomia do robô, assim como divergir nas várias áreas de aplicação.

A cartografia está dividida em dois ramos principais, sendo eles:

- Mapas métricos – representação do ambiente com precisão geográfica;
- Mapas topológicos – gráficos com localizações representativas e suas ligações.

Um robô móvel foi concebido para se deslocar entre vários pontos. Para realizar esta operação, terá de traçar uma trajetória entre a sua localização e o destino pretendido. Conhecendo o trajeto a seguir, o veículo recorrerá aos seus sensores para recolherem a informação ao seu redor, sendo que o processador analisará essa informação e com o auxílio dos atuadores o veículo será guiado até ao destino, no qual

terá de arranjar uma solução para contornar todos os imprevistos que surjam ao longo do percurso.

A figura 2.3 representa o modo de execução de um robô, no qual utiliza os sensores para recolher informação, o controlador para tomar decisões e os atuadores para executar uma ação.

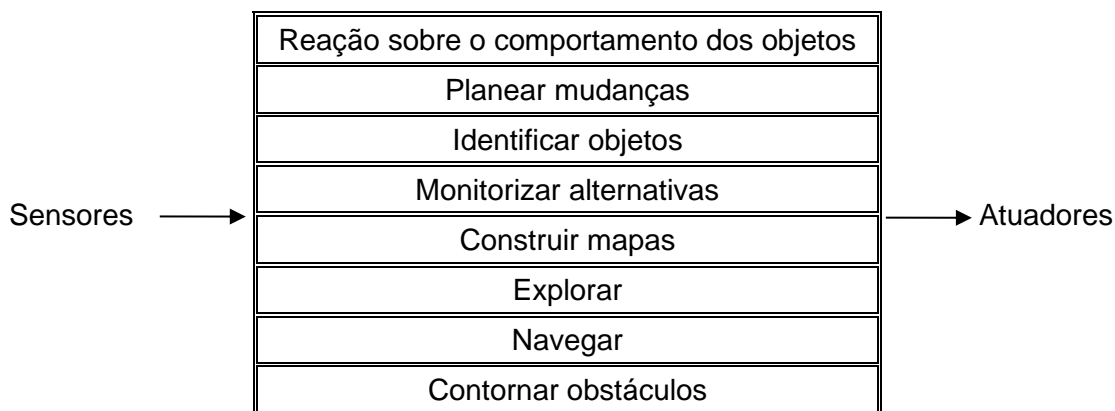


Figura 2.3 – Sistema de controlo de um robô móvel. Adaptado de: [5]

Após terem sido recolhidas as informações do ambiente em que o robô está a operar, este tem de tomar uma decisão e recorrer aos atuadores para executar um movimento. Com o objetivo de aumentar a eficiência de um robô, foram desenvolvidas duas abordagens, sendo elas a local e a global. Estas abordagens auxiliam a planear o melhor trajeto e a evitar colisões com obstáculos. Inicialmente, só existiam essas duas abordagens e apenas podiam ser utilizadas individualmente, tornando a utilização de robôs muito limitada. Porém, foi desenvolvida a abordagem híbrida, que combina as metodologias utilizadas tanto na abordagem local como na abordagem global [8].

Ambas as abordagens auxiliam na eficiência do robô, sendo a abordagem global a responsável por planear a trajetória do veículo, quando é conhecido o ambiente ao seu redor. Por outro lado, a abordagem local, faz uso de algumas informações do robô e da análise sensorial para desenvolver métodos reativos (ver figura 2.4). A principal vantagem da utilização desta abordagem é não utilizar esquemas de localização ou mapas para fazer o planeamento da trajetória [8].

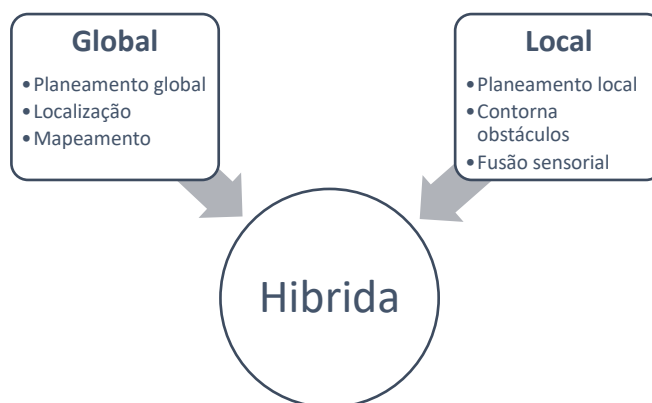


Figura 2.4 – Conceito de navegação robotizada. Adaptado de: [8]

### 2.1.2.1 Sensores

Um robô para funcionar corretamente, necessita de conhecer o mundo ao seu redor, para isso desenvolveram-se componentes eletrônicos denominados de sensores. Os sensores permitem detetar e medir algumas propriedades físicas, como temperatura, iluminação, peso, entre outras. Os sensores podem ser classificados de acordo com o tipo de energia, a informação que recolhem, entre outros.

Os vários sensores podem ser qualificados consoante a informação que recolhem, como se pode ver na tabela 2.1 [5]:

Tabela 2.1 – Propriedades dos sensores: Externos vs. Internos

Sensores externos		Sensores internos
Captam propriedades do meio ambiente, como distâncias, temperaturas, entre outras. Este grupo ainda pode estar dividido em:		Recolhem informações internas do sistema robótico. Por exemplo, um <i>encoder</i> pode recolher qual é a posição de um braço robótico.
Sensores de contacto	Sensores sem contacto	
Recolhem informação a partir do contacto	Colhem os dados sem necessidade contacto	

Para além da classificação apresentada anteriormente, os sensores podem ainda ser classificados em dois grupos, nomeadamente (tabela 2.2) [5]:

Tabela 2.2 – Propriedades dos sensores: Visuais vs. Não visuais

Sensores visuais	Sensores não visuais
Reconhecem o ambiente ao seu redor através da luz refletida pelos obstáculos.	Para captarem o meio envolvente, utilizam o áudio e outras propriedades.

Os sensores podem ser classificados de acordo com o tipo de energia utilizada na deteção do meio ambiente, podendo ser (tabela 2.3) [9]:

Tabela 2.3 – Propriedades dos sensores: Ativos vs. Passivos

Sensores ativos	Sensores passivos
Recolhem informação através da emissão de energia. Esta propriedade pode ser observada em sensores <i>laser</i> , sensores ultrassónicos, sensores de contato, entre outros.	Estes sensores não emitem qualquer tipo de energia, sendo que para detetarem um obstáculo captam a energia emitida pelo mesmo. O sensor mais comum que possui esta característica são os sensores de visão, onde a imagem é recolhida através de uma matriz de pontos.

No presente subcapítulo serão apresentados vários sensores que podem ser aplicados na robótica móvel. Antes de se realizar uma breve descrição dos mesmos, é importante classificá-los consoante as propriedades descritas anteriormente (tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Classificação dos vários sensores de acordo com as suas propriedades

	Externo/Interno	Visual/Não Visual	Ativo/Passivo
<b>Sensores de contato</b>	Externo	Não visual	Ativo
<b>Sensores Infravermelhos</b>	Externo	Não visual	Ativo
<b>Sonar</b>	Externo	Não visual	Ativo
<b>Laser</b>	Externo	Não visual	Ativo
<b>Sensores de orientação</b>	Externo	Não visual	Passivo
<b>Codificadores de eixo</b>	Interno	Não visual	Ativo
<b>Sensores de visão e imagem</b>	Externo	Visual	Passivo

Após serem discriminadas todas as propriedades que definem um sensor, foi possível construir uma tabela que classifique os vários sensores de acordo com as propriedades. Conhecer as propriedades que cada sensor possui não é suficiente na escolha de um sensor, é bastante importante conhecer também o seu funcionamento. De seguida será realizada uma breve descrição dos vários sensores disponíveis no mercado.

### Sensores de Contato

Tal como o nome indica, estes sensores são utilizados para detetar o contacto físico entre o sensor e um objeto. Os sensores de contacto mais simples são os *microswitches*, também conhecidos como sensores de *whisker*. Estes sensores possuem um circuito interno e quando este entra em contacto com um obstáculo, esse circuito fecha e gera um sinal elétrico ao controlador, podendo ser comparado a um interruptor [5].

Para além do método de construção presente nos sensores de *whisker*, existem outros sensores de contacto que possuem outros procedimentos para recolher informação. Esses sensores podem ser:

- Extensómetros: o sensor é colocado numa superfície e quando esta é deformada, o valor da sua resistência interna é alterado;
- Transdutores piezoelétricos: geram uma carga quando são deformados.

## Sensores Infravermelhos

Segundo o autor U. Nehmzow, os sensores infravermelhos são os sensores sem contacto mais simples que existem para a deteção de obstáculos. Durante o processo de deteção de obstáculos, estes emitem uma luz infravermelha de baixa frequência, para se diferenciar da radiação emitida pela luz solar, e recolhem os dados resultantes da reflexão da luz emitida com a superfície do obstáculo [5].

Geralmente, este sensor é utilizado para detetar obstáculos que se encontrem relativamente próximos do sensor. Porém, a utilização deste tipo de sensor nem sempre é favorável, pois a cor da superfície do obstáculo poderá afetar a qualidade dos resultados obtidos da medição. As superfícies pretas, não possuem capacidade de refletir a luz infravermelha, logo o sensor não terá capacidade de as detetar. Quando se trata de superfícies coloridas, consoante a cor da superfície, estas podem refletir mais ou menos a luz emitida [5].

## Sonar e Laser

Tanto o sonar como o *laser* são utilizados para medir, detetar e localizar obstáculos. Os métodos de funcionamento de ambos os sensores são muito semelhantes, diferenciando-se apenas pelo tipo de feixe emitido para recolher informação. A única diferença entre o sonar e o *laser* está no impulso emitido. Enquanto o sonar faz uso de impulsos de som curto para recolher informação, o *laser* utiliza pulsos de luz curtos [5].

Durante o seu funcionamento, estes sensores possuem um emissor que emite um sinal, de luz para o caso do *laser* e de som para o caso do sonar, que ao colidir com a superfície do obstáculo é refletido para o recetor desse sensor. Como a velocidade do seu sinal é conhecida, o controlador conta o tempo desde a emissão até à sua receção. Sabendo esse tempo, é possível determinar a distância que o sinal percorreu e em simultâneo a distância que se encontra o obstáculo [5].

Estes sensores podem ser utilizados para diversos fins, como por exemplo, o sonar é utilizado em navios para detetar a presença de obstáculos no mar, assim como o *laser* está presente em algumas tecnologias como o RADAR (*Radio Detection and Ranging*) e o LIDAR (*Light Detection and Ranging*) [5]. Mais à frente, em [2.2.2.5](#), existirá uma abordagem mais profunda destes sensores.

## Sensores de orientação

Desde que a robótica móvel começou a ser desenvolvida, sempre houve alguma dificuldade para se conhecer com alguma precisão a localização e a orientação do robô sem a necessidade de se utilizar algum equipamento externo. Neste contexto, foram desenvolvidos sensores capazes de solucionar este problema, sendo os sensores mais comuns: os giroscópios e as bússolas [10].

Na robótica móvel, os giroscópios são sensores utilizados para medir a velocidade angular do robô. Existem dois tipos de giroscópios, sendo eles mecânicos ou óticos [11] (tabela 2.5):

Tabela 2.5 – Diferença entre giroscópio mecânico e ótico

<b>Giroscópio mecânico</b>	<b>Giroscópio ótico</b>
Mede a orientação do veículo através de uma massa rotativa que gira em torno do seu eixo de rotação.	Faz uso de um <i>laser</i> para medir a orientação do robô. Para isso, emite dois feixes de luz em direções opostas, no qual estes colidem com os obstáculos e retornam ao sensor. Caso o robô esteja parado, esses feixes chegam em simultâneo ao sensor. Caso os tempos sejam diferentes significa que houve uma rotação ou inclinação do robô.

Para além dos giroscópios, as bússolas também permitem determinar a orientação absoluta de um robô. Para isso, este sensor recorre ao campo magnético gerado pelo planeta Terra. Este dispositivo quando é devidamente integrado permite ainda determinar a direção do robô [12]. Atualmente, este sensor tem várias aplicações, sendo uma delas o protótipo em desenvolvimento neste trabalho final de mestrado.

## Codificadores de eixo

Os codificadores de eixo, também conhecidos como *encoders*, são um tipo de sensores cujo a sua função é medir a posição ou velocidade angular de um robô. Para isso, estes dispositivos são colocados nos eixos de rotação, cujo resultado da sua medição é uma representação binária da sua posição [5] [9].

Este sensor pode ser utilizado para vários fins, sendo um deles medir a velocidade de translação e estimar a posição de um robô ao fim de um intervalo de tempo. Para que isso seja possível, basta colocar um *encoder* em cada roda e conhecer

a odometria do veículo. Na robótica móvel, existem disponíveis dois tipos de codificadores, sendo eles os absolutos e os incrementais [9] [13] (tabela 2.6).

Tabela 2.6 – Diferença entre um codificador de eixo absoluto e incremental

Codificadores absolutos		Codificadores incrementais
Óticos	Magnéticos	Converte um movimento angular ou de posição de um eixo em código analógico ou digital.
Possui um disco binário com $n$ segmentos e $2^n$ setores. Cada setor representa uma posição absoluta	Funcionam em simultâneo com vários sensores com o objetivo de detetar o campo magnético do disco rotativo em relação ao eixo	

### Sensores de visão e imagens de processamento

A utilização de sensores de visão e imagens de processamento têm sido muito recorrentes na robótica móvel, pois apresentam uma boa relação “quantidade de informação / custo” e ainda uma vasta área de aplicação, como mapeamento ou reconhecimento de objetos.

Vários investigadores estudam diariamente como aumentar o campo de visão recolhido pelo sensor, no qual concluíram que se alterassem a configuração de monocular para binocular, trinocular ou ainda para câmaras omnidirecionais, conseguiam obter um campo de visão mais vasto. Cada vez é mais recorrente o uso de câmaras omnidirecionais, pois possuem um campo de visão de 360°, o seu preço é relativamente baixo comparando com outros sensores, as qualidades das suas imagens são mais estáveis e possibilita estimar a posição e localização de um robô. A principal desvantagem da utilização de sensores de visão é a sensibilidade às alterações de luminosidade [5].

#### 2.1.2.2 Atuadores

Após a informação ter sido recolhida pelos sensores e processada pelo controlador, é necessário realizar uma ação. Para isso, foram desenvolvidos componentes denominados de atuadores, que convertem um sinal de entrada num movimento físico ou outro tipo de ação [5].

Estes equipamentos possuem várias características, permitindo assim serem aplicados em diversos setores, entre eles, automação industrial, equipamentos médicos, veículos, sistemas de controlo, entre outras. Os atuadores podem ser classificados consoante o tipo de energia utilizada, sendo eles:

- Atuadores elétricos;
- Atuadores pneumáticos;
- Atuadores hidráulicos.

### Atuadores elétricos

Os atuadores elétricos, tal como o nome indica, utilizam energia elétrica para realizar uma ação no meio ambiente. Na robótica móvel, o tipo de atuador elétrico que é mais utilizado é o motor elétrico. A utilização deste atuador, oferece uma variedade de benefícios como a facilidade de operação, boa capacidade de controlo e ainda binários moderados [5].

Os motores elétricos podem estar classificados da seguinte forma [5] (tabela 2.7):

Tabela 2.7 – Diferença entre um motor de passo-a-passo e um motor DC

<b>Motores de passo-a-passo</b>	<b>Motores DC (corrente contínua)</b>
A sua utilização destina-se quando é pretendido um movimento mais preciso	Motor de fácil utilização, pois conhecendo a voltagem aplicada às suas bobinas, é possível determinar a sua velocidade de rotação

### Atuadores pneumáticos

Os atuadores pneumáticos fazem uso de ar comprimido para realizar um movimento físico. Este tipo de atuador, normalmente atua em posições fixas, sendo o ar comprimido entre a câmara de ar e o êmbolo do atuador. Este atuador apresenta algumas vantagens, como a facilidade de utilização e o baixo custo comparado com os atuadores hidráulicos e elétricos. Em contrapartida, estes atuadores não apresentam muita precisão [5].

## Atuadores hidráulicos

Outro tipo de energia que pode ser utilizada para gerar uma ação é a utilização de sistemas hidráulicos. Geralmente, este tipo de atuador não é utilizado na robótica móvel porque apresenta um grande custo, o seu peso é bastante elevado e ainda apresenta uma grande contaminação de óleos. Por outro lado, caso a sua utilização fosse comum, este tipo de atuador oferecia a possibilidade de movimentar grandes cargas com bastante precisão [5].

### 2.1.2.3 Tipos de Locomoção

A robótica móvel permite que um dispositivo robótico navegue por meios próprios através de um sistema de locomoção. Para que seja possível movimentar um robô com sucesso é necessário ter em consideração o fim para o qual o robô foi construído.

Na natureza é possível observar que existe uma grande variedade de sistemas de locomoção independentemente do meio de navegação do ser vivo. No desenvolvimento de um robô móvel, é importante analisar qual o sistema de locomoção apresenta maior eficiência de acordo com o ambiente em que o robô vai operar. Na figura 2.5, são apresentados alguns dos mecanismos que permitem movimentar na superfície terrestre [8].

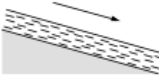


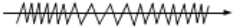

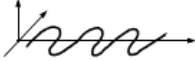






Tipo de movimento	Resistência ao movimento	Cinemática do movimento
Fluxo em um canal 	Forças Hidrodinâmicas	Turbulência 
Rastejar 	Forças de fricção	Vibrações Longitudinais 
Deslizamento 	Forças de fricção	Vibrações Transversais 
Corrida 	Perda de energia cinética	Movimento oscilatório de um pêndulo multi-link 
Pulando 	Perda de energia cinética	Movimento oscilatório de um pêndulo multi-link 
Andando 	Força gravitacional	Rolamento de um polígono 

Figura 2.5 – Mecanismos de locomoção usados em sistemas biológicos. Adaptado de: [14]

Ao se analisar as várias formas de como os seres vivos se movem na natureza, consegue-se observar que existe uma grande variedade de métodos de locomoção. Um dos maiores inconvenientes de se replicar um sistema de locomoção de um ser vivo a um robô móvel é devido à elevada complexidade mecânica da estrutura. Quando se replica este tipo de estruturas, é espectável que essa estrutura se assemelhe o mais possível com o original, sendo os músculos do ser vivo substituídos por componentes mecânicos, podendo causar alguns problemas como: excesso de peso ou estruturas de grande dimensão [14].

De forma a aumentar a eficiência do sistema de locomoção presente no robô móvel sobretudo em terrenos planos, existe um mecanismo desenvolvido pelo ser humano que não é possível ser observado na natureza. Esse mecanismo é a roda. De acordo com Siegwart, Roland e Nourbakhsh, Illah R., este mecanismo pode ser equiparado ao sistema de locomoção de um bípede, ou seja, de um rolamento de um polígono. Se o passo de um bípede for igualado ao lado de um polígono, significa que ao reduzir o passo do bípede os lados do polígono ficam menores, aproximando-se o polígono de um círculo, como se pode observar na figura 2.6.

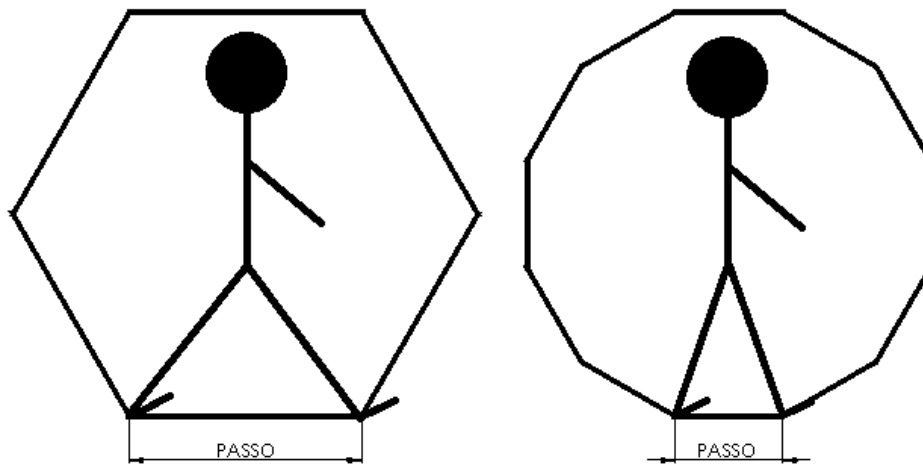


Figura 2.6 – Comparação entre um polígono com 6 e 12 lados

De acordo com Siegwart, Roland e Nourbakhsh, Illah R., a construção de um robô com pernas exige uma maior complexidade mecânica relativamente a um robô que utilize rodas para se locomover. Essa complexidade é devida à locomoção com pernas possuir um maior número de graus de liberdade. Apesar da locomoção com rodas ser de simples construção, demonstra uma excelente eficiência em terrenos planos. No entanto, a eficiência pode ser afetada pela dureza e planície do solo [14].

## Locomoção com Pernas

Ao se analisar sistemas de locomoção presentes na natureza, é possível observar que existe uma grande variedade de sistemas de locomoção. Um desses sistemas é a locomoção com pernas. Este sistema é utilizado por vários seres vivos, quer sejam mamíferos, répteis ou insetos, alterando apenas a sua configuração. Na seguinte figura, é possível observar várias configurações de pernas presentes nos mamíferos, nos répteis e nos insetos (ver figura 2.7).

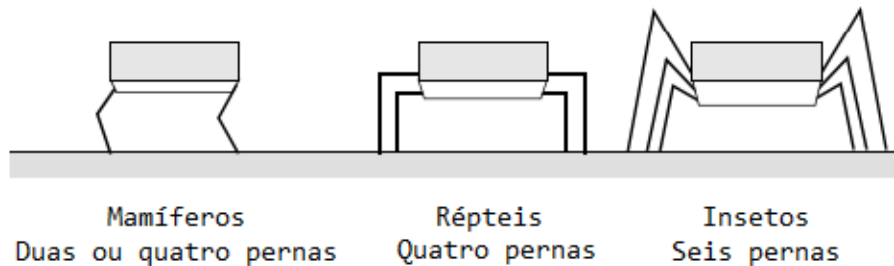


Figura 2.7 – Configurações de pernas. Adaptado de: [14]

Ao longo do tempo, a forma de como os seres vivos se movem tem-se aperfeiçoando, ficando cada vez mais eficiente. No passado, há cerca de 1,8 a 2,5 milhões de anos, os primogénitos do ser humano começaram a desenvolver algumas capacidades, sendo o equilíbrio uma delas, o que permitiu a locomoção em duas pernas [15]. Caso os humanos possuíssem três pernas não seria necessário o desenvolvimento do equilíbrio, desde que o centro de gravidade estivesse dentro da estrutura do tripé [14].

Para se poder utilizar a locomoção com pernas, para além do robô ter de se equilibrar, este terá ainda de possuir a capacidade de movimentar as suas pernas. Para isso, os autores Siegwart, Roland e Nourbakhsh, Illah R. citam a necessidade de o robô possuir pelo menos dois graus de liberdade em cada perna. Quando é pretendido que o robô execute movimentos mais complexos, é aconselhado o uso de três graus de liberdade. Tal como a evolução que houve com o ser humano, algumas pesquisas mais recentes defendem que devem de ser utilizados quatro graus de liberdade, sendo este último aplicado na zona do tornozelo, permitindo assim um contacto mais consistente entre a sola do pé e a superfície [6] [14].

Resumindo, quando se pretende desenvolver um robô que utilize a locomoção com pernas tem de se ter em consideração o tipo de movimento que realizará, assim como o solo que irá operar. Quantos mais graus de liberdade se adicionar à perna do robô, mais complexo será o controlo da perna e haverá conseqüentemente um aumento de energia requerida assim como um aumento do peso.

## Locomoção com Pernas - Humanoides

A robótica tem mostrado ser uma excelente solução para auxiliar ou mesmo substituir o ser humano na execução de tarefas. Neste contexto, tem-se desenvolvido novos robôs para operarem em zonas que são bastantes prejudiciais para o ser humano, como missões espaciais, campos de minas, poços de petróleo, entre outros.

Contudo, nem todos os robôs são desenvolvidos com o intuito de executar tarefas difíceis para um humano. Um exemplo disso são os humanoides, que são robôs para entretenimento ou auxiliar o ser humano [16]. Os autores H. Taheri e C. X. Zhao, definem um humanoide como “uma máquina programável que pode imitar as ações e a aparência de um ser humano” [17]. O desenvolvimento destes robôs tem sido um dos maiores objetivos da robótica, pois é desejado que eles se tornem autônomos, alcançando ou superando a capacidade e o desempenho do ser humano [6].

Para além de apresentarem uma forma corporal semelhante a um humano, ou seja, um tronco com cabeça, dois braços e duas pernas, o autor retrata que vários investigadores estão a desenvolver humanoides que possuem características típicas dos humanos, como realizar pensamentos, mostrar emoções ou observar o ambiente envolvente. Para além destas competências, estes robôs possuem ainda a capacidade de comunicação facial, reconhecimento e comunicação através da voz [6]. Para que isto seja possível, estes robôs à semelhança dos humanos, estão equipados com o sentido auditivo, visual, cinestésico, vestibular e táctil [16]. Na tabela 2.8 é possível compreender alguns dos benefícios da utilização destes robôs, assim como algumas desvantagens.

*Tabela 2.8 – Vantagens e desvantagens dos humanoides*

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Capacidade de navegação sem restrições em qualquer ambiente;</li><li>• Conseguem replicar formas de locomoção típicas dos humanos, como: andar, correr, saltar, rebolar, escalar, entre outras.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Por possuírem vários graus de liberdade, levará a um consumo exagerado de energia;</li><li>• Atualmente não existem aplicações reais na indústria para se utilizarem humanoides;</li><li>• O custo de fabrico é bastante elevado;</li><li>• Um erro de programação pode pôr em perigo a vida dos seres vivos;</li><li>• Podem ser utilizados para cometer crimes.</li></ul>

## Locomoção com Rodas

Apesar de nenhum ser vivo utilizar o sistema de locomoção com rodas para se movimentar, este sistema é o mais utilizado pelos seres humanos para se deslocarem de um local para o outro no solo. Este sistema de locomoção pode ser observado em vários setores, como transporte, logística, entre outros.

A sua utilização tem vindo a aumentar com o passar do tempo, pois este sistema de locomoção apresenta bastante simplicidade de utilização, o custo de implementar este sistema é relativamente baixo comparado aos outros sistemas e um baixo consumo de energia [8].

Desde a criação do primeiro robô móvel com rodas, até aos desenvolvidos atualmente, já foram concebidos robôs com várias configurações, alterando o tipo de roda utilizado, podendo ser rodas motoras, orientáveis, omnidirecionais ou *mecanum*, ou diferenciando-se pelo tipo de acionamento (diferencial, sincronizado e omnidirecional). Ao se analisar a cinemática destes robôs, esta pode-se dividir esta em duas categorias: holonómicos e não holonómicos [8].

De acordo com as características apresentadas anteriormente, os automóveis possuem um acionamento diferencial e o tipo de roda é a motora. Apesar desta configuração ser bastante utilizada, ela apresenta algumas limitações, como o impedimento de realizar um deslocamento e uma rotação em simultâneo. Este constrangimento afeta bastante o veículo quando está perante um percurso estreito e tem de contornar obstáculos [8].

### Locomoção com rodas - tipos de rodas

No desenvolvimento de um robô móvel, para além de se compreender os requisitos que levaram à construção do robô, é importante conhecer as várias configurações mecânicas que podem estar presentes no robô, assim como os vários tipos de rodas que podem ser utilizados. Apesar de existirem uma grande variedade de rodas para robôs móveis, neste subcapítulo apenas vão ser discutidas duas, as rodas convencionais e as rodas omnidirecionais.

## Rodas motoras

As rodas motoras ou convencionais são conhecidas pela sua simplicidade de controlo. Estas rodas possuem apenas dois graus de liberdade o que as possibilita de girar em duas direções. A construção deste tipo de roda pode variar, pois elas podem possuir diferentes formatos e tamanhos. A roda motora quando acoplada a um acionamento diferencial, permite realizar a rotação do robô quando se aplicam velocidades de rotação diferentes, ou sentidos de rotação opostos [18] [19].

Uma das maiores características deste tipo de roda é a capacidade de suportar grandes cargas e possuir uma elevada tolerância às irregularidades do solo. Em contrapartida, apresentam um enorme atrito entre a roda e o solo, o que reduz a precisão do posicionamento, levando a um desgaste do pneu e a um aumento da energia consumida [18].

## Rodas omnidirecionais

Apesar de ser possível construir um robô móvel omnidirecional com rodas convencionais, é cada vez mais comum que a sua construção seja realizada com rodas omnidirecionais [20]. Este tipo de roda proporciona ao robô mais eficiência uma vez que é possível realizar movimentos de rotação e translação em simultâneo. Esta característica permite construir robôs que se desloquem em qualquer direção sem a necessidade de realizar uma curva na sua trajetória, apresentando uma mais-valia quando existe a necessidade de realizar movimentos em locais estreitos e complexos [8].

As rodas omnidirecionais ou multidirecionais, possuem um *design* simples e o seu custo é bastante baixo [21]. Na figura 2.8 observa-se que com a combinação da rotação das várias rodas, é possível realizar movimentos de rotação e translação.

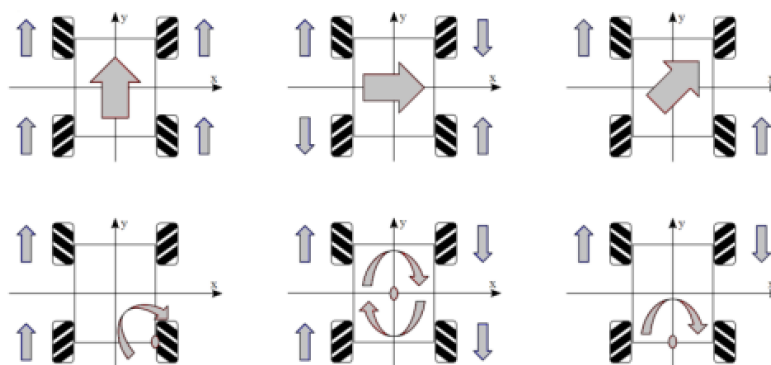


Figura 2.8 – Movimentação de um robô com rodas Omnidirecionais

Existem várias configurações de rodas para se construir um robô omnidirecional, assim como vários tipos de rodas, podendo estas ser universais, direcionais, *mecanum*, esféricas, ortogonais, entre outras. Cada tipo de roda oferece vantagens e a sua utilização pode ser bastante variada.

## 2.2 Veículos

O ser humano sempre procurou mecanismos com o intuito de aumentar a sua eficácia ao desempenhar uma tarefa. Antes da existência dos automóveis, o ser humano recorria ao auxílio de animais para se movimentar de um local para o outro. Contudo, este método de transporte não era o mais eficiente, pois exigia muito esforço dos animais. Com o surgimento de novas tecnologias, o ser humano tentou desenvolver uma máquina capaz de o movimentar de um local para outro comodamente.

No início do século XX, os veículos eram muito básicos e possuíam pouca tecnologia o que os tornava pouco eficientes. Contudo, com o desenvolvimento de novas tecnologias e o aperfeiçoamento das mesmas, os veículos tornaram-se cada vez mais modernos e sofisticados chegando aos níveis de eficiência atuais.

Neste contexto, uma das tecnologias que tem sido aplicada aos veículos, é o uso da robótica para auxiliar a condução, oferecendo uma condução mais confortável e segura para todos os ocupantes do veículo. Inicialmente, esta tecnologia era utilizada para monitorizar alguns parâmetros do veículo e aumentar a eficiência do veículo, como por exemplo a aplicação de uma ECU (*Electronic Control Unit*), também conhecida como centralina do veículo. Contudo, com o passar do tempo, o uso desta tecnologia é mais recorrente, sendo que uma das tendências do futuro é tornar os veículos totalmente autônomos.

No seguimento das tendências dos veículos, no presente subcapítulo será efetuada uma pequena abordagem sobre veículos autônomos, sendo retratadas os seus benefícios para a sociedade, assim como o seu funcionamento.

### 2.2.1 Veículos Inteligentes

No passado foram desenvolvidos vários produtos que revolucionaram a sociedade, sendo um deles o automóvel. Os autores B. Siciliano e O. Khatib, citam que em 2008 existiam mais de 800 milhões de veículos no planeta terra [22]. Uma pesquisa mais recente, afirma que em 2022 existem mais de 1,3 mil milhões de automóveis no mundo [23]. De acordo com os autores M. M. Shukurov, et al., é espectável que durante os próximos 30 anos existam mais 1,2 milhões de automóveis [24].

Enquanto no passado os automóveis eram totalmente mecânicos, hoje-em-dia já possuem bastante tecnologia, oferecendo mais segurança e conforto para os ocupantes do veículo.

A presença de veículos inteligentes nas vias públicas é cada vez mais comum, uma vez que este tipo de veículo possui dispositivos de percepção, raciocínio e acionamento, o que permite automatizar algumas tarefas de condução, sendo elas:

- Evitar obstáculos;
- Seguir o veículo da frente;
- Ultrapassar o tráfego mais lento;
- Determinar o percurso a seguir;
- Evitar situações perigosas;
- Entre outras.

### 2.2.2 Veículos Autónomos

A produção de veículos decorre em todos os continentes do planeta, contudo, cerca de 28% da produção mundial é concebida no continente europeu tornando-o o maior fabricante de automóveis. Os fabricantes de automóveis tentam oferecer ao mercado veículos que possuam uma ampla variedade de tecnologias, com o intuito de satisfazer todos os seus clientes. Com o objetivo de proporcionar viagens mais seguras e cómodas, os fabricantes estão a trabalhar e desenvolver veículos autónomos [25].

Os autores J. Ondruš, et al., definem um veículo autónomo como “qualquer veículo que tenha a capacidade de se deslocar sozinho entre vários pontos, sem a necessidade da contribuição humana”. Estes veículos prometem revolucionar o setor automóvel, pois não necessitarão de um condutor para os guiar, o que levará a um reaproveitamento dos tempos que seriam destinados à condução, para executar outra tarefa [25] [26]. Para além deste benefício para a sociedade, é expectável que o número de acidentes reduza drasticamente, cerca de 80%, o que levará a uma redução do valor do seguro automóvel [25].

Os veículos autônomos para além de serem utilizados para locomover seres humanos, poderão ser utilizados para outros fins, como: na agricultura para semear campos agrícolas, ou para fins bélicos, como por exemplo analisar campos minados [22].

No presente subcapítulo, será apresentada a história destes veículos, assim como os benefícios da sua utilização. Será também elaborada uma breve descrição do funcionamento deste tipo de veículos, assim como das tecnologias que estão presentes.

#### *2.2.2.1 História dos Veículos Autônomos*

Desde os primeiros veículos fabricados, sempre houve o desejo de desenvolver um veículo autônomo. O primeiro veículo considerado autônomo foi desenvolvido nos anos 20 do século XX. Este veículo era controlado via rádio por um segundo veículo que o perseguia. Algumas décadas mais tarde, acreditava-se que o desenvolvimento destes veículos passaria também por a criação de rodovias equipadas com dispositivos eletrônicos o que levaria a grandes custos [27].

Uns anos mais tarde, nos anos 80 do século passado, surgiram os primeiros protótipos de veículos autônomos, cujo objetivo é navegar sem a intervenção humana. O primeiro protótipo surgiu em 1984, na Universidade *Carnegie Mellon*, denominado de projetos *Navlab* e *ALV*. Três anos mais tarde, a Universidade *Bundeswehr* de Munique em parceria com a fabricante de automóveis Mercedes-Benz®, lançaram o projeto *EUREKA Prometheus*. Desde então, têm sido fabricados e desenvolvidos vários protótipos de veículos autônomos [25].

Para garantir a segurança dos utilizadores, os protótipos eram utilizados em ambientes controlados, contudo, em 2013 deu-se um grande passo, pois foram realizados pela primeira vez testes nas ruas de Londres. Um ano mais tarde, a fabricante Tesla Motors® instalou nos seus veículos um piloto automático, tornando os seus veículos semiautônomos. Em 2015, foi permitida a utilização de veículos totalmente autônomos em alguns estados norte americanos [25].

### 2.2.2.2 Classificação de Veículos Autónomos

Com o desenvolvimento de veículos autónomos, é importante classificá-los de acordo com a sua automação. Neste contexto, em 2014, a SAE (*Society of Automotive Engineers*) desenvolveu um sistema de classificação baseado em seis níveis, sendo classificados todos os veículos desde os totalmente mecânicos (nível 0) aos totalmente autónomos (nível 5) [25].

O indicador que fundamenta esta classificação é a quantidade de intervenções entre o condutor e o veículo e o grau de atenção que o condutor do veículo necessita durante a condução. A norma por detrás dessa classificação é a Norma SAE J3016, 2016 [25], [28][29][30]. As designações de cada nível estão descritas na tabela 2.9 [30]:

Tabela 2.9 – Níveis SAE de Condução Autónoma. Fonte: [30]

SAE nível	Nome	Descrição	Movimentação da Direção e Aceleração/Desaceleração do veículo	Monitorização do Ambiente de Condução	Desempenho da Tarefa de Condução Dinâmica	Capacidade do Sistema (Modos de Condução)
<b>O condutor controla o ambiente de condução</b>						
<b>0</b>	<b>Sem automação</b>	O condutor é responsável por todos os aspetos da tarefa de condução, mesmo perante um sistema de alerta de intervenção	Condutor	Condutor	Condutor	n/a
<b>1</b>	<b>Assistente de condução</b>	É executado um modo específico de condução que assiste o condutor, quer pela direção ou aceleração/desaceleração, com base em informações recolhidas no ambiente de condução. No entanto, é esperado que o condutor execute todas as restantes tarefas da condução dinâmica do veículo	Condutor e Sistema	Condutor	Condutor	Alguns modos de condução
<b>2</b>	<b>Automação Parcial</b>	A execução específica do modo de condução é realizada por um ou mais sistemas de assistência ao condutor que auxiliam no controlo da direção e/ou aceleração/desaceleração, com base em informações recolhidas no ambiente de condução. É esperado que o condutor execute todas as outras tarefas da condução dinâmica do veículo	Sistema	Condutor	Condutor	Alguns modos de condução
<b>O sistema de condução automatizado monitoriza o ambiente de condução</b>						
<b>3</b>	<b>Automação Condicionada</b>	Todos os aspetos da tarefa de condução dinâmica são automatizados por um modo de condução específico, no qual é esperado que o condutor responda adequadamente quando é solicitado um pedido de intervenção	Sistema	Sistema	Condutor	Alguns modos de condução
<b>4</b>	<b>Alta Automação</b>	Todos os aspetos da tarefa de condução dinâmica são automatizados por um modo de condução específico, mesmo que o condutor não responda adequadamente quando é solicitado um pedido de intervenção	Sistema	Sistema	Sistema	Alguns modos de condução
<b>5</b>	<b>Automação Completa</b>	Todos os aspetos da tarefa de condução dinâmica, independentemente das condições da estrada ou ambientais, são automatizados por um sistema de condução em tempo integral	Sistema	Sistema	Sistema	Todos os modos de condução

### 2.2.2.3 Vantagens e Desvantagens da utilização de veículos autónomos

O uso de veículos autónomos é cada vez mais recorrente, pois apresentam diversos benefícios para a sociedade. A utilização deste tipo de veículo oferece aos seus utilizadores uma viagem cómoda, agradável e sem esforço. Contudo, a maior vantagem que estes veículos apresentam é a segurança durante a condução. No futuro, é espectável que a sua utilização aumente, oferecendo vários benefícios para a sociedade, como [25]:

- Uma vez que o veículo é totalmente autónomo, os seus utilizadores não necessitarão de possuir carta de condução para dirigir o veículo, o que permite:
  - Aumentar o número de utilizadores, como: crianças, idosos, pessoas incapacitadas e com poucos recursos monetários;
  - Reaproveitamento do tempo destinado à condução para realizar outra tarefa.
- Redução de vários fatores, como:
  - Número de acidentes e colisões rodoviários, sendo consequência a redução do:
    - Número de mortes e feridos;
    - Valor do seguro automóvel devido há falta de acidentes;
    - Custo de reparação do veículo após acidente;
    - Fiscalizações policiais na via pública.
  - Congestionamento de tráfego, o que levará ao aumento:
    - Da capacidade de escoamento do fluxo de trânsito;
    - Dos limites de velocidade.
  - Espaço físico durante a manobra de estacionamento;
  - Número de sinais de trânsito;
  - Furto de veículos, pois a sua localização é conhecida uma vez que estão ligados à *internet*;
  - Utilização do acelerador e do sistema de travagem, o que levará a:
    - Condução mais suave;
    - Redução do consumo de combustível.

Apesar da utilização destes veículos ser bastante vantajosa para a sociedade, nem sempre apresentam um benefício. Estes veículos apresentam algumas desvantagens, como [25]:

- O destino final não corresponder ao pretendido pelo utilizador;
- Aumento de vários parâmetros, como:
  - Taxa de desemprego de algumas profissões que exigem a condução, tal como:
    - Taxistas, motoristas de pesados, entre outros.
  - Acidentes causados por:
    - Atentados ou ataques informáticos;
    - Falha do sistema informático ou dos sensores primários e secundários;
    - Não compreender a sinalização fornecida pela autoridade.
  - Protocolos entre os fabricantes automotivos e governos;
- Redução de vários fatores, como:
  - Privacidade;
  - Número de utilizadores que saibam conduzir um veículo totalmente mecânico;
  - Utilização de transportes públicos.

#### *2.2.2.4 Funcionamento de um veículo autónomo*

Um veículo autónomo ao contrário de um veículo convencional, não necessita de um condutor para se deslocar entre duas posições. Para que um usuário chegue ao destino utilizando um veículo autónomo, terá de informar o veículo qual é o destino pretendido. Para que a viagem ocorra com maior sucesso, o veículo possui um *software* que analisa o tráfego e escolhe o melhor trajeto para o utilizador [25].

Para que o veículo se consiga deslocar sem intervenção humana, necessita de alguma tecnologia que o possa orientar ao longo do trajeto. Neste contexto, no exterior do veículo existe um sensor LIDAR que monitoriza o ambiente ao seu redor, construindo assim um mapa tridimensional. Em simultâneo com este sensor, existe outro sensor na lateral do veículo cujo objetivo é detetar a posição do veículo em relação ao mapa tridimensional gerado pelo LIDAR. Para além dos sensores mencionados anteriormente, existem também na dianteira e na traseira do veículo um sensor RADAR, sendo o seu objetivo medir as distâncias entre os vários objetos e obstáculos [25].

Por outro lado, a presença de sensores não é suficiente para garantir o funcionamento do veículo, é necessário um *software* que difunda toda a informação gerada pelos vários sensores. Para isso, o *software* recorre à inteligência artificial para gerir toda a informação recolhida pelos sensores, pela câmara de vídeo e ainda pelo *Google Street View* [25].

Os autores J. Ondruš, et al., citam ainda que a intensificação da circulação de veículos autónomos aumentará a eficiência deles, porque estes veículos têm a capacidade de comunicarem entre si, informando sobre congestionamento de trânsito ou perigos na estrada. Outra particularidade que estes veículos terão, é que alguns deles possuem uma função que altera o modo de condução autónoma para condução manual, caso o condutor deseje [25].

#### *2.2.2.5 Tecnologias utilizadas nos veículos autónomos*

Um veículo autónomo destaca-se dos demais por assumir por completo o controlo do sistema de direção, aceleração e travagem, dispensando assim a intervenção de um ser humano para realizar a tarefa de condução [29]. Para garantir o seu funcionamento, estes veículos possuem algumas tecnologias, sendo elas: LIDAR, RADAR, câmaras de vídeo, sonar, sensores de inércia, GPS (*Global Position System*) e processador [25] [31].

Para o bom funcionamento de um veículo autónomo não basta apenas reunir os dados recolhidos pelos sensores, é necessário que toda a informação seja analisada pelo controlador para que não ocorra nenhum erro. Para se perceber o funcionamento de um veículo autónomo, é importante perceber também o funcionamento das diversas tecnologias que estes equipam. No presente subcapítulo será apresentada uma breve descrição de todos os sensores que auxiliam a condução autónoma [25].

## LIDAR

O sensor LIDAR é utilizado para medir distâncias através de um feixe luminoso que analisa a luz refletida. Este dispositivo, é considerado pelos autores J. Ondruš, et al., como o sensor mais importante em um veículo autónomo [25].

Este equipamento é composto por um invólucro cilindro. No interior do invólucro existe um emissor, um espelho e um recetor, no qual utiliza o laser, a luz ultravioleta, visível ou infravermelha para detetar a presença de objetos. Durante o seu funcionamento, o emissor emite um feixe luminoso, que é refletido pelo espelho existente na base, que, porém, irá colidir com o obstáculo.

Após ter ocorrido o embate do feixe com o objeto, o feixe retorna ao sensor, é refletido novamente pelo espelho e recolhido pelo recetor [25].

Este acontecimento pode ser observado na figura 2.9.

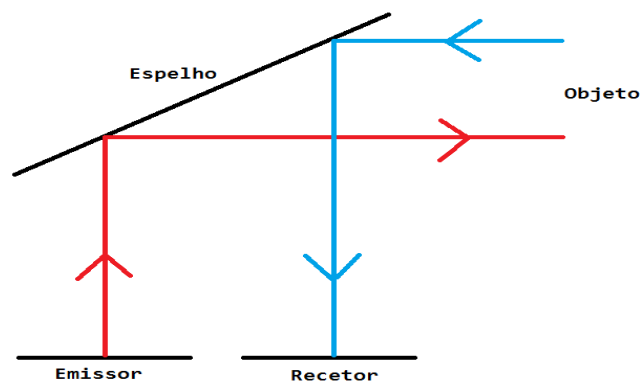


Figura 2.9 – Esquema representativo do funcionamento do LIDAR

Para que seja possível analisar toda a área ao redor do veículo, o invólucro cilíndrico possui uma base que gira 360°. Com os dados recolhidos pelo sensor LIDAR, o *software* tem a capacidade de representar num mapa tridimensional, com bastante precisão todo o ambiente que o veículo está envolvido (figura 2.10) [25].

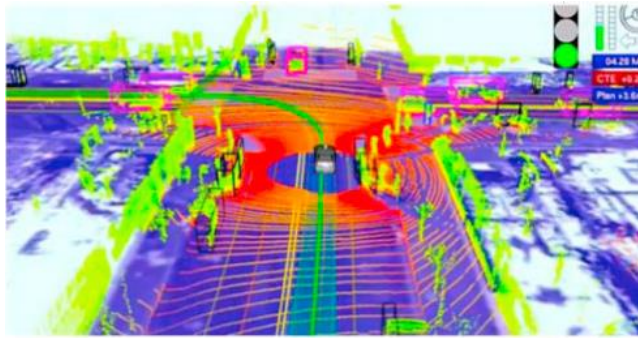


Figura 2.10 – Mapa 3D construído tendo por base o ambiente em torno do LIDAR. Fonte [25]

## RADAR

O sensor RADAR é utilizado para efetuar medições. O seu método de funcionamento é bastante semelhante ao do sensor LIDAR, pois possui um emissor e um recetor. Contudo, este sensor faz uso das ondas eletromagnéticas para recolher informação [25].

Este equipamento tem a capacidade de detetar objetos a uma distância de aproximadamente 200 m com um feixe direcional. Contudo, este sensor não permite realizar o mapeamento ao seu redor, por não conseguir detetar a presença de obstáculos não metálicos ou com algumas formas geométricas [25].

Esta tecnologia quando é aplicada nos veículos, por norma é instalada nos para-choques frontal e traseiro, sendo utilizados dois radares por para-choque com faixas de leitura diferentes. Este equipamento é utilizado para: detetar veículos em sentido contrário, auxiliar no estacionamento, detetar pontos cegos, auxiliar na mudança de faixa, alertar sobre tráfego cruzado, aviso de impacto, entre outras [25].

## GPS

Em 1960, a marinha dos Estados Unidos realizou experiências para analisar o percurso realizado pelos submarinos que transportavam mísseis militares. Para isso, recorreram aos seis satélites que orbitavam em torno do planeta terra e em poucos minutos obtiveram a localização dos submarinos. Alguns anos mais tarde, o departamento de defesa desenvolveu o GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) que utiliza o mesmo princípio que a marinha utilizou anteriormente. Neste contexto, em 1978, o departamento de defesa lançou o seu primeiro satélite de sistema de navegação com cronometragem e alcance, apelidado de NAVSTAR. O GPS tornou-se totalmente operacional em 1993, possuindo 24 satélites [32].

Atualmente, o GPS é operado pela Força Aérea dos Estados Unidos da América e oferece dois níveis de serviço: O PPS (*Precise Position Service*) e o SPS (*Standard Position Service*). O PPS apenas está disponível para as forças armadas dos Estados Unidos da América, agências federais norte-americanas, forças armadas e governos aliados. Em contrapartida, o SPS pode ser utilizado por qualquer usuário sem qualquer custo, em qualquer parte do globo [32].

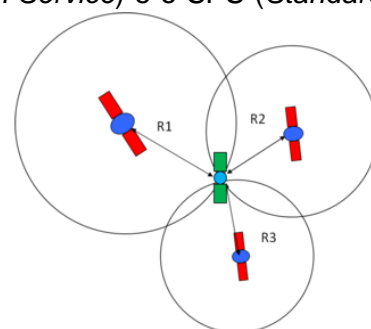


Figura 2.11 – Método de funcionamento do sistema de GPS. Fonte: [32]

Apesar do SPS não ser tão preciso e exato como o PPS, é uma excelente ferramenta (ver figura 2.11). Esta tecnologia tem a capacidade de fornecer em tempo real a localização em qualquer ponto do globo, sendo esta a tecnologia por detrás de todos os mapas disponíveis nos veículos [25].

## Sensores Ultrassônicos

O método de funcionamento dos sensores ultrassônicos é muito semelhante ao LIDAR e ao RADAR, pois possui também um emissor e um recetor. Contudo, este sensor utiliza o som para detetar a presença de obstáculos [10].

Este equipamento pode ser colocado em vários locais em torno do veículo e ser utilizado para vários fins, como medir a distância entre o veículo e um ponto referência, ou para auxiliar na manobra de estacionamento [25].

## Câmaras de vídeo

Esta tecnologia é utilizada para recolher em tempo real algumas informações sobre a via onde circula o veículo. É possível captar através das câmaras de vídeo, imagens tridimensionais da estrada, detetar a presença de sinais de trânsito ou luminosos e obstáculos inesperados [25].

As câmaras de vídeo possuem ainda um sistema que permite diferenciar algumas das informações recolhidas como: os vários sinais de trânsito, passadeiras, cones na via ou o aceno de um pedestre [25].

## IMU

Outro sensor que auxilia bastante na condução autónoma, é a IMU (*Inertial Measurement Unit*). Esta unidade difunde a informação proveniente de outros sensores como acelerómetros, giroscópios e magnetómetros com o intuito de medir e calcular algumas informações relativas do veículo como: a velocidade, orientação, entre outras [25].

Esta tecnologia é essencial num veículo autónomo porque consegue estimar a posição do veículo em caso de falha do sistema de GPS. A falha do sistema de GPS é recorrente, uma vez que não funciona em locais cobertos, como túneis ou parques de estacionamento subterrâneos, quando existe vegetação densa ou condições atmosféricas adversas e ainda quando existe interferência eletromagnética [25].

## CPU

Uma das tecnologias mais importante num veículo autónomo é a CPU (*Central Processing Unit*). Esta ferramenta é indispensável num veículo autónomo, porque funciona como o “cérebro” do veículo. A CPU é responsável pelas decisões tomadas, processando velozmente toda a informação recolhida pelos vários sensores [25].

Esta tecnologia funciona com um *software* concebido para analisar toda a informação dos sensores e tomar uma decisão. Conforme a decisão tomada, este envia um sinal para os vários atuadores, como: o sistema de direção, travagem ou acelerador. Para além de gerir as decisões do veículo, este equipamento está conectado à *internet* para manter o *software* atualizado [25].

### 2.2.2.6 Primeiro veículo autónomo a circular em Portugal

É espetável que no futuro a utilização de veículos autónomos seja recorrente em todas as partes do mundo. Neste contexto, é esperado que gradualmente estes veículos irão surgindo nas estradas. Em Portugal, não será exceção. Até que os veículos estejam aptos para transportar utilizadores com segurança, é necessário realizar bastantes testes. Numa entrevista que João Santos, coordenador do projeto V2X da *Bosch Car Multimedia*, deu à TSF-Rádio notícias, é estimado que a utilização destes veículos em Portugal se inicie em 2025 atingindo o pico de utilização apenas em 2050 [33].

Apesar do uso destes veículos não ser muito frequente, já existe um veículo autónomo em circulação em Portugal. Este veículo pertence à autarquia de Cascais e é abrangido pelo programa MobiCascais. Este programa ainda está em fase experimental, cujo intuito é melhorar a mobilidade na autarquia através da utilização de bicicletas partilhadas e estacionamento para as mesmas [34]. Este veículo está a ser utilizado experimentalmente para fazer o trajeto entre a *Nova School of Business & Economics* e a Quinta de S. Gonçalo. Os testes com o veículo iniciaram em setembro de 2019, contudo, no futuro é espetável que a sua utilização seja recorrente como transporte público de passageiros [35] [36].

## 2.3. Estado da Arte

Para se desenvolver um protótipo com o maior sucesso possível, é preciso perceber o que outros investigadores já realizaram. Neste contexto, no presente subcapítulo será retratada uma breve revisão do Estado da Arte. O presente subcapítulo estará dividido em duas partes: o Estado da Arte que faz referência aos protótipos de veículos autónomos provenientes de fabricantes de automóveis e o Estado da Arte de protótipos de veículos autónomos concebidos para fins académicos.

Na primeira parte, serão abordados alguns dos modelos de protótipos de veículos autónomos que estão a ser desenvolvidos por fabricantes de automóveis, assim como tecnologias que equipam estes protótipos.

De seguida, a segunda parte será destinada aos protótipos à escala desenvolvidos por vários investigadores e alunos para fins académicos. Para que os protótipos se assemelhem ao protótipo desenvolvido no presente trabalho de projeto, foram escolhidos projetos onde se utilizam tecnologias semelhantes. Em cada protótipo apresentado, será realizada ainda uma breve descrição do objetivo de cada projeto, assim como das tecnologias utilizadas. Apesar de todos os projetos apresentados não necessitarem da intervenção humana para funcionarem, é possível observar que esta tecnologia pode ser utilizada em diferentes setores realizando tarefas distintas, como: recolher lixo do chão ou auxiliar pessoas com incapacidades físicas.

Em ambos os Estados da Arte, tentou-se procurar algumas soluções de veículos autónomos que se enquadrem neste trabalho de projeto e em simultâneo que apresentem uma boa solução para o futuro da mobilidade. Apesar do uso destes veículos não ser muito recorrente, vários fabricantes de automóveis já estão a realizar testes nas ruas para melhorarem o produto que desenvolveram.

### 2.3.1 Veículos autónomos produzidos por fabricantes de automóveis

Com o passar dos anos, os fabricantes de automóveis tendem a acompanhar as necessidades da sociedade. Neste contexto, os vários fabricantes têm desenvolvido novas tecnologias com o objetivo de aumentar a comodidade e segurança dos ocupantes dos seus veículos. Existe uma grande variedade de fabricantes de automóveis que estão a desenvolver veículos autónomos, sendo eles o grupo *Volkswagen AG*® com o desenvolvimento do projeto “*Transform 2025+*”, a *BMW AG*®

em parceria com a *Baidu*® trabalha num projeto apelidado de “*BMW iNext*”. Outras empresas como o grupo indiano *TATA*®, a *Amazon*®, a *Tesla Motors*®, a *Toyota*®, a *Ford*®, a *General Motors*®, a *Volvo*®, entre outras, também trabalham diariamente no desenvolvimento de veículos autónomos [37] [38].

Existe uma pesquisa intensa por parte dos fabricantes de automóveis, o que significa que no futuro a presença destes veículos nas estradas é inevitável. Estes veículos irão promover o desenvolvimento sustentável, assim como revolucionar a forma de como as pessoas se deslocam. Como já foi destacado anteriormente, a utilização destes veículos trará bastantes benefícios para a sociedade, como a redução do número de acidentes rodoviários e congestionamento, o que levará à redução do consumo de combustível, contribuindo assim para a redução de gases poluentes para a atmosfera [25].

### 2.3.1.1 *General Motors*® / *Cruise Origin*

No passado, a *General Motors*® era um dos maiores fabricantes de automóveis do mundo. Esta empresa começou a desenvolver carros elétricos em 1990, avançando para a produção em 1996. Este fabricante garante que o seu produto é seguro, de baixas emissões e tem bastante autonomia [39].

A *Cruise Automation* é uma empresa destinada ao fabrico de veículos autónomos. Inicialmente começou a aplicar recursos semiautónomos em veículos já existentes, cujo objetivo era circular em autoestradas. Posteriormente, esta empresa começou a desenvolver um veículo autónomo para utilização urbana (figura 2.12). A *General Motors*® começou a mostrar interesse por esta empresa em 2015, acabando por adquiri-la [39].



Figura 2.12 – Veículo autónomo desenvolvido pela *General Motors*. Fonte: [39]

O autor B. Howard, cita que a *General Motors*® pretende desenvolver mais veículos autónomos elétricos. Contudo, nem todos os veículos elétricos desenvolvidos nesta década serão autónomos [39].

Em 2020, este fabricante apresentou o seu mais recente veículo autónomo, o *Cruise Origin*. Este veículo destina-se ao transporte de passageiros e funcionará como um táxi em áreas urbanas com a capacidade de transportar seis pessoas (ver figura 2.12). Para além disto, este veículo não possuirá volante, enquadrando-se no nível 5 ou nível 4 em algumas áreas definidas de acordo com os níveis definidos pela SAE [39].

A *Cruise Automation* afirma que apesar deste veículo não ser um veículo de produção, a sua data de entrega estará para breve. Os representantes desta empresa alertam ainda que o “nosso trabalho está longe de terminar” [39].

### 2.3.1.2 Amazon Zoox

Algumas empresas têm se focado na criação de robotaxis como uma das soluções para tornar o planeta mais sustentável. A *Zoox* é uma empresa americana cujo objetivo é fabricar veículos autónomos e elétricos destinados aos mercados dos robotaxis (figura 2.13). Esta empresa foi fundada em 2014 e em 2015 construiu o seu primeiro protótipo. Em 2017, este protótipo apresentou uma autonomia classificada pelo SAE como de nível 3. Posteriormente, em 2020, este protótipo entrou na linha de produção na Califórnia. Nesse mesmo ano, a *Amazon* adquiriu esta empresa [38].



Figura 2.13 – Veículo autónomo desenvolvido pela Zoox. Fonte: [38]

A *Zoox*, durante a produção deste veículo tentou utilizar as mais modernas técnicas de fabrico automóvel, robótica e energias renováveis. Este veículo será utilizado sobretudo em ambientes urbanos densos, e durante a sua utilização esta empresa encarrega-se de fornecer uma manutenção adequada, assim como manter os

veículos atualizados, oferecendo aos seus utilizadores uma viagem agradável e sem esforço [38].

Este veículo, figura 2.13, recorre à inteligência artificial para identificar todos os obstáculos detetados pelos sensores. À semelhança dos outros veículos autónomos, este protótipo possui tecnologia que fornece segurança dos utilizadores, assim como de um LIDAR no tejadilho do veículo e vários outros sensores, como radares e câmaras [38].

Para além de toda a tecnologia presente neste veículo, a Zoox promete que o seu veículo é diferente de toda a concorrência existente. Para que a eficiência deste veículo aumente, ele pode ser conduzido tanto para a frente como para trás, tornando-se bidirecional, possui ainda direção às quatro rodas, permitindo assim realizar ângulos apertados facilmente [38].

### 2.3.2 Protótipos de veículos autónomos desenvolvidos academicamente

O interesse pela construção de veículos autónomos não é só por fabricantes de automóveis. Vários estudantes e investigadores, tentam desenvolver os seus próprios protótipos de veículos autónomos, cujo objetivo é investigar e melhorar a capacidade destes veículos perante todas as situações que são confrontados.

Esta área tem mostrado grande interesse por parte de vários investigadores, porque é a combinação de várias áreas de engenharia, como mecânica, eletrónica, informática, entre outras. Apesar de grande parte serem protótipos académicos, possuem resultados muito bons devido ao grande desenvolvimento de algumas tecnologias que lhes são presentes, como: sensores, atuadores, processadores e algoritmos de controlo. Uma vez que estes protótipos são desenvolvidos com o intuito de realizar um estudo, é possível avaliar a sua eficiência consoante a área de aplicação, como: transporte de cargas, auxílio de pessoas com incapacidades físicas, debater novos problemas, entre outros.

Em suma, a criação destes protótipos permite expandir o uso de veículos autónomos para vários setores, contudo, a grande vantagem de se desenvolver estes protótipos academicamente é a formação de novos profissionais para trabalharem nesta área, tornando assim estes veículos mais eficientes e seguros.

### 2.3.2.1 Protótipo de veículo autônomo desenvolvido para recolha lixo

A diversificação de áreas em que os veículos autônomos podem ser utilizados, é uma vantagem de se desenvolverem protótipos para fins acadêmicos. Neste contexto, os autores Manasa M, et al., trabalharam no desenvolvimento de um protótipo à escala para recolher lixo do chão. Durante a concepção deste protótipo autônomo, o autor utiliza vários sensores para recolher informação ao redor do veículo, um Arduino para processar essa informação e um ventilador de um computador antigo para recolher o lixo através de vácuo [40].

O desenvolvimento deste protótipo surgiu quando o autor analisou um aspirador integrado com automação, também conhecidos como aspirador robô (ver figura 2.14). De acordo com o autor, a utilização destes aspiradores será bastante recorrente no futuro, pois permitem efetuar a limpeza do meio ambiente sem qualquer auxílio ou esforço para um humano [40].

As ações que este veículo executa têm por base um código pré-definido inserido no seu processador. Este protótipo possui na sua frente um sensor ultrassônico que lhe permite medir a distância entre o veículo e os obstáculos ao seu redor. Dependendo da distância entre o veículo e o obstáculo, o processador decidirá qual a melhor ação para o veículo, sem que este colida com qualquer obstáculo. Caso o veículo esteja demasiado próximo de um obstáculo, o veículo gira para a esquerda e para a direita, medindo sempre as distâncias e decide assim qual o trajeto mais seguro para continuar a sua recolha de lixo [40].



Figura 2.14 – Protótipo de veículo autônomo destinado à recolha de lixo. Fonte: [40]

### *2.3.2.2 Protótipo de veículo autónomo que segue uma trajetória baseado numa marcação no chão e contorna obstáculos*

Os veículos autónomos podem utilizar várias tecnologias com o intuito de garantir a sua autonomia. Os autores Zen Feng Li, et al., desenvolveram um protótipo cujo objetivo é seguir uma trajetória de acordo com uma marcação no chão e contornar todos os obstáculos que lhe surjam no seu trajeto. Durante o seu percurso, o veículo deparar-se-á com vários obstáculos e terá de ter a capacidade de os contornar sem afetar muito o seu trajeto. Neste projeto foi utilizado um Arduino como controlador, um sensor ultrassónico para detetar a presença de obstáculos, um sensor infravermelho para guiar o veículo pelas marcações do trajeto, um módulo para acionar os motores e ainda um módulo de potência [41].

Este protótipo apenas será executado em ambientes destinados para tal. Essa limitação é originada porque o veículo necessita das marcações no chão (linhas) para se orientar. Para efetuar a medição da presença de linha, o veículo possui dois sensores infravermelhos na sua frente. Este veículo possui também sensores ultrassónicos que medem distâncias entre o veículo e os obstáculos ao seu redor. Caso essa distância seja reduzida, o veículo deixará de utilizar os sensores infravermelhos como guia e passará a orientar-se pelos sensores ultrassónicos até contornar o obstáculo [41].

Os autores Zen Feng Li, et al., citam no seu artigo que a utilização desta tecnologia pode oferecer várias vantagens para o futuro. Este veículo permite seguir uma trajetória através de uma marcação no solo, sem que o veículo colida com qualquer obstáculo o que oferece alguma segurança aos seus utilizadores. Esta tecnologia aplicada aos veículos será uma excelente solução para veículos não tripulados. Atualmente já é possível ver estes veículos em algumas indústrias para realizar o transporte de peças [41].

### *2.3.2.3 Veículo autónomo que realiza uma trajetória autonomamente sabendo a sua posição inicial e a posição final*

Os autores Rahee Wlambe, et al., desenvolveram e implementaram um algoritmo de planeamento de trajetória para se aplicar em veículos autónomos. Para se poder implementar este algoritmo é necessário conhecer algumas posições, como; a inicial, a final e uma terceira coordenada. Este algoritmo traçará a melhor trajetória para se interseccionar todas as coordenadas referidas anteriormente. De acordo com os autores,

a terceira coordenada poderá simular um obstáculo que o veículo tenha de contornar. Neste algoritmo, todas as coordenadas mencionadas serão pré-definidas pelo utilizador, o algoritmo apenas traçará o percurso mais otimizado e que seja o mais suave possível (figura 2.15) [42].

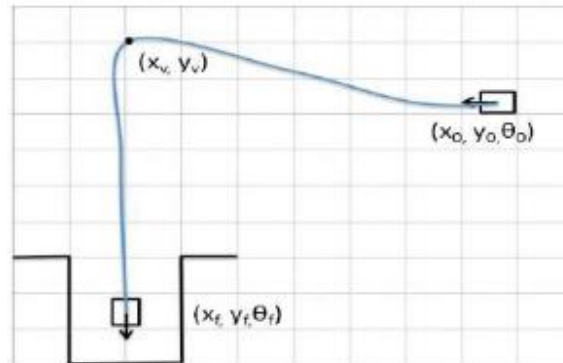


Figura 2.15 – Trajetória a realizar sabendo os pontos de intersecção. Fonte [42]

Durante o desenvolvimento do protótipo para testar o algoritmo desenvolvido, os autores utilizaram como base um carro telecomandado ao qual foi alterado para se tornar autónomo. Para implementar o algoritmo e controlarem o veículo, utilizaram dois processadores em simultâneo, sendo eles um *Arduino* e um *RaspBerry Pi*. Segundo os autores, este algoritmo pode ser utilizado em veículos reais para realizarem a manobra de estacionamento [42].

#### 2.3.2.4 Veículo autónomo controlado por voz, capaz de detetar obstáculos para auxiliar pessoas com deficiências físicas

À semelhança do que outros autores já desenvolveram, Ujjwal Gulati, et al., construíram um protótipo à escala de veículo autónomo controlado por voz. Tal como os projetos referidos anteriormente, este protótipo possui também um processador para analisar toda a informação recolhida. O processador utilizado neste projeto é um *Particle Photon*. Em simultâneo com este processador, atua um controlador de motores L293d, um *servo motor* e um sensor ultrassónico para medir as distâncias ao seu redor [43].

Durante a utilização deste veículo, é necessário que o utilizador possua um *smartphone* com a aplicação *blynk* ou acesso ao *Google Assistant* para que este sirva de intermediário entre o utilizador e o veículo. Para que o veículo cumpra uma ordem, é necessário o utilizador ditar para o *smartphone* algumas instruções pré-definidas como

“Em Linha reta”, “Esquerda” ou “Stop”. Apesar deste veículo ser conduzido pela voz, possui tecnologia como sensores ultrassônicos, que evitarão que este colida com quaisquer obstáculos, garantindo assim a segurança dos ocupantes do veículo [43].

De acordo com os autores, este tipo de veículo poderá ser uma excelente alternativa para pessoas com incapacidades físicas, uma vez que permite aos seus utilizadores narrarem o trajeto que pretendem e o veículo conduzirá até ao destino desejado [43].

#### 2.3.2.5 Veículo autónomo para combate de fogos num cenário de simulação

O desenvolvimento de veículos autónomos para fins académicos têm gerado grande interesse por vários alunos e investigadores em todo o mundo, sendo que no ISEL já foram desenvolvidos alguns desses veículos. O autor M. Ângelo Galego Marques desenvolveu um protótipo de veículo autónomo para combate de fogos em ambiente de simulação [44].

Durante o desenvolvimento deste projeto, o autor recorre à utilização de vários sensores e atuadores, sendo os que mais se destacam são: o LIDAR que foi utilizado para realizar o mapeamento do ambiente de simulação, uma câmara infravermelha para detetar a presença da chama e ainda codificadores de linha para estimar a sua posição. O autor neste projeto recorreu à utilização de um *RaspBerry Pi* como processador (ver figura 2.16).

A finalidade deste protótipo, não foi só como Trabalho Final de Mestrado. O autor tinha como objetivo entrar no concurso robô apaga chama, onde o objetivo é o veículo localizar a chama e extingui-la. Para se alcançar o primeiro lugar, o veículo teria de conseguir realizar a tarefa mencionada anteriormente o mais rapidamente possível [44].



Figura 2.16 – Veículo autónomo para combate de fogos num cenário de simulação. Fonte: [44]



### 3. Caso de estudo

Os veículos e a robótica têm evoluído gradualmente e a união destas duas áreas é cada vez maior. No passado era impensável que os veículos se conduzissem sozinhos, contudo, com a evolução da robótica esta será a realidade de forma massiva para um futuro próximo.

Neste contexto, o presente projeto tem como objetivo desenvolver um protótipo de veículo autónomo à escala com funcionalidades parciais. O protótipo a desenvolver terá como base um carro telecomandado, sendo que o utilizador lhe fornecerá previamente as coordenadas geográficas do destino e este navegará até essa posição, sem colidir com quaisquer obstáculos que lhe surja no caminho. Para que seja possível desenvolver este projeto, o primeiro passo é remover toda a eletrónica presente do carro original. De seguida, serão realizadas algumas alterações na estrutura mecânica (*chassis*), assim como a adição de um novo *hardware* e respetivas ligações eletrónicas entre si. Após o carro estar funcional, serão realizados alguns testes, cujo objetivo é garantir e comprovar a eficiência e autonomia do veículo desenvolvido.

Para analisar os dados recolhidos pelos sensores e dar instruções aos atuadores é necessária a presença de um processador no veículo. Neste sentido, foi escolhido um processador da Arduino para realizar essa tarefa. Este processador será programado pelo *software* disponibilizado pelo seu fabricante, denominado de Arduino IDE (*Integrated Development Environment*). Para se visualizar a trajetória do veículo num ambiente virtual e analisar o seu comportamento, será utilizado o *software* MATLAB®.

Por fim, para que o veículo consiga alcançar todos os objetivos propostos, serão estudados alguns dos sistemas de navegação incorporados. Será também apresentado um fluxograma cujo objetivo é auxiliar na compreensão das ações efetuadas pelo veículo.

Para que se consiga alcançar os objetivos deste trabalho de projeto, o desenvolvimento do protótipo passará pelas seguintes etapas (figura 3.1):



Figura 3.1 – Etapas no desenvolvimento do protótipo

Neste contexto, o presente capítulo estará dividido nas seguintes secções:

- Protótipo – descrição detalhada das alterações realizadas no veículo, assim como a implementação do diverso *hardware* e *software*, as suas ligações eletrónicas e a realização de alguns estudos preliminares aos componentes;
- Sistemas de navegação – análise dos sistemas de navegação presentes no protótipo, assim como a existência de um fluxograma que descreve as suas ações.

### 3.1 Protótipo

No presente trabalho de projeto será desenvolvido um protótipo de veículo autónomo à escala com funcionalidades parciais, figura 3.2, que navegará entre coordenadas geográficas, sem a intervenção humana. Durante o seu trajeto, poderão existir obstáculos, sendo que o veículo terá de ter a capacidade de evitar a colisão com eles. Todo o seu percurso será visualizado num computador remoto, num ambiente virtual MATLAB®.

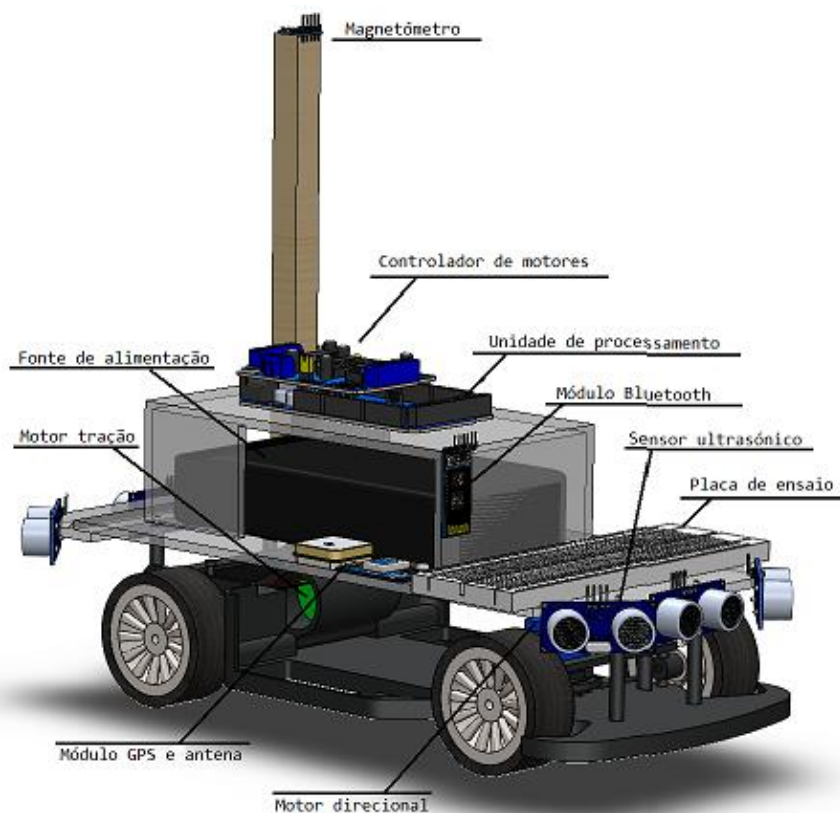


Figura 3.2 – Protótipo em estudo com os vários componentes

Uma vez que se trata de um veículo autónomo, necessitará de alguns componentes eletrónicos que o auxiliem a analisar como é o ambiente ao seu redor e a movimentar-se no espaço. Neste sentido, estarão presentes no protótipo sensores e atuadores. A presença destes equipamentos eletrónicos não é suficiente para garantir o bom funcionamento do veículo. Para que isso aconteça, é necessário um processador que funcionará como o “cérebro” do veículo. Este dispositivo analisará toda a informação recolhida pelos sensores e enviará um sinal elétrico para os atuadores consoante a sua decisão. Este dispositivo é conhecido como a unidade de processamento, sendo que a utilizada neste projeto é um Arduino Mega 2560.

No presente projeto, será necessário adicionar um módulo para distribuir a energia proveniente do sistema de alimentação pelos vários equipamentos do robô, assim como controlar o movimento realizado pelos motores. Neste contexto, o controlador de motores L298N cumpre todos os requisitos apresentados anteriormente. Como o veículo terá de navegar pelo solo até chegar ao destino, necessita de um meio de locomoção. Assim sendo, existirão dois motores no veículo sendo um deles responsável pelo sistema de direção e outro pelo sistema de tração.

Para que o veículo consiga navegar entre coordenadas geográficas sem colidir com qualquer obstáculo que encontre na sua trajetória, será equipado com dois sistemas de navegação, um baseado em dados provenientes de um sistema de GPS e outro tendo por base a informação recolhida pelos sensores ultrassónicos. O último sistema referido, apenas entra em funcionamento caso seja detetado algum obstáculo no seu percurso, evitando colisões e danos no veículo.

Para que estes sistemas de navegação funcionem corretamente necessitam de alguns sensores. O sistema de navegação baseado em GPS é constituído por: um Módulo GPS NEO-6MV2, uma Antena e um Magnetómetro. Estes componentes permitem ao veículo recolher a sua posição atual e perceber qual a sua orientação, sendo fundamental para o veículo chegar ao destino. Em contrapartida, o sistema de navegação responsável por contornar todos os obstáculos possui apenas sensores ultrassónicos HC-SR04.

Outro componente que equipa o protótipo, é um módulo *Bluetooth*. Este dispositivo poderá ser utilizado, para fornecer dados para um computador remoto, permitindo monitorizar em tempo real algumas informações relacionadas com o veículo, como por exemplo: quantas coordenadas intermédias já foram alcançadas, se o objetivo já foi cumprido, analisar a informação recolhida pelos sensores ultrassónicos e visualizar qual a ação que o controlador está a enviar aos atuadores.

### 3.1.1 Desmontagem do veículo telecomandado

O protótipo tem como *chassis* original um veículo telecomandado que será alterado para se tornar parcialmente autônomo. Para que essa transformação ocorra é necessário ter conhecimento de algumas áreas, como eletrônica, mecânica e programação. Para efetuar a alteração, é necessário que sejam removidos alguns componentes do veículo original, realizar uma reestruturação da parte mecânica, adicionar novos componentes eletrônicos e por fim desenvolver a programação da unidade de processamento.

Os veículos telecomandados são uma excelente base quando se pretende construir um protótipo semelhante ao que está a ser desenvolvido, pois a sua cinemática e forma é bastante semelhante a um carro real, existe uma grande oferta e variedade no mercado e podem ser reaproveitados alguns componentes para o novo veículo. A escolha de um veículo é essencial para que o protótipo fique com as proporções desejadas, neste sentido foi escolhido um veículo com a escala 1:17, como demonstra a figura 3.3:



*Figura 3.3 – Carro telecomandado utilizado para o desenvolvimento do protótipo*

O processo de transformação do veículo telecomandado num veículo autônomo, iniciou-se pela verificação do funcionamento de todos os componentes. Este passo é bastante importante para prevenir problemas futuros uma vez que se trata de um carro telecomandado usado. Após a realização de vários testes, verificou-se que tanto o motor DC (corrente contínua) que aciona o sistema de tração do veículo como o motor responsável pelo sistema de direção estavam completamente operacionais.

Concluído o processo de escolha do veículo assim como da verificação da sua funcionalidade, procedeu-se à sua desmontagem. Começou-se por retirar a carroçaria do veículo telecomandado e verificou-se que esta não poderá ser utilizada novamente após a colocação dos novos componentes, por não possuir espaço suficiente. Depois

da remoção da carroçaria, foi possível verificar a presença de alguma eletrónica, como demonstra a figura 3.4.



Figura 3.4 – Eletrónica presente no carro telecomandado

O veículo telecomandado possuía componentes eletrónicos que não terão qualquer utilidade para a nova finalidade, como: recetor rádio, fios elétricos, sistema de controlo, díodos LED no lugar dos faróis, entre outros. Assim sendo, estes componentes foram removidos do veículo por não apresentarem nenhuma utilidade e pela falta de espaço para alocar os novos componentes, sendo que foram reaproveitados apenas o *chassis*, as rodas, o sistema de direção e tração, e os respetivos motores.

### 3.1.2 Montagem do protótipo

Um dos processos mais exigentes no desenvolvimento deste protótipo foi a sua montagem. Como o veículo escolhido para desenvolver este projeto é de pequenas dimensões, a montagem incorreta de algum componente poderia comprometer o seu funcionamento. Com o intuito de se evitar esta situação, inicialmente procedeu-se ao desenvolvimento de um protótipo virtual e de seguida à montagem física do mesmo.

#### 3.1.2.1 Protótipo Virtual

Um protótipo virtual é uma representação gráfica, bidimensional ou tridimensional, desenvolvida através de um *software* de modelação. Com o intuito de desenvolver virtualmente o protótipo, recorreu-se ao uso do *software SolidWorks®* para modelar o veículo em desenvolvimento.

Para que o protótipo virtual se aproxime ao máximo do protótipo físico, foram modelados todos os componentes do veículo, desde *chassis*, rodas, pneus, motores, entre outros. Como o carro telecomandado é um protótipo à escala reduzida de um veículo automóvel, o seu *chassis* não tem capacidade de alocar todos os novos componentes. Para se contornar esta situação, foram adicionadas duas estruturas (andares) em acrílico ao veículo, tornando assim o veículo mais eficiente em termos de espaço. Apesar da adição destas duas estruturas, o veículo continuou praticamente com as mesmas dimensões quando comparado à estrutura inicial.

Não foi necessário modelar os componentes eletrónicos, uma vez que a sua utilização é recorrente por vários utilizadores em vários projetos de robótica móvel e estão disponíveis na plataforma digital *GrabCAD*, permitindo acelerar o processamento de modelação tridimensional. Neste contexto, todas as representações virtuais dos diversos componentes eletrónicos foram reaproveitadas desta plataforma. Para simplificar o protótipo virtual, não foram representadas as ligações eletrónicas presentes no veículo (ver figura 3.5).

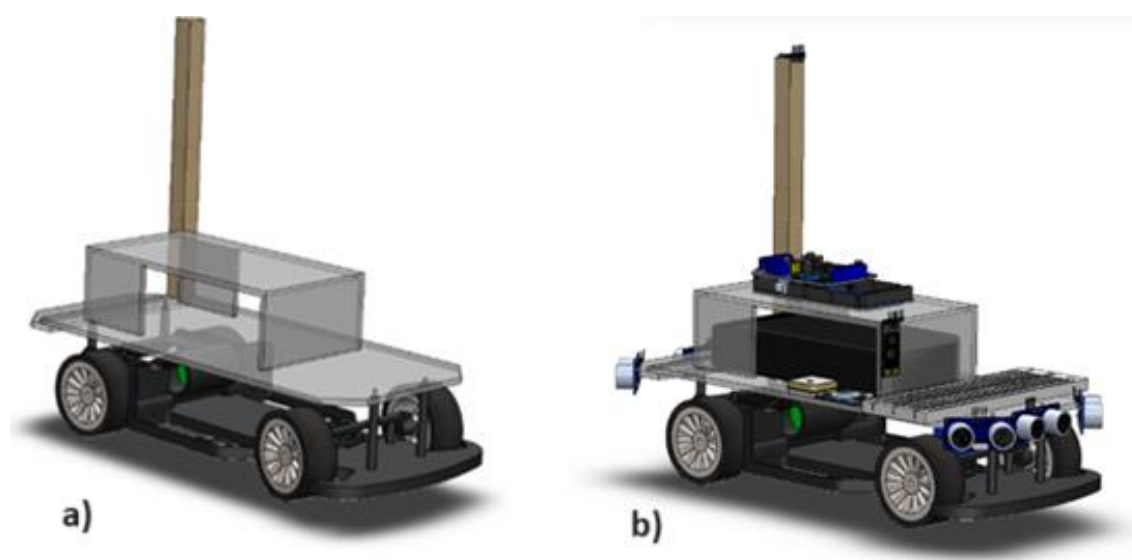


Figura 3.5 – Protótipo virtual: a) sem componentes eletrónicos; b) com componentes eletrónicos

### 3.1.2.2 Protótipo Físico

Após concluído o protótipo virtual do carro autónomo no *software* de modelação *SolidWorks®*, foi possível construir o protótipo físico. Para que a construção de ambos os protótipos não divergissem, foram respeitadas todas as cotas projetadas com o objetivo de reaproveitar o espaço disponível de modo que seja evitada a obstrução entre os vários componentes eletrónicos.

Durante o fabrico do protótipo físico, foram desenvolvidas as duas estruturas (andares) em acrílico. Selecionou-se este material por ser bastante maleável, de fácil utilização e o seu preço ser reduzido. Para fazer a união entre o *chassis* e a primeira estrutura de acrílico foram utilizados parafusos M4. Em contrapartida, a união entre a primeira e a segunda estrutura em acrílico foram realizadas com cola quente.

Após a finalização da construção do protótipo físico, adicionou-se o *hardware* necessário para que o carro se torne autónomo. Comparando a figura 3.5 com a figura 3.6, é possível concluir que ambos os protótipos ficaram bastante semelhantes.

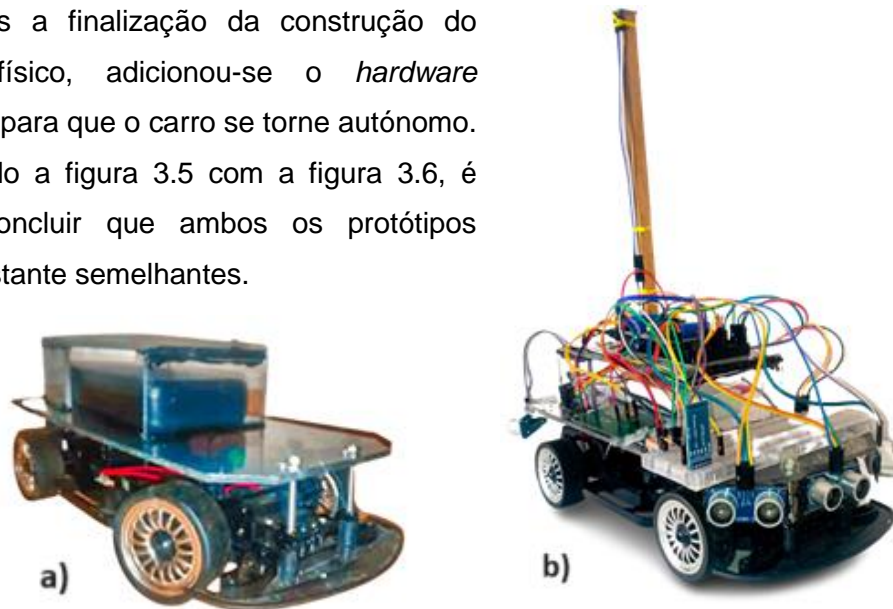


Figura 3.6 – Protótipo físico: a) sem componentes eletrónicos; b) com componentes eletrónicos

A montagem física do protótipo foi concluída com bastante sucesso, sobretudo porque inicialmente o protótipo foi desenvolvido num ambiente virtual, permitindo:

- Otimizar o espaço ocupado pelos vários componentes do protótipo;
- Os vários componentes funcionem sem obstrução dos demais;
- Disponibilidade de espaço para se adicionar mais algum *hardware* ao veículo em caso de necessidade.

### 3.1.3 Componentes do protótipo

A construção de um protótipo de veículo autónomo tendo por base um carro já existente, implica a adição de novos componentes eletrónicos, uma vez que a tecnologia existente não satisfaz os requisitos propostos para o protótipo em desenvolvimento. Neste contexto, para que o protótipo navegue autonomamente é necessário realizar alterações mecânicas ao veículo, adicionar alguns componentes eletrónicos e as suas respetivas ligações.

No presente subcapítulo, será realizada uma pequena abordagem a todas as alterações que foram efetuadas ao veículo original, assim como dos novos componentes utilizados. O presente subcapítulo será disposto pelos seguintes subtemas:

- *Chassis*;
- *Hardware*;
- *Software*;
- Circuitos elétricos;
- Estudos preliminares.

### 3.1.3.1 *Chassis*

Todos os veículos possuem uma estrutura que suporta os vários componentes, como o motor, suspensão, sistema de travagem, entre outros. Essa estrutura é denominada de *chassis* e é construída com bastante rigor, pois é responsável por garantir que todo o *hardware* instalado no veículo é colocado de forma otimizada e em locais estratégicos (figura 3.7).

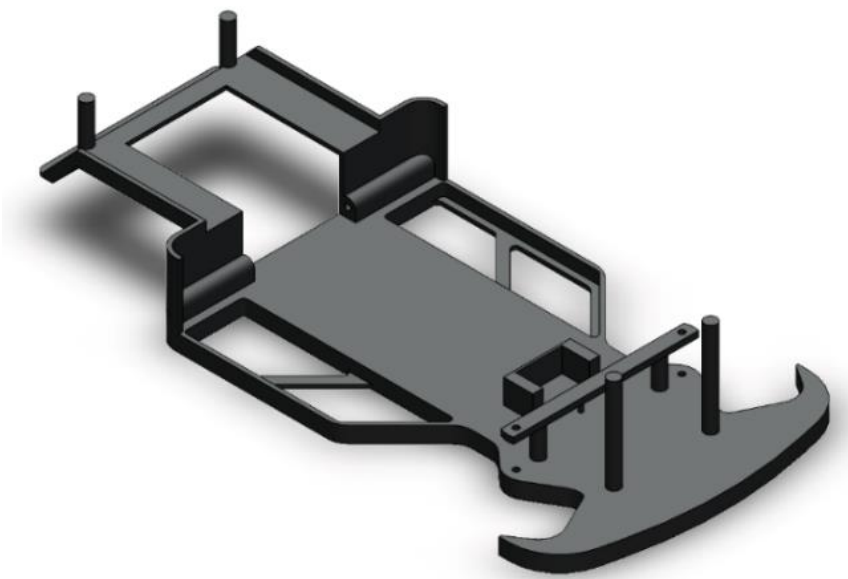


Figura 3.7 – *Chassis do protótipo*

Na robótica móvel podem ser utilizados *chassis* com várias formas geométricas, como circular, quadrangular, retangular, entre outras. O autor M. Ângelo Galego Marques na sua obra elabora uma comparação entre um *chassis* circular e um quadrangular [44]. O autor cita que um *chassis* quadrangular apresenta mais desvantagens, como: maior probabilidade de colidir com um obstáculo, uma vez que não tem a capacidade de se deslocar tão facilmente em percursos estreitos; tem

dificuldade em inverter o sentido de marcha. Em contrapartida, o *chassis* circular apresenta uma enorme vantagem, pois consegue inverter o sentido de marcha sem colidir com nenhum obstáculo, rodando apenas o *chassis* numa direção [44].

Apesar do *chassis* circular apresentar mais vantagens quando comparado com o quadrangular, no protótipo em desenvolvimento será utilizado um *chassis* quadrangular. Esta escolha é justificada por o veículo autônomo em desenvolvimento ter por base um veículo telecomandado e por esta forma geométrica se assemelhar mais com um *chassis* de um veículo real. Contudo, o *chassis* utilizado já possui algumas alterações para que se torne mais eficiente, como é possível ver na figura 3.8.

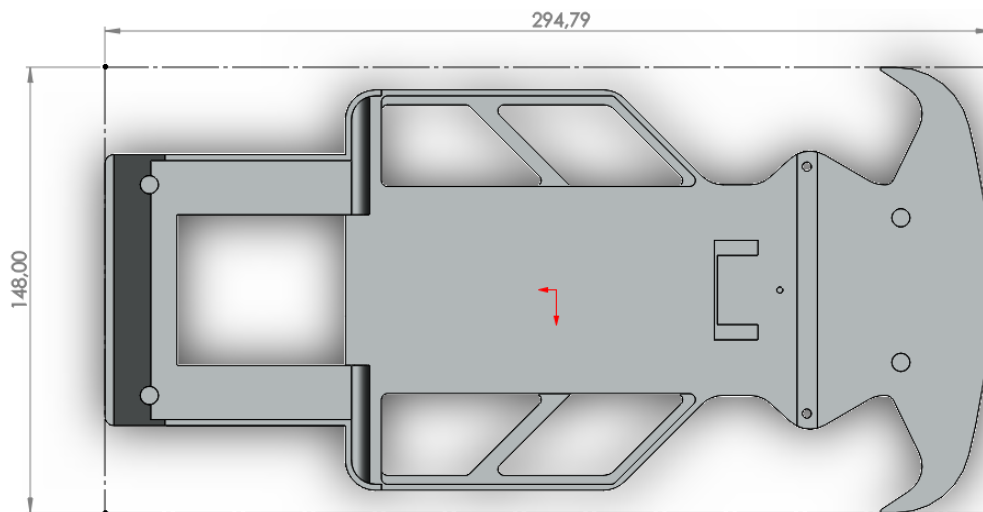


Figura 3.8 – Protótipo - Dimensões do chassis

### 3.1.3.2 Hardware

Para que o veículo em desenvolvimento se torne autônomo, é necessário que lhe seja fornecido um sistema eletrônico ou informático, constituído por um processador, sensores, atuadores, entre outros. Esses componentes que serão adicionados são denominados de *hardware*.

O protótipo de veículo autônomo terá de recorrer ao *hardware* para recolher, processar e analisar todos os dados que possui, porém, a escolha incorreta de um *hardware* apresenta inúmeras desvantagens, como baixa eficiência e resultados pouco fiáveis.

## Unidade de processamento – Arduino

A unidade de processamento é um dos componentes mais importantes do protótipo. Será responsável por processar toda a informação recolhida pelos vários sensores e enviar ações aos atuadores. Apesar de existir muita oferta nesta área, foi escolhida uma unidade de processamento do fabricante Arduino. Este componente é uma placa programável de fácil utilização, capaz de compreender as informações adquiridas pelos sensores e transformá-las num sinal de saída. Para que esta placa funcione corretamente, terá de ser programada numa linguagem de programação Arduino que tem por base o *Wiring*. O *software* que permite programar este componente é o Arduino IDE (figura 3.9).

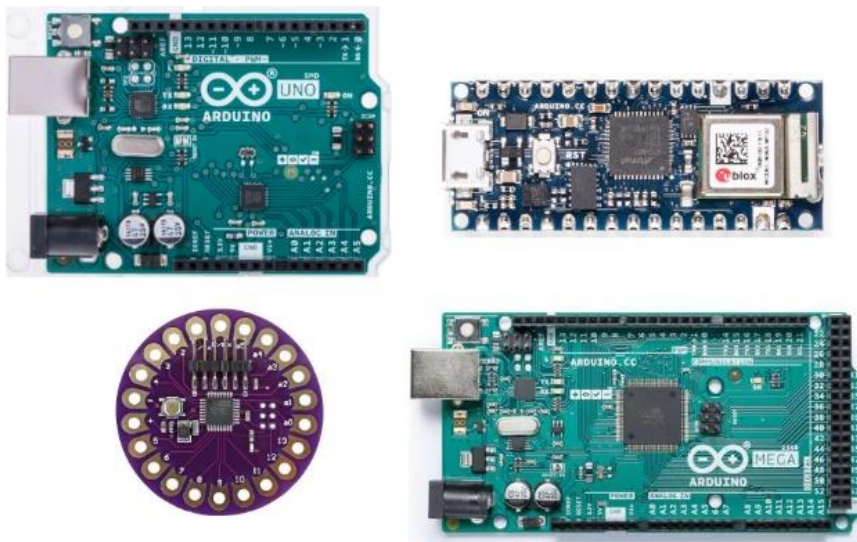


Figura 3.9 – Alguns dispositivos da família Arduino

Este componente foi desenvolvido pela *Ivrea Interaction Design Institute*, onde o fabricante garante que é uma ferramenta de fácil utilização, que pode ser utilizada sem qualquer tipo de formação em programação e eletrónica. Este equipamento tem sido aplicado para vários fins, como [45]:

- Fabrico de sistemas;
- Agricultura inteligente;
- Exploração mineira;
- Cuidados médicos;
- Defesa;
- Domótica;
- Educação;
- Aplicações gerais.

A utilização deste dispositivo tem sido cada vez mais recorrente por apresentar várias vantagens, como se observa na figura 3.10 [46]:

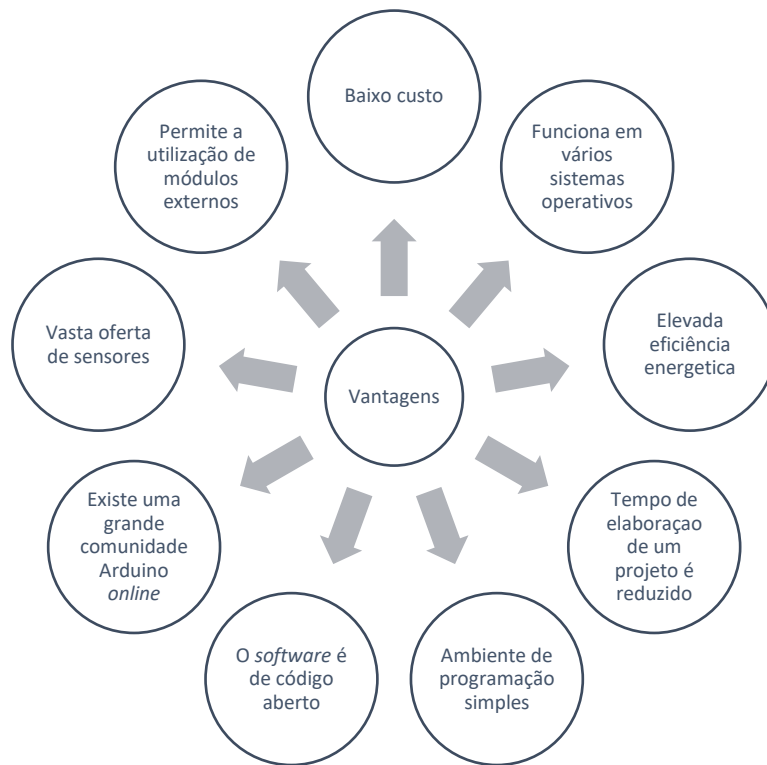


Figura 3.10 – Vantagens da utilização do Arduino

Contudo, nem sempre a utilização deste equipamento apresenta uma mais-valia, tendo algumas limitações, tais como se observa na figura 3.11 [46]:

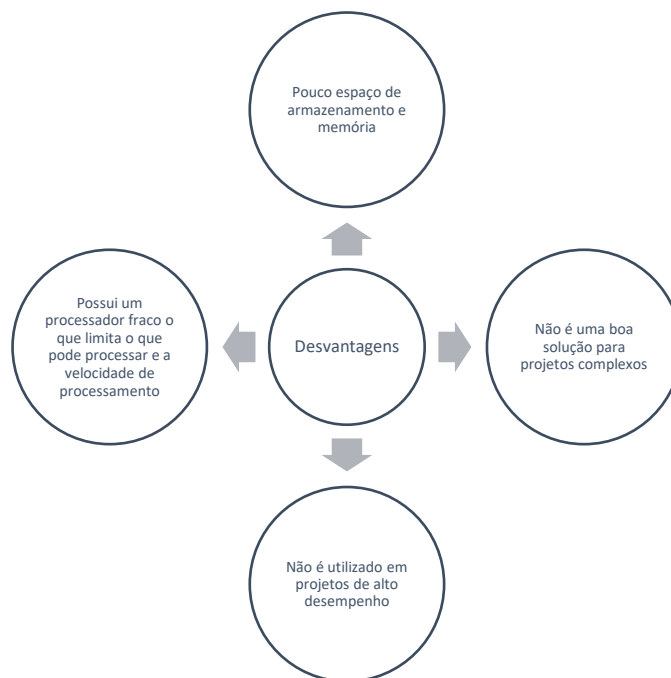


Figura 3.11 – Desvantagens da utilização do Arduino

## Arduino Mega 2560

A escolha de um processador adequado ao projeto em desenvolvimento é fundamental. Apesar de existir uma vasta oferta de equipamentos por parte deste fabricante, o dispositivo utilizado será o Arduino Mega 2560 (figura 3.12). A escolha deste equipamento acontece por possuir o maior número de pinos da família Arduino, sendo 54 entradas e saídas, das quais 16 entradas analógicas e 14 canais PWM. Este dispositivo é compatível com Arduino *shields*, no entanto, por vezes necessita de um *software* de compatibilidade.

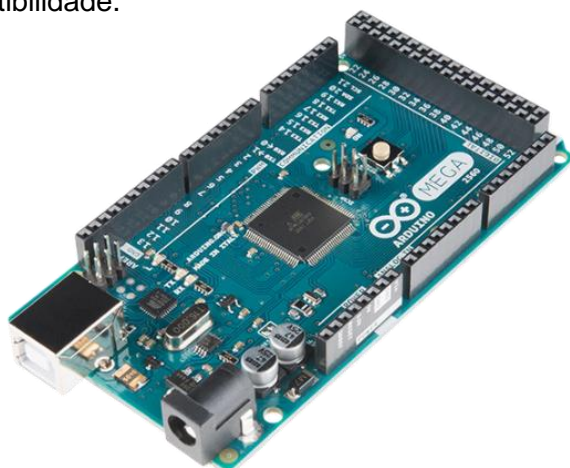


Figura 3.12 – Unidade de processamento - Arduino Mega.

Este equipamento para além das características apresentadas anteriormente, dispõe de uma excelente relação qualidade-preço. De acordo com o fabricante, este equipamento possui as seguintes características apresentadas na tabela 3.1 [46] [47]:

Tabela 3.1 – Propriedades da unidade de processamento

Dimensões	
Comprimento:	101,52 mm
Largura:	53,3 mm
Peso:	37 g
Parâmetros	
Microcontrolador:	ATmega2560
Tensão de operação:	5 V
Tensão de entrada:	7-12 V
Corrente DC por pino I/O:	40 mA
Corrente DC para pino de 3.3V:	50 mA
Memória <i>Flash</i> :	256 KB
SRAM:	8 KB
EEPROM:	4 KB
Velocidade de <i>Clock</i> :	16 MHz

## Motor de tração

Durante a construção do protótipo de veículo autónomo, nem sempre foi necessário adicionar novos componentes ao veículo original, por existirem certos componentes que puderam ser reaproveitados. Um exemplo disso é o motor responsável pelo sistema de tração do veículo. Este motor é de corrente contínua e está acoplado ao eixo traseiro do veículo. Como se trata de um carro telecomandado usado, não foi possível obter mais informações sobre este motor.

## Motor do sistema de direção

O sistema de direção do veículo é bastante importante para orientar as rodas na direção correta. Neste contexto, existe um motor responsável por esta função. Este motor, figura 3.13, também foi reaproveitado do veículo original, não existindo quaisquer informações sobre ele.



Figura 3.13 – Motor presente no sistema de direção

## Módulo GPS

Um dos componentes mais importantes do veículo é o recetor GPS. Este equipamento será responsável por informar o protótipo da sua posição no globo. Neste contexto, foi escolhido o módulo GPS 6MV2, pois oferece valores fiáveis e o seu custo é relativamente baixo (figura 3.14). Este equipamento é composto por um módulo e pela respetiva antena. O fabricante deste equipamento é a *u-blox* e garante que o seu dispositivo pode ser utilizado em várias áreas que necessitem de precisão e posicionamento em tempo real.



Figura 3.14 – Módulo GPS

Apesar deste componente ser de baixo custo, possibilita a comunicação com o GNSS, permitindo recolher algumas informações, como: coordenadas geográficas, velocidade e hora atual (GMT).

Quando se utiliza este componente eletrônico é esperado que ele dê com o máximo de precisão as informações que necessitamos. Para isso, durante a sua utilização é importante evitar que o equipamento se encontre numa zona subterrânea, perto de edifícios, pontes, árvores, entre outras, pois haverá um bloqueio do sinal de satélite ou então sinais refletidos entre as paredes [48].

Este dispositivo possui uma característica que se distingue dos demais, pois tem incorporado uma bateria interna que em caso de falha pode realizar *backup* das informações. Apesar de ser um equipamento de baixo custo, permite comunicar com até 22 satélites, utilizando 50 canais de frequências diferentes. De acordo com o seu fabricante, este componente possui as características dispostas na tabela 3.2 [49]:

Tabela 3.2 – Propriedades do Módulo GPS

<b>Dimensões Módulo</b>	
Comprimento:	30 mm
Largura:	23 mm
Altura:	4 mm
<b>Dimensões Antena</b>	
Comprimento:	25 mm
Largura:	25 mm
Altura:	8 mm
<b>Parâmetros</b>	
Tensão de entrada:	3,3 a 5 V
Consumo de corrente:	45 mA
Taxa de comunicação:	9600 bauds
Sensibilidade do recetor:	-161 dbm
Conetor para antena:	IPEX/UFL
Temperatura de operação:	-40 a 80 °C
<b>Precisões</b>	
Localização horizontal:	2,5 m
Velocidade:	0,1 m/s ou 0,36 km/h
Ângulo de orientação:	0,5°
<b>Limites</b>	
Altitude:	50 km
Velocidade:	500 m/s ou 1800 km/h
Dinâmica:	≤ 4 g

## Placa de ensaio

Nem todos os equipamentos presentes no veículo são utilizados para recolher informações, processar ou realizar uma ação. A utilização de uma placa de ensaio, ou *breadboard*, é bastante comum em projetos de eletrónica por esta possuir vários contactos, permitindo assim realizar ligações eletrónicas facilmente (ver figura 3.15). A placa de ensaio que foi instalada no veículo possui as seguintes características descritas na tabela 3.3:

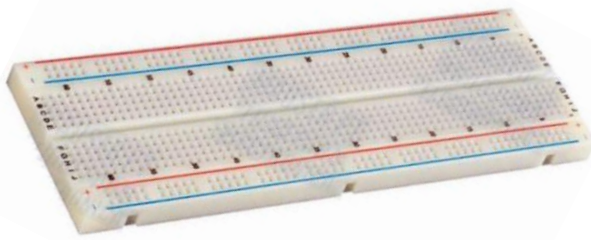


Figura 3.15 – Placa de ensaio

Tabela 3.3 – Propriedades da placa de ensaio

Dimensões	
Comprimento:	165 mm
Largura:	54 mm
Altura:	8,5 mm
Parâmetros	
Contactos:	830

## Sensor Ultrassónico

A utilização de sensores ultrassónicos em protótipos de veículos autónomos é bastante recorrente, pois permitem calcular distâncias a outros objetos que se encontram em torno do veículo. Este componente, figura 3.16, é essencial num projeto de robótica móvel, pois evitará que o veículo colida com quaisquer obstáculos que lhe surja no seu percurso.



Figura 3.16 – Sensor ultrassónico

Este componente utiliza o som para realizar uma medição, possuindo um emissor e um recetor. Durante o seu funcionamento, o emissor emite um sinal de som ao que esse sinal emitido é refletido pelo objeto e retorna novamente ao sensor, sendo recolhido pelo recetor. Durante este procedimento, o sensor conta o tempo que demorou e como sabe a que velocidade é emitido o sinal, consegue calcular a que distância se encontra o obstáculo [50].

Apesar de existir uma vasta oferta de sensores ultrassônicos, o sensor escolhido para incorporar o protótipo em desenvolvimento é um HC-SR04 por possuir uma excelente relação custo-qualidade. De acordo com o autor W. A. Jabbar, et al., os resultados fornecidos por este equipamento são muito fiáveis quando comparados com outros sensores ultrassônicos [51].

Segundo o fabricante deste equipamento é possível calcular a distância de qualquer objeto que se encontre entre 2 e 400 cm do sensor, com uma precisão de 3 mm. Contudo, nem todos os obstáculos conseguem ser identificados pelo sensor com fiabilidade. O fabricante realça que os obstáculos necessitam de ter uma área de colisão igual ou superior a 0,5 m<sup>2</sup> [52].

Além destas propriedades, o fabricante disponibiliza algumas características deste sensor, disponíveis na tabela 3.4 [52].

Tabela 3.4 – Propriedades do sensor ultrassónico

Dimensões	
Comprimento:	45 mm
Largura:	20 mm
Altura:	15 mm
Parâmetros	
Tensão de entrada:	5 V
Corrente de funcionamento:	15 mA
Frequência de funcionamento:	40 Hz
Amplitude máxima de deteção:	400 cm
Amplitude mínima de deteção:	2 cm
Ângulo de medição:	15°

### Controlador de motores

Apesar da unidade de processamento fornecer alguma energia, nem sempre esses valores são suficientes para satisfazer os requisitos impostos pelos demais componentes. Neste contexto, será necessário adicionar um controlador de motores ao protótipo, para garantir que não falta energia aos motores responsáveis pelos sistemas de tração e direção.

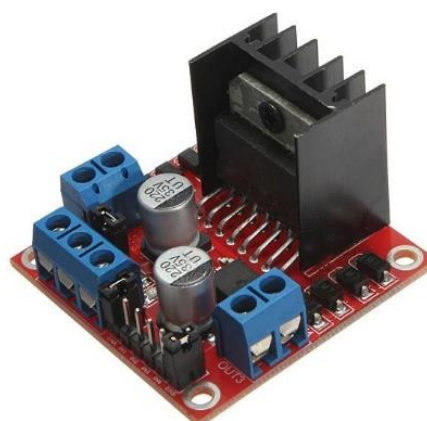


Figura 3.17 – Controlador de motores

Existe uma grande variedade de controladores de motores disponíveis no mercado, desde Arduino *shields*, como por exemplo o L293D, a outras soluções como o L298D, figura 3.17. Para incorporar o protótipo foi escolhido o controlador L298D, por este equipamento apresentar várias vantagens de utilização, como o controlo independente de velocidade e rotação dos motores.

Além desta característica, o seu fabricante disponibiliza as propriedades que caracterizam este equipamento, que estão disponíveis na tabela 3.5 [53]:

Tabela 3.5 – Propriedades do Controlador de Motores

Dimensões	
Comprimento:	43 mm
Largura:	43 mm
Altura:	27 mm
Peso:	30 g
Parâmetros	
Chip:	ST L298N
Tensão de saída:	4 a 46 V
Corrente de saída (máx):	2 A/canal
Tensão lógica:	5 V
Corrente lógica:	0 a 36 mA
Potência (máx):	25 W
Limites de Temperatura:	-25 a +130°C
Consegue controlar	
Motores DC:	≤ 2 unid
Motores de passo:	≤ 1 unid

## Magnetómetro

Com o intuito de orientar o veículo, será adicionado ao protótipo um magnetómetro, figura 3.18. Este sensor tem a capacidade de medir a intensidade de campos magnéticos, podendo ser utilizado como bússola. O sensor escolhido para este fim é um HMC5883L, pois oferece várias vantagens como [54]:

- Baixo custo;
- Pequeno tamanho;
- Alta precisão;
- Fácil instalação.

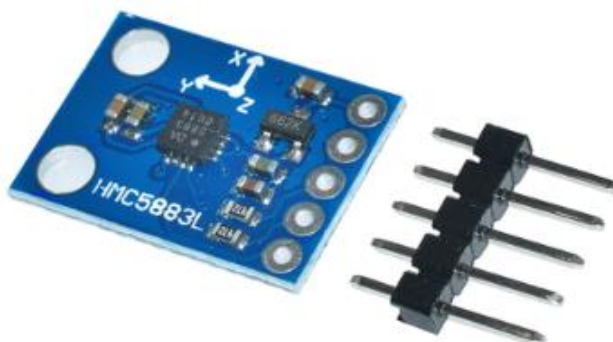


Figura 3.18 – Magnetómetro

De acordo com os autores P. Škrabánek, et al., este dispositivo permite detectar campos magnéticos nos três eixos cartesianos [55]. Durante a sua utilização, funcionará em simultâneo com o módulo GPS cujo objetivo é orientar o veículo para a coordenada geográfica pretendida.

Vários autores citam que para prevenir as interferências magnéticas e aumentar a credibilidade dos resultados obtidos, este equipamento terá de ser instalado a uma distância de pelo menos 15 cm da restante eletrónica e durante a sua utilização evitar a proximidade com vedações ou coberturas metálicas [56].

O fabricante disponibiliza algumas informações técnicas sobre este equipamento, como pode ser observado na tabela 3.6 [57]:

Tabela 3.6 – Propriedades do magnetómetro

Dimensões	
Comprimento:	18 mm
Largura:	13 mm
Peso:	17 g
Parâmetros	
Chip:	HMC5883L
Tensão de entrada:	3 a 5 V
Eixos de medição:	3
Faixa de medição:	$\pm 1,3$ a 8 Gauss
Resolução:	5 mG
Interface de comunicação:	I2C

### Sistema de alimentação

Para que o protótipo navegue autonomamente necessita de um sistema de alimentação que forneça energia a todos os componentes presentes no veículo. Neste sentido, será utilizada uma bateria recarregável proveniente da modalidade de modelismo. A bateria utilizada, figura 3.19, é de lítio, e de acordo com as especificações do seu fabricante, possui as características que estão descritas na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Propriedades da fonte de alimentação

Dimensões	
Comprimento:	131 mm
Largura:	42,5 mm
Altura:	19,5 mm
Peso:	252 g
Parâmetros	
Tipo:	Lipo
Células:	3S
Capacidade:	3300 mAh
Tensão:	11,1 V
Taxa de descarga:	30C



Figura 3.19 – Fonte de alimentação

## Módulo Bluetooth

Para além dos sensores que garantem o bom funcionamento do veículo, existem outros componentes que são utilizados para estabelecer a comunicação entre o protótipo e um dispositivo de interface com o utilizador. Um exemplo disso é o módulo *Bluetooth*. Este equipamento pode ser utilizado, para analisar em tempo real algumas informações úteis relativas ao veículo, como a distância a que se encontra da coordenada objetivo, se já cumpriu todos os objetivos que lhe foram propostos, entre outras.

O módulo *Bluetooth* selecionado para o protótipo foi um HC-06, figura 3.20. O fabricante disponibiliza algumas propriedades deste componente que podem ser observadas na tabela 3.8 [58]:

Tabela 3.8 – Propriedades do módulo Bluetooth

Dimensões	
Comprimento:	36,5 mm
Largura:	16 mm
Peso:	4 g
Parâmetros	
Tensão de entrada:	3,3 V
Corrente de funcionamento:	50 mA
Temperatura de operação:	-20 a 55 °C
Frequência operacional:	2,4 GHz
Potência de transmissão:	≤ 4 dBm
Sensibilidade:	≤ -84 dBm
Protocolo USB:	USB v1,1/2,0

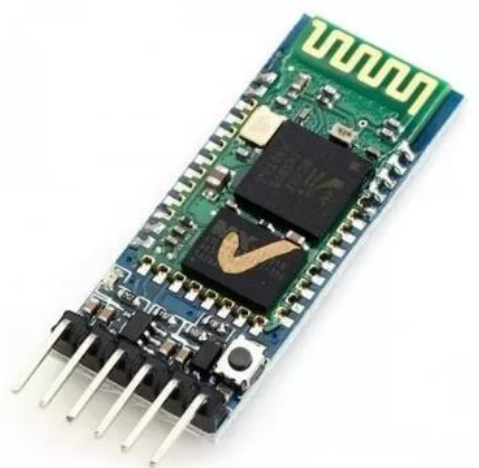


Figura 3.20 – Módulo Bluetooth

Este equipamento poderá ser uma excelente solução para diversas áreas, como:

- Comunicar entre diferentes dispositivos eletrónicos, como *smartphones*, computadores, *tablets*, entre outros;
- Poder ser utilizado em projetos industriais como robóticos;
- Poder ser utilizado como um acessório sem fio de um *smartphone*, tanto para enviar como para receber dados.

### 3.1.3.3 Software

Durante a concepção do protótipo de veículo autónomo a partir de um carro telecomandado é necessário que ele execute uma tarefa por meio de um *software* instalado na unidade de processamento, de modo a controlar o *hardware* presente no protótipo. Para validar os resultados obtidos é importante escolher um *software* adequado que consiga representar os dados fornecidos pelo veículo.

Neste contexto, esta secção será dedicada a apresentar os *softwares* utilizados para programar o *hardware*, extrair dados do veículo ou mesmo representar essa informação.

Antes do protótipo executar uma tarefa é necessário que a sua unidade de processamento contenha um programa. Como a unidade de processamento pertence ao fabricante Arduino, existe um *software* disponibilizado pelo fabricante para programar os seus equipamentos, denominado de Arduino IDE. Após esta tarefa estar concluída é necessário analisar e representar os dados provenientes do veículo. Para isso, será utilizado o aplicativo CoolTerm que gerará um ficheiro no formato .txt. A representação gráfica dos dados fornecidos pelo veículo será realizada no *software* MATLAB®. Contudo, apesar deste último *software* ter a capacidade de abrir ficheiros no formato .txt, estes dados nem sempre chegam no formato adequado para análise. Com o objetivo de solucionar esta situação, faz-se uso do *software* EXCEL para tratar e separar por várias colunas toda a informação presente no ficheiro gerado pelo CoolTerm e alterar o formato do ficheiro .txt para .xlsx (figura 3.21).

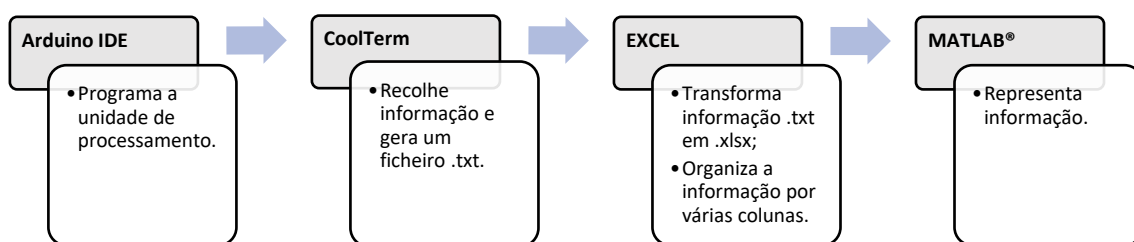


Figura 3.21 – Ordem para extração e análise de dados

### Arduino IDE

Apesar de existirem vários *softwares* que permitem a programação de uma unidade de processamento Arduino, o seu fabricante disponibiliza um *software* para esse fim. O *software* disponibilizado é o Arduino IDE. O fabricante garante que o seu

*software* facilita a escrita do código em qualquer equipamento da família Arduino sem a necessidade de ligação à internet [59].

Este *software* pode ser instalado em qualquer sistema operativo. Todos os programas desenvolvidos neste *software* são apelidados de esboços e quando gravados, o seu ficheiro fica no formato .ino [59].

## CoolTerm

Para se poder representar graficamente todo o trajeto realizado pelo veículo é necessário um *software* que recolha todas as informações pertinentes do veículo. Para isso, foi escolhido o aplicativo CoolTerm. Optou-se por esta ferramenta, pois utiliza as portas série de um computador para comunicar com o *hardware* [60].

Para efetuar a troca de informações entre o aplicativo CoolTerm e o veículo, a sua ligação é via cabo e serão transferidas todas as informações que contém o *serial print*. Essas informações podem ser as coordenadas geográficas do veículo, a distância que se encontra do objetivo, quantas coordenadas faltam alcançar, entre outras informações.

Este aplicativo foi desenvolvido por R. Meier e possui alguns recursos como [60]:

- Ligação em simultâneo através das portas série;
- Envio de dados e arquivos;
- Recolha de dados e armazenamento no formato de texto (.txt);
- Apresentação dos dados recolhidos em texto sem formatação ou formato hexadecimal;
- Entre outros.

## MATLAB®

Com o objetivo de representar a trajetória descrita pelo veículo num ambiente virtual, recorreu-se à utilização do *software* MATLAB® para esse fim. Este *software* é uma plataforma de programação e computação numérica, utilizada para analisar dados, desenvolver algoritmos e criar modelos. O MATLAB® é uma excelente ferramenta, pois permite executar o cálculo matemático de matrizes e de álgebra linear, possuindo várias

bibliotecas que permitem resolver algumas questões matemáticas mais rapidamente [61].

A utilização desta ferramenta destina-se a vários setores, pois permite a realização de tarefas, tais como [61]:

- Análise e representação de dados;
- Desenvolvimento de algoritmos;
- Cálculo matricial e de álgebra linear;
- Representação gráfica de dados;
- Entre outras;

Este *software* é uma ferramenta indispensável na elaboração deste trabalho de projeto, pois será utilizada para efetuar uma representação bidimensional da trajetória efetuada pelo veículo. Para que isso ocorra, necessita que o ficheiro gerado pelo CoolTerm tenha de ser dividido entre várias colunas para facilitar o trabalho executado pelo *software* MATLAB®. Neste contexto, será utilizado o *software* EXCEL para realizar essa operação.

## EXCEL

O EXCEL é uma ferramenta desenvolvida pela Microsoft® que utiliza uma folha de cálculo para análise e visualização de dados [62]. Contudo, a utilização do *software* EXCEL será apenas como intermediário entre o aplicativo CoolTerm e o MATLAB®. O veículo durante a sua trajetória envia ao aplicativo CoolTerm várias informações relevantes para análise do seu percurso. Após recolhida toda a informação da trajetória do veículo, o aplicativo CoolTerm gera um ficheiro de texto (.txt) com todos os dados recolhidos. Como se trata de um ficheiro de texto, a informação vem toda compactada o que dificulta o trabalho do MATLAB®. Neste contexto, será utilizado o EXCEL para separar essa informação e dividi-la em várias colunas.

A escolha deste *software* para executar esta tarefa é devido a este possibilitar a leitura de ficheiros de texto (.txt), separar as informações em várias colunas e gerar um ficheiro no formato .xlsx que facilita a leitura dos dados por parte do *software* MATLAB®.

### 3.1.3.4 Circuitos elétricos

O desenvolvimento do protótipo do veículo autónomo passa por várias etapas, tais como a desmontagem do veículo original, a escolha do *hardware*, a ligação dos vários componentes do veículo, entre outras. Neste contexto, a presente secção será dedicada a todas as ligações presentes no veículo, sendo elas entre atuador-módulo, módulo-Arduino, sensor-Arduino ou outras relevantes.

As ligações são bastante importantes durante a construção do veículo, pois sem elas os vários sensores não conseguem recolher informações e os atuadores não funcionarão. Para isso, nesta secção será apresentado o esquema das ligações do controlador do veículo. Apesar de existirem figuras com a representação das várias ligações, para facilitar a leitura das mesmas, existe uma tabela onde serão indicados os nomes dos vários pinos do sensor e a respetiva ligação à unidade processamento ou módulo. As ligações serão realizadas com fio de cobre.

#### Ligação: Unidade processadora – Controlador de motores

O controlador de motores utilizado é um L298N. Este controlador é de fácil ligação com a unidade de processamento. Este módulo permite controlar dois motores, sendo que todas as conexões serão utilizadas, como mostra a figura 3.22.

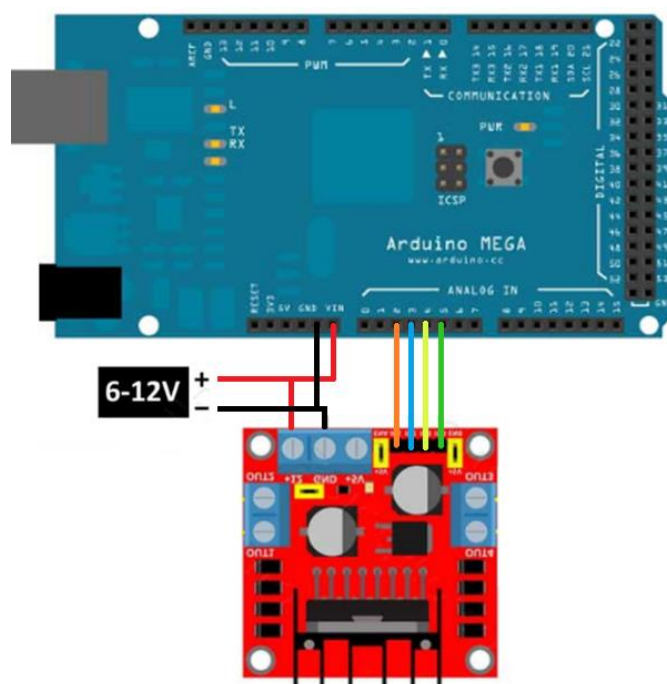


Figura 3.22 – Ligação do controlador de motores à unidade de processamento

O controlador de motores dispõe de 7 pinos, sendo que a sua ligação com a unidade de processamento está assinalada na tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Pinos de ligação - Controlador de Motores

Controlador de motores	
IN1:	2
IN2:	3
IN3:	4
IN4:	5
+12 V:	+12 V
Gnd:	Gnd
+5 V:	-

#### Ligação: Controlador de motores – motores

O controlador de motores deve garantir que não falta energia aos motores que atuam no sistema de direção e de tração do veículo. Para isso, a fonte de alimentação estará ligada diretamente ao controlador de motores (ver tabela 3.10).

Tabela 3.10 – Pinos de ligação - Motores

Motores	
Tração:	OUT3 e OUT4
Direcional:	OUT1 e OUT2

Este controlador permite conectar dois motores (tabela 3.10), que é o suficiente para o protótipo em desenvolvimento. A ligação entre o controlador de motores e os motores pode ser observada na figura 3.23.

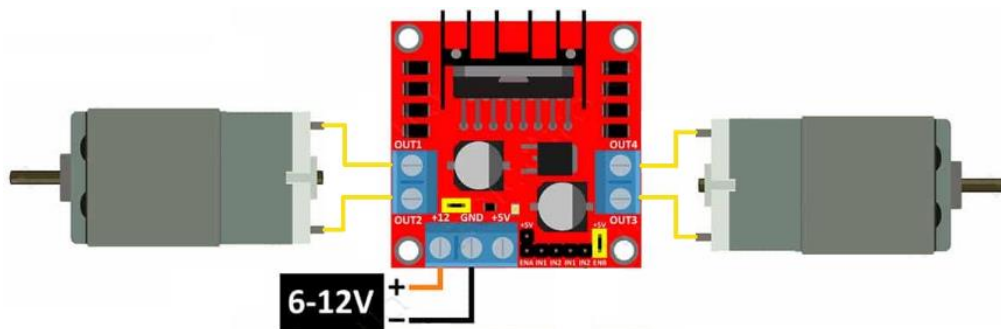


Figura 3.23 – Ligação dos Motores ao Controlador de Motores.

## Ligação: Módulo GPS – Unidade processadora

A montagem do veículo inclui conectar os vários componentes eletrônicos entre si. Com isto, a ligação correta do módulo GPS é bastante importante. Este componente é composto por um módulo e uma antena que estão interligados via cabo. Para que este equipamento funcione, é necessário existir uma ligação entre o módulo e a unidade de processamento. Para isso, o módulo dispõe de quatro pinos, sendo eles: o VCC, que é a alimentação do módulo; o GND, ligação ao pino neutro; o TX, que é o emissor do módulo; e o RX, sendo o recetor do módulo (tabela 3.11).

Tabela 3.11 – Pinos de ligação - Módulo GPS

Módulo GPS	
Vcc:	+5 V
Rx:	52
Tx:	53
Gnd:	Gnd

Ao analisar as características do equipamento, o seu fabricante aconselha que o pino do recetor funcione com uma tensão de 3,3 V. Contudo, a unidade de processamento só consegue disponibilizar uma tensão de 5 V. Para garantir o bom funcionamento deste equipamento, será realizado um divisor de tensão que converterá os 5V fornecidos pela unidade de processamento em 3,3 V como é aconselhado pelo fabricante. Para isso, serão utilizadas duas resistências de 1 k $\Omega$  e 2,2 k $\Omega$ , integradas no circuito que se apresenta na figura 3.24.

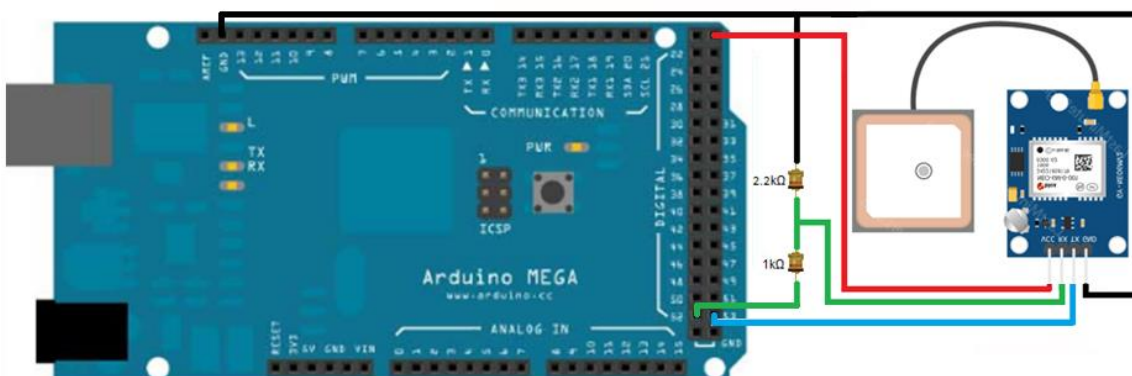


Figura 3.24 – Ligação do módulo GPS à unidade de processamento

## Ligação: Sensor ultrassônico – Unidade de processamento

O protótipo em desenvolvimento possui dois sistemas de navegação, um baseado em coordenadas geográficas e outro por sensores ultrassônicos. Neste contexto, a presença de sensores ultrassônicos no veículo é inevitável para detetarem a presença de alguns obstáculos ao seu redor e medir as distâncias a que se encontram.

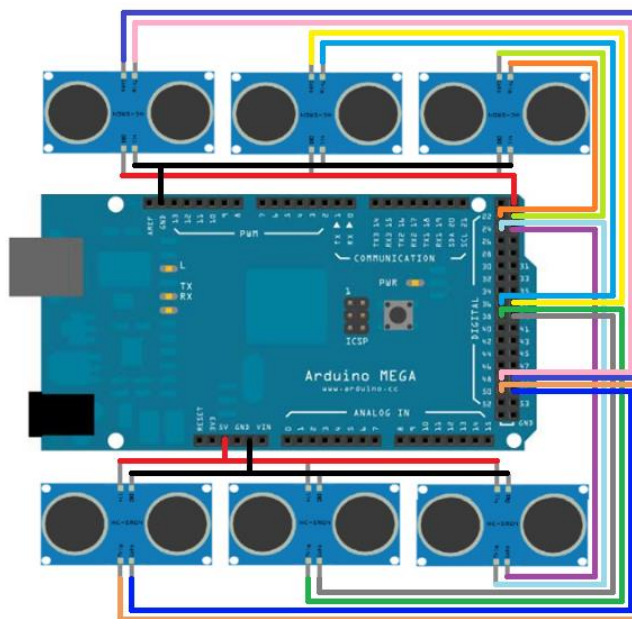


Figura 3.25 – Ligação do sensor ultrassônico à unidade de processamento

Para que a unidade de processamento recolha a informação proveniente do sensor é necessário existir uma ligação eletrónica como meio de comunicação. Para isso, o sensor ultrassônico dispõe de quatro pinos que são: o Vcc, que é utilizado para alimentar o sensor; o Gnd, que terá de ser ligado a um pino neutro; o Trig, que é o pino do emissor do sensor; e o Echo, que é o recetor do sinal emitido pelo sensor (ver figura 3.25). Para garantir que o veículo não colide com quaisquer obstáculos, serão instalados seis sensores ultrassônicos no veículo, estando três deles na dianteira e os restantes na traseira (ver tabela 3.12).

Tabela 3.12 – Pinos de ligação - Sensores Ultrassônicos

Ultrassônicos					
Dianteira					
Esquerdo		Centro		Direito	
Trig:	25	Trig:	39	Trig:	51
Echo:	24	Echo:	38	Echo:	50
Vcc:	+5 V	Vcc:	+5 V	Vcc:	+5 V
Gnd:	Gnd	Gnd:	Gnd	Gnd:	Gnd
Traseira					
Esquerdo		Centro		Direito	
Trig:	23	Trig:	37	Trig:	49
Echo:	22	Echo:	36	Echo:	48
Vcc:	+5 V	Vcc:	+5 V	Vcc:	+5 V
Gnd:	Gnd	Gnd:	Gnd	Gnd:	Gnd

## Ligação: Magnetômetro – Unidade de processamento

O magnetômetro funcionará em simultâneo com o módulo GPS. Este sensor será responsável por orientar o veículo para a coordenada geográfica pretendida. Para que isto seja possível, este sensor possui cinco pinos, sendo apenas quatro deles utilizados neste projeto (figura 3.26).

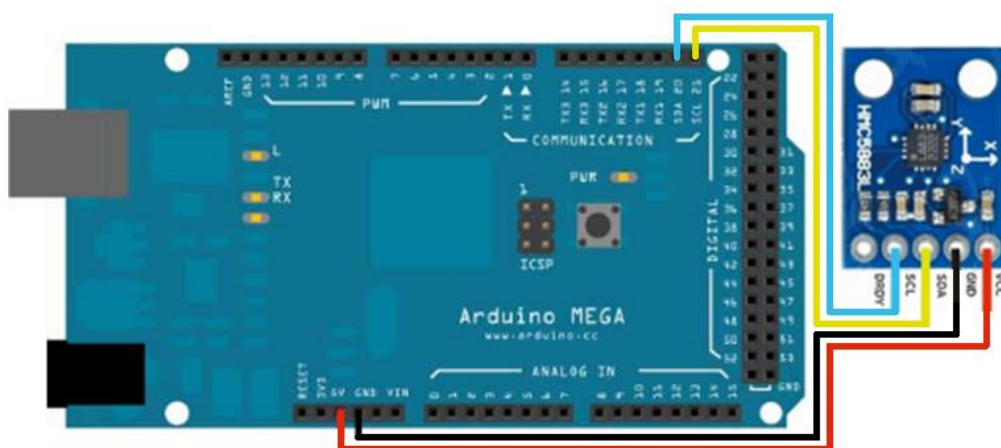


Figura 3.26 – Ligação do magnetômetro à unidade de processamento

À semelhança do que acontece anteriormente, os pinos Vcc e Gnd são utilizados para garantir a alimentação do sensor. Já os pinos SCL e SDA só podem ser conectados à unidade de processamento em pinos específicos (pinos 20 e 21). É de realçar, que este equipamento terá de ser colocado a pelo menos 15 cm da restante eletrónica para evitar problemas de interferência magnética (tabela 3.13).

Tabela 3.13 – Pinos de ligação - Magnetômetro

Magnetômetro	
Vcc:	+5 V
SCL:	20
SDA:	21
DRDY:	-
Gnd:	Gnd

## Ligação: Módulo *Bluetooth* – Unidade de processamento

Nem todos os componentes presentes no protótipo são utilizados para auxiliar o veículo durante a sua condução. Neste contexto, o módulo *Bluetooth* pode ser utilizado para monitorizar alguns dados do veículo, como as distâncias a obstáculos, a posição atual do veículo, entre outras. Este equipamento dispõe de seis pinos de ligação, no qual serão utilizados apenas quatro deles (tabela 3.14).

Tabela 3.14 – Pinos de ligação - Módulo *Bluetooth*

<b>Módulo <i>Bluetooth</i></b>	
Status:	-
RxD:	Tx1
TxD:	Rx1
Gnd:	Gnd
Vcc:	+5 V
En:	-

À semelhança do módulo de GPS, o seu fabricante aconselha que o pino de receção Rx seja alimentado apenas com 3,3 V. De modo a converter os 5 V fornecidos pela unidade de processamento, será necessário colocar um divisor de tensão, sendo ligado à unidade processamento, tal como apresentado no esquema da figura 3.27.

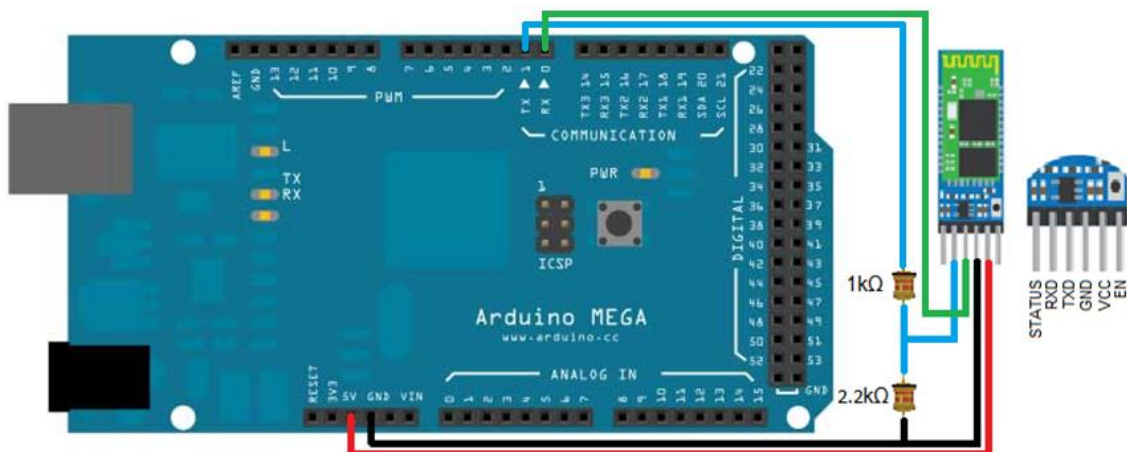


Figura 3.27 – Ligação do módulo *Bluetooth* à unidade de processamento

### 3.1.3.5 Estudos preliminares

Durante o desenvolvimento do protótipo de veículo autónomo com base num carro telecomandado é necessário cumprir algumas tarefas indispensáveis para se alcançar o sucesso, como a escolha de sensores e atuadores adequados, realizar algumas alterações mecânicas e interligar o vários *hardware*. Contudo, nem sempre o *hardware* escolhido apresenta o melhor desempenho para o protótipo. Para evitar essa situação, nesta secção serão apresentados alguns estudos preliminares realizados em alguns componentes eletrónicos.

As realizações desses estudos preliminares podem ser importantes para verificar algumas limitações ou erros de construções mecânicas dos vários componentes do veículo. Neste contexto, será apresentado um estudo relativamente a: Posicionamento dos sensores ultrassónicos para abrangerem o máximo de área possível; e erro associado ao módulo de GPS.

#### Posicionamento dos Sensores Ultrassónicos

Um dos sistemas de navegação presentes no protótipo em desenvolvimento é um sistema baseado nas medições realizadas pelos sensores ultrassónicos. Para que este sistema de navegação consiga captar a máxima informação ao redor do veículo, é necessário que sejam utilizados sensores que abranjam o máximo de campo de “visão”, de modo a evitar que este colida com obstáculos. Neste contexto, serão utilizados seis sensores ultrassónicos no veículo e colocados de forma estratégica de modo a evitar qualquer colisão. Os seis sensores serão distribuídos, de forma igual, pela traseira e pela dianteira do veículo.

Neste estudo preliminar, será realizada uma verificação da posição dos sensores, de modo que estes abranjam a maior área possível de deteção sem a existência de zonas sem vigilância (“ângulos mortos” do veículo). Para isso, recorrer-se-á ao auxílio do *software SolidWorks®*. De acordo com o fabricante dos sensores ultrassónicos, este equipamento possui as seguintes características [52]:

- Amplitude máxima de deteção: 400 cm;
- Amplitude mínima de deteção: 2 cm;
- Ângulo de medição: 15°.

Conhecendo as características dos sensores é possível recorrer ao uso do software *SolidWorks*®, para se modelar a geometria (cônica) do campo de visão e projetar uma plataforma para fixar os sensores numa posição que maximiza a sua área de detecção. É de realçar que tanto a plataforma da frente como da traseira do veículo são iguais.

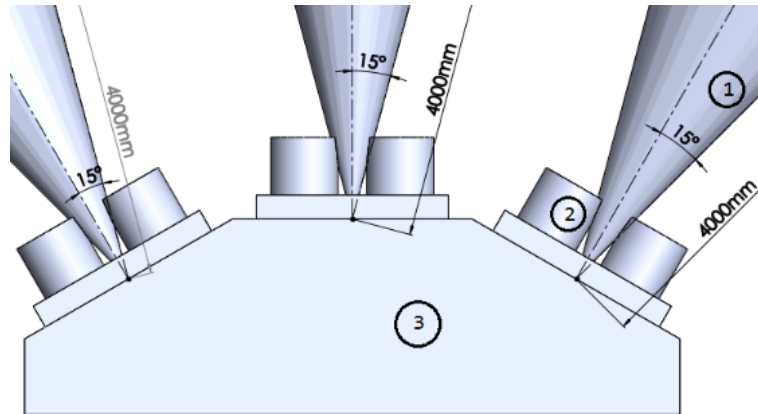


Figura 3.28 – Representação em *SolidWorks* do posicionamento dos sensores Ultrassônicos

Na figura 3.28 é possível observar vários componentes importantes para realizar este estudo, como:

1. Ângulo do cone de medição do sensor;
2. Representação do sensor ultrassônico utilizado;
3. Plataforma que agrega os sensores.

Para se perceber a importância da posição dos sensores na plataforma, inicialmente foi colocado um ângulo aleatório entre os ângulos dos cones de medição. É possível concluir que a realização do estudo é indispensável, pois numa primeira análise existe uma grande interseção dos ângulos dos cones de medição.

Como o ângulo escolhido aleatoriamente é bastante elevado, figura 3.29, originou a interseção entre os ângulos dos cones de medição dos sensores. Esta configuração apresenta, algumas desvantagens, tais como:

- Dois ou mais sensores capturarem o mesmo obstáculo;
- Área total abrangida pelos cones ser reduzida.

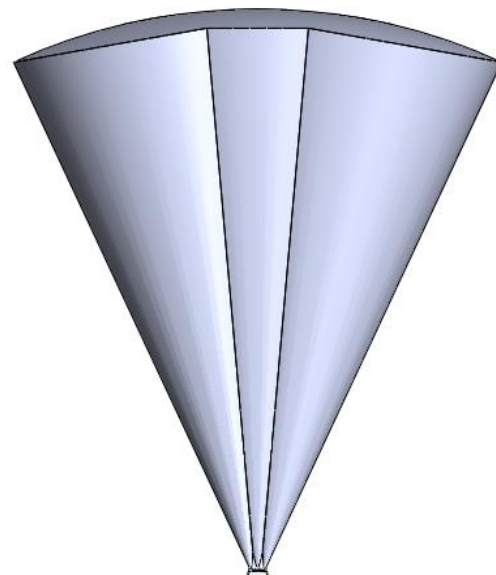


Figura 3.29 – Cone de medição do sensor ultrassônico. Ângulo da base de 85°

O ângulo inicial era bastante elevado o que levou à sobreposição dos cones de medição dos sensores ultrassônicos. Neste sentido, reduziu-se o valor do ângulo entre os cones de medição de  $85^\circ$  para os  $67,5^\circ$  e obteve-se uma diferença bastante notória, como se apresenta na figura 3.30.

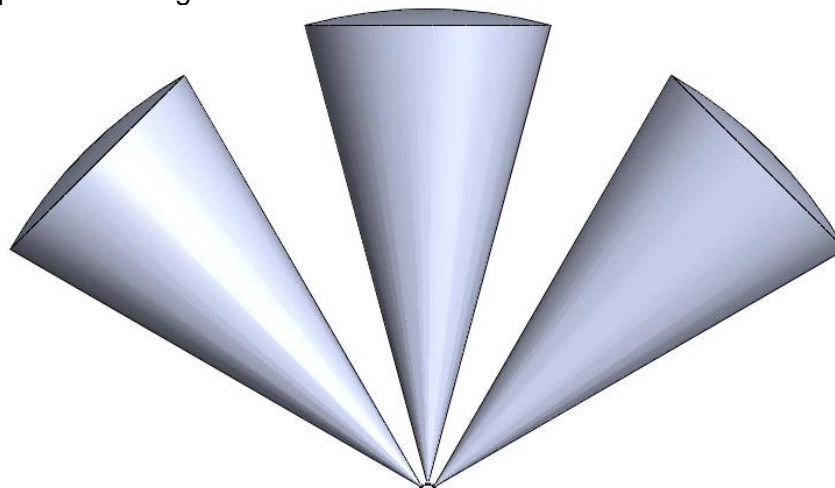


Figura 3.30 – Cone de medição do sensor ultrassônico.  
Ângulo da base de  $67,5^\circ$

Comparando-se a figura 3.29 com a figura 3.30 é visível que já não existe interseção dos cones de medição. Contudo, existe uma região entre os vários cones de medição que não está a ser monitorizada pelos sensores. Nessa região pode existir obstáculos que não estão a ser detetados, o que levará o veículo a colidir.

Neste contexto, para que seja abrangida a maior área possível, sem sobreposição dos cones nem a existência de zonas sem monitorização, tal como demonstra a figura 3.31, é necessário escolher um ângulo que esteja entre os  $67,5^\circ$  e os  $85^\circ$ . Para se determinar esse valor, recorreu-se ao *software SolidWorks®* para analisar a variação de ângulos no modelo tridimensional.

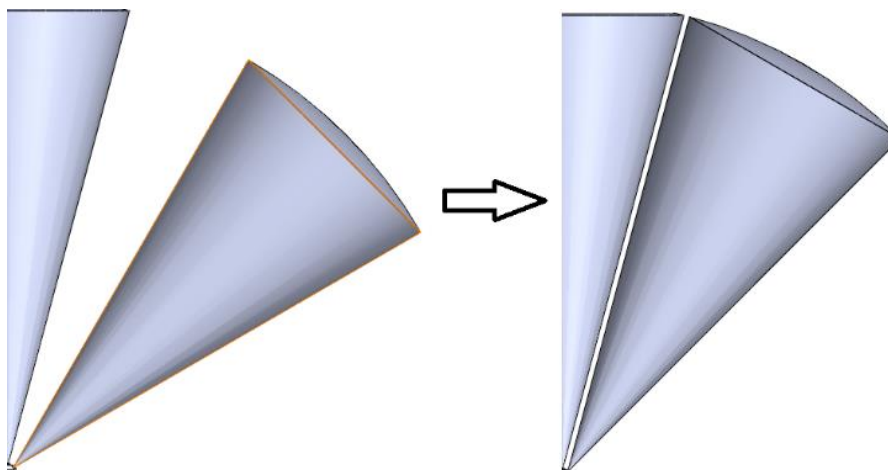


Figura 3.31 – Processo de Otimização do Cone

Durante o processo de otimização é necessário ter em consideração alguns requisitos, como as geratrizes mais próximas entre os cones de medição serem paralelas. Para que esse fenômeno ocorra, traçou-se uma reta numa extremidade da base da plataforma, pois é esse ângulo que é alterado, garantiu-se que essa reta seja exatamente paralela à geratriz, tal como é observado na figura 3.32.

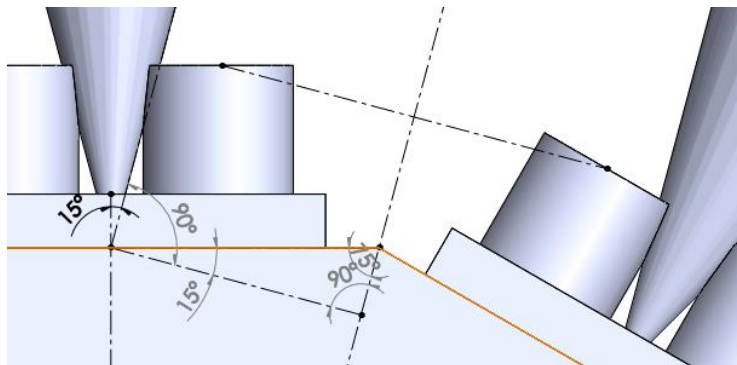


Figura 3.32 – Determinação do ângulo da base

Após a aplicação das características descritas anteriormente, conclui-se que o ângulo que apresenta a maior otimização é de  $75^\circ$ . Ao se aplicar esse ângulo, é possível concluir que a área de monitorização está abrangida ao máximo, não existindo sobreposição dos cones de medição, nem zonas sem vigilância por parte dos sensores. Na figura 3.33 é representado a área abrangida pelos cones quando utilizada esta configuração.

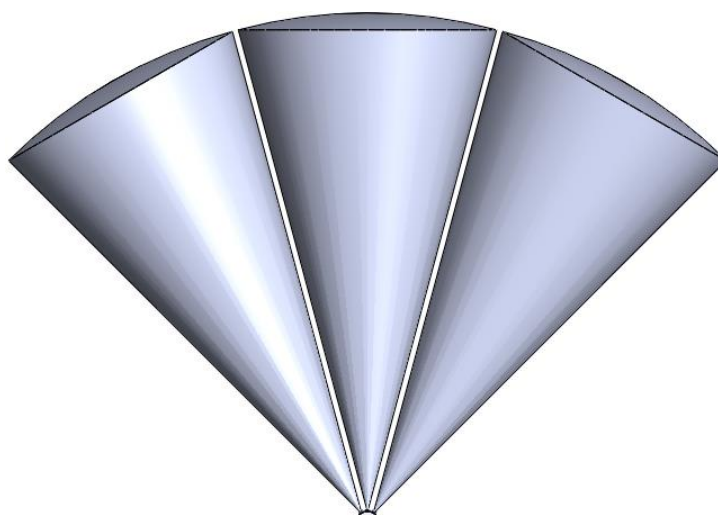


Figura 3.33 – Otimização dos cones gerados pelos sensores ultrassônicos

Contudo, ainda existem umas pequenas faixas que não se encontram sobre vigilância dos sensores. Esse problema pode ser resolvido aproximando-se mais os sensores. No entanto, essas faixas podem ser ignoradas, pois a distância entre os vários cones de medição é de pequenas dimensões.

## Erro associado ao módulo GPS

Um dos sistemas de navegação que equipa o veículo é um sistema que utiliza coordenadas geográficas para guiar o veículo para a posição desejada. Para que este sistema funcione necessita de um módulo GPS que recolhe a posição atual do veículo e de um magnetómetro para determinar o ângulo que orienta o protótipo para a posição desejada.

No entanto, é importante analisar a precisão e exatidão do módulo GPS para efetuar a recolha das coordenadas geográficas do veículo. Neste contexto, serão realizados alguns ensaios cujo objetivo é perceber e analisar o erro associado a este equipamento. Para se poder analisar os resultados obtidos recorrer-se-á ao uso do *software* MATLAB®.

Para a realização dos ensaios efetuou-se a montagem do módulo GPS na unidade de processamento, como é possível observar na figura 3.24. Após a conclusão da montagem e a unidade de processamento programada, foi possível recolher alguns dados relativamente à posição onde se encontrava o módulo. Para se obter uma variada amostra de resultados, recolheram-se dados do módulo GPS durante cerca de 20 min, obtendo uma amostra com 1174 coordenadas geográficas. É de realçar que os primeiros valores obtidos pelo módulo GPS não foram considerados porque podiam possuir um erro elevado e interferir diretamente com a qualidade dos resultados. Durante os ensaios o equipamento em estudo não sofreu qualquer movimento, encontrando-se sempre na mesma localização e numa zona sem edifícios ao seu redor, pontes, árvores ou quaisquer estruturas que impedissem a recessão dos sinais provenientes do satélite ou sinais refletidos em paredes [48].

A amostra recolhida pelo módulo pode ser observada na figura 3.34:

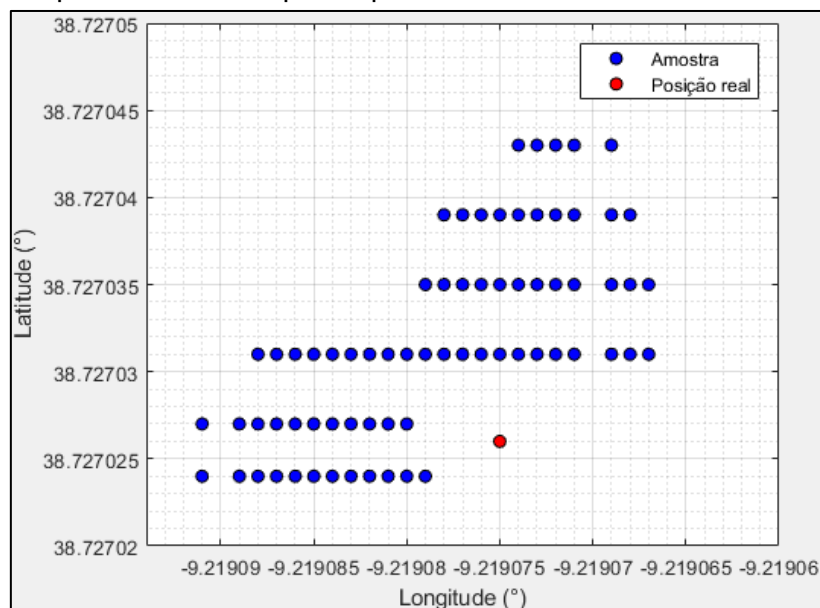


Figura 3.34 – Amostra recolhida pelo módulo GPS

Como foi mencionado anteriormente, o módulo GPS não sofreu qualquer movimento durante os testes realizados, contudo, ao se analisar a figura anterior é possível observar que a posição geográfica se alterou ao longo do tempo. Esta situação é esperável, uma vez que existem várias condicionantes que alteram a precisão deste equipamento. Para se perceber qual é o erro associado a este módulo é importante conhecer a posição real onde foram concebidos os ensaios. Através do *Google Maps* foi possível medir essa posição, sendo o valor da latitude de  $38,727026^\circ$  e a longitude igual a  $-9,219075^\circ$ . A posição real está assinalada na figura 3.34 por um ponto vermelho.

Apesar dos valores adquiridos na amostra apresentarem alguma disparidade, é possível observar que apresentam repetibilidade. Para analisar o quão se afastam os valores uns dos outros, os dados recolhidos sofrerão uma mudança de unidade, ou seja, de grau para metro. Esta conversão é apenas para auxiliar na compreensão de valores, uma vez que é mais fácil a compreensão de uma medida usando uma unidade fundamental do sistema internacional, o metro, do que o grau. Na sua conversão, a origem das coordenadas geográficas está situada na coordenada real (figura 3.35).

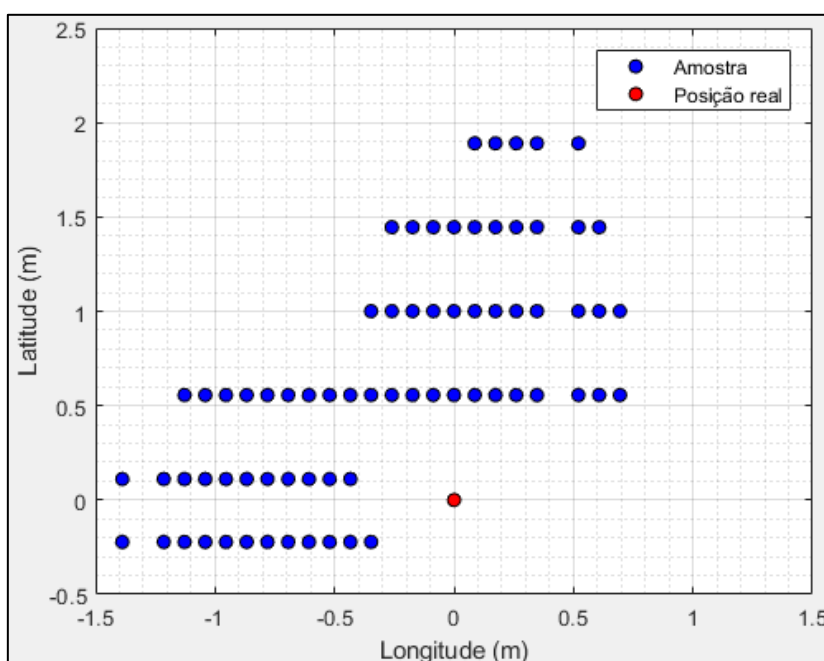


Figura 3.35 – Conversão da amostra de graus para metro

Para realizar a conversão utilizaram-se as equações de Azimute e *Haversine* que serão descritas também neste trabalho de projeto. Ao se analisar a figura 3.35 é possível observar que os valores da amostra possuem bastante repetibilidade, afastando-se no máximo até uma distância inferior a 2 m. Contudo, para se analisar o

rigor do equipamento, não basta ser analisada apenas a repetibilidade, tem de ser analisada também a exatidão (figura 3.36).

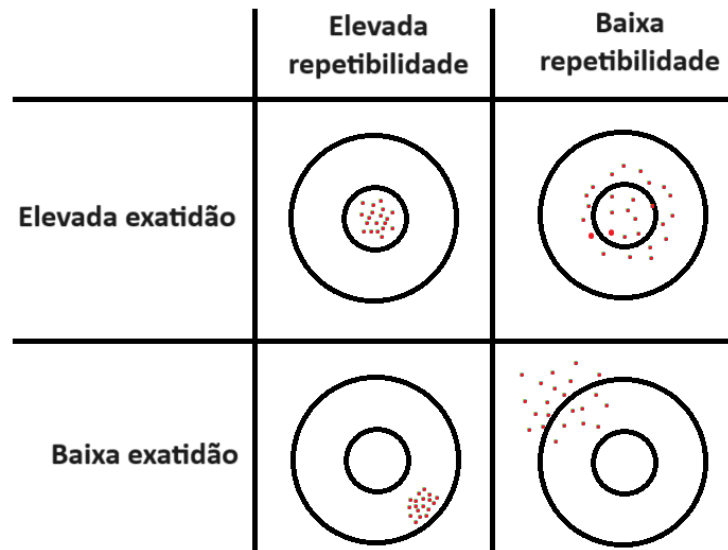


Figura 3.36 – Exatidão vs. Repetibilidade

Com o objetivo de calcular a exatidão da amostra, determinou-se a distância entre a coordenada real do veículo e as coordenadas medidas, ao longo do tempo, que se apresentam na figura 3.37.

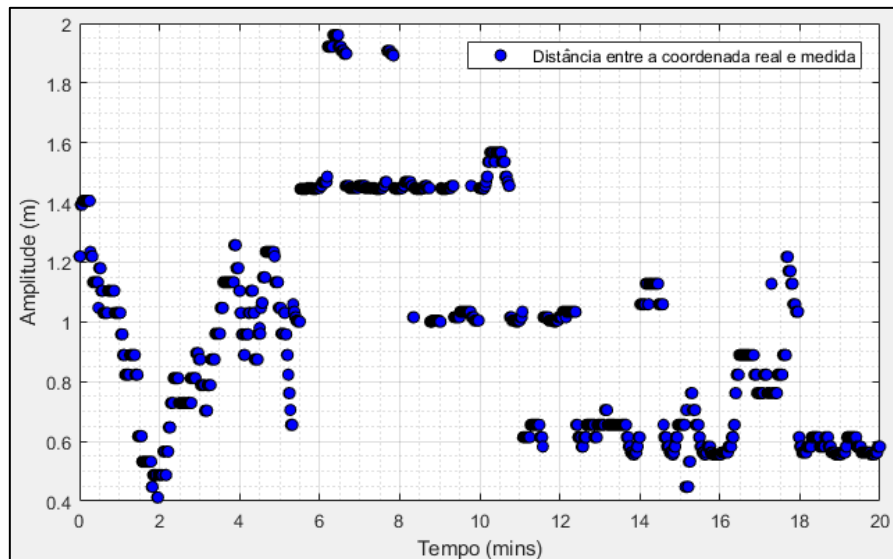


Figura 3.37 – Desvio da amostra ao longo do tempo

Observando a figura 3.37 é notório a existência de alguma oscilação da distância, entre a medição efetuada pelo módulo e da posição real ao longo do tempo, apesar de existirem alguns instantes onde a oscilação é praticamente nula, apresenta sempre um erro de medição. Verifica-se ainda que, embora, existam alguns instantes

onde o valor da oscilação é reduzido, nem todos os resultados são favoráveis existindo oscilações em torno de 2 m.

Como foi possível observar anteriormente, os valores da amostra adquiridos pelo módulo GPS apresentam alguma instabilidade no estudo em desenvolvimento. Para contrariar essa situação, será importante determinar a média  $\bar{x}$  da amostra para analisar a exatidão dos resultados recolhidos. A variável  $x_i$  representa a amostra, já a constante  $n$  o número de dados da amostra. A média é definida por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

Como existe um valor muito elevado no número de dados da amostra, recorreu-se ao uso do *software* MATLAB® para determinar a média do erro associado, no qual se obteve:

$$\bar{x} = 0,97233 \text{ m} \quad (3.2)$$

Outro fator que pode ser interessante para a análise dos dados recolhidos é a determinação do desvio padrão  $s$ . Neste sentido, para se calcular o desvio padrão é necessário calcular inicialmente a variância pela seguinte fórmula:

$$s^2 = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3.3)$$

Para se obter o valor do desvio padrão, basta aplicar a raiz quadrada à fórmula da variância, obtendo-se a seguinte equação:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.4)$$

À semelhança do cálculo da média da amostra, recorreu-se ao *software* MATLAB® para determinar o valor do desvio padrão da amostra.

$$s = 0,36419 \text{ m} \quad (3.5)$$

O desvio padrão determina um intervalo, centrado na média, onde grande parte dos valores da amostra estão concentrados. Quanto maior for este valor, maior será a

irregularidade dos dados da amostra. Em contrapartida, se este valor for baixo significa que existe mais homogeneidade nos dados da amostra. Neste contexto, o intervalo que concentra grande parte dos valores pode ser definido por:

$$] \bar{x} - s ; \bar{x} + s [ \quad (3.6)$$

Aplicando as devidas alterações na equação anterior:

$$] 0,97233 - 0,36419 ; 0,9723 + 0,36419 [ \quad (3.7)$$

Podendo ser simplificado por:

$$] 0,60814 ; 1,33652 [ \text{ m} \quad (3.8)$$

Após a execução deste estudo e tendo por base a amostra recolhida, é possível concluir que a média do erro da posição medida do módulo GPS é de aproximadamente 0,97 m. Porém, com os resultados obtidos, foi possível calcular o valor do desvio padrão sendo este de aproximadamente de 0,36 m. Conhecendo estes dois fatores é possível concluir que grande parte dos valores se encontram entre 0,61 e 1,34 m da posição real.

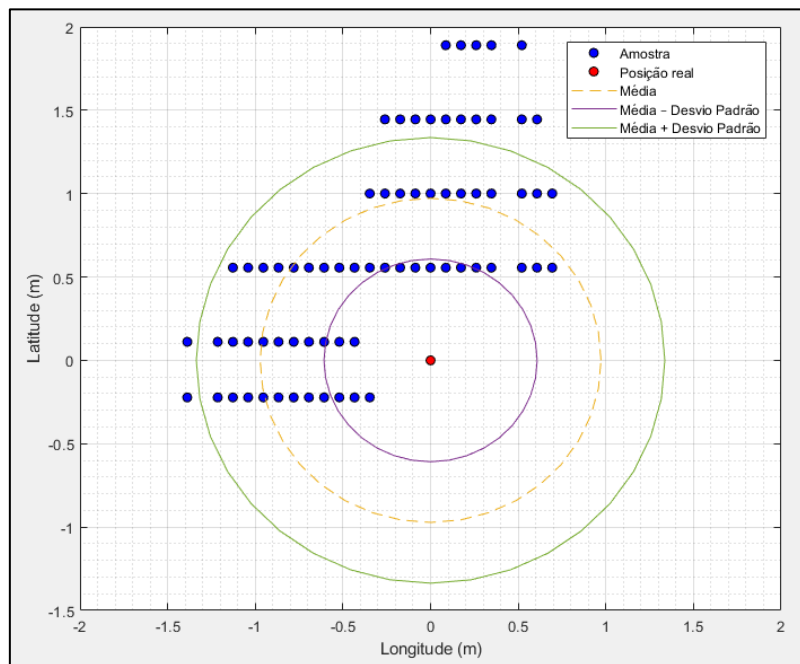


Figura 3.38 – Zona de maior concentração de valores da amostra

Na figura 3.38 é possível ver o intervalo onde ocorre a maior concentração de valores tendo por base o fator da média e do desvio padrão. Sabendo que o valor da média somado com o valor do desvio padrão é igual 1,34 m e que poderia existir coordenadas geográficas em qualquer localização dentro da circunferência desse valor de diâmetro, a distância máxima entre duas coordenadas geográficas é igual ao valor do diâmetro dessa circunferência, ou seja de 2,68 m.

Este valor obtido pode ser considerado a precisão do módulo GPS, pois garante que a distância entre a posição medida e a real é sempre inferior a 2,68 m. Contudo, ao se comparar este valor com o fornecido pelo fabricante, é possível concluir que estes valores são muito próximos, garantindo assim a veracidade dos resultados. É de realçar que durante os ensaios procurou-se um local onde fosse possível obter dados do GPS com menor interferência do exterior possível.

Apesar do valor do erro do GPS ser relativamente grande, outros autores utilizaram o mesmo módulo para os seus projetos e obtiveram valores bastante semelhantes. Um exemplo disso foram os autores Zohari, et al., que desenvolveram um sistema de rastreamento para localizar um veículo em caso de roubo. Estes autores concluíram que este módulo de GPS apresenta discrepâncias entre a posição real e a medida pelo módulo de 5 a 30 m [63]. Existem outros autores que realizaram alguns ensaios com este módulo. Um exemplo disso foram os autores Mitrovic N, et al., que analisaram a eficiência deste dispositivo em meios urbanos e rurais. Durante as experiências os autores concluíram que a discrepância máxima obtida no meio urbano foi de 10,91 m enquanto no meio rural de apenas 9,09 m. Outro fator que estes autores verificaram foi no tempo de resposta. No meio urbano obtiveram um tempo de 2,93 s, enquanto no meio rural, este tempo baixou para 1,66 s [64].

### 3.2 Sistemas de navegação

Nesta secção serão descritos os sistemas de navegação implementados no veículo. De acordo com o autor M. Ângelo Galego Marques, um sistema de navegação é responsável pela forma como o veículo navega e se localiza no ambiente onde está a operar, garantindo a sua segurança e eficiência ao longo do seu trajeto [44]. Durante a implementação dos sistemas de navegação, a utilização de sensores é indispensável, pois irão fornecer dados que permitirão ao veículo navegar de forma segura até ao local pretendido.

O protótipo, será equipado com dois sistemas de navegação para garantir a sua autonomia, sendo eles:

- Navegação baseada em coordenadas geográficas;
- Navegação baseada em medições efetuadas pelos sensores ultrassónicos.

É de realçar que o último sistema de navegação referido é apenas para auxiliar o sistema de navegação baseado em coordenadas geográficas de modo que o veículo não colida com quaisquer obstáculos que lhe surjam no seu percurso.

Durante esta secção abordar-se-á a cinemática do protótipo, finalizando com a descrição do funcionamento do sistema de navegação baseado em coordenadas do sistema GPS.

### 3.2.1 Cinemática do veículo

A cinemática é uma área da mecânica clássica que se dedica ao estudo do movimento de sistemas mecânicos. Neste contexto, durante o desenvolvimento de um robô é importante compreender e estudar os seus comportamentos mecânicos, permitindo assim desenvolver um robô seguro e eficiente na execução de tarefas.

Para se compreender o movimento mecânico desempenhado pelo veículo, é necessário efetuar uma descrição da contribuição de cada eixo. Neste sentido, o protótipo em desenvolvimento pode ser assemelhado a um carro com tração traseira. Esta semelhança deve-se ao facto destes carros possuírem duas rodas motrizes na traseira e duas rodas direcionais e diferenciais na frente, como demonstra a figura 3.39 [14] [65]:

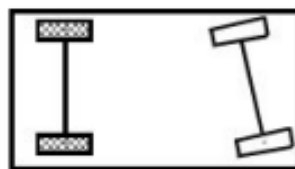


Figura 3.39 – Descrição das rodas do veículo em estudo

Apesar do protótipo em desenvolvimento se assemelhar a um carro com tração traseira por possuir as características descritas anteriormente, por simplificação, pode ser assemelhado a um modelo empírico de uma bicicleta/mota, considerando-se apenas uma roda por eixo, como demonstra a figura 3.40. A associação deste modelo empírico aplicado ao caso de estudo é devido ao [14]:

- Eixo dianteiro – O sistema de direção de um veículo encontra-se no eixo dianteiro. Quando este altera a direção para descrever uma curva, as rodas viram com ângulos de direção diferentes, seguindo o princípio de *Ackerman*, de modo que todas as rodas descrevam um círculo em torno de um centro de

rotação instantâneo, colinear com as rodas traseiras. Ao se utilizar este modelo empírico, a roda direcional encontra-se no eixo de simetria da moto/bicicleta, logo é obtido um valor médio do eixo de viragem do veículo;

- Eixo traseiro – O número de elementos rolantes que o veículo possui na retaguarda não terá nenhum impacto, pois estas não influenciam o tipo de movimento a realizar. Isto acontece porque o movimento é direcionado ao eixo rotação, movendo-se em apenas uma direção.

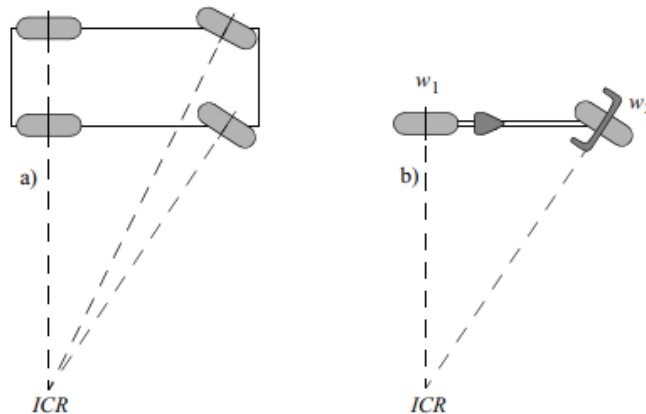


Figura 3.40 – a) modelo em estudo; b) modelo empírico do modelo em estudo

O protótipo em desenvolvimento será modelado como um corpo rígido com rodas, que se irá deslocar num plano horizontal possuindo assim o seu *chassis* três graus de liberdade:

- Dois graus de liberdade relativos à sua posição no plano  $(x, y)$ ;
- Um grau de liberdade é dedicado à orientação com eixo vertical  $(\theta)$ .

O protótipo em estudo tem por base um *chassis* de construção geométrica no qual irá servir de referência aos seus eixos de inércia. Com isto, a configuração cinemática do veículo tem constrangimentos cinemáticos que impedem movimentos nos outros graus de liberdade [44].

### 3.2.2 Navegação baseada em Coordenadas Geográficas

Quando se pretende localizar uma posição no globo, a forma mais simples de o fazer é identificar as suas coordenadas geográficas. Este método faz uso de linhas imaginárias traçadas paralelamente entre si, onde dividem o planeta e fornecem a localização de uma posição em graus. Neste contexto, essas linhas podem ser definidas por:

- Paralelos – deram origem à latitude, no qual dividem o globo horizontalmente no sentido este-oeste.
- Meridianos – geram a longitude, pois repartem o globo verticalmente no sentido norte-sul.

O principal paralelo é a Linha do Equador, pois divide o planeta em dois hemisférios (Norte e Sul). Por outro lado, o meridiano principal é o Meridiano de Greenwich, ao qual intersesta a cidade de Londres e divide o globo verticalmente. A interseção da Linha do Equador com o Meridiano de Greenwich representa a origem de todo o sistema de coordenadas.

Sendo assim, é possível caracterizar a latitude como a distância em graus entre a Linha do Equador e uma determinada posição, onde essa medida pode variar entre  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ . À semelhança do que acontece com as latitudes, a longitude é a distância em graus entre o Meridiano de Greenwich e uma determinada posição. Essa medida pode variar entre  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$ .

Ao se identificar a latitude e a longitude de uma determinada posição é possível localizá-la geograficamente.

#### 3.2.2.1 Azimute

Quando se pretende atingir uma certa coordenada é necessário definir um ângulo correto na posição inicial para que a intersecção aconteça na menor distância possível. Para isso, faz-se uso da equação de Azimute que calcula o ângulo da direção correta a seguir, entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ , quando é conhecido o valor da latitude e a longitude da posição inicial e da posição objetivo.

De acordo com os autores B. Szyk e S. Wooding, a equação de azimute descreve o ângulo entre duas linhas, definidas por (ver figura 3.41) [66]:

- Posição atual e o Pólo Norte;
- Posição atual e a posição desejada.

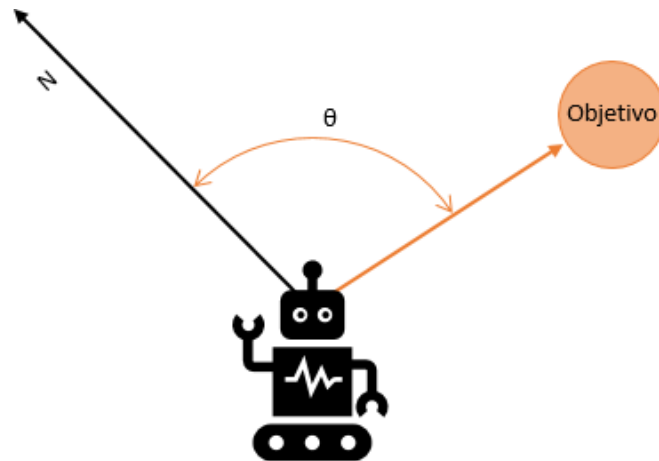


Figura 3.41 – Demonstração do ângulo de Azimute

Para que os resultados sejam claros, é necessário que qualquer ângulo utilizado na equação de Azimute, assim como o resultado da mesma, seja sempre medido no sentido horário (ver figura 3.42) [66] [67].

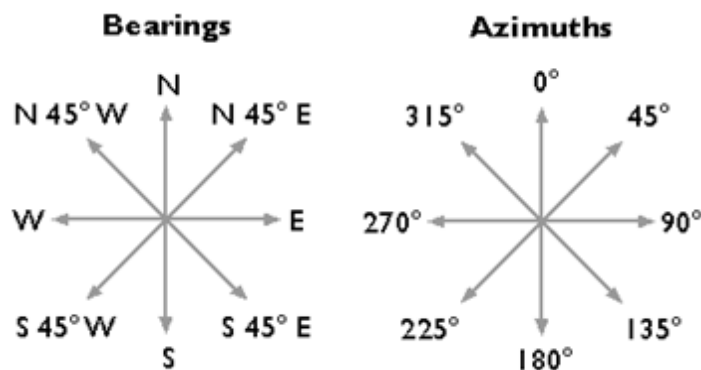


Figura 3.42 – Conversão de coordenadas geográficas

### Equação de Haversine

Quando é conhecida a posição geográfica atual e é pretendido intersestar outra, basta conhecer o ângulo de Azimute e a distância entre a posição atual e a posição desejada. Se o planeta Terra fosse plano, a distância entre as duas posições seria a distância euclidiana. Como a geometria do nosso planeta se assemelha a uma esfera, a distância a considerar é a distância mais curta entre as duas posições em questão.

Para efetuar o cálculo dessa distância entre duas coordenadas  $d$ , recorre-se ao uso da equação de *Haversine*.

$$d = 2R \arctan 2(\sqrt{aux}; \sqrt{1 - aux}) \quad (3.9)$$

Onde o raio do planeta Terra é representado por  $R$ , considerando-se o valor de 6371km, e a incógnita  $aux$  corresponde a um cálculo intermédio, definido por:

$$aux = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos\phi_1 \cos\phi_2 \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (3.10)$$

Onde:

- $\phi_1$  e  $\phi_2$  – Correspondem à latitude do ponto inicial e final, respetivamente. É importante realçar que caso essa coordenada pertença ao hemisfério Norte, o seu valor é positivo. Caso contrário, o seu valor deve ser considerado negativo;
- $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  – Correspondem à longitude do ponto inicial e final, respetivamente. É importante realçar que caso essa coordenada esteja a Este do meridiano de Greenwich, o seu valor é positivo. Caso contrário, o seu valor deve ser considerado negativo;
- $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$  – Corresponde à diferença da latitude;
- $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  – Corresponde à diferença de longitude.

### Ângulo de Azimute

Tal como foi descrito anteriormente, sabendo a posição atual é possível alcançar a posição desejada. Para isso, é necessário conhecer a distância entre as duas posições e o seu ângulo. As distâncias entre as coordenadas já foram calculadas anteriormente, através da equação de *Haversine* 3.9, faltando assim determinar o ângulo.

Este ângulo pode ser obtido através da equação de Azimute, sendo definido por:

$$\theta = \arctan2(\sin\Delta\lambda \cos\phi_2, \cos\phi_1 \sin\phi_2 - \sin\phi_1 \cos\phi_2 \cos\Delta\lambda) \quad (3.11)$$

Como a equação de Azimute devolve o ângulo em radianos, é necessário convertê-lo:

$$\theta_{\text{graus}} = \theta \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (3.12)$$

Uma vez que a posição inicial é conhecida, através das equações 3.9 e 3.12 é possível determinar a distância e o ângulo corretos para se alcançar a posição desejada.

### 3.2.3 Algoritmos de controle

O protótipo em desenvolvimento terá de navegar entre coordenadas geográficas sem colidir com quaisquer obstáculos que lhe surjam no seu caminho. Neste contexto, o veículo terá de ter dois algoritmos, pois é o necessário para realizar a navegação orientada por coordenadas geográficas e a navegação direcionada pelas medições realizadas pelos sensores ultrassônicos. É importante realçar, que o sistema de navegação predominante neste trabalho de projeto é a navegação entre coordenadas geográficas. O sistema de navegação para contornar obstáculos servirá apenas para que o veículo não colida com obstáculos, evitando danos.

Sendo assim, o presente subcapítulo será organizado da seguinte forma:

- Método A – Navegação entre coordenadas geográficas;
- Método B – Desvio de obstáculos.

#### 3.2.3.1 Método A – Navegação entre Coordenadas Geográficas

Neste método, o robô será orientado pelas suas coordenadas geográficas, tendo como objetivo alcançar algumas coordenadas pré-definidas no *software* Arduino IDE. Com o auxílio do trabalho desenvolvido por M. Abdullah-Al-Kaiser, et al., e G. S. Akhshirsh, et al., foi possível desenvolver um fluxograma que permite ao veículo percorrer trajetórias entre coordenadas geográficas [68] [69].

Inicialmente, o algoritmo consiste em analisar quantas coordenadas geográficas terá de intersestar e posteriormente, iniciar um contador para examinar quantas dessas coordenadas já foram alcançadas. Caso esses valores sejam iguais, significa que todas as coordenadas previstas foram atingidas. Caso contrário, o robô terá de se movimentar de modo a intersestar-las. Após realizar a tarefa descrita anteriormente, o veículo fará uso

dos sensores ultrassônicos frontais para perceber se existe algum obstáculo na sua frente. Se ele detectar algum obstáculo, guiar-se-á pelo método B para contorna-lo. Caso não detete nada, poderá continuar com o algoritmo.

Para o veículo poder alcançar as coordenadas pré-definidas, terá também de conhecer a sua localização. Para isso, recorrerá ao módulo GPS para obter a sua localização geográfica. Após conhecer a sua localização, fará uso da equação de *Haversine* para calcular a sua distância até à posição pretendida. Caso essa distância seja inferior a 2,5 m, o veículo considerará que alcançou a coordenada pretendida e incrementará o contador. Caso contrário, terá de continuar com o algoritmo para chegar ao destino. É considerada uma distância de 2,5 m devido ao erro associado ao módulo GPS, sendo este fornecido pelo fabricante e calculado na secção dos estudos preliminares.

Para que o objetivo seja alcançado o mais rapidamente possível, recorrer-se-á ao magnetómetro para determinar a orientação do veículo. Como as coordenadas atuais e as desejadas são conhecidas, é possível determinar o ângulo de Azimute. Ao se realizar a diferença entre o ângulo da orientação do veículo com o de azimute, é possível determinar que tipo de movimento o robô terá de realizar. O movimento é definido por:

- Ângulo negativo ( $\delta < 0$ ): o veículo irá virar à esquerda;
- Ângulo igual a zero ( $\delta = 0$ ): terá de ir em linha reta, pois o ângulo de orientação do veículo coincide com o ângulo de azimute;
- Ângulo positivo ( $\delta > 0$ ): o veículo irá virar à direita.

Na figura 3.43 está descrito o critério de viragem do robô, onde  $\alpha$  simboliza o ângulo da orientação do veículo,  $\theta$  o ângulo de Azimute e  $\delta$  a diferença entre estes dois ângulos.

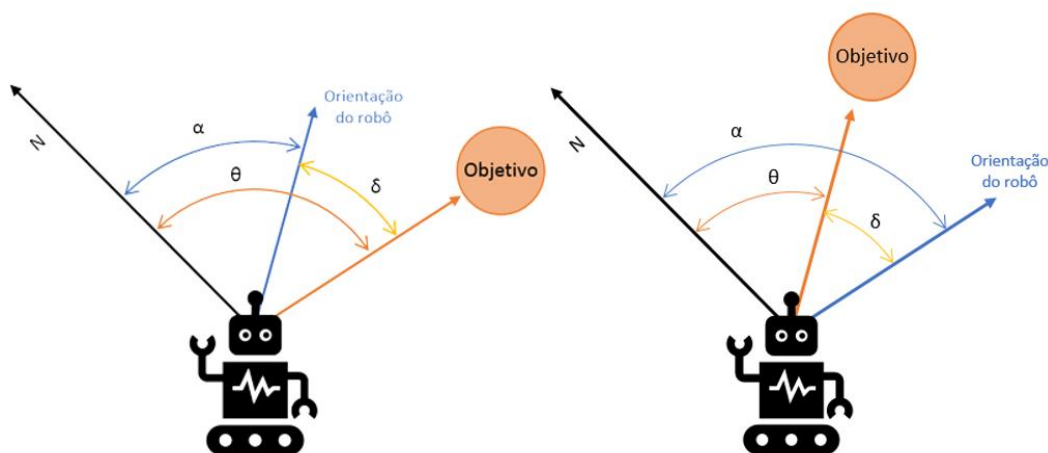


Figura 3.43 – Critério de viragem: a) Direita; b) Esquerda

Até todas as posições pretendidas serem alcançadas, todos os acontecimentos serão repetidos, como descreve o seguinte fluxograma (figura 3.44).

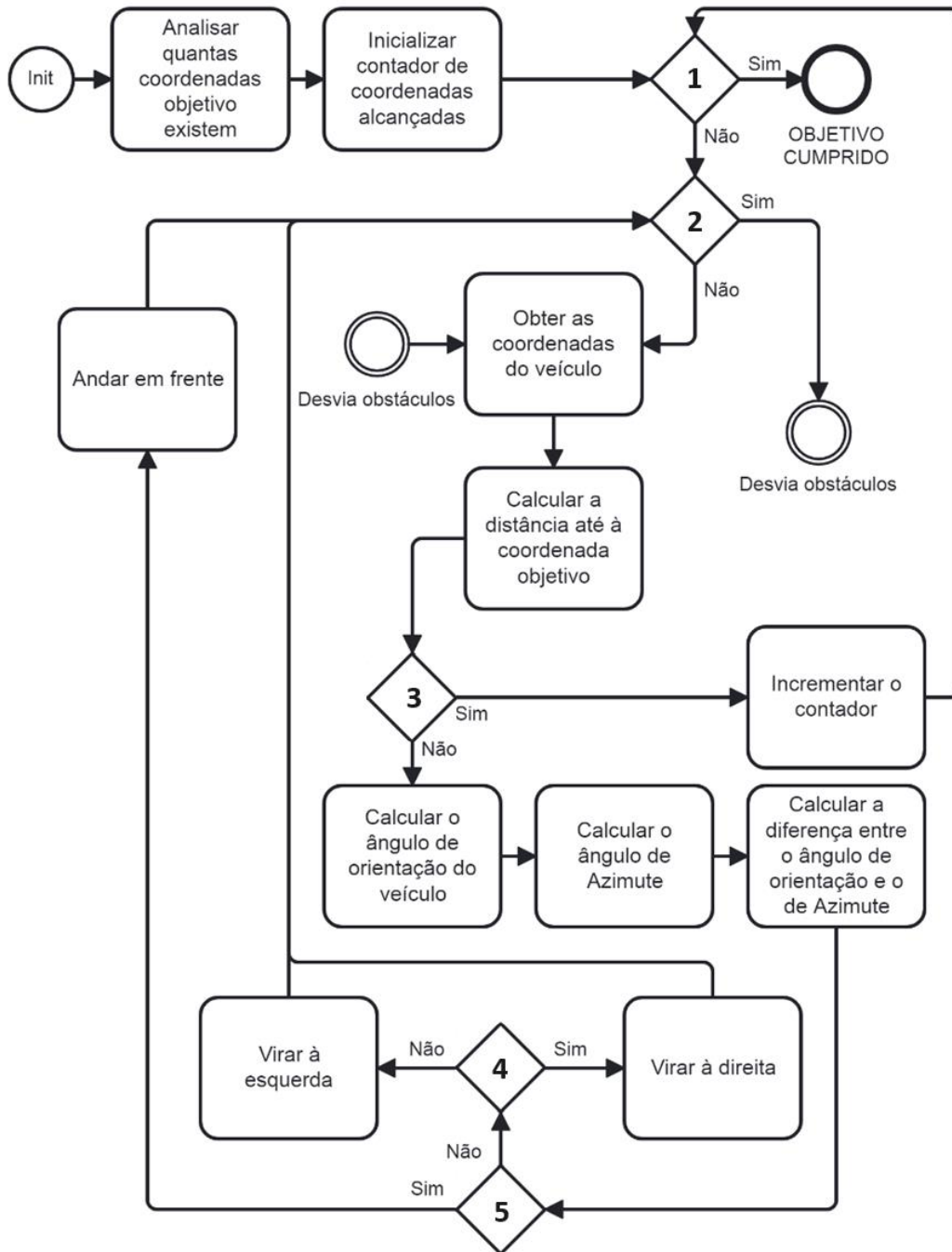


Figura 3.44 – Fluxograma – Método A – Navegação entre coordenadas geográficas

Sendo a legenda do fluxograma a seguinte:

- 1- Já alcançou todas as coordenadas?
- 2- Dist. Sonar Esq/dirt < 30cm?
- 3- Essa dist < 2.5m?
- 4- O ângulo > 0°
- 5- Esse ângulo = 0°?

### 3.2.3.2 Método B – Desvio de obstáculos

Este método faz uso dos sensores ultrassônicos que foram instalados no veículo para contornar quaisquer obstáculos que lhe surjam ao longo do percurso. É importante realçar mais uma vez que este sistema de navegação servirá apenas para contornar obstáculos, evitando colisões e por consequência danos no veículo. Neste contexto, este sistema de navegação não necessitará da mesma ênfase quando comparado com o sistema de navegação por coordenadas geográficas.

Este sistema de navegação é iniciado quando o sensor direito ou o sensor esquerdo detetam um obstáculo a menos de 30 cm. Caso seja detetado algum obstáculo recorre-se aos dados do sensor central da frente do veículo para se determinar as seguintes ações a realizar, de acordo com a distância obtida:

- Inferior a 25 cm – o veículo recorrerá ao sensor central traseiro para analisar o ambiente na sua retaguarda. Caso não detete nenhum obstáculo a uma distância inferior a 20 cm, o veículo deslocar-se-á para trás. Caso detete a existência de um obstáculo, o veículo ficará imobilizado, pois encontra-se num beco sem saída.
- Superior a 25 cm – o veículo mede a distância a que o obstáculo se encontra do sensor esquerdo e direito e vira no sentido onde essa distância é superior. O veículo deixa de virar, assim que o sensor que se encontrava mais próximo do obstáculo se encontre a uma distância superior a 45 cm.

Após a execução deste procedimento para ultrapassar o obstáculo, o veículo retorna ao método de navegação guiado por coordenadas geográficas. É de notar que apesar do veículo estar a tentar ultrapassar um obstáculo, como a unidade de processamento funciona em *loop*, continuam a ser fornecidas informações sobre as coordenadas geográficas do veículo.

O fluxograma do método B – Desvio de obstáculos pode ser observado na figura 3.45.

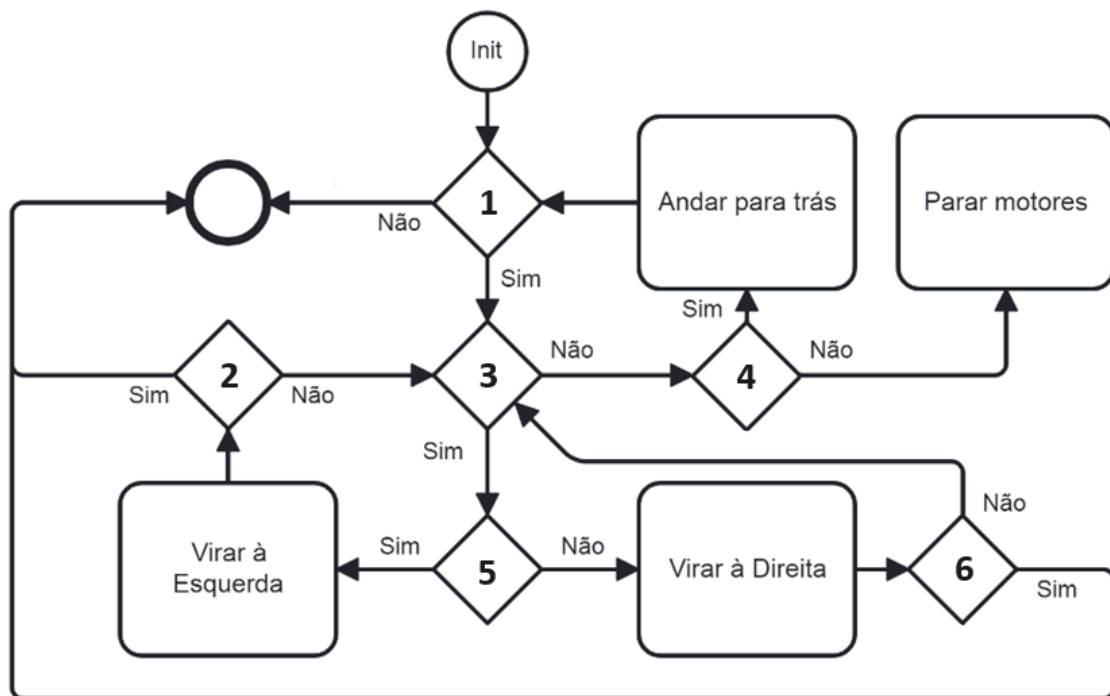


Figura 3.45 – Fluxograma – Método B – Desvio de obstáculos

Sendo a legenda do fluxograma a seguinte:

- 1- Dist. sonar Esq/Dirt < 30cm?
- 2- Dist. sonar Dirt > 45 cm?
- 3- Dist. sonar Frente > 25 cm?
- 4- Dist. sonar Tras > 20 cm?
- 5- Dist. sonar Esq ≥ Dirt?
- 6- Dist. sonar Esq > 45 cm?

## 4. Validação experimental e resultados obtidos

O presente capítulo será dedicado à apresentação dos resultados obtidos experimentalmente. Inicialmente, serão efetuadas calibrações aos vários equipamentos. De seguida, serão realizadas experiências de navegação do veículo e apresentados os resultados obtidos. Por fim, são apresentadas algumas limitações identificadas no protótipo desenvolvido.

Para validar o protótipo e o sistema implementado foram realizados vários ensaios. Inicialmente, os ensaios são de baixa complexidade, contudo, o seu grau de complexidade foi aumentando ao longo dos ensaios realizados.

No primeiro conjunto de ensaios, o veículo terá de navegar autonomamente até chegar a uma coordenada objetivo. Inicialmente, o veículo encontra-se orientado para a posição objetivo. Contudo, com o decorrer dos ensaios também se verificaram outras condições, como o veículo partir de uma orientação oposta à direção para a coordenada objetivo, a colocação de um obstáculo durante o seu percurso ou a diminuição da área admissível para o veículo alcançar.

De seguida serão realizados ensaios mais complexos. Durante estes ensaios o veículo terá de realizar trajetórias mais elaboradas, como a interseção de várias coordenadas ao longo do seu percurso, ou um trajeto misto, onde existirão obstáculos entre troços e poderá ser necessário realizar manobras para alcançar o destino.

É de realçar que todos os ensaios e calibrações foram realizados em locais com condições que minimizam a interferência dos sinais nos sensores, tais como: solo sem inclinação, longe de vedações metálicas, estruturas que possam impedir o sinal proveniente dos satélites, entre outras características.

### 4.1 Calibração dos parâmetros do robô

A calibração dos vários dispositivos que equipam o protótipo é bastante importante, pois irão afetar a qualidade dos resultados obtidos. Neste sentido, é necessário realizar uma calibração/reajustes em alguns equipamentos presentes no veículo, como é o caso do magnetómetro e o controlador de motores.



informação do percurso efetuado, o veículo terá de reduzir a sua velocidade. Esta característica poderá ter algumas limitações como: falta de potência para o veículo arrancar; caso o percurso seja longo, o nível da bateria vai reduzindo podendo não existir energia suficiente para alcançar todos os objetivos propostos.

Neste contexto, foi adotada uma gama de valores compreendida entre 45 e 70, para as portas PWM responsáveis pelo controlo da velocidade do motor de tração e pelo sistema de direção. Ao se utilizar esta gama de valores, o veículo tem a capacidade de navegar a uma velocidade reduzida, alcançando todas as posições desejadas.

## 4.2 Ensaios

A escolha do local para realizar os ensaios é fundamental, uma vez que as interferências dos sinais nos sensores podem interferir nos resultados do sistema. Neste contexto, o local escolhido para a realização dos ensaios foi um parque de estacionamento, pois reunia as condições ideais para a realização dos mesmos, como: ser um espaço ao ar livre, não possui infraestruturas ou árvores nas imediações que obstruem o sinal proveniente dos satélites, não possui redes ou vedações que comprometessem a intensidade do campo magnético, entre outras características.

É importante realçar que em todos os ensaios efetuados, não foi possível realizar medições da posição real do veículo a cada movimento que este executa. Por isso, no código desenvolvido no *software* Arduino IDE, sempre que o carro atinge uma coordenada geográfica objetivo este fica imobilizado, dando tempo para colocar uma marcação no solo. Assim que as experiências são concluídas, são realizadas todas as medições para que o estudo seja o mais rigoroso possível.

Em todos os ensaios realizados, o veículo partiu sempre da mesma posição e terminou o seu percurso quando atinge uma coordenada geográfica que se encontre dentro da área admissível. Esta área tem a forma geométrica de um círculo centrado na coordenada desejada, com o raio igual ao erro do GPS (2.5 m). Para verificar a veracidade dos resultados, sempre que possível serão utilizadas as seguintes posições nas figuras apresentadas:

- Posição real do objetivo;
- Posição medida do objetivo;
- Posição real do veículo;
- Posição medida do veículo.

#### 4.2.1 Navegação ao longo de uma reta entre duas coordenadas geográficas

Durante a execução dos ensaios referentes à presente secção, é esperado que o veículo recolha a sua posição geográfica inicial, e alcance a coordenada objetivo. No decorrer dos ensaios tanto a posição inicial como a final não são alteradas, diferindo apenas alguns parâmetros, como a orientação do veículo, a presença de obstáculos ou a diminuição da área admissível. O local escolhido para realizar os ensaios pode ser observado na figura seguinte, ao qual estão assinaladas as coordenadas geográficas iniciais e finais do seu trajeto (figura 4.2).

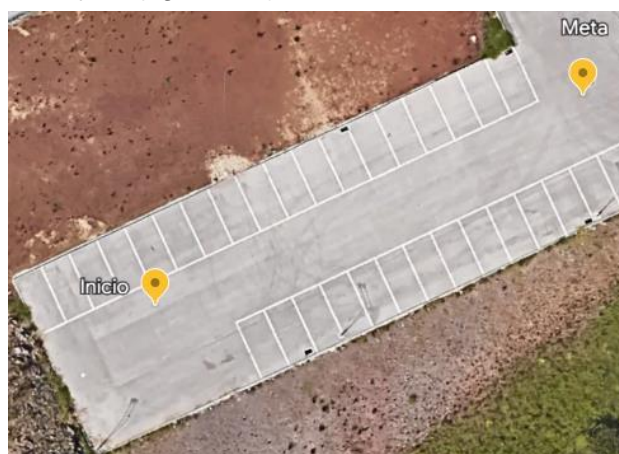


Figura 4.2 – Representação das posições objetivo - uma coordenada

É importante realçar que em todos os ensaios realizados o veículo tentará alcançar a coordenada medida pelo módulo GPS instalado no veículo, que tem sempre um erro associado da coordenada geográfica real (figura 4.3).

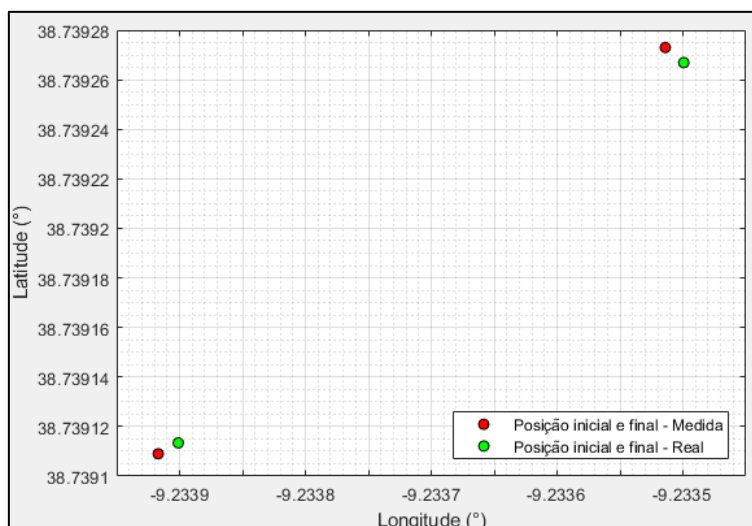


Figura 4.3 – Posição inicial e final - Medida vs. Real

Para facilitar a análise dos resultados, os dados dos testes serão convertidos para unidades métricas.

#### 4.2.1.1 Veículo parte orientado para a coordenada objetivo

Este ensaio consiste na navegação do protótipo até alcançar uma coordenada objetivo. Durante o ensaio, o veículo encontra-se orientado para o destino. Idealmente, o veículo apenas terá de se movimentar em frente. Após a conclusão do ensaio, foi possível registrar a posição final aproximada do protótipo. Na figura 4.4 estão representados os resultados relativos a este ensaio.

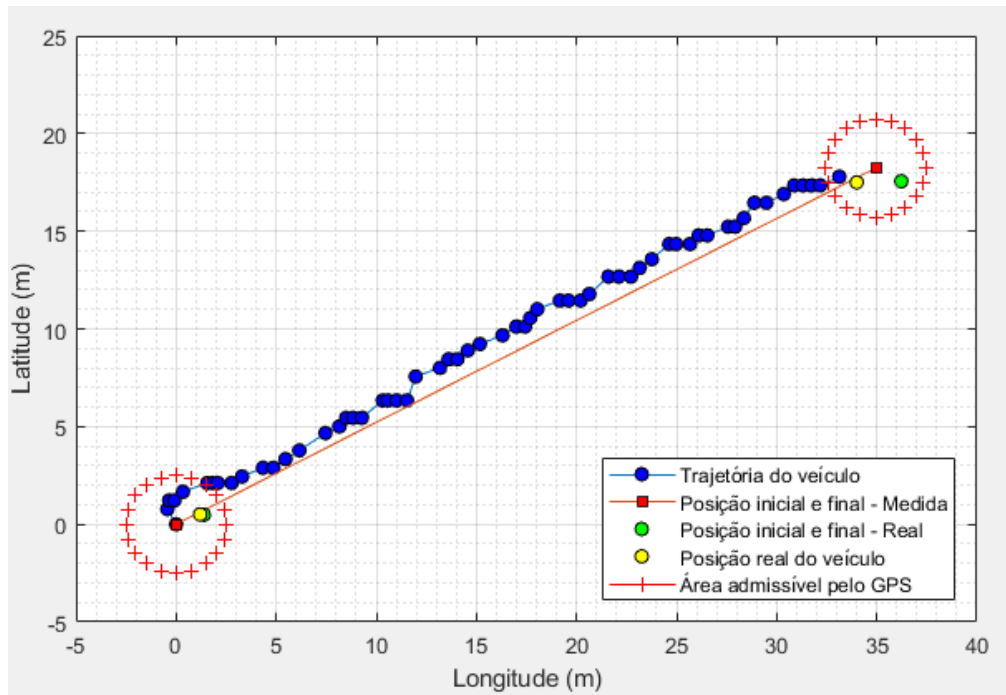


Figura 4.4 – Ensaio com uma coordenada – veículo parte orientado para o destino

Analisando os resultados apresentados na figura 4.4, é possível verificar que o veículo alcançou o destino. É possível reparar que todas as posições quer medidas, como as reais encontram-se dentro da área admissível gerada pelo erro do GPS. Contudo, é importante analisar a variação da distância a percorrer ao longo do tempo.

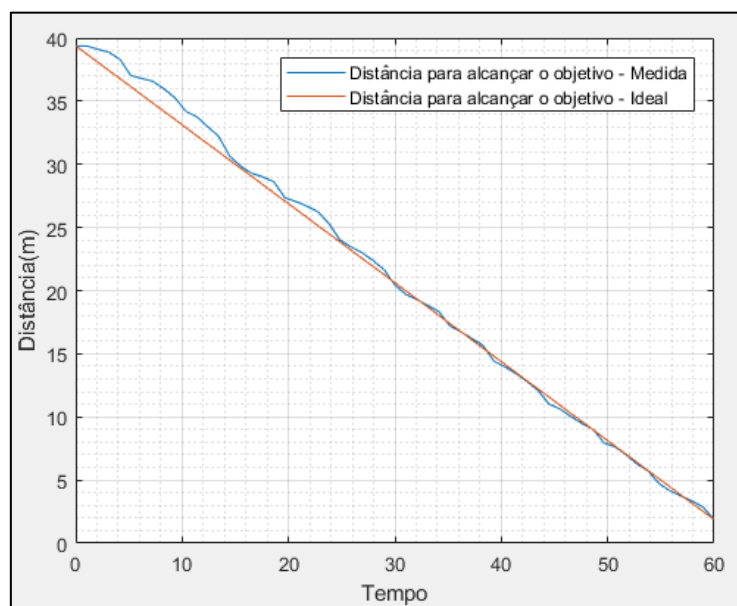


Figura 4.5 – Ensaio com uma coordenada – Orientado para o destino – Variação da distância a percorrer ao longo do tempo

Com a figura 4.5 é possível verificar que ao longo do trajeto, o veículo navegou sempre em direção ao ponto de destino e, apesar de existirem algumas oscilações na distância a percorrer, a linha originada pelas medições do GPS está praticamente sobreposta à linha com a distância ideal. Na figura 4.5 é possível ainda visualizar que o veículo ficou imobilizado a uma distância aproximadamente igual a 2 m.

#### 4.2.1.2 Veículo parte com a direção oposta para a coordenada objetivo

O protótipo em desenvolvimento terá de navegar autonomamente entre coordenadas geográficas independentemente das condições iniciais em que se encontra. Neste contexto, no presente ensaio o veículo começa a sua trajetória orientado para a posição oposta (180°) do destino. Para o protótipo alcançar o destino terá de realizar uma manobra para inverter o sentido de marcha. Caso o protótipo fosse omnidirecional, bastava girar em torno do seu eixo para se orientar para o destino. É importante realçar, que a posição real do veículo é aproximada. Os resultados deste ensaio estão representados na figura 4.6.

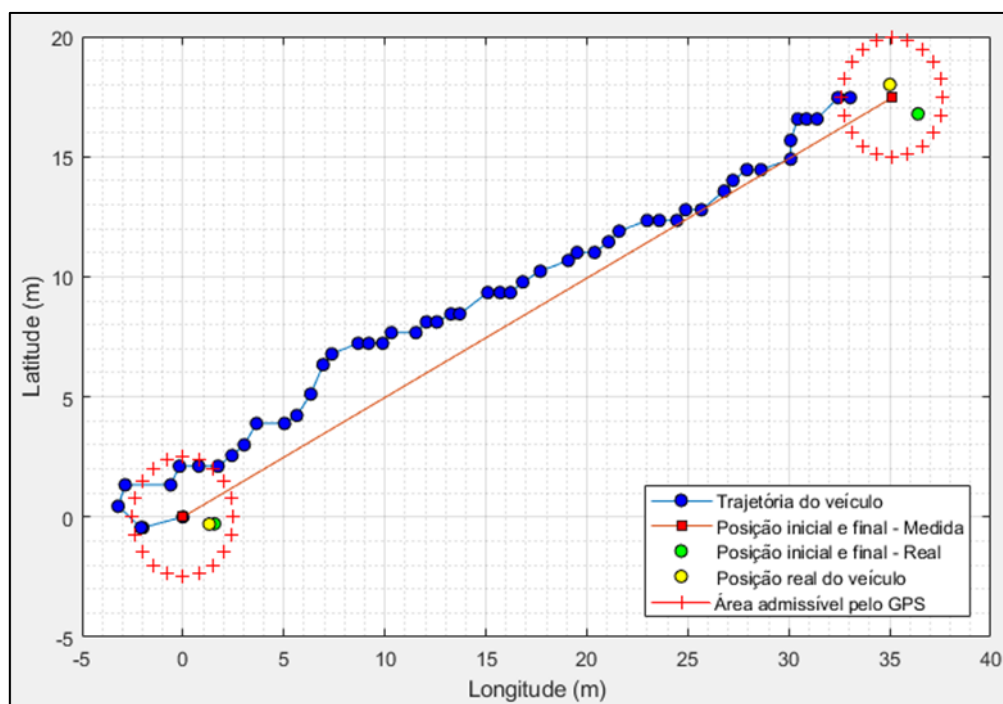


Figura 4.6 – Ensaio com uma coordenada – veículo parte desorientado para o destino

Na figura 4.6, é possível visualizar a trajetória efetuada pelo veículo. Inicialmente, o veículo partiu na direção da coordenada de destino, mas no sentido oposto. Para alcançar o destino o veículo iniciou a trajetória realizando uma manobra de alteração do

sentido de marcha, para se orientar no sentido da posição final. É possível visualizar que durante o percurso, o veículo corrigiu a trajetória e aproximou-se da trajetória ideal (reta vermelha). O veículo concluiu a sua trajetória quando a distância da posição final medida pelo sensor e a real eram inferior a 2,5 m, sendo possível visualizar que todas as medições se encontram dentro da área admissível.

À semelhança do ensaio anterior, é necessário analisar a distância percorrida até alcançar o destino (figura 4.7).

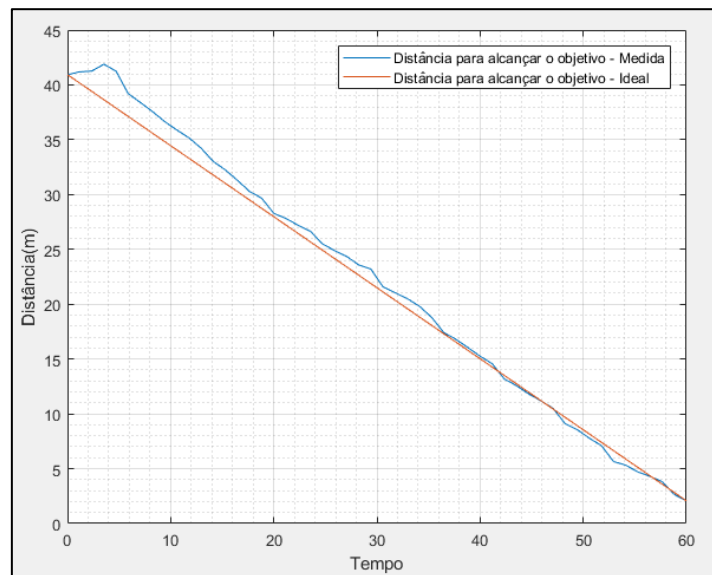


Figura 4.7 – Ensaio com uma coordenada – Desorientado para o destino – Variação da distância a percorrer ao longo do tempo

Analisando a figura 4.7 é possível visualizar que no início do percurso a distância até ao destino aumenta. Esse acontecimento ocorre porque o veículo está a realizar a manobra de rotação de modo a orientar-se no sentido da coordenada do destino. É de notar que o veículo terminou o seu percurso quando alcançou uma distância até ao objetivo inferior a 2,5 m.

#### 4.2.1.3 Navegação com desvio de obstáculos

O veículo possui dois sistemas de navegação, um baseado em coordenadas geográficas e outro para contornar obstáculos. O último método referido é utilizado apenas para garantir a segurança do veículo, evitando que este colida com obstáculos e prevenindo eventuais danos causados ao veículo. Neste contexto, este sistema de

navegação só é ativado caso os sensores frontais detetem algum obstáculo nas suas proximidades.

Para provar o seu funcionamento, realizou-se um ensaio ao qual o veículo terá de alcançar uma coordenada geográfica. Inicialmente, o veículo encontra-se numa direção perpendicular à posição objetivo. Durante o trajeto, o veículo deparar-se-á com um obstáculo que terá de contornar para evitar colisão.

Os resultados obtidos neste ensaio podem ser visualizados na figura 4.8.

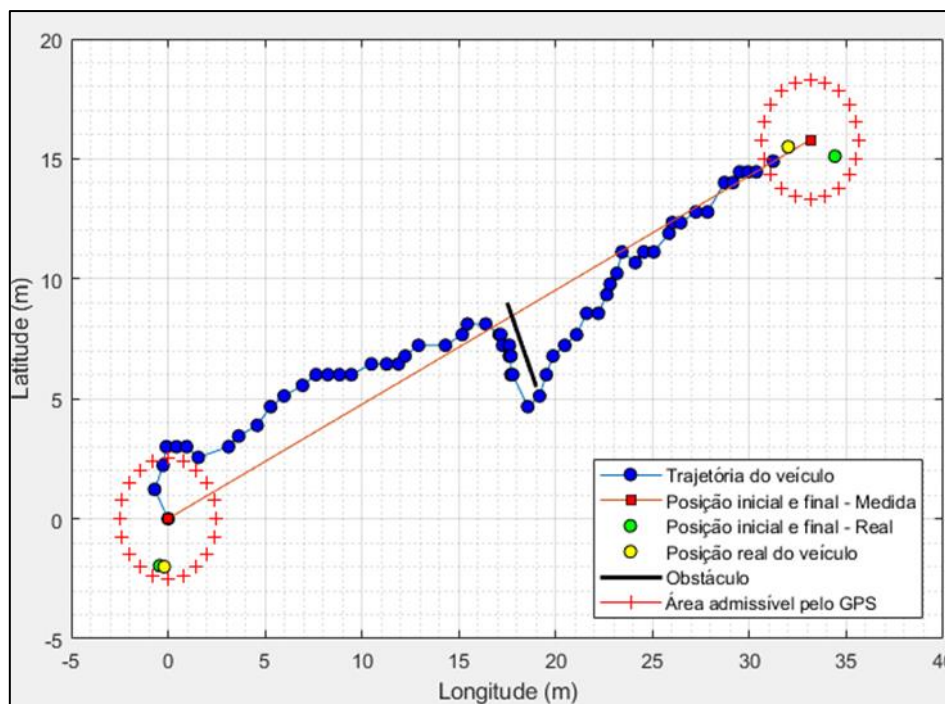


Figura 4.8 – Ensaio com uma coordenada – Desvia obstáculos

Na figura 4.8 é possível observar que o veículo inicia a sua trajetória a tentar orientar-se para a posição final. Finalizada esta tarefa segue até ao destino, contudo entre a posição inicial e a final existe um obstáculo. Quando se depara com o obstáculo, o veículo muda o seu objetivo inicial, de alcançar o destino para contornar o obstáculo. Quando os sensores detetam que existe caminho livre na direção do ponto de destino, o veículo recolhe a sua localização geográfica e retorna novamente ao seu objetivo principal. É observado também na figura anterior que após contornar o obstáculo, o veículo tenta aproximar a sua trajetória para perto da trajetória ideal. É possível observar ainda que todas as medições se encontram dentro da área admissível.

A variação da distância percorrida até alcançar o destino é dada por (figura 4.9):

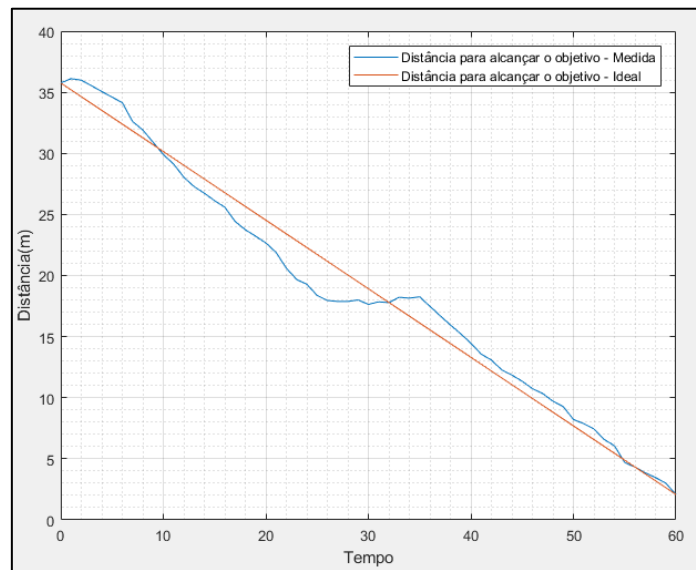


Figura 4.9 – Ensaio com uma coordenada – Desvia obstáculos –  
Variação da distância a percorrer ao longo do tempo

Na figura 4.9 é possível observar a variação da distância por percorrer ao longo do tempo. Como o veículo não se encontrava orientado para o destino, o veículo teve de desempenhar essa tarefa aumentando a distância à coordenada objetivo. Após concluir essa tarefa, o veículo continua o seu trajeto e depara-se com um obstáculo. Ao tentar ultrapassar o obstáculo, a distância até ao destino aumenta. Assim que o objeto é ultrapassado a distância que falta percorrer vai diminuindo ao longo do tempo, acabando por atingir o objetivo a uma distância inferior a 2,5 m.

#### 4.2.1.4 Veículo confrontado com redução da área admissível

Realizou-se um ensaio com o objetivo de analisar o comportamento do veículo perante a redução da área associada ao erro do módulo GPS. Durante o ensaio, a posição inicial foi mantida, no entanto a coordenada do destino foi alterada para que o veículo realizasse uma trajetória mais reduzida quando comparada com os ensaios anteriores. Nos ensaios anteriores, assim que a posição do veículo se encontra a uma distância inferior a 2,5 m do ponto objetivo, o veículo considera que alcançou o destino. No presente ensaio essa distância foi reduzida para 20 cm.

Os resultados obtidos neste ensaio podem ser observados na figura 4.10:

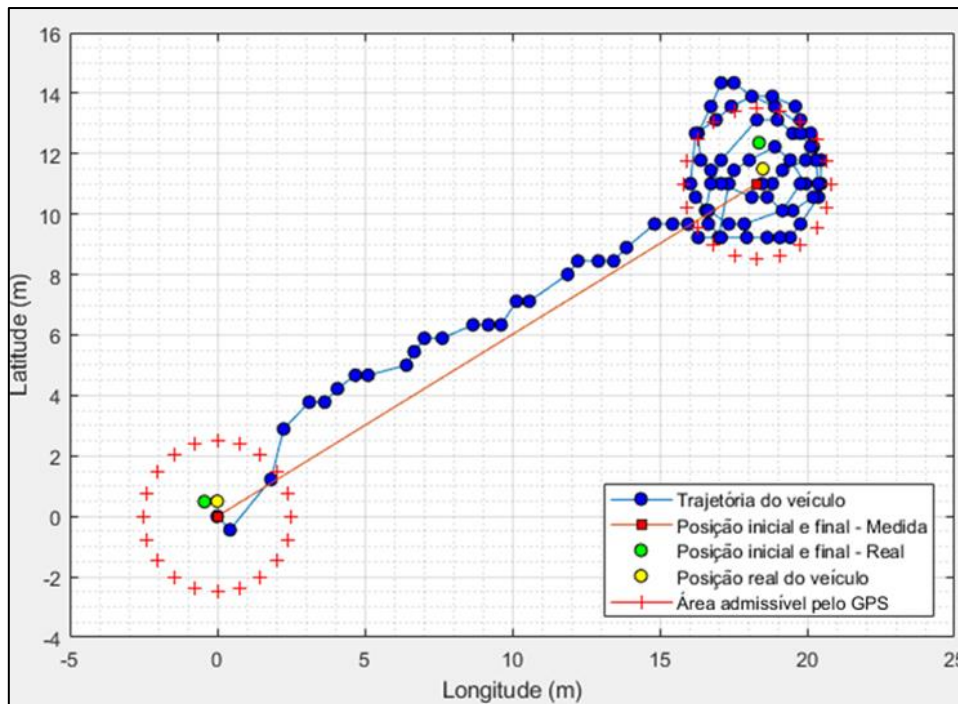


Figura 4.10 – Ensaio com uma coordenada – Redução área admissível

Observando a trajetória efetuada pelo veículo é possível visualizar que inicialmente o veículo mantém o comportamento semelhante aos ensaios anteriores, no qual tenta orientar-se para o destino e seguir uma trajetória em linha reta. Contudo, devido à diminuição da área associada ao erro do módulo GPS, o veículo teve alguma dificuldade em atingir a posição desejada. Para contrariar a sua dificuldade, o veículo executa trajetórias circulares em torno da posição objetivo, fazendo várias tentativas para se ir aproximando desta localização. Após realizar algumas tentativas o veículo alcança a posição. Na figura 4.10 é possível observar que tanto as posições reais como as medidas se enquadram na área admissível estipulada para este ensaio.

Da análise da figura 4.11, é possível observar a variação da distância por percorrer ao longo do tempo. Inicialmente o

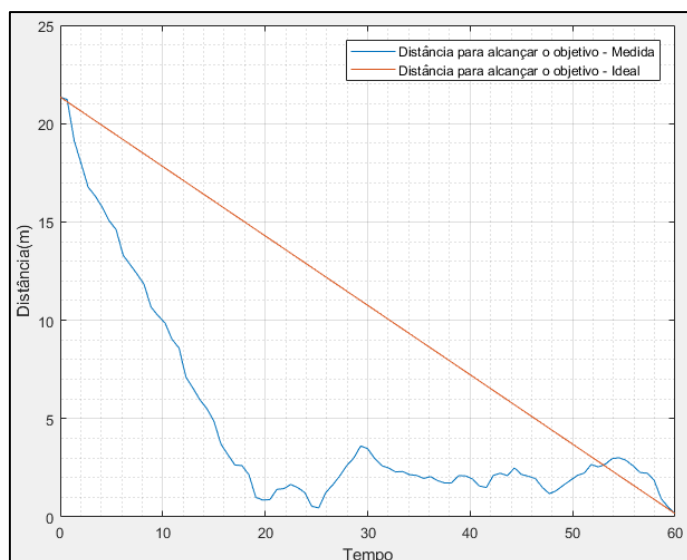


Figura 4.11 – Ensaio com uma coordenada – Redução área admissível – Variação da distância a percorrer ao longo do tempo

veículo seguiu uma trajetória constante, alcançando uma distância interior a 1 m da coordenada objetivo no vigésimo instante temporal da figura 4.11. Contudo, é pretendido que o veículo alcance uma posição inferior a 20 cm, ao que o veículo faz diversas tentativas de aproximação à posição objetivo, acabando por alcançar.

#### 4.2.2 Navegação com várias coordenadas geográficas

A presente secção será dedicada à execução de ensaios no qual são fornecidas várias coordenadas objetivo ao veículo e este terá de as alcançar, podendo ou não possuir obstáculos no trajeto. Os ensaios foram realizados no mesmo local dos ensaios anteriores. Contudo, durante este ensaio serão adicionados vários pontos objetivo. Neste contexto, a distância percorrida pelo veículo será muito superior aos ensaios realizados anteriormente.

Na figura 4.12 é possível ver o ambiente de teste, assim como as posições reais que o veículo terá de alcançar.

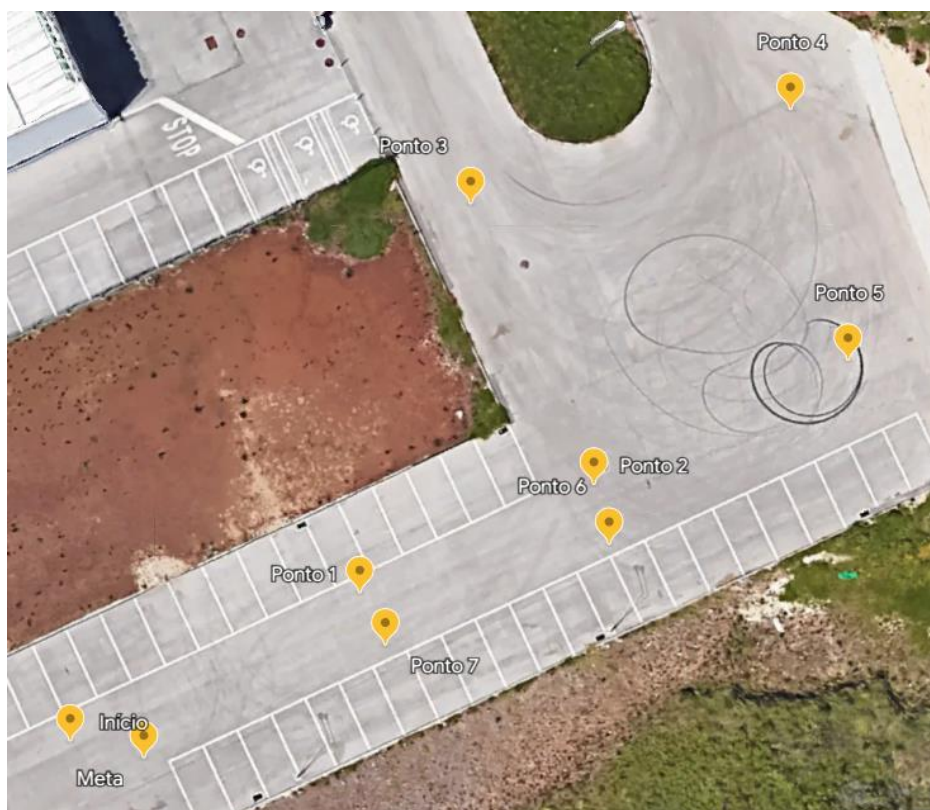


Figura 4.12 – Representação das posições objetivo - várias coordenadas

É importante realçar novamente que em todos os ensaios realizados, o veículo tentará alcançar a coordenada medida pelo módulo GPS podendo esta divergir, do valor da coordenada real (figura 4.13).

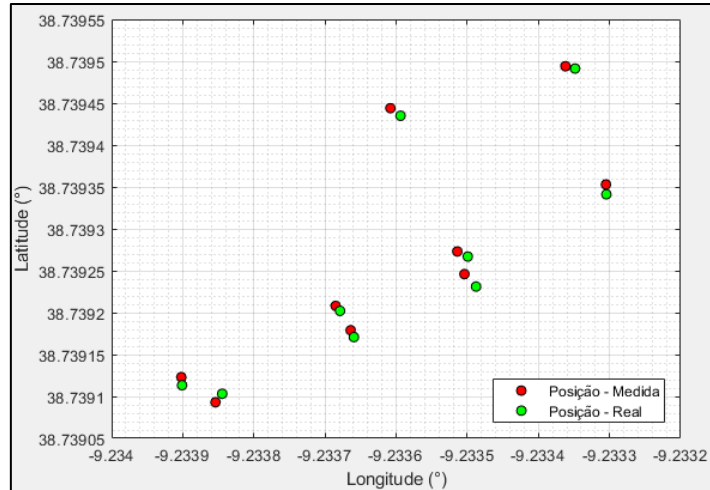


Figura 4.13 – Posições do trajeto - Medida vs. Real

À semelhança dos resultados apresentados anteriormente, com intuito de

facilitar a compreensão dos resultados, nas próximas figuras serão apresentados resultados convertidos para unidades métricas, definindo-se a origem do referencial cartesiano na posição inicial medida.

#### 4.2.2.1 Navegação com várias coordenadas – Percurso sem obstáculos

Durante o ensaio, o veículo foi colocado na posição inicial e iniciou o seu percurso, obtendo-se o seguinte trajeto (figura 4.14).

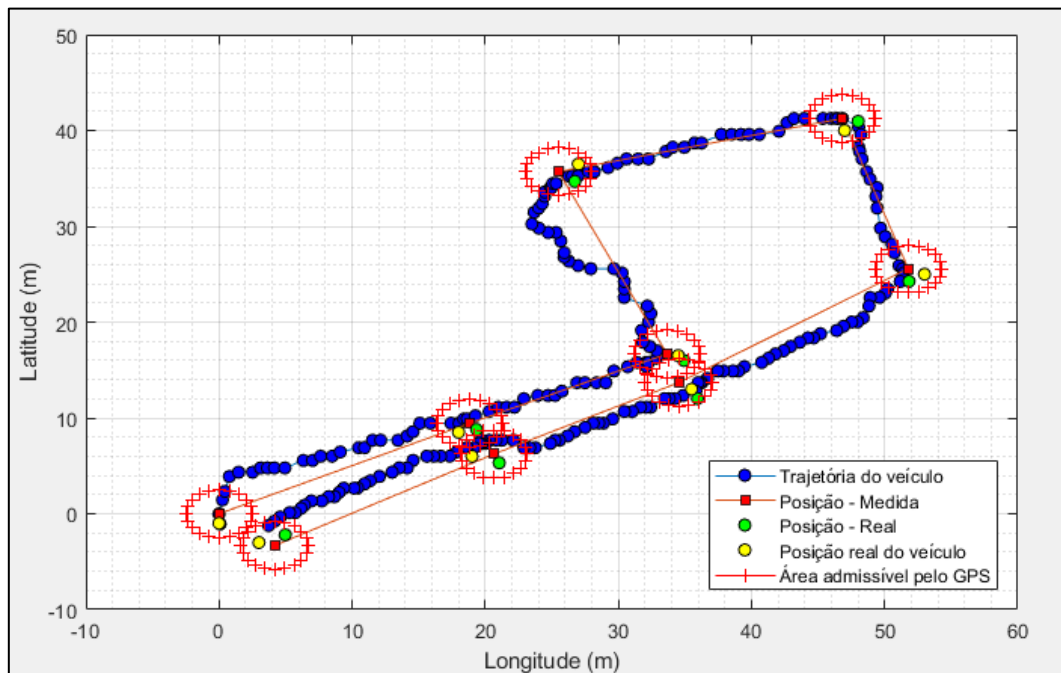


Figura 4.14 – Ensaio com várias coordenadas – Sem obstáculos

Ao longo do trajeto, o veículo teve de intersear algumas coordenadas geográficas. Ao analisar os resultados obtidos é possível visualizar que todas as coordenadas propostas foram alcançadas e que tanto as posições medidas como as reais se enquadram dentro das áreas admissíveis. Se compararmos a trajetória ideal (trajeto vermelho) com a realizada pelo veículo, conseguimos concluir que durante o percurso estas trajetórias não apresentam grandes defasagens. Contudo, entre os pontos 2 e 3 (ver figura 4.12) houve uma pequena diferença entre a trajetória real e ideal. Essa diferença poderá ter várias origens, sendo uma delas a existência de uma tampa de esgoto metálica no solo, no qual a sua existência poderá ter interferido com a intensidade do campo magnético, alterando assim os valores recolhidos pelo sensor magnetômetro.

Analisando os resultados com detalhe, é possível observar uma concentração maior de dados junto às coordenadas objetivo. Essa concentração de dados é devido ao carro ficar imobilizado sempre que alcança uma coordenada. Também se observa que no início da trajetória não existem tantos dados recolhidos pelo módulo GPS quando comparado com o final do percurso. Essa discrepância deve-se à diminuição do nível de energia presente no sistema de alimentação do veículo. Essa diminuição de energia reduz a energia fornecida aos motores, fazendo com que não girem com tanta intensidade, reduzindo assim a velocidade do veículo. Em consequência são recolhidos dados pelo GPS em coordenadas mais próximas.

Neste estudo é importante analisar a variação da distância por percorrer até ao ponto de destino (de passagem ou final) ao longo do tempo (figura 4.15).

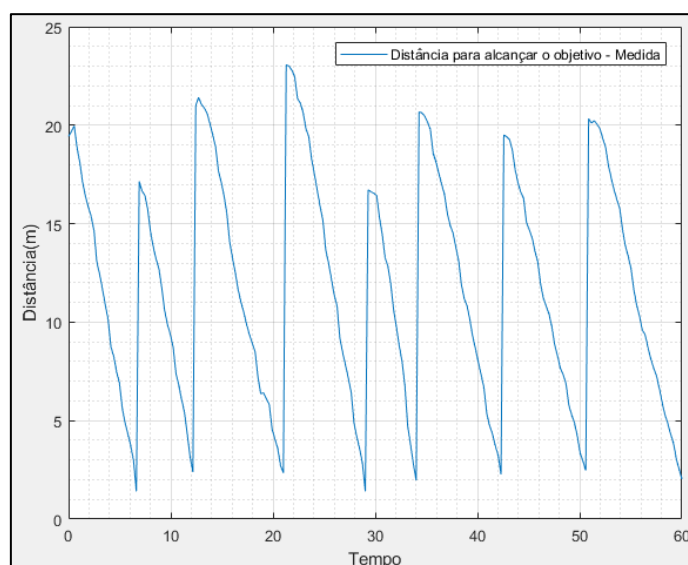


Figura 4.15 – Ensaio com várias coordenadas – Sem obstáculos – Distância a percorrer

Analisando os resultados apresentados na figura 4.15, é possível observar que as várias coordenadas objetivo se encontravam em locais que distam entre si aproximadamente 20 m, sendo possível observar que o veículo só dirigia para o objetivo seguinte, assim que a distância para o objetivo atual fosse inferior a 2.5 m. Analisando as inclinações das várias retas e as suas oscilações, é possível concluir que são todas relativamente semelhantes, o que significa que o veículo alcançou os vários objetivos, aproximando-se com uma velocidade semelhante

#### 4.2.2.2 Navegação com várias coordenadas – percurso com obstáculos

Neste ensaio, pretende-se analisar o comportamento do veículo para se desviar de obstáculos, enquanto navega em direção das coordenadas objetivo (de passagem ou final). Assim, à semelhança do ensaio realizado anteriormente, o veículo terá de alcançar várias coordenadas geográficas, contudo, neste ensaio considerou-se apenas uma coordenada objetivo de passagem e outra final. Além disso, foram colocados dois obstáculos em forma de “L” na zona do percurso, por ter paredes exteriores que formam um obstáculo com um ângulo convexo (mais fácil de ultrapassar) e paredes interiores que formam um obstáculo com um ângulo concavo (mais difícil de ultrapassar). No primeiro troço colocou-se um obstáculo de forma ao veículo encontrar as paredes que formam o ângulo convexo e no segundo troço o obstáculo com um ângulo concavo.

No presente ensaio obteve-se a seguinte trajetória (figura 4.16):

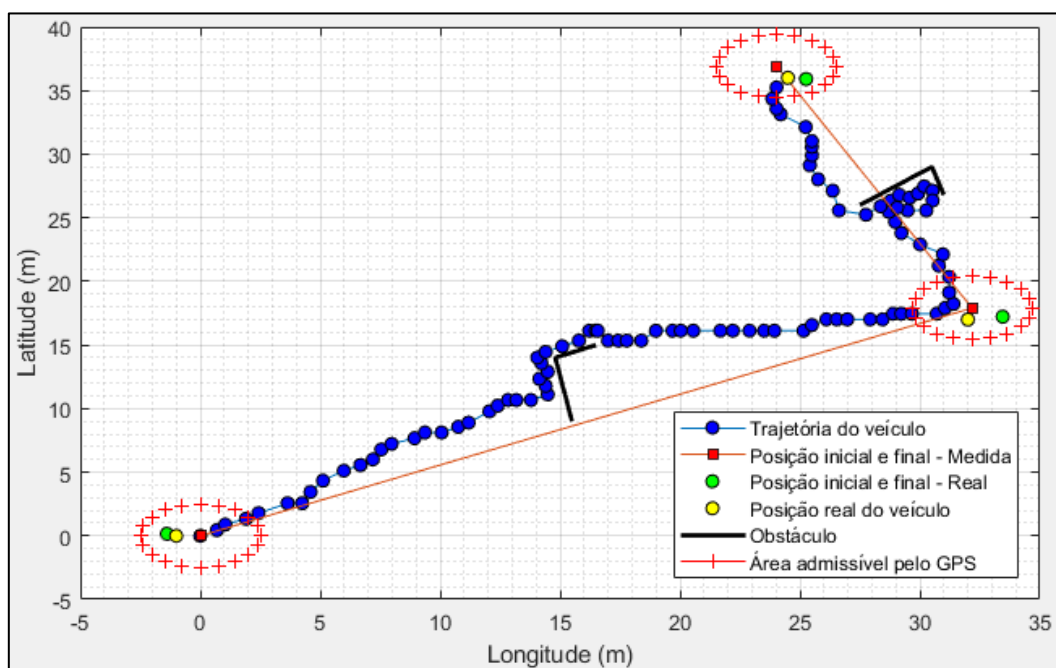


Figura 4.16 – Ensaio com várias coordenadas – Com obstáculos

Analisando os resultados da figura 4.16, observa-se que no primeiro trecho o veículo é interceptado pelo obstáculo com o formato da letra “L”, pelo lado do ângulo convexo. Como o veículo estava orientado para o lado esquerdo no momento da sua interseção, contornou o obstáculo por esse mesmo lado, sem nunca existir colisão entre o obstáculo e o veículo. Após ultrapassar o obstáculo o veículo seguiu o seu percurso até à coordenada geográfica desejada.

No segundo trecho existia um obstáculo semelhante ao anterior, colocado de forma que o veículo o encontrasse com as paredes que formam um ângulo concavo entre si. Quando o veículo alcançou o obstáculo estava orientado para o lado direito, fazendo que este se dirigisse para esse mesmo lado. Assim que os sensores ultrassônicos deixaram de detetar a presença do obstáculo, o sistema de navegação calculou a diferença entre a orientação do veículo e o azimute para a coordenada de destino, para determinar o tipo de movimento a realizar. Após realizar esta operação o veículo intersesta novamente o mesmo obstáculo. Contudo, como desta vez estava orientado para o lado esquerdo, foi possível ultrapassá-lo por esse lado. Ultrapassado o obstáculo, o veículo continuou o seu trajeto guiando-se pelo módulo GPS.

É possível observar também na figura 4.16 que todas as posições se encontram dentro das áreas admissíveis. Com isto, conclui-se que o veículo cumpriu todos os objetivos propostos para este ensaio.

Neste ensaio é importante analisar a manobra realizada para ultrapassar o segundo obstáculo, neste sentido será realizado uma ampliação da figura anterior nessa região (ver figura 4.17).

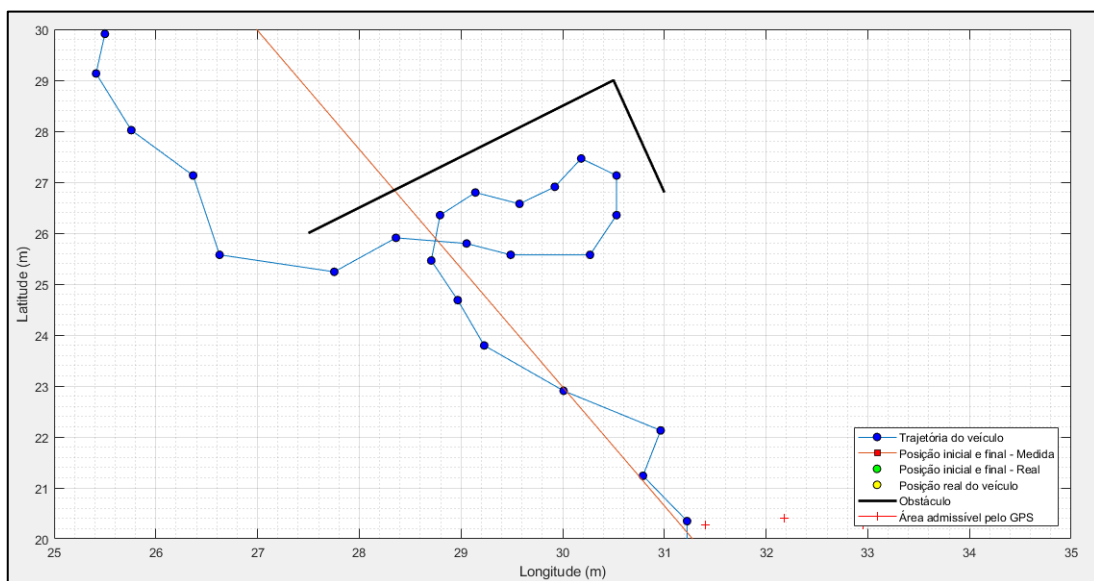


Figura 4.17 – Ensaio com várias coordenadas – Com obstáculos – Manobra

Neste estudo é importante analisar a variação da distância por percorrer ao longo do tempo.

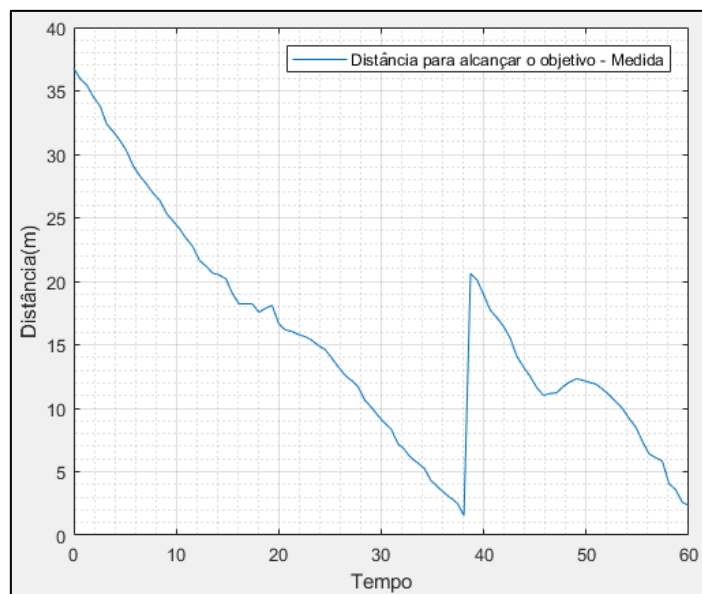


Figura 4.18 – Ensaio com várias coordenadas – Com obstáculos – Distância a percorrer

Por análise da figura 4.18, é notório que o veículo percorreu dois trechos. No primeiro trecho, o veículo teve de percorrer uma distância de cerca de 36 m. Se compararmos esse valor com a distância do primeiro trecho do ensaio anterior, é notório que a distância deste ensaio é cerca de 2 vezes maior. Isso ocorreu porque não foi considerado o primeiro ponto objetivo do ensaio anterior. Entre os vários trechos a presença de obstáculos é notória.

## 5. Conclusão e trabalhos futuros

Este capítulo apresenta as principais conclusões sobre o trabalho desenvolvido e seus resultados, assim como algumas limitações que foram identificadas durante o desenvolvimento do veículo autónomo, a execução dos ensaios e análise dos resultados obtidos.

Por fim, serão mencionadas algumas possíveis perspectivas de desenvolvimento futuro tendo por base o trabalho realizado.

### 5.1 Conclusões gerais

O desenvolvimento de um veículo autónomo é uma tarefa bastante complexa que envolve o conhecimento de várias áreas para que os resultados sejam próximos dos desejados. Neste contexto, o desenvolvimento deste protótipo passou por várias fases, tais como: a alteração de um veículo telecomandado para um protótipo de veículo autónomo, a escolha do *software* e *hardware* adequado, entre outras.

O protótipo desenvolvido contém vários sensores e atuadores que permitem a navegação do veículo entre coordenadas geográficas sem a intervenção humana. No veículo desenvolvido está presente dois sistemas de navegação, um baseado em coordenadas geográficas e outro pelas distâncias a que os obstáculos se encontram do veículo. O primeiro sistema mencionado é o que se destaca no desenvolvimento do protótipo, pois requer um conhecimento mais profundo para a sua implementação. O sistema de navegação que orienta o veículo pelas distâncias a que este se encontra dos obstáculos é considerado um sistema auxiliar, pois é utilizado para que o veículo não colida com quaisquer obstáculos que lhe surjam ao longo do trajeto, não demonstrando o mesmo interesse quando comparado com o primeiro.

Neste contexto, o sistema de navegação por coordenadas geográficas é predominante neste trabalho de projeto. Este sistema é composto por um módulo GPS capaz de recolher informações sobre a sua localização geográfica e um sensor magnetómetro que mede a intensidade do campo magnético terrestre. Com estes dois componentes eletrónicos e fazendo uso das equações de Azimute e *Haversine* é possível alcançar qualquer posição no globo com bastante precisão.

Assim sendo, o sucesso do veículo desenvolvido dependerá bastante da qualidade dos resultados medidos pelos componentes referidos anteriormente. Neste contexto, a escolha do local para a realização dos ensaios práticos do veículo é fundamental para que o veículo consiga alcançar a coordenada geográfica do destino, uma vez que a presença de campos magnéticos indesejados ou interferência do sinal emitido pelos satélites podem causar erros nas leituras dos sensores levando o veículo para posições não pretendidas.

Com isto, o local escolhido para realizar os ensaios possuía todos os requisitos necessários. Foram realizados seis ensaios para testar a eficiência do veículo. Nos três primeiros ensaios foi pretendido que o veículo alcançasse a mesma coordenada geográfica a pelo menos 2,5 m dela. Estes três primeiros ensaios são fundamentais para verificar que independentemente da orientação ou a existência de obstáculos no percurso, o veículo consegue alcançar sempre a posição desejada a uma distância inferior do destino de 2,5 m.

É realizado também um ensaio para analisar o comportamento do veículo quando lhe é proposto que se aproxime a uma distância muito reduzida do ponto pretendido. Apesar do veículo não obter sucesso logo à primeira tentativa, este vai realizando trajetórias circulares cujo objetivo é aproximar-se ao máximo do destino, acabando por alcançar.

Por fim, são realizados ensaios onde é pretendido que o veículo percorra uma distância considerável e alcance várias coordenadas geográficas, podendo ou não ter a presença de obstáculos. Inicialmente, foi realizado um ensaio onde o veículo terá de alcançar várias coordenadas, no qual cumpre todos os objetivos que lhe são impostos. No entanto, este ensaio é bastante importante para analisar como varia o consumo de energia do veículo. Assim sendo, é possível observar que inicialmente o veículo andava mais rapidamente, logo não conseguia tirar tantas coordenadas geográficas por onde tinha passado. No final da trajetória é notório um aumento da concentração de dados na amostra, sendo resultado da diminuição de energia disponível no sistema de alimentação. Posteriormente foi realizado outro ensaio, onde existe um obstáculo em cada troço da trajetória. Apesar de ambos os obstáculos serem idênticos, possuíam orientações diferentes o que implicou a necessidade de o veículo realizar ações diferentes. No primeiro troço, devido à orientação do obstáculo, o veículo conseguiu contornar sem a necessidade de realizar uma manobra. Em contrapartida, no segundo obstáculo foi necessário a realização de uma manobra para contornar o obstáculo, devido à sua orientação. Apesar de todas as dificuldades impostas ao veículo, este

conseguiu alcançar todas as coordenadas pretendidas sem nunca colidir com quaisquer obstáculos.

Relativamente à linguagem de programação utilizada, é possível concluir que foi a indicada para desenvolver o projeto proposto pela sua versatilidade e por ser de código aberto. A realização deste tema como trabalho de projeto, permitiu aprofundar os conhecimentos desta linguagem de programação, assim como de alguns *softwares* utilizados, como é o caso do Arduino IDE ou do MATLAB®.

Em suma, é possível concluir que as metodologias adotadas e os resultados apresentados comprovam o desenvolvimento de um veículo autónomo capaz de navegar sem a intervenção do ser humano entre coordenadas geográficas evitando que este colida com qualquer obstáculo que lhe surjam no seu trajeto.

## 5.2 Limitações do protótipo

Durante o desenvolvimento do protótipo e nos ensaios realizados foram detetadas algumas limitações do sistema. Essas limitações poderão ser devidas ao *software*, *hardware* ou de construção.

O veículo conseguiu cumprir os objetivos propostos para este trabalho de projeto, no entanto apresentou algumas limitações. Neste sentido, após a realização dos ensaios foi detetado que as dimensões do veículo afetaram o seu desempenho. O veículo durante a sua trajetória foi interstado por pequenos objetos como pedras, pequenos resíduos, marcações rodoviárias, entre outras, no qual teve alguma dificuldade de as ultrapassar. Esta limitação foi originada por este possuir rodas de pequenas dimensões e os sensores ultrassónicos não terem capacidade de detetar estes objetos.

Existem algumas limitações provenientes do reaproveitamento de peças do carro telecomandado original. Como o carro inicial utilizava um motor DC no sistema de direção, este mecanismo foi mantido. Contudo, apresenta uma enorme desvantagem, pois este motor apenas apresenta três estados lógicos (-1,0,1), o que significa que o carro ou tem a direção alinhada ou tem a direção completamente virada para um lado. Esta condição compromete muito a eficiência do veículo uma vez que não é possível direcionar as rodas para um ângulo conhecido. Uma solução para este problema é a substituição deste motor DC por um servo motor. No entanto, esta substituição levaria à alteração e adaptação no sistema de direção.

Foi detetada uma desvantagem na localização do sensor magnetómetro. Como este sensor está colocado a pelo menos 15 cm acima da restante eletrónica foi desenvolvida uma estrutura para este ser colocado. No entanto, como esta estrutura está bastante elevada levou a que durante alguns ensaios acabasse colidindo com vários obstáculos que não são detetados pelos sensores ultrassónicos, como bancos. A solução para este problema passaria na adição de um sensor ultrassónico nesta estrutura para detetar a existência de alguns obstáculos, contudo, a sua presença poderia alterar a intensidade do campo magnético e afetar as leituras do sensor.

Como se trata de um veículo autónomo que se guia entre coordenadas geográficas, a escolha do local é fundamental para que este execute o seu trajeto com bastante sucesso. Este local não poderá ser coberto, nem estar perto de edifícios, vegetação densa, vedações metálicas, entre outras, apresentando assim uma enorme limitação.

O sistema de alimentação também apresenta algumas limitações, pois dependendo do nível de energia presente poderá necessitar de reajustes no *software* do veículo. Em trajetórias de grandes dimensões, é bastante notório o consumo de energia efetuado, pois o veículo reduz bastante a sua velocidade e quando necessita de efetuar uma paragem, o arranque para voltar a andar é bastante lento apresentando esforço por parte dos motores.

Relativamente à aquisição de dados do veículo, esta era feita por cabo. Apesar do veículo conseguir se movimentar autonomamente entre coordenadas geográficas, para recolher a informação do seu trajeto foi necessário perseguir o veículo ao longo da trajetória, pois este encontrava-se conectado por cabo a um computador. Esta circunstância não afeta diretamente o desempenho do veículo, mas dificulta o monitoramento para analisar a trajetória efetuada por este. Para contrariar esta situação, uma solução era fazer uso do módulo *Bluetooth* presente no protótipo para esse fim.

Por último, a maior limitação deste protótipo é devido ao módulo GPS e à unidade de processamento escolhida. O módulo de GPS apresenta um erro de leitura muito elevado, sendo por vezes utilizado em locais onde o sinal proveniente dos satélites é refletido em vários edifícios gerando um erro ainda maior na localização geográfica. Em relação à unidade de processamento, devia de ser possível aumentar o número de *loops* realizados por segundo, o que levaria a um aumento da frequência de amostragem, tendo por consequência um aumento da informação recolhida pelos sensores.

### 5.3 Trabalhos Futuros

O trabalho desenvolvido no presente trabalho de mestrado apresenta uma excelente base para trabalhos futuros na área da robótica móvel. Neste contexto, este veículo poderá ser utilizado para vários fins no futuro, ou inspirar outras pessoas a desenvolverem os seus próprios protótipos de veículos autónomos, criando soluções para problemas futuros.

No entanto, para que este protótipo alcance mais um pouco de eficiência é necessário realizar alguns melhoramentos. Para isso, a alteração do tipo de roda é inevitável. O tipo de roda utilizado apresenta algumas limitações, como a necessidade de bastante espaço para realizar uma manobra. A sua alteração para rodas omnidirecionais permitiria que o veículo realizasse uma rotação e uma translação em simultâneo, o que levaria a alcançar posições geográficas com mais precisão.

Por outro lado, era importante descobrir uma utilidade real para o protótipo desenvolvido. Neste sentido, o desenvolvimento de um protótipo de veículo autónomo capaz de preencher uma matriz baseada em coordenadas geográficas poderia ser aplicado a várias áreas, como: na agricultura, onde seria implementado uma alfaia ao protótipo e a matriz representa um terreno, cujo objetivo era o robô preencher a matriz simulando um trabalho agrícola.

Visto de outra perspetiva, poderia ser desenvolvido um protótipo de drone autónomo baseado em coordenadas geográficas ou um drone que tivesse a capacidade de seguir um pedestre. Estas propostas são uma excelente solução para quem trabalha com fotografia.

Para melhorar o desempenho do veículo, seria necessário utilizar a fusão sensorial. Esta técnica era fundamental para difundir toda a informação recolhida pelos vários sensores, melhorando drasticamente o desempenho do protótipo. Em relação à unidade de processamento escolhida, teria de ser bem analisada qual a melhor oferta para o projeto em desenvolvimento, pois existem outras soluções no mercado, como *Raspberry Pi*.



## Bibliografia

- [1] C. D. Teixeira, “Sistemas de Segurança Activa,” *Slides da Unidade Curricular - Técnica e gestão automóvel (2021)*.
- [2] C. D. Teixeira, “Sistemas de Segurança Passiva,” *Slides da Unidade Curricular - Técnica e gestão automóvel (2021)*.
- [3] “PORDATA - Acidentes de viação com vítimas, feridos e mortos - Continente.” <https://www.pordata.pt/Portugal/Acidentes+de+via%C3%A7%C3%A3o+com+v%C3%A1timas++feridos+e+mortos+++Continente-326> (Acedido em Dec. 21, 2021).
- [4] V. Romano and M. Dutra, “Introdução a robótica industrial,” *Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processo, São Paulo: Edgard Blücher*, pp. 1–19, 2002.
- [5] U. Nehmzow, “Mobile Robotics: A Practical Introduction,” *Mobile Robotics: A Practical Introduction*, 2003, doi: 10.1007/978-1-4471-0025-6.
- [6] J. Linert and P. Kopacek, “Humanoid robots Robotainment,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 30, pp. 220–225, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.IFACOL.2018.11.290.
- [7] M. R. Miller and R. Miiler, “Robots and Robotics - Principles, Systems, and Industrial Applications,” *McGraw-Hill Education*, 2017.
- [8] H. Taheri and C. X. Zhao, “Omnidirectional mobile robots, mechanisms and navigation approaches,” *Mech Mach Theory*, vol. 153, p. 103958, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2020.103958.
- [9] M. I. Ribeiro, “sensores”, Acedido em: Mar. 03, 2023. [Online]. Disponível em: <http://users.isr.ist.utl.pt/~mir/pub/sensores.pdf>
- [10] A. D. Goulão, “Navegação de um Robô Móvel por Processamento de Imagem,” *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa*, 2022.
- [11] W. C. Lee and C. W. Cai, “An orientation sensor for mobile robots using differentials,” *Int J Adv Robot Syst*, vol. 10, Feb. 2013, doi: 10.5772/55658/ASSET/IMAGES/LARGE/10.5772\_55658-FIG17.JPEG.
- [12] V. M. N. Passaro, A. Cuccovillo, L. Vaiani, M. De Carlo, and C. E. Campanella, “Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective,” *Sensors 2017, Vol. 17, Page 2284*, vol. 17, no. 10, p. 2284, Oct. 2017, doi: 10.3390/S17102284.
- [13] K. B. Sims, “Orientable Single-Distance Codes for Absolute Incremental Orientable Single-Distance Codes for Absolute Incremental Encoders Encoders,” 2020, Acedido em: May 29, 2023. [Online]. Disponível em: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd>
- [14] R. Siegart and I. R. Nourbakhsh, “Introduction to Autonomous Mobile Robots,” 2004, Acedido em: Feb. 22, 2022. [Online]. Disponível em: [https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog\\_13268/objava\\_56689/fajlovi/Introduction%20to%20Autonomous%20Mobile%20Robots%20book.pdf](https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_13268/objava_56689/fajlovi/Introduction%20to%20Autonomous%20Mobile%20Robots%20book.pdf)

- [15] H. M. McHenry and K. Coffing, "Australopithecus to Homo: Transformations in Body and Mind," <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.29.1.125>, vol. 29, pp. 125–146, Nov. 2003, doi: 10.1146/ANNUREV.ANTHRO.29.1.125.
- [16] C. Kahraman, M. Deveci, E. Boltürk, and S. Türk, "Fuzzy controlled humanoid robots: A literature review," *Rob Auton Syst*, vol. 134, p. 103643, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.ROBOT.2020.103643.
- [17] Y. J. King and C. Y. Dat, "Humanoid Robot: A Review of the Architecture, Applications and Future Trend Design of a easy to fly, low-cost generic unmanned aerial vehicle (UAV) for civilian aerial-imaging application View project Internal Flow Induced Acoustics in Corrugated Pipe View project Chenhunt Ting," *Article in Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2014, doi: 10.19026/rjaset.7.402.
- [18] M. Crenganis, C. Biris, and C. Girjob, "Mechatronic Design of a Four-Wheel drive mobile robot and differential steering," *MATEC Web of Conferences*, vol. 343, p. 08003, 2021, doi: 10.1051/MATECCONF/202134308003.
- [19] K. Shabalina, A. Sagitov, and E. Magid, "Comparative analysis of mobile robot wheels design," *Proceedings - International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE*, vol. 2018-September, pp. 175–179, Feb. 2019, doi: 10.1109/DESE.2018.00041.
- [20] I. Doroftei, V. Grosu, V. Spinu, I. Doroftei, V. Grosu, and V. Spinu, "Omnidirectional Mobile Robot - Design and Implementation," *Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots*, Sep. 2007, doi: 10.5772/5518.
- [21] C. V. R. Coutinho, "Robótica móvel: sistema de condução autónoma," 2014, Acedido em: Dec. 08, 2022. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/3624>
- [22] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-30301-5.
- [23] M. Nurdinov, M. G'anijonov, and B. Abdupattoyev, "CARGO ON INTERNATIONAL HIGHWAYS REST AREAS FOR CARS," *Theoretical aspects in the formation of pedagogical sciences*, vol. 1, no. 6, pp. 302–308, 2022.
- [24] M. M. Shukurov, M. A. Nurdinov, N. B. Hudoyazarov, and R. I. Ismoilov, "Roads, road lines and thermoplastic products used in their drawing," *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal*, vol. 11, no. 4, pp. 258–263, 2021, doi: 10.5958/2249-7137.2021.01049.1.
- [25] J. Ondruš, E. Kolla, P. Vertal, and Ž. Šarić, "How Do Autonomous Cars Work?," *Transportation Research Procedia*, vol. 44, pp. 226–233, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.TRPRO.2020.02.049.
- [26] P. Alexandre and B. Machado, "Um exercício de prospectiva sobre o futuro da mobilidade na cidade de Lisboa no horizonte 2030," 2019, Acedido em: Jun. 16, 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/19092>
- [27] P. Davidson and A. Spinoulas, "Autonomous vehicles: what could this mean for the future of transport," in *Australian Institute of Traffic Planning and Management (AITPM) National Conference, Brisbane, Queensland*, 2015.

- [28] K. Y. Hui, "Week 7: Current Developments | Driverless Cities," Oct. 15, 2016. <https://driverlesscities.wordpress.com/2016/10/15/week-8-technological-risks/> (Acedido em Feb. 21, 2022).
- [29] R. Sushma and J. S. Kumar, "Autonomous vehicle: Challenges and implementation," *Journal of Electrical Engineering and Automation*, vol. 4, no. 2, pp. 100–108, 2022.
- [30] "SAE's levels of driving automation. Source: Standard SAE J3016, 2016 | Download Scientific Diagram." [https://www.researchgate.net/figure/SAEs-levels-of-driving-automation-Source-Standard-SAE-J3016-2016\\_fig1\\_340072903](https://www.researchgate.net/figure/SAEs-levels-of-driving-automation-Source-Standard-SAE-J3016-2016_fig1_340072903) (Acedido em Jan. 04, 2023).
- [31] E. Martí, M. Á. De Miguel, F. García, and J. Pérez, "A Review of Sensor Technologies for Perception in Automated Driving," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 11, no. 4, pp. 94–108, Dec. 2019, doi: 10.1109/MITS.2019.2907630.
- [32] T. Mai, "Global Positioning System History," 2015, Acedido em: Jun. 16, 2023. [Online]. Disponível em: [http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS\\_History.html](http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html)
- [33] Lusa, "Carros autónomos só devem chegar a Portugal em 2025," *TSF*, Feb. 25, 2021. <https://www.tsf.pt/futuro/carros-autonomos-so-devem-chegar-a-portugal-em-2025-13390062.html> (Acedido em Dec. 21, 2021).
- [34] M. V. Gomes, "Tecnologias de Participação dos Cidadãos," 2017, Acedido em: Jun. 16, 2023. [Online]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/22004>
- [35] "Serviços Mobi | MobiCascais." <https://mobi.cascais.pt/servicos/veiculoautonomo> (Acedido em Dec. 22, 2021).
- [36] A. M. Marau, "Aplicações e impactos do modelo de smart city em Cascais," Dec. 2022, Acedido em: Jun. 16, 2023. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.iscte-iul.pt/handle/10071/27362>
- [37] C. F. J. T. Salazar, "Automóveis Autónomos em Portugal: A Perspetiva do Consumidor numa Indústria em Mudança," 2017, Acedido em: Jun. 16, 2023. [Online]. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/49857>
- [38] Q. Zheng and P. Mueller, "An Overview of the Zoox Smart Automatic Thermal Control Design - An Autonomous Electric Taxi," *2021 5th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence, CVCI 2021*, 2021, doi: 10.1109/CVCI54083.2021.9661241.
- [39] B. Howard, "GM's Cruise Origin Is an Autonomous Vehicle From the Future | Extremetech," *Extreme Tech*, Jan. 23, 2020. <https://www.extremetech.com/cars/302323-meet-gms-cruise-origin-of-the-autonomous-species> (Acedido em Jun. 16, 2023).
- [40] M. M, V. T S, B. V, S. Rao, and G. P S, "Smart vacuum cleaner," *Global Transitions Proceedings*, vol. 2, no. 2, pp. 553–558, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.GLTP.2021.08.051.
- [41] Z. F. Li, J. T. Li, X. F. Li, Y. J. Yang, J. Xiao, and B. W. Xu, "Intelligent tracking obstacle avoidance wheel robot based on Arduino," *Procedia Comput Sci*, vol. 166, pp. 274–278, 2020, doi: 10.1016/J.PROCS.2020.02.100.

- [42] R. Walambe, N. Patwardhan, and V. Joshi, "Development of auto-parking and collision avoidance algorithms on car type autonomous mobile robots," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 1, pp. 567–572, 2020, doi: 10.1016/J.IFACOL.2020.06.095.
- [43] U. Gulati, Ishaan, and R. Dass, "Intelligent Car with Voice Assistance and Obstacle Detector to Aid the Disabled," *Procedia Comput Sci*, vol. 167, pp. 1732–1738, 2020, doi: 10.1016/J.PROCS.2020.03.383.
- [44] M. Ângelo Galego Marques, "Desenvolvimento de um Robô para Combate a Fogos num Cenário de Simulação," *INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA*, Jan. 2017, Acedido em: Jun. 19, 2023. [Online]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.21/7071>
- [45] "What is Arduino? | Arduino," *Arduino.cc*, Feb. 05, 2018. <https://www.Arduino.cc/en/Guide/Introduction> (Acedido em Dec. 30, 2021).
- [46] H. K. Kondaveeti, N. K. Kumaravelu, S. D. Vanambathina, S. E. Mathe, and S. Vappangi, "A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations," *Comput Sci Rev*, vol. 40, p. 100364, May 2021, doi: 10.1016/J.COSREV.2021.100364.
- [47] "Arduino Mega 2560 Rev3 — Arduino Official Store," *Arduino.cc*. <https://store.Arduino.cc/products/Arduino-mega-2560-rev3?queryID=undefined> (Acedido em Jun. 27, 2023).
- [48] "GPS Accuracy," *gps.gov*, Mar. 03, 2022. <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/> (Acedido em Jun. 27, 2023).
- [49] "NEO-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet NEO-6-Data Sheet," *u-blox.com*, 2011, Acedido em: Jun. 27, 2023. [Online]. Disponível em: [www.u-blox.com](http://www.u-blox.com)
- [50] A. Susan John and S. Shelly, "A navigational system for visually challenged persons," *Mater Today Proc*, vol. 62, no. P12, pp. 6873–6878, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.05.137.
- [51] W. A. Jabbar, C. W. Wei, N. A. A. M. Azmi, and N. A. Haironnazli, "An IoT Raspberry Pi-based parking management system for smart campus[Formula presented]," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 14, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.IOT.2021.100387.
- [52] E. J. Morgan, "HC-SR04 Ultrasonic Sensor," Nov. 2014. Acedido em: Jun. 28, 2023. [Online]. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132203/ETC2/HC-SR04.html>
- [53] STMicroelectronics, "DUAL FULL-BRIDGE DRIVER," 2000. Acedido em: May 01, 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.st.com/en/motor-drivers/l298.html>
- [54] Q. Wang, J. Zheng, H. Xu, B. Xu, and R. Chen, "Roadside Magnetic Sensor System for Vehicle Detection in Urban Environments," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 5, pp. 1365–1374, May 2018, doi: 10.1109/TITS.2017.2723908.
- [55] P. Škrabánek, P. Vodička, and S. Yildirim-Yayilgan, "Control System of a Semi-Autonomous Mobile Robot," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 25, pp. 460–469, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.IFACOL.2016.12.065.

- [56] R. R. A. Torrico, "GPS Guides Robotic Car," *Circuit Cellar*, Jan. 06, 2019. <https://circuitcellar.com/research-design-hub/gps-guides-robotic-car-2/> (Acedido em Sep. 26, 2022).
- [57] Honeywell, "3-Axis Digital Compass IC HMC5883L," *Honeywell*, Feb. 2013, Acedido em: Mar. 09, 2023. [Online]. Disponível em: [www.honeywell.com](http://www.honeywell.com)
- [58] Wavesen, "HC-06-Datasheet," *Guangzhou HC Information Technology Co., Ltd*, Apr. 2011, Acedido em: Mar. 05, 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.etechnophiles.com/wp-content/uploads/2020/10/HC-06-Datasheet.pdf>
- [59] L. Aljundi, "Using the Arduino Software (IDE) | Arduino Documentation," *docs.Arduino.cc*, Apr. 07, 2023. <https://docs.Arduino.cc/learn/starting-guide/the-Arduino-software-ide> (Acedido em Jun. 05, 2023).
- [60] R. Meier, "CoolTerm," *the-meiers.org*, Dec. 2022, Acedido em: Jan. 05, 2023. [Online]. Disponível em: [http://freeware.the-meiers.org/CoolTerm\\_ReadMe.txt.html](http://freeware.the-meiers.org/CoolTerm_ReadMe.txt.html)
- [61] E. Byrne, "What is MATLAB®?," *MathWorks*. <https://www.mathworks.com/products/MATLAB®.html> (Acedido em Jun. 03, 2023).
- [62] Microsoft, "Software de Folha de Cálculo do Microsoft Excel," *Microsoft 365*. <https://www.microsoft.com/pt-pt/microsoft-365/excel> (Acedido em Jul. 05, 2023).
- [63] M. H. Zohari, M. Hakimi, B. Zohari, M. F. Bin, and M. Nazri, "GPS Based Vehicle Tracking System," *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2021, Acedido em: Mar. 31, 2023. [Online]. Disponível em: [www.ijstr.org](http://www.ijstr.org)
- [64] N. Mitrovic, S. Veljkovic, Z. Prijic, and D. Dankovic, "Comparison of the performance of the different GPS receivers in practical applications," *2022 IEEE Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference, ZINC 2022*, pp. 11–16, 2022, doi: 10.1109/ZINC55034.2022.9840698.
- [65] A. da S. Simões, "Aula09 - Locomocao com rodas", Acedido em: Oct. 13, 2022. [Online]. Disponível em: <http://gasi.sorocaba.unesp.br/assimoes/lectures/rm/Aula09%20-%20Locomocao%20com%20rodas.pdf>
- [66] B. Szyk and S. Wooding, "Azimuth Calculator," *Omni Calculator*, Jun. 05, 2023. <https://www.omnicalculator.com/other/azimuth> (Acedido em Jan. 04, 2023).
- [67] D. DiBiase, "Measuring Angles," *College of Earth and Mineral Sciences*, 2009, Acedido em: Jan. 04, 2023. [Online]. Disponível em: [https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/c5\\_p7.html](https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/c5_p7.html)
- [68] M. Abdullah-Al-Kaiser, D. J. Paul, A. I. Khan, C. Shahnaz, and S. A. Fattah, "A cost effective GPS guided autonomous object transporter robot for disaster management and industrial automation," *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, vol. 2017-December, pp. 2637–2641, Dec. 2017, doi: 10.1109/TENCON.2017.8228307.
- [69] G. S. Akhshirsh, N. K. Al-Salihi, and O. H. Hamid, "A cost-effective GPS-aided autonomous guided vehicle for global path planning," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 650–657, Apr. 2021, doi: 10.11591/eei.v10i2.2734.



## Anexos

### Anexo 1 – Precisão do módulo GPS

#### Código Arduino

```
#define GPS_RX 43
#define GPS_TX 42
#define GPS_Serial_Baud 9600
#include <SoftwareSerial.h>
#include <TinyGPS.h>
TinyGPS gps;
SoftwareSerial gpsSerial(GPS_RX, GPS_TX);
float flat, flon, flat2, flon2;
void setup()
{
  Serial.begin(GPS_Serial_Baud);
  gpsSerial.begin(GPS_Serial_Baud);
}
void loop()
{
  bool newData = false;
  unsigned long chars;
  // For one second we parse GPS data and report some key values
  for (unsigned long start = millis(); millis() - start < 1000;)
  {
    while (gpsSerial.Disponivel em())
    {
      char c = gpsSerial.read();
      // Serial.write(c); //apague o comentario para mostrar os dados
      if (gps.encode(c)) // Atribui true para newData caso novos dados
        newData = true;
    }
    if (newData)
    {
      flat2 = flat;
      flon2 = flon;
      unsigned long age;
      gps.f_get_position(&flat, &flon, &age);
      //Serial.print("LAT=");
      Serial.print(flat == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flat,
6);
      Serial.print(",");
      //Serial.print(" LON=");
      Serial.print(flou == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flon,
6);
      Serial.print(",");
      //Serial.print("\tDIST= ");
      Serial.print(distanceBetweenEarthCoordinates(flat, flon, flat2,
flon2));
      Serial.println();
    }
  }
  else
  {
    Serial.println("Sem dados do GPS");
  }
}
```

```

    }
}

float degreesToRadians(float degreesF)
{
    return degreesF * 3.1415/180;
}

float distanceBetweenEarthCoordinates(float lat1, float lon1, float
lat2, float lon2)
{
    long earthRadiusMeters = 6371000; // Raio da Terra em m

    float dLat = degreesToRadians(lat2-lat1); //Diferenças entre as
latitudes
    float dLon = degreesToRadians(lon2-lon1); //Diferenças entre as
longitudes

    lat1=degreesToRadians(lat1);
    lat2=degreesToRadians(lat2);

    float a =
sin(dLat/2)*sin(dLat/2)+sin(dLon/2)*sin(dLon/2)*cos(lat1)*cos(lat2);
//calculo auxiliar da Equação de Haversine
    float c = 2 * atan2(sqrt(a), sqrt(1-a)); //Equação de Haversine

    return earthRadiusMeters * c;
}

```

## Código MATLAB®

```

clc, clear ALL, close all;

% Ficheiro que contem a amostra em %Posições medidas
filename =
'Amostra_de_precisao_do_modulo_GPS_Exterior.xlsx';

%Coordenadas geograficas medidas
lat = (xlsread(filename, 'A:A'))'; %Recolha da latitude da
amostra
lon = (xlsread(filename, 'B:B'))'; %Recolha da longitude da
amostra
dif = (xlsread(filename, 'C:C'))'; %Recolha dos erros da
amostra

%Posição real
Posicao_Lat = [38.727026];
Posicao_Lon = [-9.219075];

%Conversão da coordenada geografica para plano cartesiano;
%Origem na coordenada real
for j=1:length(lat)
    lat_dif(j)=(3.1415/180)*(Posicao_Lat(1)-lat(j));
    lon_dif(j)=(3.1415/180)*(Posicao_Lon(1)-lon(j));

```

```

aux(j)=((sin(lat_dif(j)/2)).^2)+cos((3.1415/180)*lat(j))*..
.
cos((3.1415/180)*Posicao_Lat(1))*((sin(lon_dif(j)/2)).^2);
dist_m(j)=2*6371000*atan2(sqrt(aux(j)),sqrt(1-aux(j)));

aux_x(j)=((sin(0/2)).^2)+cos((3.1415/180)*Posicao_Lat(1))*..
..
cos((3.1415/180)*Posicao_Lat(1))*((sin(lon_dif(j)/2)).^2);
aux_y(j)=((sin(lat_dif(j)/2)).^2)+cos((3.1415/180)*lat(j))*
...
cos((3.1415/180)*Posicao_Lat(1))*((sin(0/2)).^2);

if lat_dif(j) > 0
    dist_m_y(j)=-1*(2*6371000*tan(sqrt(aux_y(j))));

elseif lat_dif(j) <= 0
    dist_m_y(j)=(2*6371000*atan(sqrt(aux_y(j))));
end

if lon_dif(j) > 0
    dist_m_x(j)=-1*(2*6371000*tan(sqrt(aux_x(j))));

elseif lon_dif(j) <= 0
    dist_m_x(j)=(2*6371000*atan(sqrt(aux_x(j))));
end

end

%Cálculo da média das distâncias
dist_medium=mean(dist_m);
%apresentar o resultado no ecrã
disp(['A média das distâncias da amostra são
',num2str(dist_medium),...
' m'])

%Cálculo do Desvio Padrão
somatorio_s_quadrado=0;
for n=1:length(lat)
    aux_s_quadrado(n)=((dist_m(n)-dist_medium).^2);

somatorio_s_quadrado=somatorio_s_quadrado+aux_s_quadrado(n);
end
s_quadrado=(somatorio_s_quadrado)/(length(lat)-1); %Variância
s=sqrt(s_quadrado); %Desvio Padrão

```

```

disp(['O desvio padrão da amostra é de ', num2str(s), ' m'])

i=0:20/(length(dif)-1):20;
%incremento ao longo do tempo

%Circunferencias
raio_inf=dist_medium-s; %Raio inferior
raio_sup=dist_medium+s; %Raio superior
raio_med=dist_medium; %Raio médio
alpha=0:10:360;

x_circ_inf=raio_inf.*cosd(alpha);
y_circ_inf=raio_inf.*sind(alpha);
x_circ_sup=raio_sup.*cosd(alpha);
y_circ_sup=raio_sup.*sind(alpha);
x_circ_med=raio_med.*cosd(alpha);
y_circ_med=raio_med.*sind(alpha);

figure('Name','Diferenças entre medições em relação à
medição anterior',...
'NumberTitle','off');
plot(i,dif,'LineWidth',1,'Color','b');
grid on; grid minor;
xlabel('Tempo (min)');
ylabel('Erro (m)');

figure('Name','Coordenadas GPS','NumberTitle','off');
plot(lon,lat,'o','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','b
");
grid on; grid minor;
ylabel('Latitude (°)');
xlabel('Longitude (°)');
ylim([38.727020 38.72705]);
xlim([-9.219094 -9.21906]);
hold on;
plot(Posicao_Lon,Posicao_Lat,'o','MarkerEdgeColor','k',...
'MarkerFaceColor','r');
legend('Amostra','Posição real');

figure('Name','Coordenadas GPS - m','NumberTitle','off');
plot(dist_m_x,dist_m_y,'o','MarkerEdgeColor','k','MarkerFac
eColor','b");
hold on;
plot(0,0,'o','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','r');
ylabel('Latitude (m)');
xlabel('Longitude (m)');
grid on;
grid minor;
legend('Amostra','Posição real');
xlim([-1.5 1.5]);
ylim([-0.5 2.5]);

```

```

figure('Name','Coordenadas GPS - m - Com desvio padrão',...
      'NumberTitle','off');
plot(dist_m_x,dist_m_y,'o','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','b');
hold on;
plot(0,0,'o','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','r');
ylabel('Latitude (m)');
xlabel('Longitude (m)');
grid on;
grid minor;
hold on;
plot(x_circ_med,y_circ_med,'--');
hold on;
plot(x_circ_inf,y_circ_inf);
hold on;
plot(x_circ_sup,y_circ_sup);
legend('Amostra','Posição real','Média',...
      'Média - Desvio Padrão','Média + Desvio Padrão');
xlim([-2 2]);
ylim([-1.5 2]);

figure('Name','Coordenadas GPS -
distâncias','NumberTitle','off');
plot(i,dist_m,'o','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','b');
grid on; grid minor;
xlabel('Tempo (mins)');
ylabel('Amplitude (m)');

% for p=1:length(i)
%     hold on;
%     raio_med_graph(p)=raio_med;
%     raio_inf_graph(p)=raio_inf;
%     raio_sup_graph(p)=raio_sup;
%     plot(i,raio_med_graph(p),'--');
%     hold on;
%     plot(i,raio_inf_graph(p));
%     hold on;
%     plot(i,raio_sup_graph(p));
% end
legend('Distância entre a coordenada real e
medida','Média',...
      'Média - Desvio Padrão','Média + Desvio Padrão');

```

## Anexo 2 – Ensaios

### Código Arduino

```
//
//TRABALHO FINAL DE MESTRADO - 2023
//AUTOR: RICARDO MARÇAL
//VEÍCULO AUTONOMO BASEADO NUM CARRO TELECOMANDADO
//
//Bibliotecas
#include <NewPing.h> //Sensor ultrassonico
#include <SoftwareSerial.h>
#include <TinyGPS.h> //GPS
//#include <AFMotor.h> //Motores
#include <QMC5883LCompass.h> //Bussola

//Coordenadas Objetivo
//float lat_obj= 38.7270270000000000;
//float lon_obj=-9.2190890000000000;

#define contador_obj 1
int contador;
//float
vetor_lat_obj[contador_obj]={38.739208,38.739273,38.739444,38.739494,3
8.739353,38.739246,38.739185,38.739109};
//float vetor_lon_obj[contador_obj]={-9.233685,-9.233514,-9.233608,-
9.233362,-9.233305,-9.233504,-9.233694,-9.233881};

float vetor_lat_obj[contador_obj]={38.739208};
float vetor_lon_obj[contador_obj]={-9.233685};

float lat_obj;
float lon_obj;

////-----
--GPS-----
---
//Pinos GPS
#define GPS_RX 53
#define GPS_TX 52

//Taxa de dados GPS
#define GPS_Serial_Baud 9600

TinyGPS gps;
SoftwareSerial gpsSerial(GPS_RX, GPS_TX);

float flat, flon; //Coordenadas Atuais
float distancia; //distância entre a coordenada atual e objetivo
//#define distancia_segurança 2 //Erro do módulo GPS

////-----
--Motores-----
--
//Pinos Motores
//AF_DCMotor motor1(1); //Rodas
//AF_DCMotor motor2(2); //Direção
```

```

#define pinMotDirec2A 2
#define pinMotDirec2B 3
#define pinMotTracao1A 4
#define pinMotTracao1B 5

#define velocidade 50
#define velocidade_dir 65
#define parado 0
////-----
--Bussola-----
--
QMC5883LCompass compass;

float alphaa; // Ângulo de Orientação
float theta; // Ângulo de Azimute
float dife; // Diferença entre ângulos

//-----
Sensor ultrassonico-----
-----
NewPing sonar_fc (39,38,400); //(trig,echo,dist_max_considerar) ->
Frente Centro
NewPing sonar_fd (51,50,400); //(trig,echo,dist_max_considerar) ->
Frente Direita
NewPing sonar_fe (25,24,400); //(trig,echo,dist_max_considerar) ->
Frente Esquerda

NewPing sonar_tc (37,36,400); //(trig,echo,dist_max_considerar) ->
Tras Centro
NewPing sonar_td (49,48,400); //(trig,echo,dist_max_considerar) ->
Tras Direita
NewPing sonar_te (23,22,400); //(trig,echo,dist_max_considerar) ->
Tras Esquerda

void setup()
{
    Serial.begin(GPS_Serial_Baud);
    gpsSerial.begin(GPS_Serial_Baud);

    // Velocidades variam entre 0 (parado) e 255 (velocidade máxima)
    // motor1.setSpeed(230); //Velocidade do motor das rodas
    // motor2.setSpeed(200); //Velocidade do motor da direção
    pinMode(pinMotDirec2A, OUTPUT);
    pinMode(pinMotDirec2B, OUTPUT);
    pinMode(pinMotTracao1A, OUTPUT);
    pinMode(pinMotTracao1B, OUTPUT);

    compass.setCalibration(-1256, 682, -1583, 305, -997, 0);
    compass.init(); // Inicializar a bussola

    Serial.println(" LAT, LON, Dist, Azimute, Orientação, Diferença");
    // Primeira linha no serial, repete apenas uma vez. Utilizada para se
    compreender a informação apresentada
} //setup()

void loop()
{
    if (contador < contador_obj)
    {
        lat_obj = vetor_lat_obj[contador];
    }
}

```

```

lon_obj = vetor_lon_obj[contador];
//Serial.println(contador);

// if(sonar_fe.ping_cm() > 30 || sonar_fd.ping_cm() > 30)
// {
//     difference_Azimuth_Heading (); //Calcula a diferença entre o ângulo
de orientação e o ângulo de Azimute
//     Frente();
//     if(sonar_fe.ping_cm() > 30 || sonar_fd.ping_cm() > 30)
//     {
//         controlo_GPS (); // Executa o controlo entre coordenadas gps
//     }
//     else
//     {
//         controlo_sonar(); // Tenta ultrapassar o obstaculo
//     }
// }
else
{
    Serial.println("TODAS AS COORDENADAS FORAM ALCANÇADAS");
    delay(500);
}
delay(50);
// Serial.println();

} //loop()

////-----
--Funções-----
-

float readGPS() // Recolha de dados GPS
{
    bool newData = false;
    unsigned long chars;
    // For one second we parse GPS data and report some key values
    for (unsigned long start = millis(); millis() - start < 1000;)
    {
        while (gpsSerial.Disponível em())
        {
            char c = gpsSerial.read();
            //Serial.write(c); //apague o comentario para mostrar os dados
crus
            if (gps.encode(c)) // Atribui true para newData caso novos dados
sejam recebidos
                newData = true;
        }
    }
    if (newData)
    {
        unsigned long age;
        gps.f_get_position(&flat, &flon, &age);
        //flat == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flat
        //Serial.print("LAT=");
        Serial.print(flat == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flat,
6);
        Serial.print(",");
        //Serial.print(" LON=");
        Serial.print(flou == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flon,
6);
        Serial.print(",");

```

```

        //Serial.print("\tDIST= ");
        Serial.print(distanceBetweenEarthCoordinates(flat, flon, lat_obj,
lon_obj));
        Serial.print(",");
        Serial.print(AzimuthAngle(flat, flon, lat_obj, lon_obj));
        Serial.print(",");
        //Serial.println();

    }
    else
    {
        Serial.println("Sem dados do GPS");
    }
} //readGPS()

float degreesToRadians(float degreesF) //Conversão de Graus para
radianos
{
    return degreesF * 3.1415 / 180;
} //degreesToRadians()

float distanceBetweenEarthCoordinates(float lat1, float lon1, float
lat2, float lon2) //Cálculo entre coordenadas (Equação de Haversine)
{
    long earthRadiusMeters = 6371000; // Raio da Terra em m

    float dLat = degreesToRadians(lat2-lat1); //Diferenças entre as
latitudes
    float dLon = degreesToRadians(lon2-lon1); //Diferenças entre as
longitudes

    lat1=degreesToRadians(lat1);
    lat2=degreesToRadians(lat2);

    float a =
sin(dLat/2)*sin(dLat/2)+sin(dLon/2)*sin(dLon/2)*cos(lat1)*cos(lat2);
//calculo auxiliar da Equação de Haversine
    float c = 2 * atan2(sqrt(a), sqrt(1-a)); //Equação de Haversine

    distancia = earthRadiusMeters * c;

    return distancia;
} //distanceBetweenEarthCoordinates()

float AzimuthAngle (float lat1, float lon1, float lat2, float lon2) //
Angulo de Azimute
{
    float dLat = degreesToRadians(lat2-lat1); //Diferenças entre as
latitudes
    float dLon = degreesToRadians(lon2-lon1); //Diferenças entre as
longitudes

    lat1=degreesToRadians(lat1);
    lat2=degreesToRadians(lat2);

    float aux1 = sin(dLon)*cos(lat2);
    float aux2 = cos(lat1)*sin(lat2)-sin(lat1)*cos(lat2)*cos(dLon);

    float theta_radianos = atan2(aux1,aux2);
    theta = theta_radianos * 180/3.1415;

```

```

    if (theta < 0)
    {
        theta = 360 + theta;
    }
    return theta;
} //AzimuthAngle()

float readCompass()
{
    // Read compass values
    compass.read();

    // Return Azimuth reading
    alphas = compass.getAzimuth();

    //Serial.print("A: ");
    Serial.print(alphas);
    Serial.print(",");

    delay(100);
    return alphas;
} //readCompass()

float diference_Azimuth_Heading ()
{
    readGPS();
    readCompass();

    dife = alphas - theta;
    //Serial.print("Diferença: ");
    Serial.print(dife);
    Serial.print(",");
    return dife;
}

////-----
--Controlo veículo-----
-----
//Estados direção:
//FORWARD; Direita
//RELEASE; Frente
//BACKWARD; Esquerda

void Frente()
{
    analogWrite(pinMotTracao1A, velocidade);
    analogWrite(pinMotTracao1B, parado);
    analogWrite(pinMotDirec2A, parado);
    analogWrite(pinMotDirec2B, parado);
    //delay(50);
} //Frente()

void Frente_Dirt()
{
    analogWrite(pinMotTracao1A, velocidade);
    analogWrite(pinMotTracao1B, parado);
    analogWrite(pinMotDirec2A, parado);
    analogWrite(pinMotDirec2B, velocidade_dir);
} //Frente_Dirt()

```

```

void Frente_Esq()
{
  analogWrite(pinMotTracao1A, velocidade);
  analogWrite(pinMotTracao1B, parado);
  analogWrite(pinMotDirec2A, velocidade_dir);
  analogWrite(pinMotDirec2B, parado);
} //Frente_Esq()

void Tras()
{
  analogWrite(pinMotTracao1A, velocidade);
  analogWrite(pinMotTracao1B, parado);
  analogWrite(pinMotDirec2A, parado);
  analogWrite(pinMotDirec2B, parado);
} //Tras()

void Stop()
{
  analogWrite(pinMotTracao1A, parado);
  analogWrite(pinMotTracao1B, parado);
  analogWrite(pinMotDirec2A, parado);
  analogWrite(pinMotDirec2B, parado);
} //Stop()

void controlo_GPS ()
{
  if (distancia > 0.2)
  {
    // Serial.println("A executar algoritmo de controlo");

    if ( -180 <= dife && dife < -5 || 180 <= dife && dife < 360)
    {
      Frente_Dirt();
      Serial.println("Virar à direita");
    }
    else if ( -5 <= dife && dife <= 5 || dife == 360 )
    {
      Frente();
      Serial.println("Ir em frente");
      //contador = contador + 1;
    }
    else if (-180 > dife || 5 < dife && dife < 180)
    {
      Frente_Esq();
      Serial.println("Virar à esquerda");
    }
  }
  else
  {
    Stop();
    Serial.println("Chegou ao destino");
    contador = contador + 1;
  }
} //controlo_GPS ()

void controlo_sonar()
{
  if(sonar_fc.ping_cm() > 25)
  {

```

```

    if(sonar_fe.ping_cm() >= sonar_fd.ping_cm() && sonar_fe.ping_cm()
> 45)
    {
        //Frente_Esq();
        Serial.println("Virar à esquerda SONAR");
    }
    else if (sonar_fe.ping_cm() < sonar_fd.ping_cm() &&
sonar_fd.ping_cm() > 45)
    {
        //Frente_Dirt();
        Serial.println("Virar à direita SONAR");
    }
}
else
{
    if (sonar_tc.ping_cm() > 20)
    {
        //Tras();
        Serial.println("Ir para tras SONAR");
    }
    else
    {
        // Stop();
        Serial.println("STOP SONAR");
    }
}
// delay(100);
} //controlo_sonar()

```

## Código MATLAB®

```

clc, clear ALL, close all;

filename = 'Amostra_Volta_Completa.xlsx';
% Ficheiro que contem a amostra em estudo

lat = (xlsread(filename,'A:A'))'; %Recolha da latitude da
amostra
lon = (xlsread(filename,'B:B'))'; %Recolha da longitude da
amostra
dist = (xlsread(filename,'C:C'))'; %Recolha dos erros da
amostra
Azimuth = (xlsread(filename,'D:D'))';
Orientacao = (xlsread(filename,'E:E'))';
dif = (xlsread(filename,'F:F'))' ;

%Coordenadas objetivo - medidas pelo módulo GPS
Posicao_Lat = [lat(1), 38.739208, 38.739273, 38.739444,
38.739494, 38.739353, 38.739246, 38.739179, 38.739093];
Posicao_Lon = [lon(1), -9.233685, -9.233514, -9.233608, -
9.233362, -9.233305, -9.233504, -9.233664, -9.233854];

%Coordenadas objetivo - Google Maps

```

```

Posicao_Lat_real = [ 38.7391134, 38.7392021, 38.7392669,
38.7394349, 38.7394913, 38.7393412, 38.7392311, 38.7391708,
38.7391032];
Posicao_Lon_real = [ -9.2339010, -9.2336789, -9.2334993, -
9.2335938, -9.2333484, -9.2333044, -9.2334876, -9.2336593,
-9.2338446];

```

```

%Posição do veículo

```

```

Posicao_carro_Lat_real = [-1 8.5 16.5 36.5 40 25 13 6 -
3];
Posicao_carro_Lon_real = [ 0 18 34.5 27 47 53 35.5 19
3];

```

```

%Conversão da coordenada geografica para plano cartesiano;
%Origem na coordenada inicial

```

```

for j=1:length(lat)
    lat_dif(j)=(3.1415/180)*(lat(1)-lat(j));
    lon_dif(j)=(3.1415/180)*(lon(1)-lon(j));

    aux(j)=((sin(lat_dif(j)/2)).^2)+cos((3.1415/180)*lat(j))*co
s((3.1415/180)*lat(1))*((sin(lon_dif(j)/2)).^2);
    dist_m(j)=2*6371000*atan2(sqrt(aux(j)),sqrt(1-aux(j)));

```

```

    aux_x(j)=((sin(0/2)).^2)+cos((3.1415/180)*lat(1))*cos((3.14
15/180)*lat(1))*((sin(lon_dif(j)/2)).^2);

```

```

    aux_y(j)=((sin(lat_dif(j)/2)).^2)+cos((3.1415/180)*lat(j))*
cos((3.1415/180)*lat(1))*((sin(0/2)).^2);

```

```

    if lat_dif(j) > 0
        dist_m_y(j)=-1*(2*6371000*tan(sqrt(aux_y(j))));

```

```

    elseif lat_dif(j) <= 0
        dist_m_y(j)=(2*6371000*atan(sqrt(aux_y(j))));
    end

```

```

    if lon_dif(j) > 0
        dist_m_x(j)=-1*(2*6371000*tan(sqrt(aux_x(j))));

```

```

    elseif lon_dif(j) <= 0
        dist_m_x(j)=(2*6371000*atan(sqrt(aux_x(j))));
    end

```

```

end

```

```

%Conversão das coordenadas objetivo para o plano

```

```

for k=1:length(Posicao_Lat)
    lat_dif_obj(k)=(3.1415/180)*(Posicao_Lat(1)-
Posicao_Lat(k));

```

```

lon_dif_obj(k)=(3.1415/180)*(Posicao_Lon(1)-
Posicao_Lon(k));

aux_obj(k)=((sin(lat_dif_obj(k)/2)).^2)+cos((3.1415/180)*..
.
Posicao_Lat(k))*cos((3.1415/180)*Posicao_Lat(1))*...
((sin(lon_dif_obj(k)/2)).^2);
dist_m(k)=2*6371000*atan2(sqrt(aux_obj(k)),sqrt(1-
aux_obj(k)));

aux_x_obj(k)=((sin(0/2)).^2)+cos((3.1415/180)*Posicao_Lat(1
))*...

cos((3.1415/180)*Posicao_Lat(1))*((sin(lon_dif_obj(k)/2)).^
2);

aux_y_obj(k)=((sin(lat_dif_obj(k)/2)).^2)+cos((3.1415/180)*
...

Posicao_Lat(k))*cos((3.1415/180)*Posicao_Lat(1))*((sin(0/2)
).^2);

    if lat_dif_obj(k) > 0
        dist_m_y_obj(k)=-
1*(2*6371000*tan(sqrt(aux_y_obj(k))));

        elseif lat_dif_obj(k) <= 0

dist_m_y_obj(k)=(2*6371000*atan(sqrt(aux_y_obj(k))));
end

    if lon_dif_obj(k) > 0
        dist_m_x_obj(k)=-
1*(2*6371000*tan(sqrt(aux_x_obj(k))));

        elseif lon_dif_obj(k) <= 0

dist_m_x_obj(k)=(2*6371000*atan(sqrt(aux_x_obj(k))));
end

end

%Conversão das coordenadas reais para o plano
for k=1:length(Posicao_Lat_real)
    lat_dif_obj_real(k)=(3.1415/180)*(Posicao_Lat(1)-
Posicao_Lat_real(k));

```

```

lon_dif_obj_real(k)=(3.1415/180)*(Posicao_Lon(1)-
Posicao_Lon_real(k));

aux_obj_real(k)=((sin(lat_dif_obj_real(k)/2)).^2)+cos((3.14
15/180)*...
Posicao_Lat_real(k))*cos((3.1415/180)*Posicao_Lat_real(1))*
...
((sin(lon_dif_obj_real(k)/2)).^2);
dist_m_real(k)=2*6371000*atan2(sqrt(aux_obj_real(k)),...
sqrt(1-aux_obj_real(k)));

aux_x_obj_real(k)=((sin(0/2)).^2)+cos((3.1415/180)*...
Posicao_Lat_real(1))*cos((3.1415/180)*Posicao_Lat_real(1))*
...
((sin(lon_dif_obj_real(k)/2)).^2);
aux_y_obj_real(k)=((sin(lat_dif_obj_real(k)/2)).^2)+...
cos((3.1415/180)*Posicao_Lat_real(k))*cos((3.1415/180)*...
Posicao_Lat_real(1))*((sin(0/2)).^2);

if lat_dif_obj_real(k) > 0
    dist_m_y_obj_real(k)=-
1*(2*6371000*tan(sqrt(aux_y_obj_real(k))));

elseif lat_dif_obj_real(k) <= 0

dist_m_y_obj_real(k)=(2*6371000*atan(sqrt(aux_y_obj_real(k)
)));
end

if lon_dif_obj_real(k) > 0
    dist_m_x_obj_real(k)=-
1*(2*6371000*tan(sqrt(aux_x_obj_real(k))));

elseif lon_dif_obj_real(k) <= 0

dist_m_x_obj_real(k)=(2*6371000*atan(sqrt(aux_x_obj_real(k)
)));
end

end

%Circunferencias
raio=2.5; %raio utilizado no Arduino IDE
alpha=0:360/20:360;

for p=1:length(dist_m_x_obj) %Numero de pontos a intersetar

```

```

    for m=1:length(alpha)
        x_circ(p,m)=dist_m_x_obj(p)+raio.*cosd(alpha(m));
        y_circ(p,m)=dist_m_y_obj(p)+raio.*sind(alpha(m));
    end
end

% %incremento ao longo do tempo
i=0:60/(length(dist)-1):60;

%Gráficos

figure('Name','Posição inicial e
final','NumberTitle','off');
plot(Posicao_Lon,Posicao_Lat,'o','MarkerEdgeColor','k',...
'MarkerFaceColor','r');
ylabel('Latitude (°)');
xlabel('Longitude (°)');
grid on;
grid minor;
hold on;
plot(Posicao_Lon_real,Posicao_Lat_real,'o',
'MarkerEdgeColor','k',...
'MarkerFaceColor','g');
ylim([38.73905 38.73955]);
xlim([-9.234 -9.2332]);
legend('Posição - Medida','Posição -
Real','Location','southeast');

figure('Name','Coordenadas GPS','NumberTitle','off');
plot(lon,lat,'-
o','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','b');
hold on;
plot(Posicao_Lon,Posicao_Lat,'-s',
'MarkerEdgeColor','k',...
'MarkerFaceColor','r');
ylabel('Latitude (°)');
xlabel('Longitude (°)');
grid on;
grid minor;
hold on;
plot(Posicao_Lon_real,Posicao_Lat_real,'o',
'MarkerEdgeColor','k',...
'MarkerFaceColor','g');
legend('Trajetória do veículo','Posição inicial e final -
Medida',...
'Posição inicial e final -
Real','Location','southeast');

% -----É ESTE QUE FAZ AQUELE GRAFICO-----
figure('Name','Coordenadas GPS - m','NumberTitle','off');

```

```

plot(dist_m_x,dist_m_y,'-
o','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','b');
hold on;
plot(dist_m_x_obj,dist_m_y_obj,'-s',
'MarkerEdgeColor','k',...
'MarkerFaceColor','r');
ylabel('Latitude (m)');
xlabel('Longitude (m)');
grid on;
grid minor;
hold on;
plot(dist_m_x_obj_real,dist_m_y_obj_real,'o',
'MarkerEdgeColor','k',...
'MarkerFaceColor','g');
hold on;
plot(Posicao_carro_Lon_real,Posicao_carro_Lat_real,'o',...
'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','y');
hold on;
for n=1:length(dist_m_y_obj)
    for r=1:length(alpha)
        plot(x_circ(n,r),y_circ(n,r),'+-r');
        hold on;
    end
    hold on;
end
legend('Trajetória do veículo','Posição - Medida','Posição
- Real',...
'Posição real do veículo','Erro admissível pelo
GPS','Location',...
'southeast');

dist_ideal = [dist(1), dist(length(dist))];
i_ideal = [i(1), i(length(i))];

figure('Name','Distância até alcançar o
objetivo','NumberTitle','off');
plot(i,dist,'-');
grid on; grid minor;
xlabel('Tempo');
ylabel('Distância(m)');
legend('Distância para alcançar o objetivo -
Medida','Location',...
'northeast');

```