

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA BERLEZE

STEPHANY KAMILY ARENT MACHADO

**ESTUDO DE SENSORES APLICADOS A VEÍCULOS AUTÔNOMOS E
DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO**

CURITIBA

2024

BRUNA BERLEZE
STEPHANY KAMILY ARENT MACHADO

**ESTUDO DE SENSORES APLICADOS A VEÍCULOS AUTÔNOMOS E
DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO**

Study of Sensors Applied to Autonomous Vehicles and Prototype Development

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica e de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Rosângela Bach Rodrigues dos Santos.

CURITIBA

2024



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

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

BRUNA BERLEZE
STEPHANY KAMILY ARENT MACHADO

**ESTUDO DE SENSORES APLICADOS A VEÍCULOS AUTÔNOMOS E
DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica e de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 11 de junho de 2024.

Rosângela Bach Rodrigues dos Santos
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Mariana Antonia Aguiar Furucho
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Glauber Gomes de Oliveira Brante
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA
2024

RESUMO

Os veículos autônomos são capazes de realizar decisões de direção independentes da interferência humana. Na última década, sua representatividade tem crescido no cotidiano, tornando, a cada dia, mais palpável a introdução dessa tecnologia na vida das pessoas. Neste trabalho são estudados os tipos de sensores utilizados no desenvolvimento da autonomia destes veículos. Com o objetivo de, utilizando sensores infravermelho e ultrassônico, construir um protótipo educacional de exemplificação do funcionamento de um veículo seguidor de linha e detector de obstáculos.

Palavras-chave: veículos autônomos; sensores; protótipo; automóveis autodirigidos.

ABSTRACT

Autonomous vehicles are capable of making driving decisions independently of human interference. Over the past decade, their presence has increased in daily life, making the introduction of this technology into people's lives more tangible each day. This work studies the types of sensors used in the development of vehicle autonomy. The objective is to construct an educational prototype that exemplifies the functioning of a line-following and obstacle-detecting vehicle using infrared and ultrasonic sensors.

Keywords: autonomous vehicles; sensors; prototype; self-driving cars.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Futurama - Feira Mundial de Nova York 1939-1940.....	11
Figura 2 – Firebird II - 1956.....	12
Figura 3 – Stanford Cart.....	12
Figura 4 – Stanley.....	13
Figura 5 – Parte interna do VaMP.....	14
Figura 6 – Organização de um VA.....	18
Figura 7a – Receptor PwPak7D - NovAtel.....	22
Figura 7b – Antena da Série VEXXIS® GNSS-800 - NovAtel.....	22
Figura 8 – Representação esquemática de um interferômetro de Sagnac.....	24
Figura 9 – Sensor LIDAR do modelo Alpha Prime.....	26
Figura 10 – Percepção tridimensional do sensor LIDAR.....	27
Figura 11 – Imagens tridimensionais do LIDAR e Radar de Alta Resolução respectivamente.....	28
Figura 12 – Aplicações e posições de alguns radares.....	29
Figura 13 – Imagem de câmera termográfica infravermelha.....	30
Figura 14 – Padrão do filtro Bayer.....	31
Figura 15 – Câmera Sekonix Nvidia Drive - SF3326-10X.....	31
Figura 16 – Imagem gerada a partir de um sistema de câmeras.....	32
Figura 17 – Sensor para cálculo de distâncias até obstáculos e de monitoramento do espaço ao estacionar e manobrar.....	33
Figura 18 – Comparação entre os tipos de sensores em relação aos atributos.....	35
Figura 19 – Arduino UNO R3.....	39
Figura 20 – Arduino IDE.....	39
Figura 21 – Sensor de Distância Ultrassônico HC-SR04.....	40
Figura 22 – Módulo Sensor de Obstáculo Infravermelho IR.....	41
Figura 23 – Motor Shield L293D.....	42
Figura 24 – Bateria 9V.....	43
Figura 25 – Chassi.....	43
Figura 26 – Motor CC.....	45
Figura 27 – Diagrama de blocos.....	46
Figura 28 – Diagrama do circuito.....	47
Figura 29 – Programação do Sensor Ultrassônico.....	48
Figura 30 – Programação dos Sensores Infravermelhos.....	49
Figura 31 – Programação dos Motores.....	50
Figura 32 – Lógica de Decisão Sensor Ultrassônico.....	50
Figura 33a – Vista frontal do protótipo.....	51
Figura 33b – Vista lateral do protótipo.....	51
Figura 33c – Vista superior do protótipo.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

A/D	Analógico/Digital
ACC	<i>Adaptive Cruise Control</i> (Controle de Cruzeiro Adaptativo)
ALU	<i>Arithmetic Logic Unit</i> (Unidade Aritmético-Lógica)
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i> (Regulador Automático de Tensão)
BMW	<i>Bayerische Motoren Werke</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> (Dispositivo de Carga Acoplada)
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i> (Semicondutor de Óxido Metálico Complementar)
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade Central de Processamento)
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> (Memória Programável de Leitura Apenas Eletricamente Apagável)
EUA	Estados Unidos da América
GM	<i>General Motors</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
ICSP	<i>In Circuit Serial Programming</i> (Programação Serial em Circuito)
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
INS	<i>Inertial Navigation System</i> (Sistemas de Navegação Inercial)
LEDs	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodos Emissores de Luz)
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i> (Detecção de Luz e Distância)
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i> (Sistemas Microeletromecânicos)
PIB	Produto Interno Bruto
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RCA	<i>Radio Corporation of America</i>
RF	Radiofrequência
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i> (Memória Estática de Acesso Aleatório)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)
UTM	Universal Transversa de Mercator
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i> (Veículo-a-Veículo)
VA	Veículo Autônomo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
B	Bytes
bits	Dígitos Binários
CC	Corrente Contínua
cm	Centímetros
Echo	Pino de Eco
G	Giga
GND	Terra
Hz	Hertz
k	Kilo / quilo
kgf	Quilograma-força
km/h	Quilômetros por hora
m	Metros
mm	Milímetros
ms	Milissegundos
M	Mega
RPM	Rotações por Minuto
Trigger	Pino de Disparo
V	Volts
VCC	Tensão de Alimentação
μs	Microsssegundos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Tema	14
1.1.1 Delimitação do Tema	14
1.2 Problema e Premissas	15
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
1.4 Justificativa	15
1.5 Metodologia de Pesquisa	16
2 Referencial Teórico	17
2.1 Características dos VAs	17
2.1.1 Componentes de Automação	18
2.1.1.1 Sensores	19
2.1.1.2 Atuadores	19
2.1.1.3 Controladores	19
2.1.1.4 Inteligência	19
2.2 Sensores	20
2.2.1 Sensoriamento do Estado Interno do Veículo	21
2.2.1.1 Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System - GPS)	21
2.2.1.2 Sistemas de Navegação Inercial	24
2.2.1.3 Magnetômetro	25
2.2.2 Sensoriamento do Mundo Externo	25
2.2.2.1 LIDAR	25
2.2.2.2 RADAR	27
2.2.2.3 Sensores Infravermelhos	30
2.2.2.4 Sistema de Câmeras	31
2.2.2.4 Sistema de Ultrassônicos	33
2.2.2.3 Fusão de Sensores	34
3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	37
3.1 Componentes utilizados na construção do protótipo	37
3.1.1 Microcontrolador (Arduino Uno)	37
3.1.2 Arduino IDE	39
3.1.3 Sensor Ultrassônico HC-SR04	40
3.1.4 Sensor de Obstáculo Infravermelho	41
3.1.5 Motor Shield L293D	41
3.1.6 Fonte de Alimentação	42
3.1.7 Chassi	43
3.1.8 Motor de Corrente Contínua (CC)	44
4 MONTAGEM DO PROTÓTIPO	46

4.1 Diagrama do Circuito.....	46
4.1.1 Diagrama de Blocos.....	46
4.1.2 Diagrama Fritzing.....	47
4.2 Programação.....	47
4.2.1 HC-SR04.....	48
4.2.2 Infravermelho IR.....	48
4.2.3 Motores.....	49
4.3 Lógica de Decisão (Fluxograma).....	50
4.4 Registro Visual do Protótipo.....	51
5 RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva possui uma grande relevância para a economia mundial, ao fazer a análise do valor do Produto Interno Bruto (PIB) em países desenvolvidos, percebe-se que esse setor representa cerca de 10% da economia. No Brasil, conforme o relatório do setor das montadoras de veículos leves da Lafis, empresa responsável pela análise setorial e informações do mercado financeiro, divulgado em 2019, a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) apontou que, em 2016, a indústria de automóveis correspondia a quase 22% do Produto Interno Bruto (PIB) industrial, o equivalente a aproximadamente 4% do PIB geral (PORTILLO; SIQUEIRA; VARTANIAN; MOURA JÚNIOR, 2019).

Com o grande avanço da eletrônica e dos sistemas embarcados nos últimos anos, a tecnologia aplicada em veículos autônomos (VA) vem se tornando uma realidade cada vez mais próxima, que busca atender um mercado de consumidores que procuram por praticidade, conforto e segurança.

O termo “autônomo” é utilizado para se referir a veículos de transporte que possuem um sistema de controle computacional com um conjunto de sensores e atuadores integrados, que têm como função, a partir de um ponto inicial estabelecido pelo usuário, fazer a navegação de maneira autônoma e segura sobre a superfície terrestre (STILLER; REDMILL; OZGUNER, 2007; GONÇALVES, 2011).

A navegação autônoma apresenta etapas que são automatizadas para extrair dados, obter de forma precisa a posição do veículo e impedir a colisão com os demais elementos do ambiente.

A autonomia de um carro é definida pela forma como ele realiza as decisões de condução sem a intervenção de um ser humano. A automação já está presente em outros elementos de um carro, como no “controle de cruzeiro” e “Antilock Brake Systems” (ABS) (STILLER; REDMILL; OZGUNER, 2007).

O primeiro relato que se tem sobre pesquisas no campo da automação de veículos é na Feira Mundial de Nova Iorque, nos Estados Unidos da América (EUA), em 1939. Projetada por Norman Melancton Bel Geddes e patrocinada pela empresa General Motors Corporation (GM), a exposição Futurama (Figura 1), apresentava uma estimativa sobre o mundo para os próximos vinte anos (1959-1960), junto à apresentação de um protótipo de sistema de rodovias automatizado. A proposta foi

discutida por Geddes e Franklin Delano Roosevelt, o então presidente dos EUA, porém não houve continuidade, pois, a partir de 1940, as pesquisas foram direcionadas para a produção militar na Segunda Grande Guerra Mundial (MITCHELL; BORRONI-BIRD; BURNS, 2010) (GEDDES, 1940; WETMORE, 2003). Com o fim do conflito, diversas tecnologias que haviam sido desenvolvidas para fins militares, como por exemplo, o radar, foram ajustadas para industrializar os recursos de navegação na área automotiva em geral.

Figura 1 – Futurama - Feira Mundial de Nova York 1939-1940



Fonte: MCNY Blog: New York Stories (2013)

Em 1950, a General Motors (GM) e a Radio Corporation of America (RCA) uniram forças para iniciar o desenvolvimento conjunto de tecnologias destinadas a aprimorar e automatizar a condução de veículos. Três anos mais tarde, apresentaram um protótipo em escala de um sistema rodoviário automatizado para experimentação, seguido do lançamento da GM de uma série de três carros-conceito conhecidos como Firebird I, II e III (WETMORE, 2003).

O Firebird II, conforme ilustrado na Figura 2, foi divulgado ao público como um projeto de carro tecnológico, equipado com funcionalidades de condução automática e capacidade de comunicação via rádio com torres de controle (TEMPLE, 2006). No entanto, este veículo não incorporava de fato a tecnologia de condução autônoma. A verdadeira demonstração de condução autônoma ocorreu somente em 1958, por meio de um sistema que utilizava um cabo elétrico instalado abaixo da superfície da estrada. Este cabo emitia corrente alternada, que era detectada por bobinas magnéticas situadas na parte frontal do carro (WETMORE, 2003).

Figura 2 – Firebird II - 1956

Fonte: GM Heritage Center (2019)

Em 1964, a GM investiu na Feira Mundial de Nova Iorque, introduzindo uma atualização que incluía uma torre de controle para supervisionar a direção, freios e velocidade de cada veículo em uma pista automática, permitindo o movimento coordenado de grupos de carros em intervalos regulares (WETMORE, 2003).

Entre 1960 e 1980, o professor Hans Moravec, juntamente com seus alunos na Universidade de Stanford, trabalhou no desenvolvimento do Stanford Cart, um tipo de veículo robótico, apresentado na Figura 3. O principal objetivo deste projeto era explorar a possibilidade de operar um veículo explorador lunar remotamente a partir da Terra, utilizando câmeras de vídeo conectadas ao veículo por um longo cabo.

Figura 3 – Stanford Cart

Fonte: Stanford Magazine (2014)

Este projeto pioneiro estabeleceu as bases tecnológicas que, posteriormente, contribuíram para o desenvolvimento do Stanley, apresentado na Figura 4 - lançado em 2005, o Stanley era um Volkswagen Touareg R5 equipado com uma plataforma contendo seis processadores Intel, além de um conjunto avançado de sensores e atuadores destinados à navegação autônoma. Este projeto foi resultado da colaboração entre as equipes de pesquisa da Universidade de Stanford, da Intel Research, da Volkswagen e de outras organizações (THRUN *et al.*, 2006).

Figura 4 – Stanley



Fonte: Stanford CS221 (2013)

Em 1977, no Japão, o Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Tsukuba desenvolveu o que é reconhecido pela comunidade científica como o primeiro veículo robótico inteligente. Este veículo era equipado com um sistema de visão computacional, que utilizava câmeras de televisão e uma unidade central de processamento para funcionar. Essa tecnologia inovadora permitia ao veículo identificar obstáculos e seguir linhas brancas marcadas no chão (TSUGAWA, 1994; BENENSON, 2009).

Entre 1987 e 1995, equipes de pesquisa na Europa, incluindo o grupo liderado pelo engenheiro aeroespacial Ernst Dickmanns, reconhecido como "o pioneiro do carro autônomo", bem como equipes da *Bayerische Motoren Werke* (BMW), da Daimler-Benz e da Jaguar, colaboraram no desenvolvimento do projeto EUREKA Prometheus (Programa para um Tráfego Europeu de Máxima Eficiência e Segurança Sem Precedentes). O objetivo principal deste projeto era melhorar a eficiência do tráfego urbano em toda a Europa. Em 1994, o grupo apresentou um

Mercedes-Benz Classe-S adaptado, denominado VaMP (Figura 5), que conseguiu percorrer autonomamente mais de 1000 km e alcançou velocidades de até 130 km/h. No ano seguinte, um veículo chamado VaMoRs-P, uma van Mercedes-Benz equipada com câmeras e uma variedade de outros sensores foi capaz de navegar a velocidades de até 160 km/h em uma Autobahn (rodovia alemã). Este veículo realizou várias manobras avançadas, incluindo a ultrapassagem de outros veículos na rodovia (DICKMANNNS *et al.*, 1994; BROGGI *et al.*, 1999).

Figura 5 – Parte interna do VaMP



Fonte:Mercedes-Benz Media (2016)

1.1 Tema

A palavra “autonomia”, de etimologia grega, significa o direito de conduzir-se conforme suas próprias leis (Oxford Languages). Assim, entende-se por Veículo Autônomo, aquele que é capaz de executar decisões de direção sem qualquer interferência humana (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011).

1.1.1 Delimitação do Tema

Este trabalho se aprofundará no estudo do funcionamento dos sensores presentes em VAs, com foco específico nos sensores ultrassônicos, sensores infravermelhos, LIDAR, câmeras e RADAR, culminando na construção de um protótipo em miniatura de um carro robótico. A escolha desses sensores se baseia na sua relevância e aplicação prática em sistemas de navegação autônoma.

1.2 Problema e Premissas

Muitos questionamentos são relevantes ao se deparar, inicialmente, com a atuação dos VAs. Este trabalho surge com o intuito de respondê-los. Por meio da explicitação de quais são, e, como são realizadas as leituras e processamentos de dados dos sensores de um VA, serão criados subsídios para a construção de um protótipo miniatura.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Estudar o funcionamento dos diferentes tipos de sensores utilizados em um VA a fim de desenvolver um protótipo educativo composto por sensor infravermelho e ultrassônico.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar o funcionamento dos sensores utilizados nos VAs;
- Verificar quais sensores poderão ser empregados no protótipo;
- Estudar os VAs;
- Avaliar os procedimentos de construção do protótipo;
- Levantar os materiais necessários para a elaboração do projeto;
- Desenvolver em etapas os módulos de construção do protótipo;
- Testar o funcionamento dos módulos e finalizar a construção do projeto, realizando os testes necessários.

1.4 Justificativa

A introdução de VAs nos meios de produção e na vida cotidiana tem crescido rapidamente nas últimas décadas, e sua expansão tende a ser bastante relevante nos próximos anos. No entanto, o entendimento desta tecnologia encontra-se bastante concentrada em países desenvolvidos. Dessa maneira, no Brasil, a concepção de autonomia de veículos, principalmente para uso cotidiano, ainda é pouco difundida. Esse trabalho surge com o objetivo de expor o desenvolvimento de um protótipo educacional na área, enfatizando o funcionamento dos sensores como uma das bases para automatização, com o

intuito de promover maior visibilidade à área e instigar seu crescimento mais acelerado no país.

1.5 Metodologia de Pesquisa

A pesquisa ocorreu em duas grandes etapas, que foram subdivididas em outros pequenos grupos: tais como a descrição conceitual e a de construção do protótipo. A etapa conceitual iniciou com a revisão bibliográfica necessária, abrangendo a história e os conteúdos de aplicação na engenharia.

Seguida pela etapa prática do protótipo que partiu de um estudo aprofundado dos materiais utilizados, sequente coleta das informações necessárias para a montagem do veículo e planejamento e desenho do protótipo.

Posteriormente, foram escolhidos e adquiridos os materiais necessários para o desenvolvimento. E iniciado o estudo dos mecanismos eletroeletrônicos envolvidos no processo, partindo para a construção do protótipo e, conseqüente testagem de funcionamento.

Na seqüência foi feita a descrição metodológica de todo o processo de criação do protótipo e a exposição dos resultados alcançados. Junto a isso, introduzido um estudo aprofundado do funcionamento dos sensores e as suas aplicações no sistema de navegação autônoma.

2 Referencial Teórico

A indústria automotiva de maneira geral passou por inúmeras evoluções ao longo dos anos e, dentro destas, está a automatização. No entendimento dos fatores que tornam possível classificar um veículo como automatizado, é estabelecida uma escala que, com base no grau de tecnologia aplicada determina diferentes níveis de automação (NHTSA, 2012).

Sendo esses níveis:

- Nível 0: Não existe presença de automação;
- Nível 1: Assistência ao Condutor. Apresenta tecnologia de assistência à condução, como alertas e intervenções de segurança, com todas as operações efetuadas pelo condutor;
- Nível 2: Automação Parcial. Apresenta algumas tecnologias de condução semi-autônoma, como movimento de pedais e volante, com a necessidade de atenção permanente do condutor;
- Nível 3: Automação condicional. Apresenta tecnologia de condução semi-autônoma, como movimento de pedais e volante aplicados em situações de tráfego com a necessidade de atenção do condutor para responder aos comandos do sistema;
- Nível 4: Alto grau de automação. Apresenta tecnologia de condução semi-autônoma, como movimento de pedais e volante em qualquer situação, sendo necessária a atenção do condutor para assumir o controle integral do veículo caso necessário;
- Nível 5: Automação completa. Apresenta tecnologia capaz de conduzir integralmente o veículo, excluindo a necessidade de volante e pedais, ou mesmo de passageiros.

Assim, é definido como VA, um veículo com capacidade de localizar-se e trafegar seguramente em vias terrestres por um caminho previamente apontado, sem qualquer tipo de intervenção humana (ALVES, 2018).

2.1 Características dos VAs

Os VAs são assim denominados com base no conjunto de sistemas automatizados que os compõem e caracterizam.

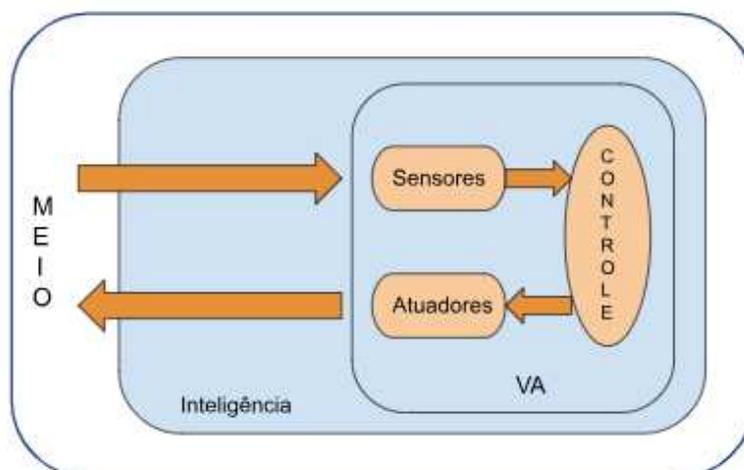
Como discutido no início do Capítulo 2, o uso de alguns tipos de sistemas, ou a totalidade da junção destes, é o fator determinante na classificação do nível de automação do veículo. Assim, foram abordados nas subseções - 2.1.1 Componentes de Automação; 2.1.1.1 Sensores; 2.1.1.2 Atuadores; 2.1.1.3 Controladores e 2.1.1.4 Inteligência - os principais componentes e sistemas de autonomia de um veículo.

2.1.1 Componentes de Automação

A proposta de introdução dos VAs no uso de automóvel regular surgiu como uma possibilidade de redução de danos e acidentes no trânsito, haja vista que esses, em sua maioria, são causados por fatores humanos. Fundamentalmente, ao atribuir um comportamento idealmente humano a um automóvel, como no caso dos VAs, direcionaram-se os estudos à capacidade sensitiva, perceptiva e de controle que poderia ser administrada nesses veículos. Com base nisso, os VAs foram estruturados a partir da interação do conjunto de quatro componentes da automação: atuadores, controladores, inteligência e os sensores - principais objetos de estudo deste trabalho (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011).

Dessa forma, a combinação do conjunto automatizado, mostrado na Figura 6, garante a obtenção de dados e interação com o meio necessárias para permitir tomadas de decisões de forma autônoma pelo automóvel (PISSARDINI, 2014).

Figura 6 – Organização de um VA



Fonte: Adaptado de PISSARDINI (2014)

2.1.1.1 Sensores

Os sensores destacam-se como uns dos principais componentes de um VA. Sua importância se deve a fundamentalidade da sua aplicação na obtenção de informações essenciais para qualquer processo de automação. Eles são responsáveis por determinar as medições de estado do automóvel, como velocidade, direção e posição em relação ao ambiente que o cerca, composto por carros, pedestres, obstáculos diversos e a estrada (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011). Seu funcionamento, tal como sua diversidade de categorias e aplicações, foi abordado no item 2.2.

2.1.1.2 Atuadores

Outro conjunto de componentes essenciais é o de atuadores. Os atuadores são responsáveis pela ligação entre o veículo e o ambiente, permitindo a movimentação. Suas principais aplicações estão no controle de direção, velocidade, frenagem e, em alguns casos, mudança de marcha. Uma grande parte dos veículos possuem sistemas de atuação que possibilitam a automação, como os controles eletrônicos de freios, acelerador e direção (RUSSEL; NORVIG, 2009).

2.1.1.3 Controladores

Em computação, um controlador é um dispositivo ou programa que regula o fluxo de dados entre dois sistemas, podendo ser um hardware como placas e microchips ou um software, facilitando a operação de dispositivos periféricos e a comunicação entre os sistemas (KIRVAN; WIGMORE, 2023). Pela extensa capacidade de aprendizado e a otimização das habilidades do veículo, algumas classes de controladores podem ser denominadas sistemas inteligentes (PIZYBLSKI, 2020).

2.1.1.4 Inteligência

A inteligência, atribuída anteriormente como um dos principais componentes da automação, está evidenciada pelos processadores que possibilitam a reprodução comportamental humana (NILSSON, 1998). Nos veículos autônomos (VAs), um sistema sofisticado de direção é criado combinando leituras de sensores, algoritmos de controle, eficiência dos dispositivos de comando e autonomia comportamental.

Esse sistema tem como objetivo evitar falhas humanas que podem resultar em acidentes.

2.2 Sensores

Reconhecer o ambiente ao redor de um VA é o primeiro passo na direção autônoma e é um fator fundamental para determinar seu desempenho. Isso ocorre porque o objetivo do reconhecimento é detectar obstáculos em vários ambientes e fornecer uma rota de direção (CHOI; KIM, 2022).

Existem características que são importantes na descrição e compreensão do comportamento de sensores e das tecnologias dos sensores, sendo de extrema importância o conhecimento da forma com que esses fatores se relacionam com a seleção, interpretação e fusão de sensores individualmente e quando usados em conjunto (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011).

Como exemplo de fatores:

- Precisão: O erro entre o valor real e sua medição, que pode incluir níveis de ruído e parâmetros de rejeição de interferência externa;
- Resolução: A diferença mínima entre duas medições (sendo na maioria das vezes menor que a precisão real do sensor);
- Sensibilidade: O menor valor possível detectado ou medido;
- Faixa dinâmica: Os valores mínimo e máximo que podem ser detectados (com precisão);
- Perspectiva: Alcance do sensor ou seu campo de visão;
- Ativo versus passivo: Sensores ativos emitem energia, como luz, som ou micro-ondas, para o ambiente e detectam a resposta dessa energia ao interagir com objetos. Por exemplo, radar, sonar e sensores infravermelhos ativos utilizam esse princípio para detecção de objetos, variações de temperatura e movimento. Por outro lado, sensores passivos não emitem energia, mas respondem a mudanças no ambiente, como variações de luz, temperatura, pressão ou emissões de calor. Eles incluem câmeras de vídeo, sensores de temperatura ambiente e detectores de movimento por infravermelho passivo. Caso o sensor emita energia ou radiação que ilumina o ambiente ou dependa das condições ambientais;

- Escala de tempo: O fator escala de tempo em um sensor refere-se à rapidez com que o sensor pode capturar e responder a mudanças ou eventos. A taxa de atualização da saída do sensor e a largura de banda de frequência da saída de medição ao longo do tempo devem ser corretamente escolhidas, garantindo que o sensor possa detectar e reagir às mudanças em tempo real, conforme a aplicação;
- Tecnologia de saída ou interface: se refere à maneira pela qual os dados coletados pelo sensor são transmitidos para o sistema, tensão ou corrente analógica, saídas digitais e fluxos de dados seriais ou de rede (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011). A escolha entre essas tecnologias depende das necessidades específicas do sistema, incluindo precisão, velocidade e compatibilidade com outros dispositivos.

2.2.1 Sensoriamento do Estado Interno do Veículo

O sensoriamento do estado interno dos VAs envolve a utilização de sensores disponíveis para realizar uma detecção precisa e contínua do ambiente do veículo. Isso engloba o sensor de velocidade, e também uma variedade de variáveis medidas em diferentes sistemas do veículo, como o motor, o trem de força e os freios. Essas variáveis incluem, por exemplo, a temperatura do motor, a pressão do óleo, a rotação do motor e a eficiência do sistema de freios, todas essenciais para o monitoramento e controle eficaz do veículo. Além disso, é fundamental contar com sensores dedicados para capturar informações específicas, como o ângulo do volante e a posição da alavanca de câmbio, que são cruciais para a compreensão da intenção do condutor e como guia para a tomada de decisões autônomas do veículo. Em conjunto, esses sensores fornecem ao VA uma compreensão abrangente do seu estado interno, permitindo uma operação segura e eficiente em diversas condições de condução.

2.2.1.1 Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System - GPS)

O funcionamento do Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System - GPS) se dá por meio de um receptor (exemplo na Figura 7a) e uma antena (Figura 7b) que se comunicam com diversos satélites. Essa comunicação possibilita

a triangulação da posição exata do veículo, fornecendo sua localização precisa na Terra (KAPLAN; HEGARTY, 2006).

Figura 7a – Receptor PwPak7D - NovAtel



Fonte: NovAtel (2022)

Figura 7b – Antena da Série VEXXIS® GNSS-800 - NovAtel



Fonte: NovAtel (2019)

Quando combinado com um sistema de comunicação sem fio veículo a veículo (Vehicle-to-Vehicle - V2V), pode proporcionar informações de posição relativa e velocidade relativa.

As informações disponíveis de um receptor GPS são:

- Posição absoluta em um sistema de coordenadas geodésicas, por exemplo, latitude-longitude-altitude, X-Y-Z Terra centrada na Terra fixa ou coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM);
- Informações sobre a velocidade e o curso sobre o solo;
- Tempo preciso e pulso sincronizado por segundo;

- Informações brutas que podem ser usadas em aplicações precisas de pós-processamento (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011).

Quando integrados a mapas detalhados, os dados coletados podem ser aplicados em VAs para elaborar rotas ideais, fornecer direcionamento, identificar características topográficas, mapear faixas de trânsito e detectar obstáculos. Embora a maioria dos sistemas veiculares empregue o GPS para fins de navegação, o uso exclusivo dessa tecnologia não alcança a precisão necessária para que um veículo opere de forma totalmente autônoma.

A tecnologia GPS funciona com base na propagação de sinais de Radiofrequência (RF). Quando um satélite envia um sinal RF, ele é recebido pela antena do GPS, que calcula a posição aproximada do receptor dentro de uma esfera imaginária centrada no satélite. A intersecção das esferas de propagação de dois satélites permite ao receptor estimar sua posição no ponto onde essas esferas se encontram. Contudo, para determinar a localização precisa, é essencial a recepção de sinais de pelo menos três satélites, o que resulta em duas possíveis localizações. Uma dessas posições é eliminada, pois fica fora da superfície terrestre, permitindo assim identificar a localização exata do receptor na Terra (VARGHESE; BOONE, 2015).

Os sistemas de GPS enfrentam significativas incertezas em relação ao posicionamento devido ao aumento dos erros quando obstáculos físicos ou características do terreno obstruem a visão do céu. Essa obstrução impede que os receptores de GPS captem sinais de uma quantidade adequada de satélites (BAGLOEE et al., 2016).

Em áreas onde é possível ter uma visão desobstruída do céu e a menos que a disposição dos satélites visíveis seja excepcionalmente desfavorável, um receptor GPS padrão de baixo custo ou embutido, pode alcançar uma precisão de localização entre 5 a 15 m. Isso permite fornecer orientações de navegação e trajetos precisos a um condutor (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011).

Esses sistemas podem utilizar os sensores internos do veículo para complementar os dados em situações de fraca recepção de sinal GPS ou para confirmação. No entanto, a dependência prolongada nos dados dos sensores do veículo pode resultar em um aumento exponencial dos erros de posicionamento (VARGHESE; BOONE, 2015).

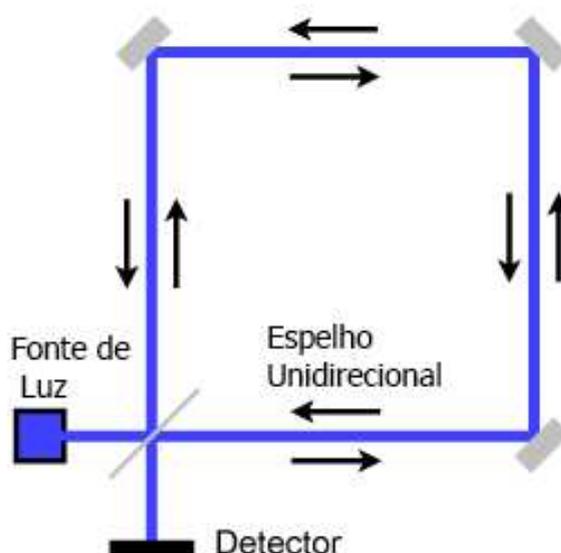
2.2.1.2 Sistemas de Navegação Inercial

Um Sistema de Navegação Inercial (Inertial Navigation System - INS) é um sistema autônomo que ajuda a determinar a posição, orientação e velocidade de um veículo em movimento utilizando sensores como acelerômetros e giroscópios. Esses sensores permitem que o INS calcule continuamente informações importantes que estimam a trajetória do veículo, sem depender de referências externas, como GPS ou referências de solo.

Durante o movimento do veículo, pode ocorrer tanto movimento retilíneo quanto rotativo em três direções: lateral, longitudinal e vertical. As medições inerciais feitas pelo INS incluem tanto a aceleração linear quanto as taxas de aceleração angular. A aceleração ao longo dessas direções pode ser medida usando acelerômetros, que detectam a força gerada pelas mudanças de velocidade. Da mesma forma, as taxas de rotação ao redor dos eixos do veículo são determinadas por giroscópios, que são baseados em tecnologias de Sistemas Microeletromecânicos (Micro-Electro-Mechanical Systems - MEMS).

Para alcançar medições precisas da rotação angular são utilizados giroscópios avançados, como os de laser de anel ou de fibra óptica, que utilizam a interferência da rotação do dispositivo no comprimento de dois feixes de luz para detectar mudanças no movimento do veículo, possibilitando uma alta precisão na determinação da orientação do veículo, semelhantes aos observados em um interferômetro de Sagnac (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011).

Figura 8 – Representação esquemática de um interferômetro de Sagnac



Fonte: Adaptado de Cleonis (2017)

2.2.1.3 Magnetômetro

O magnetômetro funciona como uma bússola digital, identificando o campo magnético terrestre para posteriormente calcular seu ângulo direcional. É um sensor de baixo custo e eficiente, pois não há erro de integração matemática. Capaz de determinar direções com exatidão absoluta, sua performance pode ser influenciada por campos magnéticos externos além do terrestre (SHAHID *et al.*, 2016).

As principais fontes de erro incluem distorção por materiais ferromagnéticos, falhas de sensibilidade e distorção por ferro mole. Adicionalmente, variações de temperatura podem comprometer a acurácia do magnetômetro, afetando a correta determinação de direções (SHAHID *et al.*, 2016).

2.2.2 Sensoriamento do Mundo Externo

Vários sensores foram desenvolvidos para detectar o ambiente externo de um VA. Alguns foram desenvolvidos inicialmente para garantir mais segurança em automóveis, como as câmeras e os detectores de faixa e, atualmente, estão sendo implantados em veículos de última geração em diversas aplicações de automação. Nas subseções da seção 2.2.2, foram explorados esses equipamentos.

A americana Tesla, utiliza em seus modelos Modelo 3 e Modelo Y câmeras como base de seu sistema. A empresa anunciou que todos os seus modelos futuros adotarão o uso de câmeras, em um sistema denominado "Tesla Vision". As câmeras são posicionadas ao redor do veículo, incluindo na frente, nas laterais e na parte traseira, para proporcionar uma visão completa do ambiente. Isso habilita o automóvel a identificar e responder a ameaças de diversos ângulos, minimizando o risco de acidentes. A habilidade dos carros autônomos da marca de operar sem o uso de LIDAR (explicado no item 2.2.2.1) é atribuída à tecnologia de visão computacional e algoritmos de aprendizado de máquina incorporados no sistema Autopilot. Esse sistema é composto por câmeras, radar e sensores ultrassônicos que atuam em conjunto para perceber e interpretar o ambiente ao redor do carro (THE DATA HUNT, 2023).

2.2.2.1 LIDAR

Um sensor de Detecção de Luz e Distância (*Light Detection And Ranging* - LIDAR), ilustrado na Figura 9, emprega uma tecnologia de sensoriamento à

distância. Funciona medindo a distância até um objeto ao emitir um feixe de laser sobre ele e, posteriormente, analisar a luz refletida e o tempo que ela leva para retornar ao sensor (BAGLOEE *et al.*, 2016).

Os LIDARs são fundamentais para oferecer informações detalhadas sobre a profundidade, permitindo a percepção tridimensional de objetos. Esta funcionalidade é benéfica em contextos de direção autônoma, pois a determinação precisa da distância até objetos detectados é vital para assegurar operações seguras (NABATI; QI, 2020).

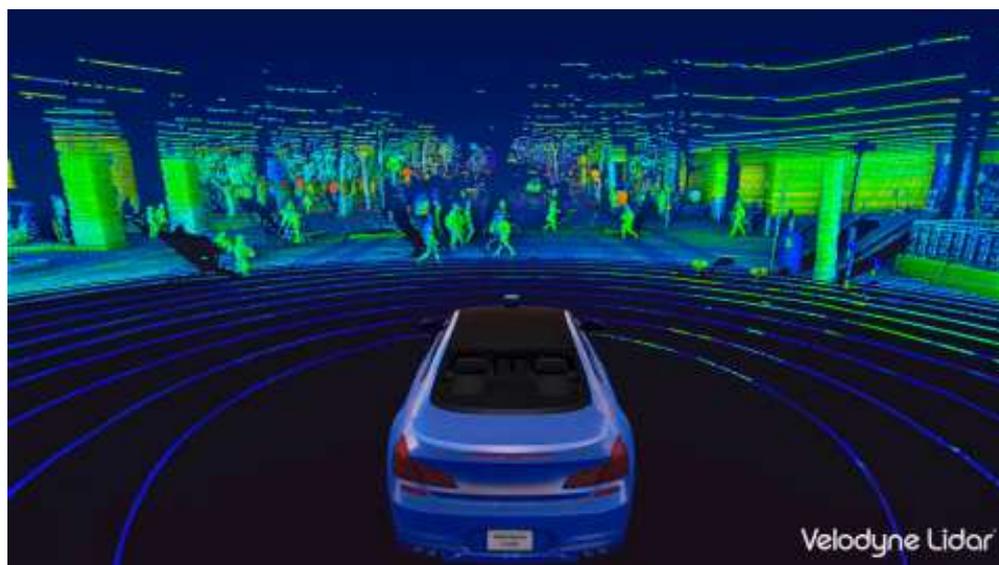
Figura 9 – Sensor LIDAR do modelo Alpha Prime



Fonte: Velodyne LIDAR (2019)

Para obter uma visualização tridimensional do ambiente, conforme a Figura 10, um conjunto de LIDARs é acoplado e sincronizado com espelhos de rotação rápida (BAGLOEE *et al.*, 2016).

Figura 10 – Percepção tridimensional do sensor LIDAR



Fonte: Business Wire (2020)

Ao contrário dos sistemas baseados em câmera, o LIDAR é mais eficaz em distâncias curtas e com determinados tipos de materiais (BAGLOEE *et al.*, 2016).

O funcionamento do LIDAR envolve a emissão de um feixe de luz (tipicamente de um diodo laser infravermelho) que é refletido por um espelho giratório. Quando este feixe de luz encontra objetos não absorventes, é refletido de volta ao sensor do LIDAR, que então calcula o tempo de voo da luz para determinar a distância até o objeto em diversos ângulos de azimute. Para superar limitações associadas a materiais semi porosos e variações nas condições climáticas, os sistemas LIDAR mais avançados adotam múltiplos feixes de luz, permitindo realizar várias medições de distância simultaneamente (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011).

2.2.2.2 RADAR

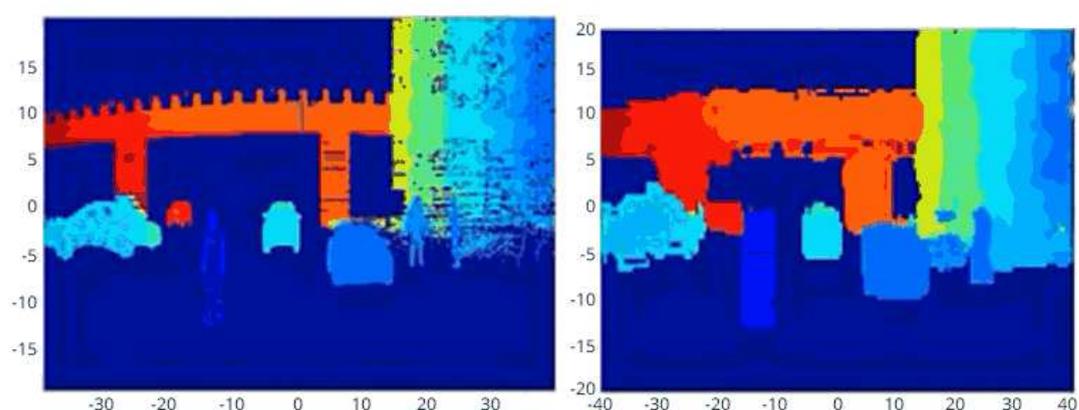
O Radar opera com base na medição do tempo de voo, determinando a distância de objetos no ambiente ao transmitir e receber ondas de rádio. Este sistema enfrenta limitações em termos de refletividade em comparação ao LIDAR, pois é mais eficaz na detecção de materiais metálicos. Essa característica resulta em uma desvantagem significativa: os pedestres, que podem não ser detectados pelo radar, tornando-os "invisíveis" para este tipo de sensor (BAGLOEE *et al.*, 2016).

Os sistemas de radar em veículos oferecem funcionalidades que extraem informações valiosas a cada detecção. Isso inclui a velocidade relativa do objeto

identificado, a probabilidade de a detecção ser precisa e a categorização dos objetos como estacionários ou em movimento (NABATI; QI, 2020).

Os radares automotivos são resistentes a condições adversas, como forte luminosidade, chuva, neblina, neve e poeira. Esta capacidade, aliada ao seu custo inferior em relação aos sistemas LIDAR, os torna uma escolha preferencial para veículos fabricados em larga escala (VARGHESE; BOONE, 2015). A Figura 11 apresenta uma comparação entre as imagens tridimensionais obtidas com os sensores LIDAR e um radar de alta resolução.

Figura 11 – Imagens tridimensionais do LIDAR e Radar de Alta Resolução respectivamente



Fonte: Semiconductor Engineering (2017)

Mesmo que os aspectos particulares de um sistema de radar possam mudar, é esperado que incluam componentes como o transmissor, a antena, o receptor e o processador de sinais (RICHARDS; HOLM; SCHEER, 2010).

Há muitos anos, os radares são empregados em veículos não autônomos como um sensor crucial para medir a distância, funcionando através da detecção da reflexão das ondas de rádio em objetos e aproveitando o efeito Doppler para calcular a velocidade desses objetos (NABATI; QI, 2020). A Figura 12 apresenta algumas aplicações de radares, bem como suas posições em relação ao veículo.

Figura 12 – Aplicações e posições de alguns radares



Fonte: Adaptado de KÖHLER et al. (2010)

Os sistemas de radar têm a capacidade de avançar ao gerenciar de forma automática o sistema de aceleração e frenagem dos veículos, com o objetivo de prevenir colisões. O transceptor utilizado nesse tipo de sistema de radar veicular funciona na faixa de frequência de 76 a 77 GHz (HOANG et al., 2013). A onda refletida é recebida por uma antena patch, onde é então amplificada e filtrada. Após, o sinal analógico é transformado em sinal digital por meio de um conversor analógico/digital, sendo posteriormente processado pela unidade de computação (VARGHESE; BOONE, 2015).

Com um número maior de sensores, esses sistemas conseguem identificar objetos na frente do veículo, com o propósito de ajustar a velocidade para manter um espaço seguro entre os carros (VIJAY et al., 2010). Por outro lado, na ausência de veículos detectados à frente, o sistema de Controle de Cruzeiro Adaptativo (Adaptive Cruise Control - ACC) opera de forma semelhante ao controle de cruzeiro tradicional (SHAOUT; COLELLA; AWAD, 2011). No contexto do ACC, quando necessário, a velocidade de referência é modificada levando em conta a presença de outro veículo à frente (PEREIRA, 2017).

O subsistema responsável pela geração de ondas eletromagnéticas é o transmissor. A antena atua interpretando essas ondas como sinais provenientes do transmissor, inserindo-os em um meio de propagação, tipicamente a atmosfera. Uma conexão entre o transmissor e a antena é estabelecida por meio de um equipamento específico para transmissão e recepção. O sinal enviado é então propagado através do ambiente até alcançar o destino. Ao encontrar um obstáculo, as ondas

eletromagnéticas geram correntes que, por sua vez, fazem com que o objeto emita suas próprias ondas eletromagnéticas de volta ao ambiente, afetando também outros elementos presentes no solo e na atmosfera, que acabam por irradiar o sinal. Esses sinais indesejados são referidos como clutter. Outro tipo de sinal não desejado é conhecido como jamming, que são sinais externos ao sistema de radar, mas que operam na mesma frequência. A antena receptora do radar capta as ondas refletidas por um objeto (MELVIN; SCHEER, 2012).

2.2.2.3 Sensores Infravermelhos

Geralmente empregados como auxiliares para manter o veículo na faixa de rodagem, os sensores infravermelhos têm um alcance limitado a aproximadamente 40 m (BAGLOEE et al., 2016).

As câmeras termográficas infravermelhas, ilustradas na Figura 13, são capazes de capturar imagens de objetos em condições onde a visibilidade é reduzida e o contraste é elevado. Isso inclui cenários como noite, áreas sombreadas, crepúsculo vespertino e matutino, assim como situações onde há intensa luz solar direta ou o brilho dos faróis de veículos que podem causar ofuscamento. Adicionalmente, essas câmeras são eficazes em ambientes com baixa luminosidade ou visibilidade comprometida, como em casos de neblina ou presença de fumaça (CHOI; KIM, 2022).

Figura 13 – Imagem de câmera termográfica infravermelha

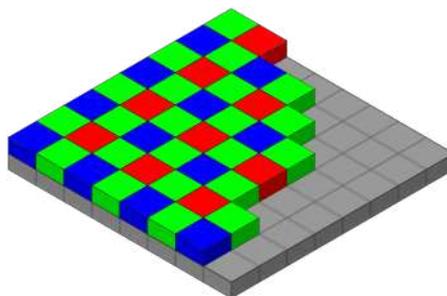


Fonte: SPIE Conferences and Exhibitions (2018)

Em sistemas infravermelhos passivos, a radiação térmica emitida pelos objetos é captada por câmeras termográficas através de um sensor que funciona de maneira similar a uma câmera convencional de luz visível. Esses sensores são

fabricados utilizando-se materiais piroelétricos ou ferroelétrico, os quais geram uma carga elétrica. Esta carga é então mapeada em pixels de uma imagem, criando um gradiente de temperatura que pode ser visualizado por meio de um Filtro Bayer. A Figura 14 mostra como o arranjo Bayer de filtros de cor é aplicado na matriz de pixels de um sensor de imagem.

Figura 14 – Padrão do filtro Bayer



Fonte: BOUSEFSAF (2014)

Em um sistema infravermelho ativo, iluminação adicional no espectro infravermelho é introduzida ao ambiente para melhorar a resolução de objetos inanimados (VARGHESE; BOONE, 2015).

2.2.2.4 Sistema de Câmeras

Presentes na maioria dos VAs, os sistemas de câmeras são equipamentos acessíveis que avaliam e monitoram vastas áreas. As informações captadas pelas câmeras requerem análise, um procedimento conhecido como processamento de imagens. As câmeras requerem calibração frequente, variando de acordo com as condições climáticas e do estado da estrada (BAGLOEE *et al.*, 2016). A Figura 15 exibe um modelo de câmera de uso automotivo.

Figura 15 – Câmera Sekonix Nvidia Drive - SF3326-10X



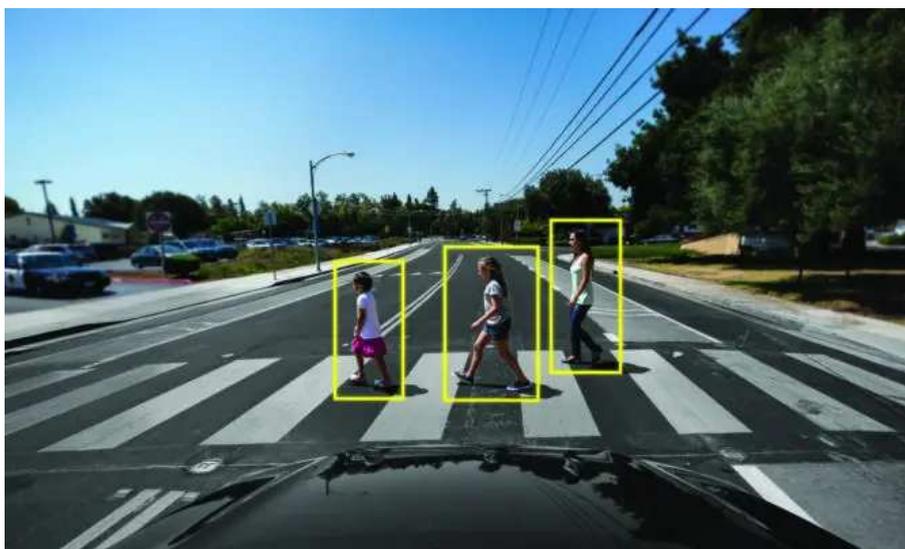
Fonte: SEKOLAB (2017)

Os sistemas de câmeras captam a luz refletida por objetos de maneira análoga ao olho humano. O espectro de luz captado inclui as cores vermelho, verde e azul, que é direcionado a um sensor, seja um Semicondutor de Óxido Metálico Complementar (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor - CMOS) ou um Dispositivo de Carga Acoplada (Charge-Coupled Device - CCD). A luz captada é então transformada em carga elétrica, processo pelo qual uma câmera digital interpreta imagens. Os sensores CCD produzem imagens de alta qualidade, mas consomem mais energia comparados aos sensores CMOS. Devido à sua maturidade e disponibilidade, os sensores CCD são preferencialmente utilizados em aplicações veiculares. Para alcançar maior resolução, empregam-se três sensores distintos (VARGHESE; BOONE, 2015).

Uma alternativa envolve a rotação sequencial de filtros de cores sobre um único sensor, combinando as cores (NICE; WILSON; GUREVICH, 2006). Contudo, esse método não é adequado para capturar imagens em movimento, limitando sua aplicabilidade em veículos (VARGHESE; BOONE, 2015).

A visão estéreo, obtida através do uso de duas ou mais câmeras, permite medir com precisão a profundidade e a altura dos objetos. Geralmente, duas câmeras posicionadas a uma distância horizontal fixa proporcionam diferentes perspectivas do mesmo objeto, possibilitando a determinação da profundidade (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011). A Figura 16 exemplifica uma imagem captada por um sistema de câmeras estéreo.

Figura 16 – Imagem gerada a partir de um sistema de câmeras



Fonte: BLOGS NVIDIA (2019)

A facilidade de acesso e a ampla disponibilidade dos sistemas de câmeras os estabelecem como um tipo essencial de sensor para tarefas de percepção. No entanto, esses sistemas apresentam uma limitação significativa: a variação nas condições de iluminação pode comprometer o desempenho dos algoritmos na detecção de objetos (AZAM; MUNIR; SHERI; KIM; JEON, 2020).

2.2.2.4 Sistema de Ultrassônicos

O sistema ultrassônico é baseado no princípio de transmissão e recepção de ondas acústicas, operando com energias na forma de ondas de frequência superior àquela audível pelos humanos. Seu funcionamento é análogo ao do radar, porém utiliza ondas acústicas de alta frequência para enviar e receber sinais. Estes sensores são capazes de fornecer informações precisas para distâncias curtas, variando entre 1 a 10 m (BAGLOEE et al., 2016).

Devido ao seu baixo custo, os dispositivos ultrassônicos são componentes essenciais em sistemas de alerta de ré e assistência de estacionamento (BAGLOEE et al., 2016). A Figura 17 ilustra um sensor ultrassônico utilizado para calcular a distância até obstáculos e monitorar o espaço disponível ao estacionar e realizar manobras.

Figura 17 – Sensor para cálculo de distâncias até obstáculos e de monitoramento do espaço ao estacionar e manobrar



Fonte: Bosch Mobility Solutions (2022)

Quando o sistema ultrassônico é ativado, uma onda sonora é emitida e refletida por objetos dentro do seu alcance. A frequência dos pulsos de retorno é então analisada para determinar a distância até esses objetos. Isso é possível através do uso de um material piezoelétrico, que, ao ser submetido a uma tensão elétrica alternada, vibra e gera uma onda sonora. À medida que esta onda se

propaga pelo ar, a variação de pressão criada ressoa, transferindo energia de partícula para partícula até que a onda seja dissipada ou refletida de volta. O processo inverso ocorre quando a onda sonora refletida atinge o sistema: a vibração do diafragma, causada pela onda sonora, induz o material piezoelétrico a gerar uma carga elétrica, que é então convertida em um sinal analógico digital (TERZIC et al., 2014).

A reflexão ocorre quando uma onda encontra um meio de densidade superior à do meio em que se propagava, fazendo com que a onda seja refletida de volta à fonte. No entanto, a natureza do meio encontrado pela onda sonora pode resultar em diferentes graus de mudança de fase e modulação de amplitude da onda refletida (VARGHESE; BOONE, 2015).

As capacidades de detecção dos sensores ultrassônicos podem variar de acordo com a temperatura, a umidade e outras condições ambientais. Para suavizar esses efeitos, muitos sensores incorporam algoritmos que ajustam as leituras com base na temperatura ambiente, visando manter a precisão e a confiabilidade das medições (HENRY; HESHAM; MANZOOR, 2023).

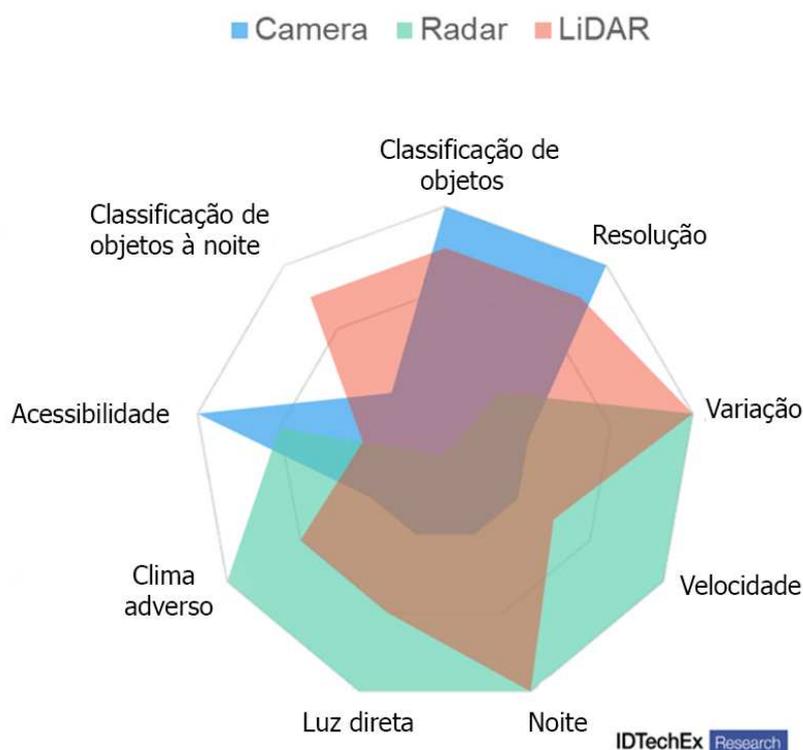
2.2.2.3 Fusão de Sensores

O reconhecimento de objetos e a estimativa de profundidade são componentes cruciais no sistema de percepção de VAs. Os modelos mais avançados desses veículos são comumente equipados com uma variedade de sensores de percepção, incluindo câmeras, radares e LIDARs. A utilização de múltiplos tipos de sensores permite a exploração de suas propriedades complementares para uma análise mais abrangente e precisa (NABATI; QI, 2020).

Falhas decorrentes do desgaste dos sensores ou modos específicos de falha podem ser identificados por meio da análise de dados provenientes de diferentes fontes. Embora a precisão seja um aspecto vital para os sistemas dos VAs, a principal razão para a adoção de múltiplos sensores está na busca pela maximização da disponibilidade de dados. Diversos sensores podem ser afetados por uma gama de fatores, incluindo interferências, interrupções de sinal e variações nas condições ambientais (VARGHESE; BOONE, 2015). Por exemplo, os sensores ultrassônicos podem ser influenciados por ruídos de alta frequência e alterações na temperatura (BANNER ENGINEERING, 2023).

A calibração e a precisão dos sensores devem ser avaliadas mesmo sob as condições mais adversas. A estratégia de empregar uma variedade de sensores contribui significativamente para o aumento da precisão geral e da confiabilidade dos dados coletados pelo veículo (VARGHESE; BOONE, 2015). A Figura 18 apresenta uma comparação entre os atributos dos diferentes tipos de sensores utilizados em veículos autônomos: câmera, radar e LIDAR.

Figura 18 – Comparação entre os tipos de sensores em relação aos atributos



Fonte: Adaptado de JEFFS & CHANG (2021)

Um sistema integrado que combina radar e câmera pode fornecer dados de profundidade valiosos para todos os objetos identificados em um cenário de condução autônoma. Essa abordagem reduz a necessidade de detectar objetos tridimensionais através do processamento intensivo de nuvens de pontos geradas por LIDAR, o que pode ser uma operação de alto custo computacional (NABATI; QI, 2020).

Quando uma gama de sensores é utilizada, existe a possibilidade de ocorrência de discrepâncias entre as medições dos sensores. Por exemplo, um mesmo objeto no ambiente pode ser reportado em duas posições distintas, ou um sensor pode identificar a presença de um objeto enquanto outro não (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011).

Esses conflitos podem surgir devido a:

- Diferenças nas propriedades perceptivas de cada sensor, incluindo alcance, precisão, campo de visão, sensibilidade ou reação a variações ambientais;
- Alterações reais no ambiente ao longo do tempo;
- Falhas no sensor, problemas eletrônicos, ruído ou dados incorretos;
- Limitações ou disparidades nos algoritmos de processamento.

Para solucionar tais conflitos, existem várias técnicas, entre elas, o rastreamento e a filtragem de dados, métodos de avaliação de confiabilidade e hipóteses, sistemas de votação e a aplicação de teoria de decisão baseada em evidências (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011).

3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

O escopo do protótipo envolve a utilização de dois sensores infravermelhos e um sensor ultrassônico, escolhidos por serem facilmente encontrados, acessíveis financeiramente e de fácil integração.

Os sensores infravermelhos, posicionados de forma estratégica na parte frontal do veículo, são essenciais para a funcionalidade de detecção e seguimento de linha. Eles permitem ao protótipo identificar e seguir um trajeto pré definido, demarcado no chão, e, através de um controle preciso dos motores, o veículo consegue reconhecer curvas e ajustar sua trajetória.

Por outro lado, o sensor ultrassônico atua na detecção de obstáculos situados na frente do veículo. Após a programação do sensor, é possível estimar a distância até um possível objeto que esteja em seu percurso. Quando a distância detectada for de 25 cm ou menos, o sistema de controle interpreta a situação como a presença de um obstáculo, levando à parada automática do veículo. Esta condição de parada se mantém até que o obstáculo seja removido, garantindo que a retomada da movimentação do veículo ocorra apenas quando o caminho estiver livre.

3.1 Componentes utilizados na construção do protótipo

A seguir serão descritos os principais componentes utilizados para a montagem e programação do protótipo desenvolvido ao longo do TCC, destacando a importância e contribuição para o projeto como um todo.

3.1.1 Microcontrolador (Arduino Uno)

Os microcontroladores são circuitos eletrônicos que incorporam uma Unidade Central de Processamento (*Central Processing Unit* - CPU), uma Unidade Lógica Aritmética (*Arithmetic Logic Unit* - ALU), linhas de dados, endereço e controle, além de periféricos integrados para comunicação serial, temporização, oscilação e dispositivos de entrada e saída. No mercado atual, são encontrados uma ampla gama de placas microcontroladas, sendo o Arduino uma das mais populares (MARTINAZZO *et al.*, 2014).

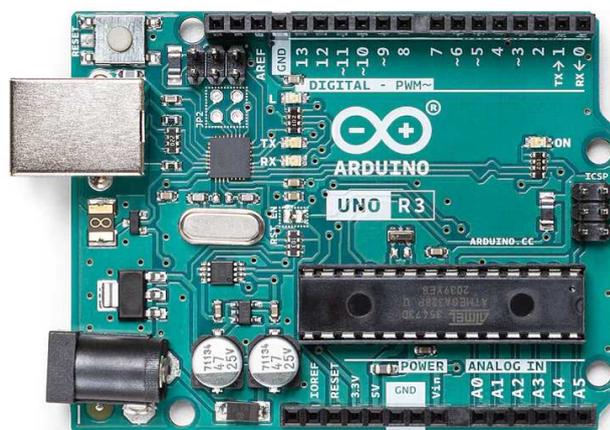
O Arduino é uma plataforma de computação física ou embarcada, que permite interagir com o ambiente por meio de combinações de *hardware* e *software*.

É possível criar objetos interativos independentes ou conectá-los a computadores, redes e até à internet para coletar e transmitir dados, desencadeando ações com base neles. É compatível com diversos dispositivos, incluindo diodos emissores de luz (Light Emitting Diode - LEDs), botões, interruptores, motores, sensores de temperatura, sensores de pressão, sensores de distância, receptores GPS, módulos Ethernet e muitos outros que possam enviar ou receber dados (MCROBERTS, 2011).

O modelo selecionado para o protótipo foi o Arduino UNO (conforme ilustrado na Figura 19), devido à adequada configuração de suas portas de entrada e saída, que se mostrou suficiente para o desenvolvimento.

O Arduino Uno utiliza o microcontrolador ATmega328P, um dispositivo Regulador Automático de Tensão (*Automatic Voltage Regulator - AVR*) de 8 bits, que opera a uma frequência de 16 MHz e conta com 32 kB de memória Flash para armazenamento de programas, 2 kB de Memória Estática de Acesso Aleatório (*Static Random Access Memory - SRAM*) para processamento temporário e 1 kB de Memória Programável de Leitura Apenas Eletricamente Apagável (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory - EEPROM*) para guardar dados. A placa Arduino Uno disponibiliza 14 pinos de entrada/saída digitais, sendo que 6 deles suportam saídas Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation - PWM*), bem como 6 pinos para entrada analógica. Além disso, inclui um ressonador cerâmico de 16 MHz para manter a precisão temporal, uma porta de Barramento Serial Universal (*Universal Serial Bus - USB*), um conector de alimentação, um conector de Programação Serial em Circuito (*In Circuit Serial Programming - ICSP*) e um botão de reiniciar. O Arduino Uno pode ser alimentado por meio de uma conexão USB ou por uma fonte de alimentação externa, operando com uma tensão de 5 V e inclui um regulador de tensão para assegurar uma alimentação estável (ARDUINO, 2023).

Figura 19 – Arduino UNO R3



Fonte: Store Usa Arduino (2023)

3.1.2 Arduino IDE

Para programar o Arduino e orientá-lo a executar as ações desejadas, é necessário utilizar o Arduino IDE (*Integrated Development Environment* - Ambiente de Desenvolvimento Integrado). Neste ambiente (Figura 20) é possível escrever o código em linguagem C, com um conjunto de instruções passo a passo. Após escrever o programa, é possível fazer o *upload* dele para o Arduino (MCROBERTS, 2011).

Figura 20 – Arduino IDE

```

1 #include <NewPing.h> // Inclui a biblioteca NewPing para uso do sensor ultrassônico
2 #include <AFMotor.h> // Inclui a biblioteca Adafruit Motor Shield para controlar os motores
3
4
5 #define TRIGGER_PIN A2 // Define o pino do Arduino usado para acionar o sensor ultrassônico
6 #define ECHO_PIN A3 // Define o pino do Arduino usado para receber o retorno do sensor ultrassônico
7 #define Distancia_Maxima 50 // Define a distância máxima para medição do sensor ultrassônico
8
9
10 #define INFRA_ESQ A1 // Define o pino para o sensor infravermelho esquerdo
11 #define INFRA_DIR A0 // Define o pino para o sensor infravermelho direito
12
13
14 #define Velocidade_Maxima 200 // Define a velocidade máxima dos motores
15 #define Velocidade_Offset 20 // Define um offset de velocidade
16
17 NewPing sonar(TRIGGER_PIN, ECHO_PIN, Distancia_Maxima); // cria um objeto NewPing para o sensor ultrassônico
18
19 AF_DCMotor motor1(1, MOTOR12_1KHZ); // Cria objetos de motor DC da Adafruit Motor shield para os motores
20 AF_DCMotor motor2(2, MOTOR12_1KHZ);
21
22
23 int distancia = 0; // Variável para armazenar a distância medida pelo sensor ultrassônico
24 boolean object;
25
26 void setup() {
27   Serial.begin(9600); // Inicializa a comunicação serial com baud rate 9600
28   pinMode(INFRA_ESQ, INPUT); // Configura o pino do sensor infravermelho esquerdo como entrada
29   pinMode(INFRA_DIR, INPUT); // Configura o pino do sensor infravermelho direito como entrada
30
31   motor1.setSpeed(120); // Define a velocidade inicial do motor1

```

Fonte: Autoria própria (2023)

3.1.3 Sensor Ultrassônico HC-SR04

O HC-SR04 é um dispositivo de medição ultrassônica empregado em aplicações eletromecânicas. Consiste em um circuito de controle, um transmissor e um receptor ultrassônico. De acordo com o fabricante Elecfreaks, este sensor é capaz de medir distâncias na faixa de 20 mm a 4000 mm, com uma precisão que pode atingir até 3 mm (NAKATANI; GUIMARÃES; MACHADO NETO, 2013).

O HC-SR04 (Figura 21) é equipado com quatro pinos: tensão de alimentação (VCC), terra (GND), pino de disparo (Trigger) e pino de eco (Echo). O pino VCC é responsável por receber a corrente elétrica positiva, o GND é o ponto de aterramento, o pino Trigger é utilizado para acionar o sinal de saída do sensor, e o pino Echo é empregado para capturar o sinal refletido por objetos localizados à frente do sensor (ROMADHON; WIDYANINGRUM, 2022).

O sensor segue o seguinte processo: para iniciar a medição, o pino Trigger deve receber um pulso de 5 V com uma duração mínima de 10 μ s. Isso faz com que o sensor emita 8 ciclos de pulsos ultrassônicos a uma frequência de 40 kHz e aguarde pelo sinal refletido. Quando o sinal refletido é recebido, o pino Echo é definido como alto e um atraso proporcional à distância medida é aplicado. O código para operar esse sensor geralmente se baseia na função "*pulseIn*", a qual mede o tempo entre o envio dos pulsos ultrassônicos e a definição do pino Echo como alto. Esse intervalo de tempo é então utilizado para calcular a distância (NAKATANI; GUIMARÃES; MACHADO NETO, 2013).

Figura 21 – Sensor de Distância Ultrassônico HC-SR04



Fonte: Eletrogate (2023)

3.1.4 Sensor de Obstáculo Infravermelho

O Sensor de Obstáculo Infravermelho (Figura 22) é um dispositivo que utiliza sinais infravermelhos para detectar obstáculos. Seu funcionamento se baseia em emissão de luz infravermelha do emissor em direção ao receptor. Quando um obstáculo reflete o sinal infravermelho de volta, o sensor gera uma mudança na saída, indicada por um LED verde aceso. Esse sensor consiste em um emissor, um receptor infravermelho e um chip comparador LM393. Opera com 3,3 V a 5 V e usa luz infravermelha invisível ao olho humano para detecção. Destaca-se pela capacidade de ajustar a faixa de detecção (de 2 a 15 cm) por meio de um potenciômetro na placa, tornando-o versátil para diversas aplicações que requerem detecção em curtas distâncias. Além disso, é projetado para minimizar interferências de fontes de luz não relacionadas ao sinal infravermelho, garantindo detecção precisa e confiável (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005) (CURTO CIRCUITO, 2023).

Figura 22 – Módulo Sensor de Obstáculo Infravermelho IR



Fonte: Baú da Eletrônica (2023)

3.1.5 Motor Shield L293D

O L293D é um módulo projetado para ser compatível com as placas Arduino UNO R3 e Arduino MEGA, funcionando como um *shield* do motor. Ele permite o controle de 2 a 6 motores de Corrente Contínua (CC) e motores de passo de 4 fios, além de suportar até 2 conjuntos de pinos para controlar um servo motor. É um circuito integrado que pode lidar com alta tensão e corrente em quatro canais de *driver* de motor, sendo útil para acionar dispositivos como relés, solenóides, motores CC e motores de passo, bem como transistores de potência de comutação. O L293D (Figura 23) simplifica o uso com suas duas pontes H em cada par de canais, entrada

Figura 24 – Bateria 9V

Fonte: UsinalInfo (2023)

3.1.7 Chassi

O chassi (Figura 25) utilizado no desenvolvimento do protótipo é idealizado para a construção de pequenos carros robôs, sua função é fornecer a estrutura necessária para a movimentação do protótipo. É composto por uma base acrílica resistente e perfurada para encaixe dos componentes e sensores, duas rodas laterais de borracha e uma pequena roda frontal. No chassi são acoplados dois motores às rodas principais com o auxílio de parafusos (CURTO CIRCUITO,2023).

Figura 25 – Chassi

Fonte: Curto Circuito (2023)

3.1.8 Motor de Corrente Contínua (CC)

O motor de corrente contínua (CC) é um dispositivo eletromecânico amplamente utilizado em diversas aplicações que necessitam de um controle de velocidade, direção e precisão, como a robótica, automação industrial e sistemas de transporte. Podem ser encontrados em versões com poucos cm de comprimento até motores industriais de grande porte. O princípio fundamental do seu funcionamento é a conversão de energia elétrica em energia mecânica.

O motor CC utilizado possui uma caixa redutora acoplada ao seu eixo de saída, sua função é reduzir a velocidade de rotação do motor, enquanto aumenta o torque. Isso é possível devido a engrenagens ou outros mecanismos de transmissão que compõem a caixa redutora.

O objetivo desse procedimento é tornar o motor adequado para aplicações que requerem mais força do que velocidade, nas quais é necessário controlar precisamente a velocidade e a força. Para o protótipo ambos os motores (Figura 26) adquiridos possuem as especificações a seguir:

- Tensão de Operação: 3 - 6 V;
- Rotação em 3 V: $90 \pm 10\%$ RPM;
- Rotação em 6 V: $200 \pm 10\%$ RPM;
- Consumo de corrente sem carga em 3 V: 150 mA;
- Consumo de corrente sem carga em 6 V: 200 mA;
- Torque em 3 V: 0,35 kgf/cm;
- Torque em 6 V: 0,80 kgf/cm;
- Redução: 1:48;
- Dimensões: 70 mm x 37 mm x 23 mm (CURTO CIRCUITO,2023).

Figura 26 – Motor CC



Fonte: Curto Circuito (2023)

4 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Para o desenvolvimento do protótipo, foi considerado fazer uso de componentes de fácil acesso e baixo custo, viabilizando o projeto dentro de um orçamento acessível, sem comprometer a eficácia e relevância dos resultados obtidos.

Esta etapa prática permitiu a materialização dos conceitos teóricos abordados, proporcionando assim uma compreensão aprofundada da aplicação e funcionamento dos sensores. Ao fazer uso de sensores dos tipos ultrassônico e infravermelho, o protótipo ofereceu um panorama sobre a interação e a percepção necessárias à navegação autônoma. Com esse processo, foi possível validar as hipóteses teóricas, além de identificar desafios e limitações práticas.

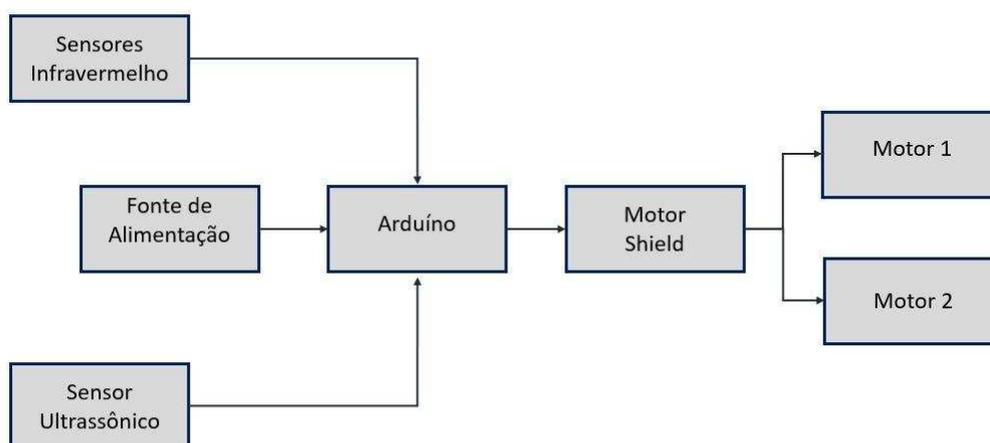
4.1 Diagrama do Circuito

Os diagramas representativos da montagem desenvolvida no protótipo estão expostos nesta sessão.

4.1.1 Diagrama de Blocos

O diagrama apresentado na Figura 27 mostra de forma sucinta o conjunto de dispositivos utilizados no projeto.

Figura 27 – Diagrama de blocos



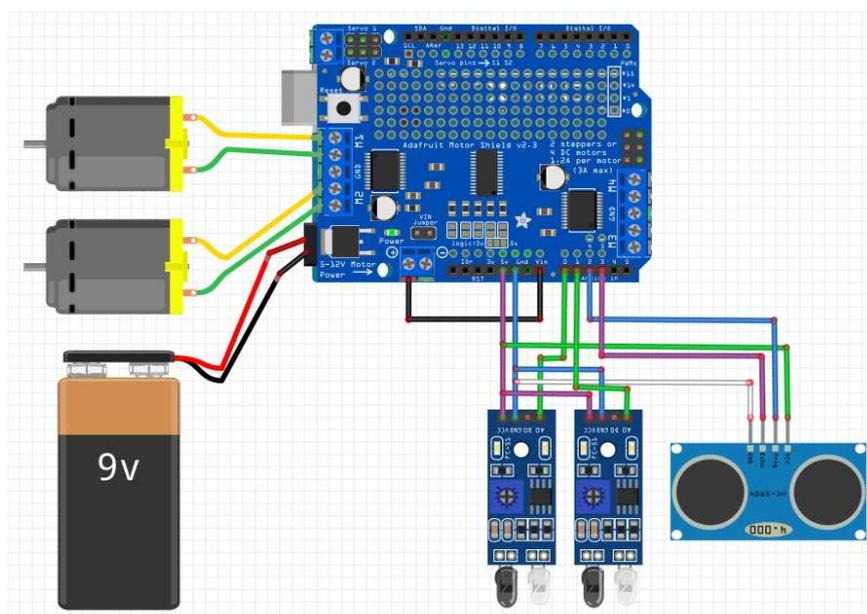
Fonte: Autoria própria (2023)

Nele são demonstradas as interconexões utilizadas na construção do protótipo. A fonte de alimentação é conectada ao arduino, no qual é integrado o motor shield. No motor shield são estabelecidas as conexões dos dois motores bem como, dos três sensores utilizados, dois infravermelhos e um ultrassônico.

4.1.2 Diagrama *Fritzing*

O diagrama do circuito foi criado através do programa *Fritzing*, que oferece uma representação visual precisa do circuito eletrônico prototipado, permitindo uma análise aprofundada de seu funcionamento. A Figura 28 ilustra a simulação do circuito desenvolvido, destacando a disposição dos componentes e as interações entre eles.

Figura 28 – Diagrama do circuito



Fonte: Autoria própria (2023)

4.2 Programação

O desenvolvimento do veículo autônomo depende da programação para alcançar a autonomia desejada. Esta seção foca na programação realizada no Arduino para controlar os principais componentes do protótipo, visando proporcionar uma compreensão aprofundada das decisões tomadas pelo veículo autônomo com base nas informações dos sensores.

4.2.1 HC-SR04

Na programação do sensor HC-SR04 foi incluída a biblioteca NewPing.h, que possibilita o uso do mesmo para realizar as medições de distância em relação a um obstáculo.

Foram definidos os pinos do Motor Shield Driver que foram conectados aos pinos do sensor, sendo eles: trigger A2 e echo A3, além da distância máxima de medição de 50 cm. Após é realizada a criação do objeto “NewPing” chamado sonar, que utiliza os pinos e a distância definidos anteriormente.

A variável global “distancia” é criada para armazenar a distância medida pelo sensor entre o protótipo e um possível objeto que esteja pelo percurso.

A função “Evitar_Objeto()” determina a distância até um objeto utilizando o resultado fornecido pela “Medir_Distancia()”, que mede a distância através do sensor. Caso a medição venha a falhar, o valor considerado será da distância máxima, de 100 cm. Enquanto a função “distancia()” for menor ou igual a 25 cm, o protótipo irá permanecer parado e irá esperar até que esta distância seja maior que 25 cm ou o objeto tenha sido removido. Quando a função “Medir_Distancia()” for maior que 25 cm, o protótipo continuará se movimentando conforme a função “loop()” (explicada no próximo item).

Figura 29 – Programação do Sensor Ultrassônico

```
void Evitar_Objeto() { // Verifica a leitura dos Sensor Ultrassônico e toma decisões
  distancia = Medir_Distancia(); // Obtém a distância medida pelo Sensor Ultrassônico
  while (distancia <= 25) { // Enquanto a distância for menor ou igual a 25 cm
    Parar(); // Executa a função Parar
    distancia = Medir_Distancia(); // Obtém a distância medida pelo Sensor Ultrassônico novamente até a mesma for maior que 25 cm ou o objeto for retirado
  }
  delay(500); // Realiza um delay de 0,5 segundo até voltar para a função loop
}

int Medir_Distancia() {
  delay(50);
  int cm = sonar.ping_cm(); // Realiza uma leitura do sensor ultrassônico e obtém a distância em centímetros
  if (cm == 0) { // Se a leitura do sensor falhar, é defino uma distância máxima de 100 centímetros
    cm = 100;
  }
  return cm;
}
```

Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.2 Infravermelho IR

Para os sensores infravermelhos, foi estabelecido para o sensor da direita o pino A0 e para o da esquerda o pino A1.

A função "loop()" é responsável por executar a leitura dos sensores infravermelhos, e com base nesses dados, realiza as tomadas de decisão.

Quando ambos os sensores infravermelhos detectam a linha, a função "Evitar_Objeto()" é ativada, na ausência de obstáculos no caminho, o protótipo continua se movendo para frente. Se apenas o sensor infravermelho esquerdo identificar a linha, essa mesma função é acionada e, na continuidade da ausência de obstáculos, o robô desloca-se para a esquerda. De forma similar, se somente o sensor infravermelho direito reconhecer a linha, a função "Evitar_Objeto()" é igualmente executada e, não encontrando obstáculos, o robô move-se para a direita. Caso os sensores não detectem nenhuma linha, a função "Parar()" é ativada, interrompendo o movimento do robô.

Figura 30 – Programação dos Sensores Infravermelhos

```
void loop() { // Verifica as leituras dos sensores infravermelhos e toma decisões

  if (digitalRead(INFRA_ESQ) == 1 && digitalRead(INFRA_DIR) == 1) { // Situação 1 - Os dois sensores identificam a linha preta
    Evitar_Objeto(); // Executa a função Evitar_Objeto que esta associada ao sensor ultrassônico
    Mover_Frente(); // Executa a função Mover_Frente
  } else if (digitalRead(INFRA_ESQ) == 1 && digitalRead(INFRA_DIR) == 0) { // Situação 2 - O Sensor da Esquerda identifica a linha preta e o da Direita não
    Evitar_Objeto(); // Executa a função Evitar_Objeto
    Mover_Esquerda(); // Executa a função Mover_Esquerda
  } else if (digitalRead(INFRA_ESQ) == 0 && digitalRead(INFRA_DIR) == 1) { // Situação 3 - O Sensor da Direita identifica a linha preta e o da Esquerda não
    Evitar_Objeto(); // Executa a função Evitar_Objeto
    Mover_Direita(); // Executa a função Mover_Direita
  } else if (digitalRead(INFRA_ESQ) == 0 && digitalRead(INFRA_DIR) == 0) { // Situação 4 - O protótipo para pois não identifica a linha preta
    Parar(); // Executa a função Parar
  }
}
```

Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.3 Motores

Na programação dos motores, a biblioteca Adafruit Motor Shield foi integrada para facilitar o gerenciamento da rotação dos motores.

Utiliza-se a função "Parar()" para interromper a atividade de ambos os motores, acionando a constante "RELEASE", definida pela biblioteca, que sinaliza a interrupção da alimentação de corrente aos motores.

A função "Mover_Frente" ativa ambos os motores na direção frontal, utilizando a constante "FORWARD" para direcionar a corrente de forma a induzir o movimento para frente.

A função "Mover_Direita" é especificada para fazer com que o motor 1 avance ("FORWARD") enquanto o motor 2 recue ("BACKWARD"), criando assim o movimento para a direita. Contrariamente, a função "Mover_Esquerda" opera de maneira inversa à "Mover_Direita", promovendo o movimento para a esquerda por meio da inversão das direções.

Figura 31 – Programação dos Motores

```

void Parar() {
  motor1.run(RELEASE); // Para o motor 1
  motor2.run(RELEASE); // Para o motor 2
}
void Mover_Frente() {
  motor1.run(FORWARD); // Move ambos os motores para a frente
  motor2.run(FORWARD);
}
void Mover_Direita() {
  motor1.run(FORWARD); // Move o motor 1 para trás
  motor2.run(BACKWARD); // Move o motor 2 para a frente
}
void Mover_Esquerda() {
  motor1.run(BACKWARD); // Move o motor 1 para a frente
  motor2.run(FORWARD); // Move o motor 2 para trás
}

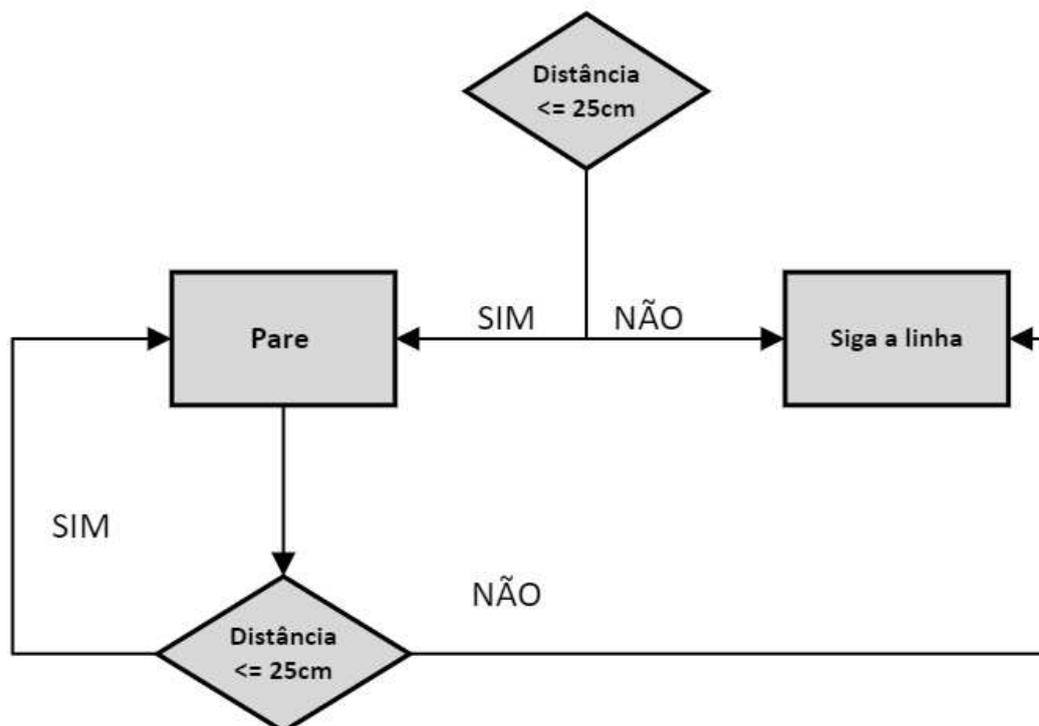
```

Fonte: Autoria própria (2024)

4.3 Lógica de Decisão (Fluxograma)

O fluxograma da Figura 32 mostra a lógica de decisão utilizada no funcionamento do sensor ultrassônico.

Figura 32 – Lógica de Decisão Sensor Ultrassônico

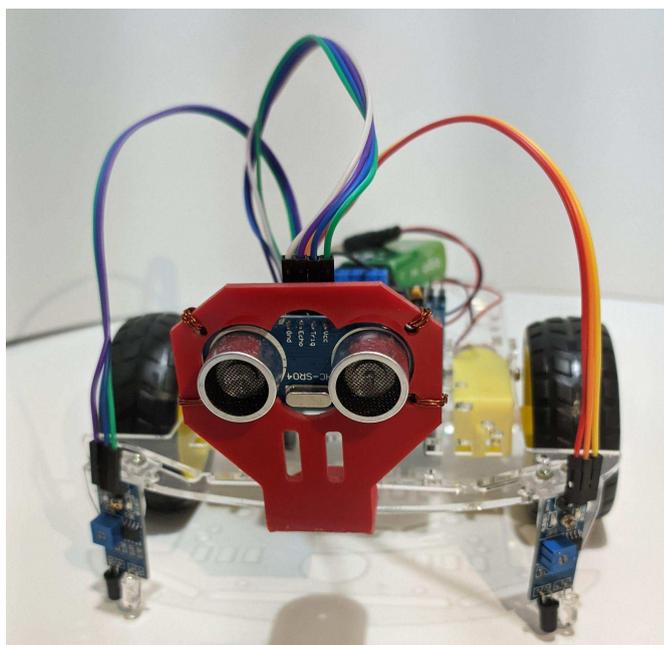


Fonte: Autoria própria (2023)

4.4 Registro Visual do Protótipo

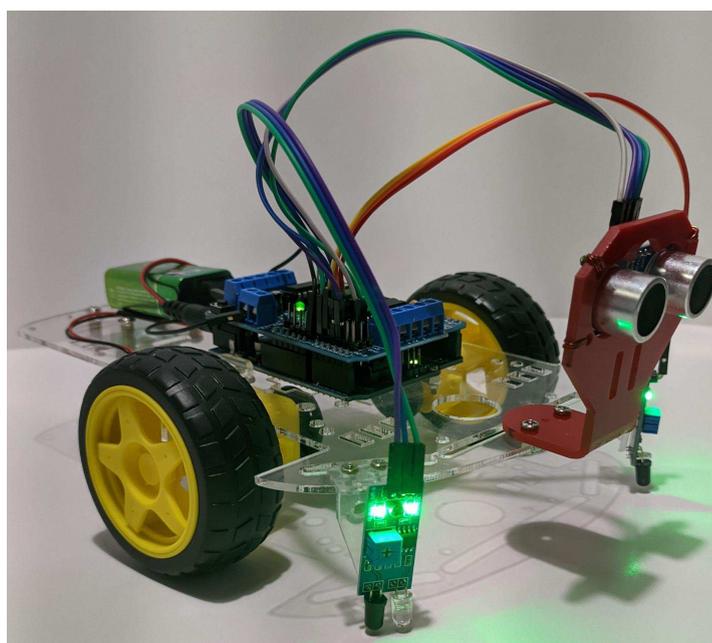
As Figuras 33a, 33b e 33c apresentam o protótipo criado, oferecendo vistas de diversos ângulos do robô. Essas imagens enfatizam sua estrutura e os elementos que o compõem.

Figura 33a – Vista frontal do protótipo



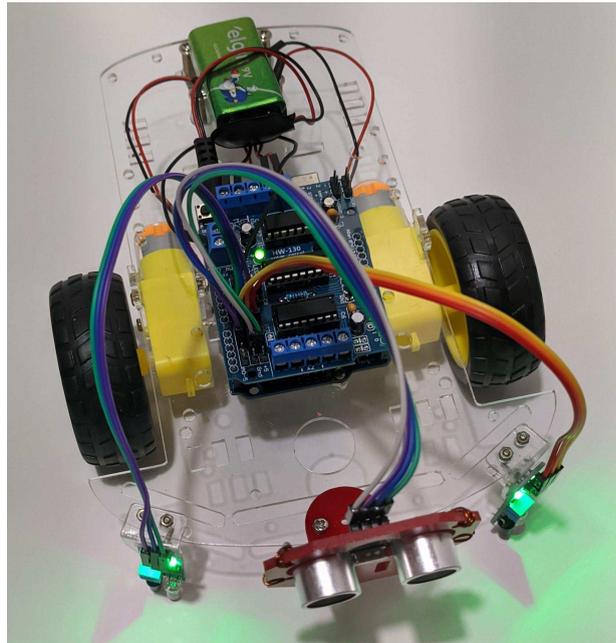
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 33b – Vista lateral do protótipo



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 33c – Vista superior do protótipo



Fonte: Autoria própria (2024)

5 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos através da construção do protótipo de veículo autônomo que incorpora sensores ultrassônicos e infravermelhos foram positivos. A implementação prática desses sensores permitiu uma compreensão mais profunda de como a tecnologia pode ser utilizada para melhorar a autonomia e segurança dos veículos. Através do protótipo, foi possível validar a eficácia da integração sensorial no que diz respeito à detecção de obstáculos e seguimento de linha.

Os objetivos específicos idealizados para o trabalho foram alcançados, iniciando pelo estudo do funcionamento dos VAs e dos sensores utilizados em sua construção, abordados no item 2.2. A avaliação dos procedimentos de construção do protótipo que incluíram a determinação do modelo e funcionalidade do protótipo a ser desenvolvido, analisando as questões de custo e complexidade de implementação. Também, os materiais essenciais foram selecionados de forma criteriosa, de forma a atender as necessidades do projeto. Durante o progresso das etapas de construção, foram necessárias algumas adaptações devido a contratempos no funcionamento de certos componentes, levando à modificação do projeto inicial que inicialmente previa o uso de uma ponte H como driver do motor para a adoção do motor shield. Na fase de testes, a principal dificuldade surgiu na programação do sensor ultrassônico, resultando em uma leve alteração na abordagem planejada inicialmente. No entanto, todas as etapas foram concluídas com sucesso, resultando em um protótipo funcional capaz de seguir linhas e detectar obstáculos de forma eficaz.

Ao longo deste estudo, foi possível observar que os sensores desempenham um papel fundamental na coleta de dados ambientais para que os veículos autônomos operem de maneira segura e eficiente.

A análise detalhada dos diversos tipos de sensores, como câmeras, radares, LIDARs e outros, revelou a complexidade e a diversidade necessárias para fornecer informações precisas e em tempo real para os sistemas de controle dos veículos autônomos. Essa diversidade sensorial contribui não apenas para a segurança dos passageiros e pedestres, mas também para a otimização do desempenho do veículo quando inserido em diferentes condições ambientais.

A partir da implementação do protótipo foi observado de forma prática a integração eficiente dos sensores ultrassônico e infravermelho, resultando em um

sistema capaz de tomar decisões autônomas, como identificar obstáculos e manter uma trajetória definida.

Com base no estudo é possível identificar que várias áreas seriam aplicáveis para pesquisa e desenvolvimento de trabalhos futuros. Algumas sugestões incluem o desenvolvimento de novos tipos de sensores, para maior precisão em condições adversas; a exploração de técnicas de fusão sensorial, que utilizam inteligência artificial para integrar dados de múltiplos sensores e a criação de ambientes de simulação mais complexos com o objetivo de testar a integração dos sensores em diferentes cenários.

REFERÊNCIAS

- ALVES, P. Níveis de Automação de Veículos. **Revista CESVI**, São Paulo, v. 110, n. 1, p. 31-33, jun. 2018. Disponível em: <https://cesvibrasil.com.br/site.aspx/noticia/revista-cesvi-edicao-110>. Acesso em: 08 mai. 2022.
- ARDUINO. **Arduino Uno Rev3**. Disponível em: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?selectedStore=us#looxReviews>. Acesso em: 25 out 2023.
- AZAM, S.; MUNIR, F.; SHERI, A.M.; KIM, J.; JEON, M. **System, Design and Experimental Validation of Autonomous Vehicle in an Unconstrained Environment**. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s20215999>. Acesso em: 6 jun. 2022.
- BAGLOEE, S. A.; TAVANA, M.; ASADI, M.; OLIVER, T. **Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies**. 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-016-0117-3>. Acesso em: 10 abr. 2022.
- BAÚ DA ELETRÔNICA. **Módulo Sensor de Obstáculo Infravermelho IR**. Disponível em: <https://www.baudaeletronica.com.br/produto/modulo-sensor-de-obstaculo-infravermelho-ir.html>. Acesso em: 10 out. 2023.
- BAÚ DA ELETRÔNICA. **Motor Shield L293D - Driver Ponte H para Arduino**. Disponível em: <https://www.baudaeletronica.com.br/produto/motor-shield-l293d-driver-ponte-h-para-arduino.html>. Acesso em: 30 out. 2023.
- BENENSON, R. **Perception pour véhicule urbain sans conducteur: Conception et implementation**. 218 f. Docteur de l'École des Mines de Paris. Paris Tech: Paris, França, 2009. Disponível: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005327>. Acesso em: 03 dez. 2021.
- BANNER ENGINEERING. **Sensores ultrassônicos 101: Respostas a Perguntas Frequentes**. Disponível em: <https://www.bannerengineering.com/br/pt/company/expert-insights/ultrasonic-sensors-101.html>. Acesso em: 18 nov. 2023.
- BLOGS NVIDIA. **How does a self-driving car see?** Disponível em: <https://blogs.nvidia.com/blog/2019/04/15/how-does-a-self-driving-car-see/>. 2019. Acesso em: 14 abr. 2022.
- BOSCH MOBILITY SOLUTIONS. **Ultrasonic sensor**. Disponível em: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/sensors/ultrasonic-sensor>. Acesso em: 04 maio 2022.
- BOUSEFSAF, F. **Mesure sans contact de l'activité cardiaque par analyse du flux vidéo issu d'une caméra numérique : extraction de paramètres physiologiques et application à l'estimation du stress**. Université de Lorraine,

França, 2014. Disponível em: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01751131v2>. Acesso em: 28 abr. 2022.

BROGGI, A.; BERTOZZI, A.; FASCIOLI, A.; GUARINO, C. “**The argo autonomous vehicles vision and control systems**”. International Journal on Intelligent Control Systems, 1999. Disponível: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.15.3035&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 01 dez. 2021.

BUSINESS WIRE. **Webinar da ITS America mostra como soluções baseadas em tecnologia lidar podem aumentar a segurança de pedestres**. 2020. Disponível em: <https://www.businesswire.com/news/home/20201106005584/pt/>. Acesso em: 28 abr. 2022.

CHOI, J. D.; KIM, M. Y. **A sensor fusion system with thermal infrared camera and LIDAR for autonomous vehicles and deep learning based object detection**. ICT Express, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959521001818>. Acesso em: 28 abr. 2022.

CLEONIS. **The Sagnac effect**. 2017. Disponível em: <http://www.cleonis.nl/physics/phys256/sagnac.php>. Acesso em: 28 abr. 2022.

CURTO CIRCUITO. **Chassi**. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/kit-chassi-2wd.html>. Acesso em: 21 nov. 2023.

CURTO CIRCUITO. **Sensor de Obstáculo Infravermelho IR**. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/sensor-de-obstaculo-infravermelho.html>. Acesso em: 10 out. 2023.

DICKMANN, E.D.; BEHRINGER, R.; DICKMANN, D.; HILDEBRANDT, T.; MAURER, M.; THOMANEK, F.; SCHIEHLEN, J. **The seeing passenger car 'VaMoRs-P'**. Proceedings of the Intelligent Vehicles '94, 1994. Disponível: <https://ieeexplore.ieee.org/document/639472/>. Acesso em: 02 dez. 2021.

ELETROGATE. **Módulo Sensor de Distância Ultrassônico HC-SR04**. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-sensor-de-distancia-ultrassonico-hc-sr04>. Acesso em: 10 out. 2023.

GEDDES, N.B. **Magic motorways**. Random House Book, New York, NY, USA, 1940. Disponível em: <https://ia600704.us.archive.org/2/items/magicmotorways00geddrich/magicmotorways00geddrich.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2021.

GM HERITAGE CENTER. **1956 Firebird II**. Disponível em: <https://www.gm.com/heritage/collection/gm-concept/1956-firebird-II>. Acesso em: 02 dez. 2021.

GONÇALVES, L. F. S. **Desenvolvimento de navegação autônoma por GNSS**. 2011. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072011-162537/publico/Diss>

ertacao_Felipe_Goncalves.pdf. Acesso em: 03 dez. 2021.

IGNATIOUS, H. A; EL-SAYED, H; KHAN, M. A. **Sensor Technology for Autonomous Vehicles**. In: Roger Narayan (Ed.). *Encyclopedia of Sensors and Biosensors (First Edition)*. Elsevier, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822548-6.00122-9>. Acesso em: 27 fev. 2024.

HOANG, V. L; HOA, T. D; ANH, T. H; ROBIN, J. E; EFSTRATIOS, S. **"A CMOS 77 GHz radar receiver front-end"**. 2013 European Microwave Integrated Circuit Conference, Nuremberg, Germany, 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6687773>. Acesso em: 27 fev. 2024.

JEFFS, J.; CHANG, Y. H. **Automotive radar 2022-2042**. IDTechEx, 2021. Disponível em: <https://www.idtechex.com/zh/research-report/automotive-radar-2022-2042/850>. Acesso em: 15 maio 2022.

KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. (2006). **Understanding GPS: Principles and Applications**. Artech House, 2006. Disponível em: https://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_33/ourdev_584835O21W59.pdf. Acesso em: 20 abr. 2023.

KIRVAN, P.; WIGMORE, I. **"What is a controller (computing)?"**. Tech Target, 2023. Disponível em: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/controller>. Acesso em: 27 fev. 2024.

KÖHLER, M.; GUMBMANN, F.; SCHÜR, J.; SCHMIDT, L. P; BLÖCHER, H. L. **"Considerations for future automotive radar in the frequency range above 100 GHz"**. German Microwave Conference Digest of Papers, 2010. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5498269>. Acesso em: 28 abr. 2022.

MITCHELL, W. J.; BORRONI-BIRD, C. E.; BURNS, L. D. (2010). **Reinventing the Automobile: Personal Urban Mobility for the 21st Century**. Cambridge, MA: MIT Press. Disponível em: <https://direct.mit.edu/books/book/3310/Reinventing-the-AutomobilePersonal-Urban-Mobility> Acesso em: 02 dez. 2021.

MARTINAZZO, C. A.; TRENTIN, D.S.; FERRARI, D.; PIAIA, M.M. **Arduino: Uma Tecnologia no Ensino de Física**. Erechim: URI, 2014. Disponível em: https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/143_430.pdf. Acesso em: 18 abr. 2023.

MCNY BLOG: NEW YORK STORIES. **"I have seen the future:"** Norman Bel Geddes and the General Motors Futurama. 2013. Disponível em: <https://blog.mcny.org/2013/11/26/i-have-seen-the-future-norman-bel-geddes-and-the-general-motors-futurama>. Acesso em: 01 dez. 2021.

MELVIN, W. L.; SCHEER, J. **Principles of modern radar: advanced techniques**. Vol. II, f. 436. 2012.

MERCEDES-BENZ MEDIA. **Premiere 25 years ago: Luxury and technology: Mercedes-benz S-Class W 140**. Stuttgart, Alemanha, 2016. Disponível

em:<https://media.mercedes-benz.com/article/59be8570-9bab-453e-9dc8-74f76c49fadd>. Acesso em: 02 dez. 2021.

MCROBERTS, M. **Arduino Básico**. São Paulo:Novatec Editora, 2011.E-book. Disponível

em:https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4287597/mod_resource/content/2/Ardu%C3%ADno%20B%C3%A1sico%20-%20Michael%20McRoberts.pdf. Acesso em: 09 set. 2023.

NABATI, R.; QI, H. **Radar-camera sensor fusion for joint object detection and distance estimation in autonomous vehicles**. 12th Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2009.08428>. Acesso em: 05 maio 2022.

NAKATANI, A.M.; GUIMARÃES, A.V; MACHADO NETO, V. **Medição com Sensor Ultrassônico HC-SR04**. Curitiba: UTFPR, 2013. Disponível em:<http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4341.6649>. Acesso em: 09 set. 2023.

NHTSA. **Automated vehicles for safety**. 2012. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles-safety>. Acesso em: 08 maio 2022.

NICE, K.; WILSON, T. V. ;GUREVICH, G. **"How Digital Cameras Work"**. 2006. Disponível em: <https://electronics.howstuffworks.com/cameras-photography/digital/digital-camera.htm>. Acesso em: 27 fev. 2024.

NILSSON, N. J. **"Artificial Intelligence: A New Synthesis"**. Morgan Kaufmann Publishers, 1998. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.5555/2974990>. Acesso em: 16 maio. 2023.

NOVATEL. **PwrPak7D**. 2022. Disponível em: <https://novatel.com/products/receivers/enclosures/pwrpak7d>. Acesso em: 05 maio 2022.

NOVATEL. **VEXXIS® GNSS-800 Series antennas**. 2019. Disponível em: <https://novatel.com/products/gps-gnss-antennas/vexxis-series-antennas/vexxis-gnss-800-series-antennas>. Acesso em: 05 maio 2022.

OZGUNER, U.; ACARMAN, T.; REDMILL, K. A. **Autonomous ground vehicles**. Artech House, f. 145, 2011.

PEREIRA, BRUNO CESAR FERNANDES. **Evolução de uma unidade de gerenciamento eletrônico de um motor VW 2.0L e desenvolvimento de controle de cruzeiro: Projeto Otto IV**. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-10112017-111401/>. Acesso em: 27 fev. 2024.

PISSARDINI, R. S. (2014). **Veículos autônomos de transporte terrestre: Proposta de Arquitetura de Tomada de Decisão para Navegação Autônoma**. 2014. Dissertação (Programa de Mestrado em Ciências). Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PIZYBLSKI, M. G. **Estudo e análise comparativa de algoritmos de planejamento de caminho para veículos autônomos**. 2020. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). Diretoria de Pesquisa e Pós-graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná.

PORTILLO, J. A.; SIQUEIRA, F. Z.; VARTANIAN, P. R.; MOURA JÚNIOR, Á. A. **Uma análise das estratégias do setor automobilístico e investimentos das quatro maiores montadoras brasileiras até 2020**: aplicação da matriz insumo-produto. *Práticas em Contabilidade e Gestão*, v. 7, n. 1, 2019. Disponível em: https://www.mackenzie.br/fileadmin/ARQUIVOS/Public/6-pos-graduacao/upm-highenopolis/mestrado-doutorado/economia_mercados/2020/Peri%C3%B3dicos/Uma_an%C3%A1lise_das_estrat%C3%A9gias_do_setor_automobil%C3%ADstico_e_investimentos_das_4_maiores_montadoras_brasileiras_at%C3%A9_2020.pdf. Acesso em: 04 dez. 2021.

RAJGURU ELECTRONICS. **L293D Based Arduino Motor Shield**. 2023. Disponível em: <https://5.imimg.com/data5/PX/UK/MY-1833510/l293d-based-arduino-motor-shield.pdf>. Acesso em: 25 out. 2023.

RICHARDS, M. A.; HOLM, W. A.; SCHEER, J. **Principles of modern radar: Basic Principles**. IET, f. 482, 2010.

ROMADHON, A. S.; WIDYANINGRUM, V. T. **Application of Sensors in Arduino as a control in Smart Home**. 2022 IEEE 8th Information Technology International Seminar (ITIS), Surabaya, Indonesia: 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10010217>. Acesso em: 04 out. 2023.

RUSSEL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd ed.)**. Prentice Hall, 2009. Disponível em: https://people.engr.tamu.edu/guni/csce421/files/AI_Russell_Norvig.pdf. Acesso em: 03 jun. 2023.

SEKOLAB. **Sekonix camera**. 2017. Disponível em: <http://sekolab.com/products/camera/>. Acesso em: 29 abr. 2022.

SEMICONDUCTOR ENGINEERING. **Radar versus LIDAR**. 2017. Disponível em: <https://semiengineering.com/radar-versus-lidar/>. Acesso em: 29 abr. 2022.

SHAHID, M. B.; SHAHZAD, M. U.; BUKHARI, S. M. R.; ABASI, M. A. **"Autonomous vehicle using GPS and magnetometer with HMI on LabVIEW"**. 2016 Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS), 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7556206>. Acesso em: 10 abr. 2022.

SHAOUT, A.; COLELLA, D.; AWAD, S. **Advanced driver assistance systems - past, present and future**. INTERNATIONAL COMPUTER ENGINEERING CONFERENCE, 7, Giza. Proceedings. p. 72–82, 2011.

SPIE CONFERENCES AND EXHIBITIONS. **Autonomous vehicle industry remains cool to thermal imaging**. 2018. Disponível em:

<https://spie.org/news/thermal-infrared-for-autonomous-vehicles?SSO=1>. Acesso em: 24 abr. 2022.

STANFORD CS221. **Self driving car**. 2013. Disponível em: <https://stanford.edu/~cpiech/cs221/apps/driverlessCar.html>. Acesso em: 02 dez. 2021.

STANFORD MAGAZINE. **Stanford's robotic history**. 2014. Disponível em: <https://stanfordmag.org/contents/stanford-s-robotic-history>. Acesso em: 02 dez. 2021.

STILLER, C.; REDMILL, K.; OZGUNER, U. **Systems for safety and autonomous behavior in cars: The DARPA grand challenge experience**. in Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 2, pp. 397-412, 2007. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4142933>. Acesso em: 02 dez. 2021.

TEMPLE, D.W. Estados Unidos, 2006. **GM's motorama**. Motorbooks: Minneapolis.

TERZIC, J.; TERZIC, E.; NAGARAJAH, R.; ALAMGIR, M. **Ultrasonic Fluid Quantity Measurement in Dynamic Vehicular Applications: A Support Vector Machine Approach**. 2014. Disponível em: https://librarysearch.adelaide.edu.au/discovery/fulldisplay/alma9923865250001811/61ADELAIDE_INST:UOFA. Acesso em: 27 fev. 2024.

THE DATA HUNT. **How Tesla made autonomous possible without LIDAR**. 2023. Disponível em: <https://www.thedatahunt.com/en-insight/how-tesla-autonomous-driving-possible-without-lidar>. Acesso em: 10 jan. 2024.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais: Fundamentos e aplicações**. 8ª ed. São Paulo: Ed. Erica, 2005.

THRUN, S.; MONTEMERLO, M.; DAHLKAMP, H.; STAVENS, D.; ARON, A.; DIEBEL, J.; FONG, P.; GALE, J.; HALPENNY, M.; HOFFMANN, G.; LAU, K.; OAKLEY, C.; PALATUCCI, M.; PRATT, V.; STANG, P.; STROHBAND, S.; DUPONT, C.; JENDROSSEK, L. E.; KOELEN, C.; MARKEY, C.; RUMMEL, C.; VAN NIEKERK, J.; JENSEN, E.; ALESSANDRINI, P.; BRADSKI, G.; DAVIES, B.; ETTINGER, S.; KAEHLER, A.; NEFIAN, A. E MAHONEY, P. **Stanley: The robot that won the DARPA Challenge**. Journal of Field Robotics, 2006. Disponível em: <http://robots.stanford.edu/papers/thrun.stanley05.html>. Acesso em: 01 dez. 2021.

TSUGAWA, S. **Vision-based vehicles in Japan: machine vision systems and driving control-systems**. Ieee Transactions On Industrial Electronics, 1994. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/303790>. Acesso em: 03 dez. 2021.

USINAINFO. **Conector de Bateria**. 2022. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/conectores-e-adaptadores/conector-de-bateria-9v-para-p4-ideal-para-arduino-2571.html>. Acesso em: 12 dez. 2023

VARGHESE, J. Z.; BOONE, R. G. **Overview of autonomous vehicle sensors and systems**. Proceedings of the 2015 International Conference on Operations Excellence and Service Engineering Orlando, Florida, Estados Unidos, 2015.

Disponível em: https://ieomsociety.org/IEOM_Orlnado_2015/papers/140.pdf. Acesso em: 18 abr. 2022.

VELODYNE LIDAR. **Alpha prime**. 2019. Disponível em: <https://velodynelidar.com/products/alpha-prime/>. Acesso em: 25 abr. 2022.

VIJAY, E. V.; RAO, C. V. R.; KUMAR, E. V.; SWAMY, G. N. "**Electronic control unit for an adaptive cruise control system & engine management system in a vehicle using electronic fuel injection,**" INTERACT-2010, Chennai, India, 2010, pp. 143-146. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5706213>. Acesso em: 27 fev. 2024.

WETMORE, J. M. **Driving the dream – the history and motivations behind 60 years of automated highway systems in america**. Automotive History Review, 2003. Disponível em: <https://autohistory.org/wp-content/uploads/2022/10/AHR040.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2021.