



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Alexsandro Ferreira Coelho

SAVIPS - Uma Infraestrutura Veicular Autônoma em Pequena Escala para Platoon

Recife

2023

Alexsandro Ferreira Coelho

SAVIPS - Uma Infraestrutura Veicular Autônoma em Pequena Escala para Platoon

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Engenharia da Computação

Orientador : Dr. Abel Guilhermino da Silva Filho

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Nataly Soares Leite Moro, CRB4-1722

C672s Coelho, Alexsandro Ferreira
SAVIPS - uma infraestrutura veicular autônoma em pequena escala para Platoon / Alexsandro Ferreira Coelho – 2023.
155 f.: il., fig., tab.

Orientador: Abel Guilhermino da Silva Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação, Recife, 2023.
Inclui referências.

1. Engenharia da Computação. 2. Veículos autônomos. 3. Unidades eletrônicas de controle. 4. Sistemas de direção automatizada. 5. Platoon. I. Silva Filho, Abel Guilhermino da (orientador). II. Título

621.39 CDD (23. ed.) UFPE - CCEN 2023 – 126

Alexsandro Ferreira Coelho

“SAVIPS - Uma Infraestrutura Veicular Autônoma em Pequena Escala para Platoon”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Engenharia da Computação.

Aprovado em: 26 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Freitas de Araújo Filho
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva Teixeira
Universidade de Brasília / Campus Gama

Prof. Dr. Abel Guilhermino da Silva Filho
Centro de Informática / UFPE
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A vida é um caminho repleto de desafios, incluindo o desafio da educação, que se torna fundamental para o nosso crescimento pessoal. É por meio da educação que temos a oportunidade de evoluir a cada dia.

Em primeiro lugar, expresso minha profunda gratidão a Deus por nos proporcionar conquistas fantásticas e pelo dom da vida.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Maria Ferreira Coelho e Pedro Coelho Pereira (em memória), por serem meus maiores incentivadores. Seu apoio e encorajamento foram essenciais em minha jornada.

À minha amada esposa, Gerlânia, e à minha filha, Yasmin, agradeço por estarem ao meu lado em todos os momentos dessa caminhada e por serem meu principal ponto de apoio durante o mestrado.

Quero fazer um agradecimento especial ao professor Abel Guilhermino por sua dedicação, empenho e paciência comigo. Em momentos difíceis desta jornada, seu apoio foi fundamental.

Agradeço à coordenação do Programa de Pós-graduação e aos professores do curso por todo o suporte e orientação fornecidos. Também expresso minha gratidão à CAPES e FACEPE pelo apoio financeiro, sem o qual essa conquista não seria possível.

Aos meus amigos de curso, Antonio Vitor, Arthur Freitas, Francisco de Assis, Gabriel Vasconcelos, Jayr Alencar, Jonatas Coelho, Marcos Eduardo, agradeço pelas colaborações valiosas e eficientes ao longo do tempo em que estiveram dispostos a me ajudar no laboratório e nas reuniões de projetos. Agradeço também aos amigos do LIVE por toda a ajuda e conselhos oferecidos.

Ao meu amigo e irmão Jeferson Freitas, agradeço por estar sempre ao meu lado e disponibilizar sua oficina para as minhas experiências.

A todas as outras pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, para minha formação acadêmica e pessoal, expresso meu sincero agradecimento do fundo do meu coração.

RESUMO

Os acidentes de trânsito são uma das principais causas de morte no mundo, muitos deles atribuídos a falhas humanas. Para reduzir esses números alarmantes, universidades, empresas de tecnologia e do setor automotivo têm se unido para desenvolver sistemas que aprimorem a condução em áreas urbanas e rodovias, utilizando tecnologias avançadas, como sistemas embarcados, redes de comunicação sem fio e Inteligência Artificial (IA). A aplicação dos sistemas embarcados na indústria automotiva tem contribuído significativamente para melhorar a segurança no trânsito, permitindo o controle de diversas funções do veículo, incluindo multimídia, climatização e controle de tração, entre outras. Contudo, o desenvolvimento de Veículos Autônomos (VAs) enfrenta desafios consideráveis, tanto em termos de custos quanto de dificuldades tecnológicas. Além disso, a pesquisa e o desenvolvimento desses sistemas autônomos requerem recursos que envolvem especialistas em IA, engenheiros de *software* e infraestrutura de testes, resultando em maiores investimentos financeiros. Outro desafio é a complexidade do ambiente de tráfego real, com suas variações imprevisíveis e interações complexas. Nesse contexto, a utilização de veículos em escala reduzida tem se mostrado uma abordagem comum em projetos de veículos autônomos, proporcionando uma plataforma segura, controlada e com custos reduzidos para testes e desenvolvimento. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de protótipos de veículos elétricos autônomos em escala reduzida para avaliar as funções dos Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS) em um pelotão de veículos. O processo abrange desde a montagem da estrutura física até a elaboração do projeto e desenvolvimento dos circuitos eletrônicos, incluindo os testes dos protótipos. A proposta é fornecer funcionalidades que permitam aos usuários validar e analisar dados em um sistema ADAS aplicado a um pelotão, de forma segura e com custos reduzidos em comparação com um pelotão de veículos em escala real. Como resultado, foram desenvolvidos dois veículos elétricos de pequeno porte, equipados com ECUs, câmeras (alta definição e estereoscópicas) e radares de ondas milimétricas. Esses veículos demonstraram o comportamento dos sistemas desenvolvidos, como o Controle de Cruzeiro Adaptativo (ACC), Sistema de Manutenção de Faixa (LKS) e Sistema de Frenagem de Emergência (EBS), para o controle lateral e longitudinal dos veículos elétricos de pequeno porte.

Palavras-chave: veículos autônomos; unidades eletrônicas de controle; sistemas de direção automatizada; platoon; veículos de pequena escala.

ABSTRACT

Traffic accidents are one of the main causes of death in the world, many of them attributed to human errors. To reduce these alarming numbers, universities, technology companies, and the automotive sector have come together to develop systems that enhance driving in urban and highway areas, using advanced technologies such as embedded systems, wireless communication networks, and Artificial Intelligence (AI). The application of embedded systems in the automotive industry has significantly contributed to improving traffic safety, allowing control over various vehicle functions, including multimedia, climate control, and traction control, among others. However, the development of Autonomous Vehicles (AVs) faces considerable challenges, both in terms of costs and technological difficulties. Moreover, the research and development of these autonomous systems require resources involving AI experts, software engineers, and testing infrastructure, resulting in higher financial investments. Another challenge is the complexity of the real traffic environment, with its unpredictable variations and complex interactions. In this context, the use of scaled-down vehicles has proven to be a common approach in autonomous vehicle projects, providing a safe, controlled, and cost-effective platform for testing and development. The objective of this work is to develop prototypes of small-scale autonomous electric vehicles to evaluate the functions of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) in a fleet of vehicles. The process encompasses everything from assembling the physical structure to the design and development of electronic circuits, including testing the prototypes. The proposal aims to provide functionalities that allow users to validate and analyze data in an ADAS system applied to a fleet, in a safe and cost-effective manner compared to a real-scale fleet of vehicles. As a result, two small electric vehicles equipped with ECUs, cameras (high-definition and stereoscopic), and millimeter wave radars have been developed. These vehicles demonstrated the behavior of the developed systems, such as Adaptive Cruise Control (ACC), Lane Keeping System (LKS), and Emergency Braking System (EBS), for the lateral and longitudinal control of the small electric vehicles.

Keywords: autonomous vehicles; electronic control units; automated steering systems; platoon; small-scale vehicles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Empresas e ICTs participantes de SegurAuto	23
Figura 2 – Veículo GM Firebird II	27
Figura 3 – Veículo Impala desenvolvido pela GM	27
Figura 4 – Protótipo Toyota Prius veículo autônomo da Google	28
Figura 5 – Veículo Stanley vencedor do DARPA Grand Challenge2005	29
Figura 6 – Fiat Palio Adventure Dualogic (CaRINA)	29
Figura 7 – Veículo autônomo desenvolvido pela UFMG	30
Figura 8 – Níveis de automação definidos pela SAE J3016 APR2021(SAE, 2018)	32
Figura 9 – Exemplos de aplicações de sensores em um ADAS	34
Figura 10 – Versão modificada pela Toyota do Lexus RX 450h	35
Figura 11 – Exemplo de um pelotão de veículos	36
Figura 12 – Sensores instalados em veículo autônomo	37
Figura 13 – Curva de complexidade da eletrônica veicular ao longo do tempo	39
Figura 14 – Arquitetura Centralizada	40
Figura 15 – Arquitetura Distribuída	41
Figura 16 – Níveis lógicos dos sinais: dominante = 0, recessivo = 1	44
Figura 17 – Conexão das ECUs no barramento CAN clássico	44
Figura 18 – Relação entre taxa de transmissão e comprimento do barramento	45
Figura 19 – Quadro de Mensagens do protocolo CAN 2.0A	46
Figura 20 – Quadro de Mensagens do protocolo CAN 2.0B	46
Figura 21 – Posicionamento dos sensores no veículo desenvolvido por CIUCIU et al.	48
Figura 22 – Diagrama em blocos do veículo autônomo proposto por CIUCIU et al.	48
Figura 23 – Jeep Bandeirantes utilizado por DUARTE; FIGUEIREDO	49
Figura 24 – Diagrama elétrico do controle lateral proposto por DUARTE; FIGUEIREDO	50
Figura 25 – Diagrama elétrico do controle longitudinal proposto por DUARTE; FIGUEIREDO	51
Figura 26 – Resposta do sistema para o teste com controladores proporcionais	52
Figura 27 – Resposta do sistema para o teste com controladores PID	52
Figura 28 – Veículo desenvolvido por BELENO et al., com seus sistemas sensoriais	53
Figura 29 – Arquitetura em blocos da plataforma autônoma proposta por BELENO et al.	54
Figura 30 – Diagrama do hardware eletrônico a bordo do veículo terrestre SuperDroid	55

Figura 31 – O sistema de navegação autônoma proposto por ALMEIDA et al.	56
Figura 32 – Plataforma Maisto RC utilizada por BILL; SHAHNASSER	57
Figura 33 – Veículo usando Jetson TX2 utilizado por BILL; SHAHNASSER	58
Figura 34 – Gráfico ROS do veículo autônomo proposto por BILL; SHAHNASSER	58
Figura 35 – Smart Camaro - protótipo de veículo autônomo proposto por AMADO et al.	60
Figura 36 – Arquitetura Pilotnet original utilizada no Smart Camaro	60
Figura 37 – Diagrama de blocos do protótipo desenvolvido por EL-HASSAN	62
Figura 38 – Teste do protótipo em estrutura rodoviária artificial	62
Figura 39 – Primeiro nível da estrutura veicular autônoma proposta por YU et al.	63
Figura 40 – Níveis 2 e 3 do veículo autônomo proposto por YU et al.	64
Figura 41 – Arquitetura de software proposta por YU et al.	65
Figura 42 – O veículo Traxxas proposto por ROBILA et al.	66
Figura 43 – A arquitetura do veículo autônomo proposto por ROBILA et al.	66
Figura 44 – Gráfico da distância medida pelos ultrassônicos (linha azul) e a potência do motor (linha vermelha)	67
Figura 45 – Protótipos de veículos para platooning e lane following proposto por LUU; LUPU; CHIRITA	68
Figura 46 – Diagrama do veículo para controle lateral	69
Figura 47 – Cyclops	70
Figura 48 – Projeto do caminhão em escala reduzida desenvolvido por Lee et al. (2022a)	70
Figura 49 – Fluxo do desenvolvimento do projeto	74
Figura 50 – Plataformas em pequena escala	76
Figura 51 – Veículo elétrico em escala reduzida	77
Figura 52 – Conjunto mecânico da direção do Jeep Bandeirantes	77
Figura 53 – Caixas de reduções do Jeep Bandeirantes Wrangler	78
Figura 54 – Componentes internos da caixa de redução	79
Figura 55 – Proposta de arquitetura	80
Figura 56 – Proposta da nova arquitetura para os veículos de pequeno porte	84
Figura 57 – Composição do sistema elétrico do Jeep Wrangler	84
Figura 58 – Diagrama de blocos do novo sistema de alimentação	86
Figura 59 – Baterias instaladas no piso do veículo	87
Figura 60 – Inversor de onda senoidal pura (DC/AC)	87
Figura 61 – Visão geral das redes elétricas CC e CA	88

Figura 62 – Principais componentes do sistema eletrônico do veículo	88
Figura 63 – Arquitetura em blocos da unidade de controle da direção	90
Figura 64 – Unidade de Controle da Direção com os componentes (a) e case de proteção (b)	91
Figura 65 – Principais componentes da unidade de controle longitudinal	92
Figura 66 – Componentes e pinos em um Módulo MCP2515	93
Figura 67 – A arquitetura em blocos da ECU de comunicação	94
Figura 68 – ECU de comunicação	95
Figura 69 – Parte frontal do VN8912 (com módulo plug-in VN8970)	96
Figura 70 – Diagrama em blocos da VN8912 interligando outras ECUs	97
Figura 71 – NVIDIA Jetson AGX Orin	98
Figura 72 – Case modelada em CAD 3D	99
Figura 73 – Jetson AGX Orin em fase de testes no veículo elétrico de pequena escala .	100
Figura 74 – Visão geral dos equipamentos embarcados no SAVIPS	101
Figura 75 – Ponte H BTS7960	103
Figura 76 – Potenciômetro e engrenagem adaptada a caixa de redução	103
Figura 77 – Diagrama elétrico do sistema de controle da direção	104
Figura 78 – Fluxograma deste algoritmo de calibração	104
Figura 79 – Diagrama de sequência do controle lateral	105
Figura 80 – Conjunto de estrutura impressa (a) e a estrutura instalada na caixa de redução traseira(b)	106
Figura 81 – Diagrama elétrico do sistema de controle de aceleração e frenagem	107
Figura 82 – Diagrama de sequência sistema de controle de aceleração e frenagem . . .	107
Figura 83 – Rede intra-veicular do veículo de pequena escala	109
Figura 84 – Comunicação entre os veículos de pequena escala e usuário	111
Figura 85 – Códigos das mensagens de comunicação	111
Figura 86 – Diagrama de sequência da rede interveicular	112
Figura 87 – Câmera estéreo ZED	113
Figura 88 – Câmera ZED fixada no veículo	115
Figura 89 – Visão da ZED2i	115
Figura 90 – RADAR ARS 404-21	116
Figura 91 – Sistema de coordenadas ARS 40X para clusters e objetos	117
Figura 92 – RARS 404-21 instalado no veículo de pequena escala	118

Figura 93 – Altura do Radar em relação ao solo	118
Figura 94 – Suporte para o conjunto de câmeras	120
Figura 95 – Campo de visão das câmeras (a) e câmeras instalada no veículo (b)	120
Figura 96 – Diagrama de blocos da arquitetura eletrônica do veículo	121
Figura 97 – Circuito Indoor	123
Figura 98 – Circuito Outdoor	123
Figura 99 – Veículos elétricos instrumentalizados	124
Figura 100–Veículo em testes nos circuitos Indoor e Outdoor	125
Figura 101–Arquitetura em blocos do Jeep Bandeirantes	125
Figura 102–Diagrama em blocos da arquitetura desenvolvida para os veículos elétricos .	126
Figura 103–Curvas das características da bateria 12V45Ah	127
Figura 104–Curvasde descarga da bateria em relação a velocidade do veículo	128
Figura 105–Curva de descarga da bateria da rede de corrente alternada	129
Figura 106–Testes das redes CC e CA	130
Figura 107–Imagem captura pela câmera ZED	130
Figura 108–Testes com o goniômetro	131
Figura 109–Variação angular das rodas diânteria em função do setpoint	132
Figura 110–Controle da velocidade em relação ao tempo	133
Figura 111–Métricas das rotações em comparação ao setpoint	134
Figura 112–Captura de tela da mensagem CAN via Osciloscópio	136
Figura 113–Captura de tela do envio/recebimento dos pacotes da rede interveicular . .	140
Figura 114–Pacotes enviados x pacotes recebidos	141
Figura 115–Teste de resposta das ECUs	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo do trabalhos relacionados	73
Tabela 2 – Características dos veículos em escala reduzida citados no Capítulo 3	75
Tabela 3 – Especificações do veículo elétrico em escala reduzida	78
Tabela 4 – Levantamento de consumo das correntes dos equipamentos	85
Tabela 5 – Características da bateria estacionaria de 45A	86
Tabela 6 – Características do inversor de onda senoidal pura	87
Tabela 7 – Principais especificações do Arduino Mega 2560	91
Tabela 8 – Especificações da plataforma ESP32	94
Tabela 9 – Dados técnicos VN8912	96
Tabela 10 – Principais especificações técnicas da Jetson AGX Orin	99
Tabela 11 – Quantidade de equipamentos/componentes embarcado em cada veículo . .	102
Tabela 12 – Descrição da rede intra-veicular do veículo em escala reduzida	109
Tabela 13 – Principais características da câmera estéreo ZED2i	114
Tabela 14 – Principais características do Radar ARS 404-21	117
Tabela 15 – Valores médios das correntes em relação a velocidade	128
Tabela 16 – Métricas do controle dos ângulos da direção do veículo de pequeno porte .	132
Tabela 17 – Métricas do controle da rotação do veículo de pequeno porte	134
Tabela 18 – Distância e tempo necessário até o veículo parar completamente	135
Tabela 19 – Métricas do barramento CAN 1	137
Tabela 20 – Métricas do barramento CAN 2	137
Tabela 21 – Métricas do barramento Ethernet	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

4WD	Four Wheel Drive
ABS	Antilock Braking System
AC	Alternating Current
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
ADS	Automated Driver Systems
AEB	Autonomous Emergency Braking
AEBS	Advanced Emergency Braking System
AHS	Automated Highway System
ARM	Advanced RISC Machines
ARS	Advanced Radar Sensor
AV	Automated Vehicle
AVR	Advanced Virtual RISC
BCM	Brake Control Motor
BSD	Blind-Spot Detection
CA	Collision Avoidance
CNN	Convolutional Neural Network
CTM	Central Timing Module
C-V2X	Cellular Vehicle-to-Everything
CAN	Controller Area Network
CC	Corrente Contínua
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DC	Direct current
DSRC	Dedicated Short- Range Communication

EAP	Project Analytical Structure
EBCM	Electronic Brake Control Module
EBS	Emergency Braking System
ECM	Engine Control Module
ECU	Electronic Control Unit
ERT	Extended Real Time
ESP-NOW	Espressif Systems Proprietary Network protocol
FCW	Forward Collision Warning
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FOV	Field of View
GCS	Ground Control Station
GEM	Generic Electronic Module
GM	General Motors
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Units
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
HiL	Hardware-in-the-Loop
HPC	High-Performance Computing,
I2C	Inter-Integrated Circuit
IA	Inteligência Artificial
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Intelligent Transportation Systems
KF	Extended Kalman filter

LDW	Lane Departure Warning
LDWS	Lane Departure Warning System
LiDAR	Light Detection And Ranging
LIN	Local Interconnect Network
LKA	Lane Keeping Assist
LKAS	Lane Keeping Assist System
LKS	Lane Keeping System
MCC	Motor Control Center
MCU	Unidade de Controle de Movimento
MEC	Multi-Access Edge Computing
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
OD	Object Detection
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONSV	Observatório Nacional de Segurança Viária
OpenCV	Open Source Computer Vision Library
PA	Park Assistance
PCI	Placa de Circuito Impresso
PCM	Powertrain Control Module
PD	Proporcional-Derivativo
PI	Proporcional-Integral
PIB	Produto Interno Bruto
PID	Proportional Integral Derivative
PWM	Pulse-Width Modulation
QoS	Quality of Service
RADAR	Radio Detecting and Ranging
RCA	Radio Corporation of America
RCS	Radar Cross Section

ROS	Robot Operating System
RPM	Rotações por minuto
RST	Reference Signal Tracking
SAE	Society of Automotive Engineers
SAVIPS	Small-Scale Autonomous Vehicle Infrastructure for Platoon
SCM	Suspension Control Module
SoC	system-on-a-chip
SoM	System-on-Module
SONAR	Sound Navigation and Ranging
SPI	Serial Peripheral Interface
SUS	Sistema Único de Saúde
TCM	Transmission Control Module
TCP	Transmission Control Protocol
TOPS	Trillions of Operations per Second
TSR	Traffic Sign Recognition
UML	Unified Modeling Language
USB	Universal Serial Bus
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-Everything
VA	Veículo Autônomo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	19
1.2	PROJETO SEGURAUTO	23
1.3	PERGUNTA DE PESQUISA	24
1.3.1	Hipótese	24
1.4	OBJETIVOS	24
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2	REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1	CONTEXTO HISTÓRICO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS	26
2.1.1	A evolução dos veículos autônomos	28
2.2	SISTEMAS AVANÇADOS DE ASSISTÊNCIA AO MOTORISTA - ADAS	30
2.2.1	Tipos de Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista - ADAS	32
2.2.2	Sistemas de Direção Autônoma - ADS	34
2.3	VEÍCULOS ORGANIZADOS EM PELOTÃO	35
2.4	UNIDADE DE CONTROLE ELETRÔNICO - ECU	38
2.4.1	Arquiteturas Elétricas das ECUs	40
2.4.1.1	<i>Arquitetura Centralizada</i>	40
2.4.1.2	<i>Arquitetura Distribuída</i>	41
2.5	REDE CAN	42
3	TRABALHOS RELACIONADOS	47
3.1	VEÍCULOS EM ESCALA REDUZIDA SEMI-AUTÔNOMOS	47
3.2	VEÍCULOS EM ESCALA REDUZIDA AUTOMATIZADOS	53
3.3	PLATOON DE VEÍCULOS EM ESCALA REDUZIDA	68
3.4	COMPARAÇÃO DOS TRABALHOS RELACIONADOS	71
4	SAVIPS: UMA INFRAESTRURA DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS EM PEQUENA ESCALA PARA PLATOON	74
4.1	FLUXO DO PROJETO SAVIPS	74
4.2	DEFINIÇÃO DA PLATAFORMA EM ESCALA REDUZIDA	75
4.3	DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA	79
4.3.1	Sensoriamento	80

4.3.2	Percepção	81
4.3.3	Navegação	81
4.3.4	Comunicação	82
4.3.5	Controle	82
4.3.6	Atuadores	83
4.4	SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO	84
4.5	DESENVOLVIMENTO DAS UNIDADES DE CONTROLE ELETRÔNICO	89
4.5.1	Unidade de Controle Lateral	90
4.5.2	Unidade de Controle Longitudinal	91
4.5.3	Unidade Eletrônica de Comunicação	93
4.5.4	Unidade Eletrônica de Gateway	95
4.5.5	Unidade Eletrônica de ADAS	97
4.6	INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS DESENVOLVIDOS	100
4.6.1	Arquitetura Embarcada	100
4.6.1.1	<i>Sistema de Controle da Direção</i>	102
4.6.1.2	<i>Sistema de Controle da Aceleração e Frenagem</i>	106
4.6.2	Rede Intra-Veicular	108
4.6.3	Rede Interveicular	110
4.7	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE PERCEPÇÃO	112
4.7.1	Sensores Estereoscópicos	112
4.7.1.1	<i>Câmera Estéreo ZED2i</i>	113
4.7.1.2	<i>RADAR ARS 404-21</i>	116
4.7.2	Visão Computacional	119
4.7.3	Visão Geral da Arquitetura Eletrônica Integrada	120
5	RESULTADOS	123
5.1	VISÃO GERAL	124
5.2	SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA	126
5.3	SISTEMA DE CONTROLE LATERAL	130
5.4	SISTEMA DE CONTROLE LONGITUDINAL	132
5.5	COMUNICAÇÃO INTRA-VEICULAR	135
5.6	COMUNICAÇÃO INTERVEICULAR	139
6	CONCLUSÃO	143
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	143

6.2	CONTRIBUIÇÕES	144
6.3	LIMITAÇÕES	144
6.4	TRABALHOS FUTUROS	145
	REFERÊNCIAS	147

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS) (OMS, 2018), os acidentes rodoviários estão entre as 10 causas mais comuns de morte em todo o mundo. De acordo com o Relatório Global de *Status* sobre Segurança no Trânsito de 2018 da OMS (OMS, 2018), cerca de 1,35 milhão de pessoas morrem e 50 milhões ficam feridas anualmente em todo o mundo devido a acidentes de trânsito. No Brasil, em 2022, a Confederação Nacional do Transporte (CNT) (CNT, 2021), registrou 64.452 acidentes nas rodovias federais, resultando em 5.391 vidas perdidas. Segundo o Observatório Nacional de Segurança Viária (ONSV) (ONSV, 2017), mais de 60% dos leitos do Sistema Único de Saúde (SUS) são ocupados por vítimas de acidentes de trânsito. A CNT estimou que os acidentes nas rodovias federais brasileiras custaram cerca de R\$ 60 bilhões aos cofres públicos apenas em 2020. É importante ressaltar que a maioria dos acidentes de trânsito é causada por erros humanos, como imprudência, uso de álcool ou tempo de reação do condutor (FAGNANT; KOCKELMAN, 2015).

Diante desses números alarmantes e da necessidade urgente de modernização da interação entre motoristas e veículos, universidades, empresas de tecnologia e do setor automotivo estão direcionando seus esforços para o desenvolvimento de sistemas que possam aprimorar a condução tanto em áreas urbanas quanto em rodovias, através da incorporação de tecnologias de ponta, como sistemas embarcados, redes de comunicação sem fio e Inteligência Artificial (IA) (RIZZO, 2022). Essa combinação tecnológica possibilitou o surgimento de diversas aplicações voltadas para o auxílio à condução, melhora na percepção e até mesmo a condução autônoma.

Nesse sentido, os sistemas embarcados de última geração, com sua capacidade computacional avançada e compatibilidade com outras tecnologias, têm se mostrado fundamentais para o desenvolvimento de dispositivos que possam aprimorar a condução, como as Unidades de Controle Eletrônico (*Electronic Control Unit*, ECU), presente em veículos automotivos (BARROS; CAVALCANTE, 2010). Dessa forma, a utilização dessas tecnologias tem se tornado cada vez mais importante para minimizar os impactos negativos dos acidentes de trânsito, proporcionando um tráfego mais seguro e eficiente nas estradas e nas cidades.

As ECUs, cada vez mais presentes em veículos modernos, tornaram-se mais complexas ao longo dos anos. Embora tenham sido introduzidas na década de 1970 com a função de controlar a injeção eletrônica, hoje existem dezenas desses dispositivos, cada um com funções

específicas, como o controle de multimídia e climatização, ou o acionamento de atuadores para o funcionamento do motor (CONTESINI, 2017).

Além disso, a tendência atual dos veículos conectados tem exigido ainda mais poder computacional embarcado, já que é necessário interconectar várias ECUs através de um ou mais barramentos de comunicação, como o barramento CAN (*Controller Area Network*). Essas mudanças tornaram a aplicação de tecnologias de ponta, como sistemas embarcados, redes de comunicação sem fio e inteligência artificial, essenciais para o aprimoramento da condução em áreas urbanas e rodovias.

As ECUs têm um papel fundamental na implementação dos Sistemas de Transporte Inteligente (*Intelligent Transportation Systems*, ITS), sendo projetadas para trabalhar com sistemas eletrônicos avançados, como Inteligência Artificial (IA), *Internet of Things* (IoT) e Veículo Autônomo (VA). Essas unidades eletrônicas permitem a comunicação e troca de informações entre veículos e infraestruturas, permitindo que os veículos sejam controlados de forma mais eficiente e tornando a viagem mais segura e confortável para os passageiros. Além disso, as ECUs podem coletar dados sobre o funcionamento do veículo e enviá-los para sistemas de análise, que podem usá-los para melhorar a eficiência e segurança dos ITS.

Conforme Singh e Gupta (2015) os transportes inteligentes trazem serviços e estratégias para controlar interrupções de mobilidade, evitar colisões em cruzamentos, sincronizar veículos de um *Platoon* (Pelotão de Veículos Autônomos), fazer pagamentos eletrônicos em pedágios, pesagem de caminhões em movimento, entre outras. Tudo isso é possível graças à integração dos diferentes atores do trânsito urbano e rodoviário, permitindo que veículos, infraestrutura, pedestres, ciclistas, transporte público e centros de controle de tráfego interajam em tempo real, o que aumenta a eficiência do tráfego.

Segundo Tientrakool, Ho e Maxemchuk (2011), as aplicações dos Sistemas de Transporte Inteligentes baseiam-se na comunicação Veículo-para-Veículo (*vehicle-to-vehicle*, V2V), o que pode melhorar a eficiência do tráfego veicular em até 27,3%, reduzindo as distâncias horizontais e laterais entre os veículos e aumentando a capacidade viária. Desta forma, os transportes inteligentes oferecem uma ampla variedade de benefícios para o transporte particular e público, desde facilitar o planejamento de viagens e a seleção de modais até fornecer melhorias na segurança pública ao gerenciar os sistemas de transporte durante incidentes, emergências e desastres naturais (NOYES, 2020).

Um ponto importante no contexto dos ITS são os Veículos Autônomos, uma vez que sua tecnologia pode ser integrada a outros sistemas de transporte para melhorar a eficiência,

segurança e sustentabilidade do transporte em geral. Segundo Bohm e Häger (2015), os veículos autônomos são capazes de conduzir sem a necessidade de intervenção humana, sendo comandados por uma IA responsável por gerenciar todos os sensores e atuadores presentes no veículo.

Os VAs são equipados com diversos dispositivos, como câmera frontal, sensores de localização, GPS (*Global Positioning System*), LiDAR (*Light Detection And Ranging*), SONAR (*Sound Navigation and Ranging*), entre outros, que permitem que esses veículos gerem uma base de dados sobre o ambiente ao redor e tomem decisões em tempo real para evitar colisões e seguir as leis de trânsito. Além disso, os sistemas de Direção Automatizada (ADS) e Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS) são tecnologias importantes para os veículos autônomos, pois ajudam a tomar decisões durante a viagem e aprimorar os sistemas de segurança, eficiência energética e conectividade (KUKKALA et al., 2018; GALVANI, 2019; BADUE et al., 2021; TYAGI; ASWATHY, 2021; ALI et al., 2021; KHAN et al., 2022a; KHAN et al., 2022b; CIGNO; SEGATA, 2022; BAYOUDH et al., 2021; NIDAMANURI et al., 2021).

Uma área de grande interesse é o Pelotão (*Platoon*), uma técnica de condução autônoma que permite que vários veículos autônomos viajem juntos em formação, como se fossem um único veículo, mantendo velocidades e distâncias relativas controladas dinamicamente. Essa técnica aumenta a segurança e otimiza a capacidade da rodovia e a eficiência de combustível (SHIWAKOTI; STASINOPOULOS; FEDELE, 2020; STURM et al., 2020; BALADOR et al., 2022).

No entanto, é necessário um desenvolvimento e teste contínuos de veículos adequados para aplicações ITS, especialmente para o *Platoon*, a fim de identificar problemas e limitações dos métodos utilizados. Quando os veículos são testados em cenários do mundo real, eles são expostos a condições descontroladas que podem levar a acidentes. Além disso, o teste real pode ser caro e demorado devido a fatores como logística complexa, disponibilidade de recursos e necessidade de um ambiente de testes adequado. Esses fatores podem atrasar ou impedir muitos experimentos com veículos autônomos. Portanto, a utilização de modelos em escala reduzida pode ser uma solução viável para testes, em comparação com veículos em escala real, permitindo uma investigação mais aprofundada com menor necessidade de recursos (BECHTEL et al., 2018; AMADO et al., 2019; RUPP et al., 2019; KEMSARAM; DAS; DUBBELMAN, 2020; BAARS; HELLENDORRN; ALIREZAEI, 2021; SHAN et al., 2020; LEE et al., 2022b).

Segundo GREGO (2016), as vantagens da utilização de veículos em escala reduzida para testar novas tecnologias incluem:

- **Segurança:** Os testes em veículos autônomos em pequena escala são mais seguros do que testar veículos em escala real, pois minimiza o risco de acidentes e lesões;
- **Facilidade de controle:** Os veículos de escala reduzida são mais fáceis de controlar, pois têm menos peso e dimensões, o que facilita a realização de testes e a análise dos resultados;
- **Flexibilidade:** Veículos de pequeno porte são mais flexíveis e adaptáveis, permitindo testes em diferentes cenários e condições, desde pistas de testes até laboratórios;
- **Economia:** Os testes em veículos reduzidos são mais econômicos do que o teste em veículos em tamanho real, pois eles exigem menos recursos, como combustível, manutenção e reparos;
- **Agilidade:** Os testes em veículos de pequeno porte são muito mais ágeis do que em veículos de grande porte, pois demandam menos tempo de preparação e execução dos testes, o que permite a realização de um número mais significativo de testes em menos tempo.

De acordo com GREGO (2016), embora o uso de modelos em escala reduzida para avaliação de funções ADAS no *Platoon* apresente diversos benefícios, tais como a possibilidade de testar sistemas de sensores, controle de velocidade e distância relativa, e algoritmos de processamento de imagem, é importante destacar que essa abordagem pode não refletir completamente os efeitos físicos, como arrasto aerodinâmico, inércia mecânica ou atrito de um veículo em escala real. Essas limitações podem impactar os resultados e a precisão das avaliações. No entanto, essa infraestrutura é uma solução para avaliar essas tecnologias de forma controlada e segura antes de sua implementação em escala real, visando garantir a segurança e a eficiência financeira dessas tecnologias (GREGO, 2016).

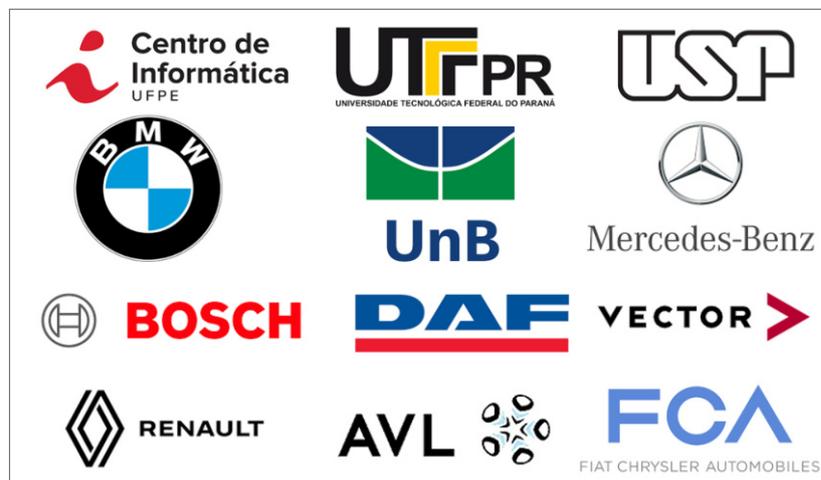
Portanto, a justificativa para este trabalho é a necessidade de avaliar as tecnologias de ADAS e ADS de forma controlada e segura antes de sua implementação em veículos de escala real, visando garantir a segurança e a eficiência financeira dessas tecnologias. A infraestrutura veicular em escala reduzida permitirá aos pesquisadores capacitar mão de obra especializada e desenvolver soluções para veículos autônomos e *Platooning* com menor custo financeiro. Além disso, a utilização de uma infraestrutura veicular em escala reduzida possibilitará a realização de testes mais precisos e repetitivos, permitindo uma análise mais aprofundada das tecnologias desenvolvidas. Com isso, será possível identificar possíveis problemas e limitações

dessas tecnologias em um ambiente controlado e seguro antes de sua aplicação em veículos de escala real, reduzindo significativamente os custos e riscos associados ao desenvolvimento de tecnologias para veículos autônomos e *Platooning*.

1.2 PROJETO SEGURAUTO

Este trabalho foi realizado em colaboração com o projeto de pesquisa SegurAuto, composto por um grupo de empresas do setor automotivo focadas em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) de Sistemas de Segurança Veicular, e pelos Institutos de Ciência e Tecnologia (ICTs), como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Empresas e ICTs participantes de SegurAuto



Fonte: O autor (2023)

O SegurAuto faz parte do programa ROTA 2030¹, cujo objetivo principal é incentivar projetos de P&D em toda a cadeia automotiva e é desenvolvido no âmbito da chamada CONSEV: Condução Segura e Eficiente de Veículos, da Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUN-DEP). O projeto visa desenvolver e implementar funções ADAS e de comunicação veicular.

Neste contexto, este trabalho colabora com o projeto SegurAuto por meio da criação de uma plataforma veicular em escala reduzida, a qual será utilizada para testes e análises das funções ADAS e ADS. Todas as atividades práticas deste trabalho foram realizadas no Laboratório de Inovação para Cidades Inteligentes (LIVE) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

¹ O programa ROTA 2030 é uma iniciativa governamental brasileira que incentiva a pesquisa, desenvolvimento e inovação na indústria automotiva, visando a competitividade e sustentabilidade do setor.

1.3 PERGUNTA DE PESQUISA

Como uma infraestrutura veicular em escala reduzida pode ser desenvolvida e utilizada para avaliar de forma eficiente e segura as funções ADAS para o *platooning* semelhante a veículos em escala real?

1.3.1 Hipótese

Uma infraestrutura veicular em pequena escala pode ser desenvolvida e utilizada para avaliar de forma eficiente e segura as funções de ADAS para um pelotão de veículos autônomos. Isso é possível através do uso de sensores, como LiDAR, radar, câmera estéreo e unidades de processamento, além de uma rede de comunicação inter e intra-veicular compatível para aplicações de *platooning* em um modelo em escala real.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de protótipos de veículos elétricos autônomos em escala reduzida que permita a realização de avaliações das funções ADAS em um sistema *Platoon*.

Os objetivos específicos são:

- Montar a estrutura física de um veículo em escala reduzida;
- Projetar e desenvolver circuitos condicionadores, de comunicação, controle e aquisição de dados;
- Instrumentalizar veículos elétricos em escala reduzida;
- Realizar testes de infraestrutura em veículos de pequena escala;
- Replicar o sistema desenvolvido em dois veículos elétricos em escala reduzida, permitindo assim a avaliação das funções ADAS em um sistema *Platoon*.

Dessa forma, os veículos elétricos autônomos em escala reduzida oferecerão aos usuários a possibilidade de conduzir verificações e examinar informações de ADAS implementadas em um sistema *Platoon*, sendo uma opção econômica e segura em comparação com a utilização de veículos em tamanho real.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em capítulos, sendo este o primeiro, que abrange a introdução, justificativa e objetivos. Os fundamentos teóricos são abordados no Capítulo 2, o qual se divide em cinco seções que tratam de veículos autônomos, sistemas de ADAS, conceitos e aplicações do *Platoon*, importância das ECUs, e definições e aplicações da rede CAN. A revisão bibliográfica utilizada no desenvolvimento do projeto é apresentada no Capítulo 3. O Capítulo 4, é detalhada a estrutura proposta para o veículo elétrico autônomo em pequena escala. Os testes realizados e os resultados obtidos são descritos no Capítulo 5. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais, as contribuições do trabalho e possíveis direcionamentos para futuras pesquisas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão apresentados os fundamentos teóricos que servem de base para a pesquisa, com as definições necessárias para a compreensão geral do trabalho. Na Seção 2.1, será apresentado o contexto histórico, bem como a evolução dos veículos autônomos. Na Seção 2.2, serão descritos o funcionamento e os modelos dos sistemas ADAS e ADS. Os conceitos de *Platoon* serão abordados na Seção 2.3. Na Seção 2.4, serão descritos os conceitos e aplicações das ECUs em um veículo. Por fim, na Seção 2.5, serão abordados os conceitos e aplicações da rede CAN

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS

A história dos veículos autônomos remonta ao início do século XX, quando foram dados os primeiros passos na direção autônoma. Um marco nesse sentido foi o desenvolvimento de um protótipo chamado "*The American Wonder*", construído por Francis Houdina. Esse veículo utilizava ondas de rádio e era controlado por um segundo veículo que o seguia. Essa inovação pioneira foi um importante avanço para a condução autônoma (KRÖGER, 2016).

Os primeiros indícios de uma corrida contra o tempo em questão de pesquisa sobre modernização veicular aconteceu na feira mundial que aconteceu na década de 1930 na cidade de Nova Iorque nos Estados Unidos da América. Uma parte que precisa ser destacada nessa feira é a pesquisa e exposição da Futurama, patrocinada pela empresa do seguimento automobilístico *General Motors* (GM) conhecida até os dias atuais, onde foi apresentado o Sistema Automatizado de Rodovias (*Automated Highway Systems*, AHS) (SINGULARITY, 2018).

Porém com, a chegada da Segunda Guerra Mundial, esse projeto teve que ser interrompido, pois as pesquisas e investimentos se voltaram para o conflito. Com o fim da guerra, algumas tecnologias utilizadas para ações em combate puderam ser utilizadas no desenvolvimento de ADAS, por exemplo, o *Global Positioning System* (GPS) (LITMAN, 2017).

No ano de 1953, com a parceria entre as empresas GM e a *Radio Corporation of America* (RCA), foram desenvolvidos os carros Firebird I, Firebird II e Firebird III. Apesar das limitações tecnológicas desses veículos sua capacidade foi comemorada na época, pois foram capazes de se locomoverem sozinhos (LITMAN, 2017).

Conforme (STANEK et al., 2018), o Firebird II, exibido na Figura 2, era capaz de se locomover

sozinho, desde que estivesse interligado a uma torre de rádio para receber orientações sobre sua locomoção. Durante a condução, a torre de rádio enviava comandos para orientar o condutor a posicionar o veículo, e a partir desse ponto, todas as funções de coordenação e condução do veículo eram executadas de forma autônoma.

Figura 2 – Veículo GM Firebird II



Fonte: (LITMAN, 2017)

Seguindo o processo de modernização, e com objetivo de superar e reparar as limitações do veículo anterior, a montadora GM lança no início do ano de 1958 o modelo Chevrolet Impala, ilustrado na Figura 3, considerado o primeiro carro capaz de realmente se locomover por conta própria, ou seja, sem a necessidade de um condutor. Esse veículo percorreu um percurso de aproximadamente $1,6\text{km}$ de distância com várias curvas. Todo o percurso foi realizado com perfeição pelo Impala, contudo, a sua condução teve o auxílio de um cabo elétrico (MAURER et al., 2016).

Figura 3 – Veículo Impala desenvolvido pela GM



Fonte: (FURLANI, 2017)

Com o passar dos anos, após o lançamento do Chevrolet Impala, houve um grande crescimento do mercado automobilístico no mundo todo, várias empresas entraram nesse setor em busca de fazer com que cada ano um novo veículo com novas tecnologias pudessem entrar nas rodovias. Na década de 2010, empresas como a *Google*¹ (Figura 4) e *Apple* assumiram o de-

¹ Disponível em: <https://waymo.com>.

safio da criação de veículos autônomos juntamente com as empresas automobilísticas, fazendo com que, atualmente, praticamente todos os grandes fabricantes de automóveis tenham seu próprio programa Veículos Autônomos (*Automated Vehicle, AV*) (SOUSA et al., 2018).

Figura 4 – Protótipo Toyota Prius veículo autônomo da Google



Fonte: (SOUSA et al., 2018)

Do ponto de vista empresarial, surgiram novos modelos de negócios para o setor de transportes, tais como serviços de compartilhamento de carros e de transporte urbano, a exemplo das empresas UBER e Lyft. Sousa et al. (2018) acreditam que uma combinação de condução autônoma com os modelos de negócios emergentes pode trazer um novo paradigma de mobilidade que é capaz de alterar significativamente o atual modelo de propriedade de automóveis, substituindo a posse por serviços *on-demand*, bem como contribuir para uma integração entre sistemas de transporte público e meios de transporte não motorizados, combinando-os de forma eficiente com serviços comerciais, preenchendo desta forma as lacunas entre os meios de transporte.

2.1.1 A evolução dos veículos autônomos

Após as primeiras experiências bem-sucedidas com veículos autônomos, o setor recebeu grandes investimentos financeiros. A Comissão das Comunidades Europeias foi a primeira a financiar um grande projeto de desenvolvimento de veículos autônomos, o projeto Eureka PROMETHEUS, que durou de 1987 e 1995 (COPPOLA; SILVESTRI, 2019).

No ano de 2005 foi realizada uma grande competição entre carros autônomos, a Challenger DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*), a qual o veículo Stanley (Figura 5), da equipe Stanford Racing Team foi o vencedor desta competição. Esta competição teve a participação de várias equipes, porém apenas seis conseguiram terminar a prova por completo, sendo esta competição um marco para os veículos autônomos. (ATKINS, 2016).

Figura 5 – Veículo Stanley vencedor do DARPA Grand Challenge 2005



Fonte: (ATKINS, 2016)

No Brasil, a Universidade de São Paulo (USP) da cidade de São Carlos desenvolveu o CaRINA, um veículo autônomo inteligente capaz de navegar em ambiente urbano (FERNANDES et al., 2014). O projeto foi implementado em um veículo Fiat Palio Adventure Dualogic, que possui um controle computacional de esterçamento, aceleração e freio, permitindo o controle total do veículo por um computador. A Figura 6 mostra o carro CaRINA.

Figura 6 – Fiat Palio Adventure Dualogic (CaRINA)



Fonte: (FERNANDES et al., 2014)

A configuração padrão de sensores utilizada no projeto CaRINA é composta por um LiDAR Velodyne HDL-32E, uma câmera estéreo PointGrey Bumblebee2, um GPS Septentrio AsteRx2i e uma IMU Xsens MTi.

Em 2007, o Grupo de Pesquisa em Desenvolvimento de Veículos Autônomos (GPDA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) iniciou o projeto Cadu (como pode ser visto na Figura 7), que apresenta diversas características inovadoras além da capacidade de direção autônoma.

O veículo é capaz de responder a comandos de voz e *joystick* para acelerar, frear e girar o volante. Além disso, ele é capaz de identificar buracos, lombadas e outros obstáculos na via, permitindo que ele adapte seu trajeto original, se necessário (SABBAGH, 2019).

Figura 7 – Veículo autônomo desenvolvido pela UFMG



Fonte: (SABBAGH, 2019)

O Cadu possui dispositivos externos, como câmeras, sensores ultrassônicos, GPS, acelerômetros e giroscópios. Com essas tecnologias, o Brasil está cada vez mais inserido no processo de desenvolvimento de veículos autônomos (SABBAGH, 2019).

De acordo com Stanek et al. (2018), após anos de pesquisas e desenvolvimento no campo de veículos autônomos, hoje já é possível encontrar carros que não precisam de um motorista para se locomover. No entanto, ainda há muitas funcionalidades que precisam ser aprimoradas para que esses veículos possam ser considerados realmente autônomos. Sendo assim, as empresas buscam melhorias em seus sistemas de direção servo controlada, controle digital, automatização dos veículos, controladores PID, conversores A/D (Analogico/Digital), teorema de amostragem de Nyquist², microcontrolador, motores de corrente contínua, controladores de velocidades de motores CC, servomotor e ADAS.

É importante destacar que o desenvolvimento de sistemas de segurança e monitoramento é uma das principais preocupações em relação aos veículos autônomos, com o intuito de garantir a segurança dos passageiros e demais usuários da via. Além disso, a busca por soluções mais eficientes e econômicas também é uma prioridade no desenvolvimento desses veículos.

2.2 SISTEMAS AVANÇADOS DE ASSISTÊNCIA AO MOTORISTA - ADAS

Estudos recentes da OMS indicam que 1,35 milhões de mortes ocorrem a cada ano devido a acidentes de trânsito. Esses incidentes representam um custo global anual de US\$ 518 bilhões, o que corresponde a aproximadamente 3% do PIB (Produto Interno Bruto) de todos os países do mundo. Esses dados contribuem para explicar a crescente demanda por soluções de sistemas de segurança rodoviária, especialmente em relação ao ADAS (OMS, 2018).

² O teorema de amostragem de Nyquist estabelece que um sinal contínuo deve ser amostrado com uma taxa de pelo menos duas vezes a sua frequência máxima para evitar perda de informações e aliasing.

De acordo com Ball e Tang (2019), os Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS) desempenha um papel cada vez mais relevante em veículos autônomos, baseado em dois pilares fundamentais: *Machine Learning* (Aprendizagem de Máquina) e computação embarcada. Algoritmos avançados, focados em *machine learning* permitem que o ADAS detecte objetos, obstáculos, outros veículos, pedestres e faixas, além de estabelecer estimativas de trajetórias e intenções de objetos dentro do raio de ação do veículo (BALL; TANG, 2019).

Hasenjäger e Wersing (2017) descrevem exemplos desses sistemas, como Controle de Cruzeiro Adaptativo (*Adaptive Cruise Control, ACC*), Aviso de Colisão Frontal (*Forward Collision Warning, FCW*), Aviso de Saída de Pista (*Lane Departure Warning, LDW*) e Assistência para Mudança de Faixa (*Lane Keeping Assist, LKA*). Eles constataram que esses sistemas se tornaram mais comuns nos últimos anos, aplicados em outros tipos de modelos de carro além dos de classe de luxo, tanto como características opcionais quanto como padrão (ABRAHAM; REIMER; MEHLER, 2017). A SAE (SAE, 2018) categoriza seis níveis de direção automatizada, ilustrados na Figura 8:

- **Nível 0 (Sem automação):** O motorista humano executa todas as tarefas de condução. Um ADAS pode fornecer informações ao motorista e o ajudar a monitorar o ambiente ao redor ou a sua própria posição, o auxílio é geralmente acústico e visual;
- **Nível 1 (Assistência ao motorista):** Um ADAS no veículo pode auxiliar o motorista humano em sub-tarefas na condução longitudinal ou lateral, mas não nas duas simultaneamente, com a expectativa de que o motorista execute o restante da condução;
- **Nível 2 (Automação parcial):** Um ADAS pode, por si só, controlar a direção e a frenagem/aceleração simultaneamente em algumas circunstâncias, o motorista humano deve monitorar o ambiente de direção em todos os momentos e realizar o restante da condução;
- **Nível 3 (Automação condicional):** Um ADS no veículo pode executar todos os aspectos da condução em algumas circunstâncias, entretanto o condutor humano deve estar sempre pronto assumir o controle do veículo;
- **Nível 4 (Alta automação):** Um ADS no veículo pode realizar todas as tarefas de condução, o humano não precisa monitorar o ambiente de direção. O motorista pode ter a opção de assumir o controle do veículo;

- **Nível 5 (Automação completa):** Um ADS no veículo pode fazer toda a direção em todas as circunstâncias, os ocupantes humanos são apenas passageiros e não precisam estar envolvidos na condução.

Figura 8 – Níveis de automação definidos pela SAE J3016 APR2021(SAE, 2018)

0	1	2	3	4	5
					
SEM AUTOMAÇÃO	ASSISTÊNCIA DE CONDUÇÃO	AUTOMAÇÃO PARCIAL	AUTOMAÇÃO CONDICIONAL	ALTA AUTOMAÇÃO	AUTOMAÇÃO COMPLETA
Autonomia zero e o motorista executa tarefas de direção	O veículo é controlado pelo motorista, mas alguns recursos de assistência à direção podem ser incluídos no veículo	Funções automatizadas combinadas do veículo, como aceleração e direção, mas o motorista deve permanecer envolvido com a tarefa de dirigir e monitorar o ambiente	O motorista é necessário, mas não precisa monitorar o ambiente. O motorista deve estar pronto para assumir o controle do veículo sem aviso prévio	O veículo é capaz de executar a função de direção sob certas condições. O motorista pode ter a opção de controlar o veículo	O veículo é capaz de realizar todas as funções de condução em todas as condições. O motorista pode ter a opção de controlar o veículo

Fonte: O autor (2023)

Quando observamos os diferentes níveis de veículos autônomos, é possível fazer uma comparação entre os sistemas ADAS, que abrangem os níveis 0 ao 2, com os Sistemas de Direção Automatizada (*Automated Driving System, ADS*), nos níveis 3 a 5. Os veículos equipados com ADAS possuem recursos que auxiliam os motoristas, como frenagem automática de emergência e controle de cruzeiro adaptativo. No entanto, nesses casos, não há um controle total do veículo. Por outro lado, nos veículos com ADS, eles podem operar sem a influência de um condutor humano.

2.2.1 Tipos de Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista - ADAS

O ADAS é projetado para melhorar o conforto ao dirigir, ajudando a remodelar os comportamentos de direção e prevenindo acidentes de trânsito, proporcionando maior segurança ao volante. Com o desenvolvimento da tecnologia e a redução de preços dos sensores e de *hardware*, o ADAS tornou-se um equipamento padrão e indispensável incorporado nos veículos atuais. O objetivo principal deste sistema de assistência é fornecer informações externas, alertar os motoristas a tempo e até mesmo oferecer suporte adicional aos veículos (LI et al., 2021).

O aumento no número de ECUs e a integração de vários tipos de sensores, como câmeras, LiDAR, RADAR e sensores ultrassônicos, viabilizaram uma maior capacidade computacional,

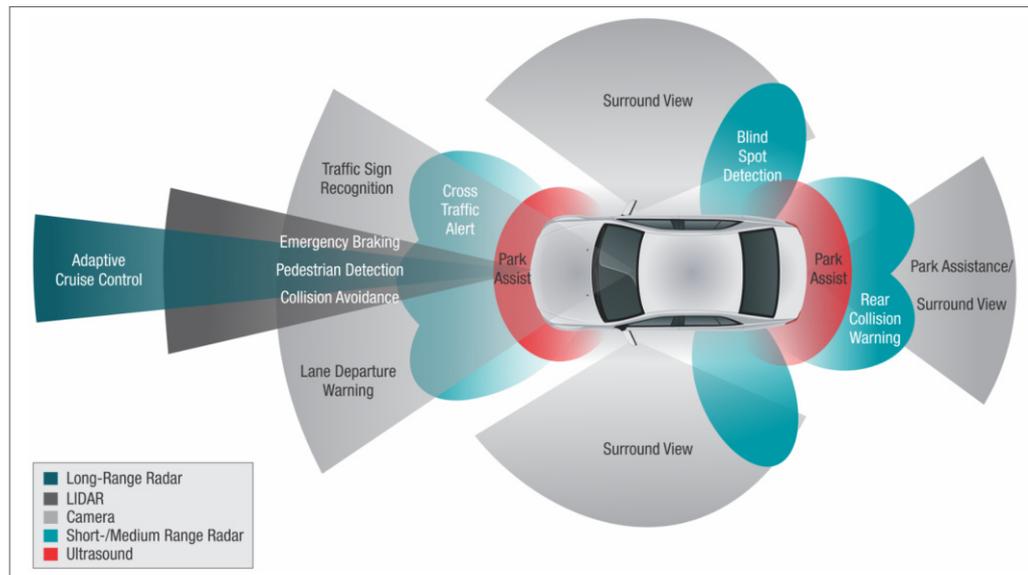
possibilitando o desenvolvimento de diversas soluções ADAS, como ilustrado na Figura 9. Ela também evidencia a diferença de alcance entre os sistemas ADAS (KUKKALA et al., 2018). Entre os sistemas ADAS mais conhecidos estão:

- **Detecção de Ponto Cego (*Blind-Spot Detection, BSD*):** Permite a detecção de veículos nos pontos cegos do motorista, alertando a presença desses para evitar uma colisão;
- **Sistema de Aviso de Saída de Faixa (*Lane Departure Warning System, LDWS*):** É utilizado para detectar se o veículo está cruzando as linhas que delimitam a faixa de rodagem, alertando o condutor sobre a mudança de faixa;
- **Controle de Cruzeiro Adaptativo (*Adaptive Cruise Control, ACC*):** Tem a função de manter uma distância segura dos veículos à frente;
- **Reconhecimento de Sinais de Trânsito (*Traffic Sign Recognition, TSR*):** Alerta sobre as condições da estrada ou perigos indicados na via, além de evitar multas por excesso de velocidade;
- **Assistência ao Estacionamento (*Park Assistance, PA*):** Auxilia o motorista durante o estacionamento emitindo alerta sonoro relativo à proximidade do veículo aos obstáculos;
- **Detecção de Objetos (*Object Detection, OD*):** Detecta objetos dentro e no entorno da via, tais como: pedestres, animais, veículos e obstáculos;
- **Frenagem de Emergência Autônoma (*Autonomous Emergency Breaking, AEB*):** Realiza a frenagem de emergência de forma autônoma para evitar uma colisão iminente.

Kukkala et al. (2018) apresentam uma pesquisa detalhada sobre os diferentes tipos de ADAS e uma visão geral dos sensores usados nesses modelos. Eles discorrem sobre a classificação de ADAS com base nos diferentes tipos de sensores utilizados tanto para monitoramento interno quanto externo, com foco maior em ADAS baseados em visão.

Explicitam a importância das técnicas de fusão de sensores e sistemas de comunicação avançados, como V2X (que representa uma classe de sistemas de comunicação que fornece ao veículo a capacidade de trocar informações com outros sistemas no ambiente), e sua importância para os veículos autônomos.

Figura 9 – Exemplos de aplicações de sensores em um ADAS



Fonte: (KUKKALA et al., 2018)

Além disso, Kukkala et al. (2018) também mencionam desafios importantes que precisam ser superados pelos ADAS, como a mudança de condições ambientais e climáticas, a eficiência energética, as restrições geoespaciais (já que nem todos os países aderem aos mesmos sinais e convenções de estrada de maneira uniforme) e a segurança contra *hackers*.

2.2.2 Sistemas de Direção Autônoma - ADS

Os ADS representam uma área de pesquisa muito complexa e ativa, com um grande impacto na sociedade. À medida que esses sistemas são propostos para implantação em um ambiente real, torna-se evidente a necessidade de testá-los para evitar possíveis consequências fatais.

Segundo Laurent et al. (2020), é necessário dedicar uma atenção especial à precisão dos componentes do *software* que compõem o ADS. Uma vez que os testes com dados reais de direção são inviáveis, os testes são realizados por meio de simulações virtuais.

Um veículo totalmente autônomo deve ser capaz de detectar sua localização, obstáculos e tomar decisões sobre seu próximo movimento. De acordo com Yaakub e Alsibai (2018), existem quatro subsistemas básicos que permitem que um veículo se mova autonomamente: sistema de identificação de posição e navegação, sistema de análise do ambiente circundante, sistema de planejamento de movimento e sistema de controle de trajetória.

Conforme descrito por Herráez (2020), essa operação é caracterizada por um ciclo que

começa com a atuação dos sensores, que capturam informações sobre o ambiente e o estado do veículo. Em seguida, a percepção da posição do veículo em relação aos obstáculos é obtida, e o planejamento do caminho e movimento é traçado. A rota desejada é então computada e enviada ao controlador do veículo.

Portanto, é compreensível que o primeiro passo para alcançar a autonomia em veículos seja a capacidade de reconhecer o ambiente, conforme afirmado por Herráez (2020), o que é essencial para posicionar o veículo e detectar obstáculos. Para isso, é necessário o uso de uma variedade de sensores, como o LiDAR, câmeras, RADAR, GPS, IMU e codificadores de odometria. Um exemplo de veículo que utiliza esses sensores é o desenvolvido pela Toyota em 2017, ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Versão modificada pela Toyota do Lexus RX 450h



Fonte: (YAAKUB; ALSIBAI, 2018)

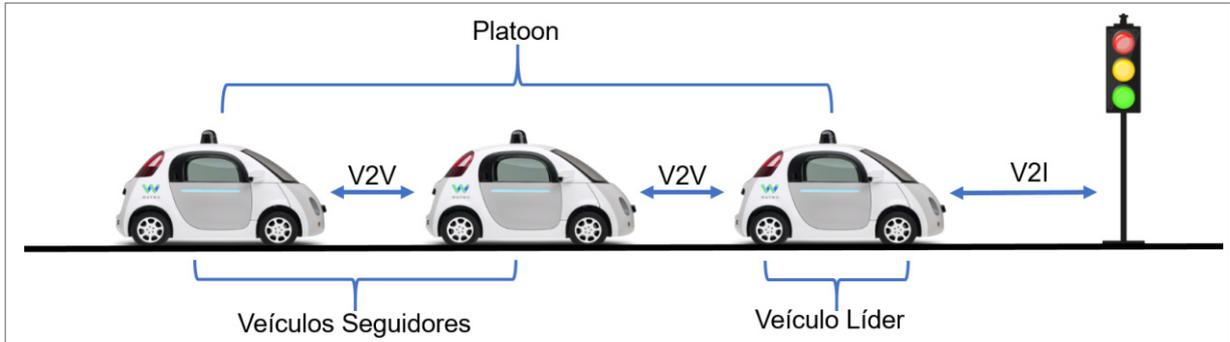
2.3 VEÍCULOS ORGANIZADOS EM PELOTÃO

O pelotão de carros autônomos (*Platoon*), também conhecido como formação de carros autônomos ilustrado na Figura 11, é uma técnica de condução automatizada em que uma série de dois ou mais veículos viajam em fila, com velocidade e distância entre os veículos controladas dinamicamente. O objetivo dessa técnica é permitir que os veículos trafeguem juntos em uma formação controlada e segura, otimizando a capacidade da rodovia e a eficiência de combustível (CHEN et al., 2021; LI et al., 2021).

Para controlar o sistema, utiliza-se o primeiro carro do pelotão, chamado de carro líder, como referência. O carro líder é o veículo que lidera o pelotão e é responsável por estabelecer a velocidade e a distância entre os veículos. Ele é equipado com sensores e tecnologias de comunicação para interagir com os demais veículos do pelotão. Dessa forma, todas as ações realizadas pelo carro líder são replicadas nos demais carros do *Platoon*. Os veículos seguintes

seguem automaticamente o carro da frente, ajustando sua velocidade e distância para manter a formação controlada e segura (SHEN et al., 2022).

Figura 11 – Exemplo de um pelotão de veículos



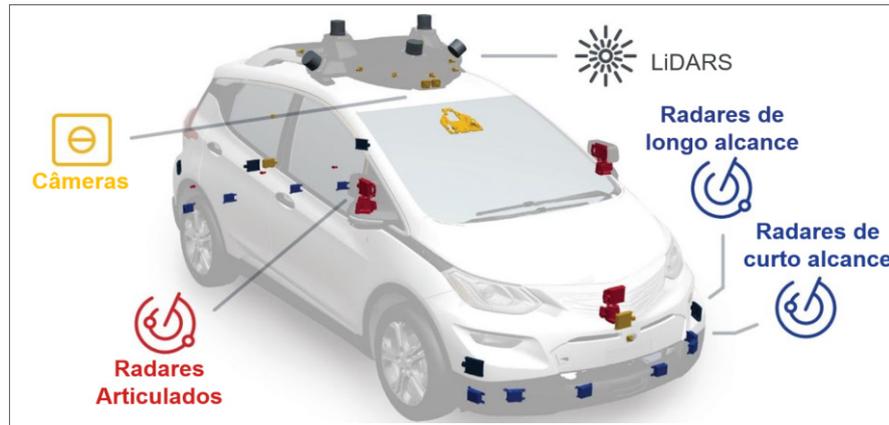
Fonte: O autor (2023)

A comunicação é uma das principais características do pelotão de carros autônomos. Existem dois tipos de comunicação usados nessa técnica: a comunicação Veículo a Veículo (*Vehicle-to-Vehicle*, V2V) e a comunicação Veículo a Infraestrutura (*Vehicle-to-Infrastructure*, V2I). A comunicação V2V permite que os veículos troquem informações entre si, como a posição, velocidade e aceleração, para poderem se ajustar e manter a formação. Já a comunicação V2I permite que os veículos recebam informações do ambiente ao redor, como o estado do trânsito, a presença de obstáculos e as condições meteorológicas. Essas informações ajudam os veículos a se adaptarem às condições de condução e a tomar decisões mais precisas (MIAO; LI; JIANG, 2019).

De acordo Oliveira, Pereira e Ferreira (2019) para a implementação do pelotão de carros autônomos, são utilizados diferentes protocolos de comunicação, como o *Dedicated Short-Range Communication* (DSRC) e o *Cellular Vehicle-to-Everything* (C-V2X). O DSRC é um protocolo que utiliza ondas de rádio de curto alcance para a comunicação entre veículos e infraestrutura, enquanto o C-V2X é um protocolo que utiliza a rede celular para a comunicação entre veículos e infraestrutura.

Além disso, para o correto funcionamento do sistema de pelotão de carros autônomos, são empregados diferentes tipos de sensores, como LiDAR, câmeras, RADAR, GPS, IMU e codificadores de odometria, conforme ilustrado na Figura 12. Esses sensores são essenciais para que o veículo reconheça o ambiente, detecte obstáculos e estabeleça a distância e a velocidade entre os veículos.

Figura 12 – Sensores instalados em veículo autônomo



Fonte: Modificada de (KOIFMAN, 2018)

O programa California PATH (*Partners for Advanced Transit and Highways*) (SHLADOVER et al., 1991) é uma parceria entre a Universidade da Califórnia e o Departamento de Transporte do Estado da Califórnia. O programa California PATH foi responsável pela primeira implementação de um sistema de Pelotão Veicular na década de 1980. Naquela época, eles utilizaram estratégias de controle linear para modelar veículos linearizados em uma formação firme e utilizaram radares como o único sensor para detectar outros veículos próximos, limitando assim a propagação de informações.

De acordo com Kamali et al. (2017), a tecnologia de *Platoon* está sendo introduzida pela indústria automotiva visando melhorar a segurança e a eficiência dos veículos em rodovias muito congestionadas. O uso dessa tecnologia pode ser especialmente útil quando os veículos são caminhões, pois eles podem ocupar uma grande área na estrada e contribuir para o congestionamento. Além disso, a tecnologia de pelotão veicular também pode ser útil em rodovias com várias pistas, pois permite que os veículos viajem juntos em uma formação, aumentando ainda mais a capacidade da rodovia

Essa é uma linha de pesquisa que, segundo Quadri et al. (2020), vem sendo desenvolvida desde 1986, quando a Daimler³ lançou o visionário projeto europeu EUREKA 45 PROMETHEUS (*PROgramme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety*). O objetivo desse projeto é desenvolver sistemas de transporte altamente eficientes e seguros. Esse projeto foi o marco inicial para o desenvolvimento de tecnologias de Pelotão veicular na Europa. A partir desse projeto, vários outros estudos e pesquisas foram desenvolvidos para aprimorar os sistemas de *Platoon*. Atualmente, a tecnologia de pelotão veicular

³ A Daimler é uma empresa alemã do setor automotivo, conhecida principalmente pela fabricação de veículos de luxo e comerciais, incluindo automóveis, ônibus e caminhões.

está sendo testada e desenvolvida por várias empresas e instituições de pesquisa ao redor do mundo, para torná-la uma realidade comercial no futuro.

As abordagens padrão de comboio são baseadas em uma abordagem distribuída e comunicação direta V2V ou no apoio a unidades à beira da estrada. As abordagens distribuídas com comunicação V2V se baseiam na comunicação direta entre os veículos, sem a necessidade de intervenção de unidades à beira da estrada. Isso permite que os veículos se comuniquem entre si e cooperem para aumentar a segurança e a eficiência do tráfego. Já as abordagens baseadas em unidades à beira da estrada se baseiam no uso de unidades de comunicação instaladas nas margens da rodovia.

Essas unidades podem ser usadas para monitorar o tráfego e fornecer informações aos veículos sobre a situação da rodovia, aumentando a segurança e a eficiência do tráfego. Com o surgimento da tecnologia 5G, é possível desenvolver abordagens centralizadas baseadas em comunicações celulares e MEC (*Multi-Access Edge Computing*). Isso permite a transmissão e o processamento de informações em tempo real, possibilitando a formação automática de pelotões e aumentando a segurança e a eficiência do tráfego.

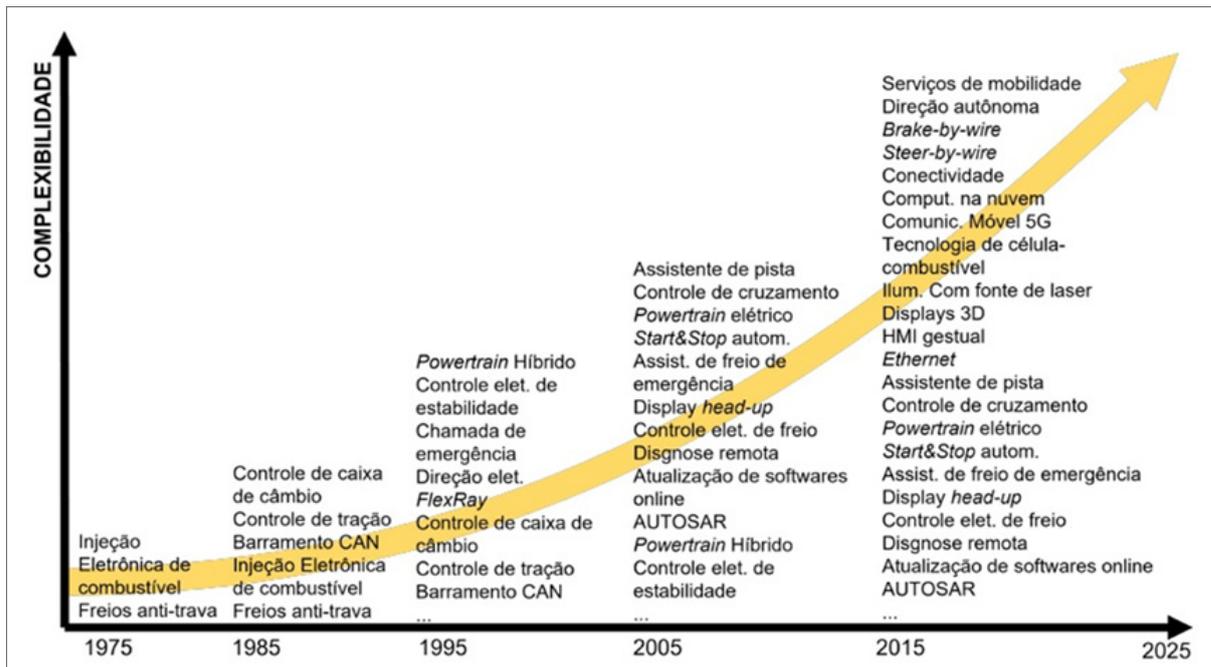
2.4 UNIDADE DE CONTROLE ELETRÔNICO - ECU

Atualmente, os veículos possuem um volume significativo de tráfego de dados em sua operação. A Figura 13 ilustra a evolução do número de Unidades Eletrônicas de Controle (*Electronic Control Unit*, ECU) em um veículo desde 1975 até 2025. Para permitir esse fluxo de informações, são necessários módulos com funções como leitura de sensores, gestão de protocolos de comunicação, troca de dados e controle dos atuadores do veículo (POLESE, 2017).

As ECUs são extremamente importantes para a arquitetura de um veículo, pois são responsáveis pelo controle de temporizadores, motores, freios e outras funções. Com o avanço das tecnologias, novas funções foram incorporadas aos veículos, elevando o número de unidades eletrônicas (VELOZO, 2018). Segundo Polese (2017), um carro popular pode contar com até 30 unidades, podendo atingir um total de mais de 80 ECUs em alguns veículos.

De acordo com Silva et al. (2017), as unidades eletrônicas são consideradas uma parte fundamental de todo o sistema embarcado automotivo, podendo ser comparadas ao cérebro do veículo, uma vez que são responsáveis pela gestão de sistemas não mecânicos, críticos e utilitários.

Figura 13 – Curva de complexidade da eletrônica veicular ao longo do tempo



Fonte: (FREITAS, 2021)

As informações coletadas pelos sensores automotivos são comumente direcionadas para a ECU por meio de um barramento de comunicação, onde são processadas pela mesma para executar ações de controle e alerta no veículo (SILVA et al., 2017). Segundo Polese (2017), as ECUs também se comunicam, por exemplo, a unidade eletrônica do ABS troca informações com a unidade do motor para controlar a potência disponibilizada.

No estudo de Velozo (2018), são apresentados os principais tipos de ECUs e suas funções específicas, que trabalham em conjunto para garantir o correto funcionamento do veículo:

- Módulo de controle do motor (*Engine Control Module, ECM*);
- Módulo de controle do trem de força (*Powertrain Control Module, PCM*);
- Módulo de controle da transmissão (*Transmission Control Module, TCM*);
- Módulo de controle do freio (*Brake Control Motor, BCM*);
- Módulo de controle eletrônico do freio (*Electronic Brake Control Module, EBCM*);
- Centro de Controle de Motores (*Motor Control Center, MCC*);
- Módulo Central Temporário (*Central Timing Module, CTM*);
- Módulo eletrônico geral (*Generic Electronic Module, GEM*);

- Módulo de Controle da Suspensão (*Suspension Control Module, SCM*).

2.4.1 Arquiteturas Elétricas das ECUs

De acordo com Velozo (2018), existem diversas arquiteturas de ECU, uma vez que, em alguns casos, uma única função de um veículo pode incorporar vários desses módulos de controle individuais. Portanto, é considerado incorreto descrever esses módulos como um único computador no veículo, já que um veículo possui vários computadores operando simultaneamente. Segundo Polese (2017), as arquiteturas elétricas dos veículos são classificadas como centralizadas e distribuídas.

2.4.1.1 Arquitetura Centralizada

Uma arquitetura centralizada, ilustrada na Figura 14, é caracterizada pela utilização de uma única unidade eletrônica de controle responsável por receber os sinais de entrada, como os provenientes de sensores e chaves de comando, processá-los e controlar as saídas dos atuadores do sistema, como eletroválvulas e relés.

Figura 14 – Arquitetura Centralizada



Fonte: Modificada de (POLESE, 2017)

As vantagens da arquitetura centralizada incluem:

- Simplificação do *hardware* necessário para a implementação do sistema, composto principalmente por sensores e atuadores.
- Os dados de entrada estão disponíveis para a ECU durante toda a operação lógica do sistema, permitindo que essa unidade eletrônica escaneie e colete as informações de cada sensor.

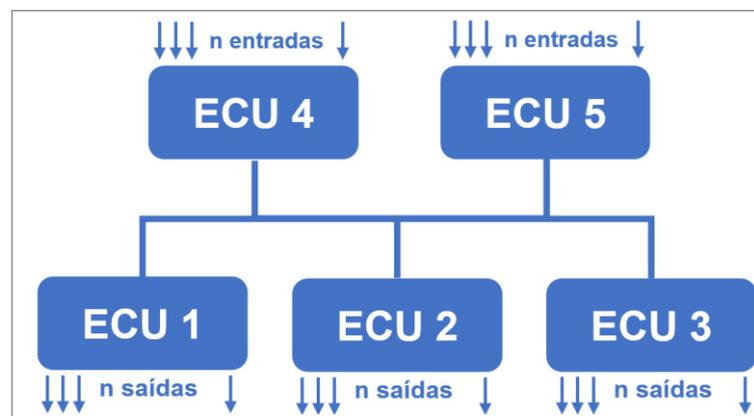
No entanto, a arquitetura centralizada apresenta as seguintes desvantagens:

- A necessidade de inúmeros cabos para conectar sensores e atuadores à unidade eletrônica de controle, o que dificulta tanto a fabricação quanto a manutenção dos veículos.
- A limitação na expansão do sistema, pois as alterações na ECU podem exigir modificações no *hardware* e/ou *software*, alterando assim a função original do sistema.

2.4.1.2 Arquitetura Distribuída

A arquitetura distribuída se caracteriza pela interligação de várias ECU em um sistema de controle, compartilhando entre elas a execução das diversas funções do veículo. O diagrama esquemático que representa esse conceito de arquitetura é apresentado na Figura 15. No entanto, para possibilitar a interação entre as ECUs, é necessário implementar um protocolo de comunicação adequado (POLESE, 2017).

Figura 15 – Arquitetura Distribuída



Fonte: Modificada de (POLESE, 2017)

As ECUs 4 e 5 (conforme a Figura 17) são responsáveis pela leitura direta das entradas do sistema, enquanto as unidades 1, 2 e 3 (ilustradas na Figura 17) são responsáveis pelo controle das saídas. Além disso, no diagrama apresentado, qualquer uma das ECUs, dependendo das funções existentes nesse sistema de controle, pode participar do processamento dos dados e do acionamento das saídas.

Quanto às vantagens da Arquitetura Distribuída, podem-se destacar os seguintes pontos:

- Redução na quantidade de cabos no sistema, já que várias ECUs estão disponíveis e são instaladas próximas aos sensores e atuadores, diminuindo o peso do cabeamento na implementação, que consiste principalmente em pares de fios conectando as entradas e saídas do controle eletrônico das unidades.

- Maior robustez do sistema de controle, pois há menos chances de interrupção de um dos circuitos ou mau contato em determinado conector (devido à menor quantidade de cabos necessários).
- Facilidade de expansão do sistema, permitindo que alterações em uma determinada função do veículo impactem apenas uma ou parte das ECUs.

Quanto às desvantagens da Arquitetura Distribuída, podem-se destacar os seguintes pontos:

- Necessidade de utilizar um protocolo de comunicação entre as ECUs.
- Requerimento de software de controle para a rede de comunicação que interliga as ECUs, cujo desenvolvimento pode ser desafiador dependendo do protocolo de comunicação escolhido.
- Dificuldade em determinar a taxa de transmissão ideal para uma aplicação específica, o que afeta diretamente os tempos internos do *software* de controle e a escolha dos componentes eletrônicos a serem utilizados no projeto das ECUs.

É importante ressaltar que a decisão entre a escolha das arquiteturas (Centralizada e Distribuída) para uma determinada aplicação móvel depende da consideração de vários fatores, como a complexidade do sistema a ser controlado, a disponibilidade de componentes e o tempo necessário para a implementação.

2.5 REDE CAN

Na indústria automotiva, a introdução da eletrônica embarcada provocou alterações significativas na arquitetura dos veículos. Os sistemas automotivos passaram a ser compostos por três categorias de componentes: componentes mecânicos, componentes eletroeletrônicos e componentes de *software*. Com o aumento e a complexidade da eletroeletrônica, a arquitetura distribuída tornou-se predominante. Essa arquitetura é benéfica como a redução do cabeamento utilizado, a diminuição da possibilidade de falhas, a simplificação da fabricação do veículo e a capacidade de ampliação modular. Por conta disso, utiliza-se o termo "rede de comunicação" para descrever a interconexão das unidades eletrônicas de controle, que transmitem e recebem dados (DUARTE; FIGUEIREDO, 2022).

De acordo com Silva (2015), para possibilitar a troca de informações entre as unidades eletrônicas, são adotados protocolos de comunicação que estabelecem padrões para o desenvolvimento e implementação de redes automotivas. Entre os protocolos existentes estão o *FlexRay*, *LIN*, *Ethernet* e *CAN*, que funcionam como meios de transmissão e recepção de dados. Cada um desses protocolos apresenta particularidades técnicas específicas que os tornam mais adequados para determinadas aplicações.

O protocolo de comunicação *CAN* (*Controller Area Network*) foi desenvolvido e introduzido na década de 1980 pela renomada empresa alemã BOSCH. Inicialmente aplicado em ônibus e caminhões, hoje em dia é utilizado em diversos setores, incluindo a indústria automotiva, embarcações e tratores (SILVA, 2015).

Silva (2015) explica que a ampla utilização do barramento *CAN* em veículos leves e pesados se deve aos seguintes fatores: o baixo custo de microcontroladores e controladores *CAN*, a comunicação de alta velocidade, a alta imunidade a interferências eletromagnéticas, a possibilidade de novas configurações sem a necessidade de alterar os nós⁴ já existentes, além de ser uma tecnologia robusta e confiável.

Os elementos do barramento *CAN* são definidos pela camada física e, dependendo do número de fios utilizados, o barramento pode ser construído de três maneiras, utilizando 1, 2 ou 4 fios (ANDERSSON; TOVAR, 2009). No barramento de um fio, os dados trafegam por um único caminho chamado linha *CAN*.

Nos sistemas de 2 e 4 fios, os sinais *CAN_H* (*CAN_HIGH*) e *CAN_L* (*CAN_LOW*) são utilizados, e a diferença de tensão entre eles representa os dados. Essa configuração é conhecida como par trançado e visa reduzir a interferência eletromagnética. No caso de 4 fios, há um fio adicional para alimentação de 5 volts (*VCC*⁵) e outro para referência (*GND*⁶) (GUIMARÃES, 2003).

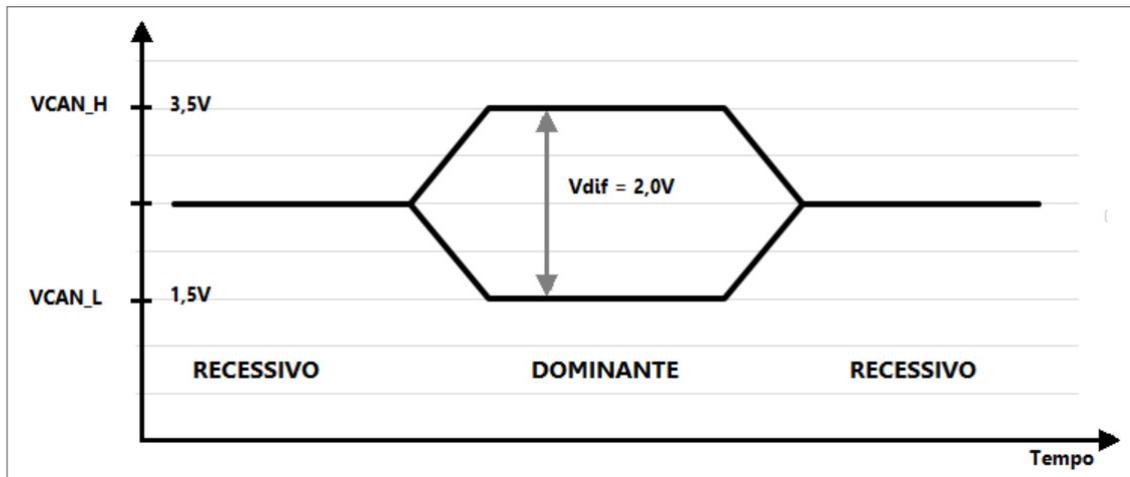
Segundo GUIMARÃES (2003), na rede *CAN*, os dados são representados por um bit recessivo e um bit dominante, conforme ilustrado na Figura 16. A tensão nominal para ambos os bits recessivos, assim como para as linhas *CAN_H* e *CAN_L*, é de 2,5 volts. Isso significa que não há diferença de tensão entre as linhas no barramento. No caso do bit dominante, a tensão é de 3,5 volts na linha *CAN_H* e de 1,5 volts na linha *CAN_L*, resultando em uma diferença de 2 volts.

⁴ Refere-se a um dispositivo conectado ao barramento *CAN*, que pode enviar, receber e processar informações.

⁵ *VCC* é utilizada para representar a tensão de alimentação positiva em circuitos eletrônicos.

⁶ *GND* refere-se ao ponto de referência comum para as tensões elétricas em um circuito.

Figura 16 – Níveis lógicos dos sinais: dominante = 0, recessivo = 1

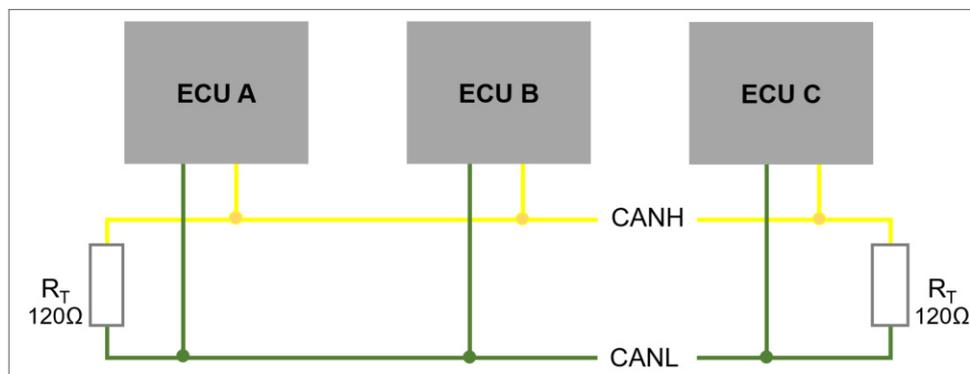


Fonte: Modificada de (GUIMARÃES, 2003)

Segundo a Organização Internacional de Padronização (ISO), a norma ISO 11898 define o protocolo CAN como um barramento de comunicação serial, desenvolvido para substituir os complexos chicotes elétricos por um barramento de dois fios nos mais diversos veículos (CORRIGAN, 2008).

Os nós (ECUs) desse barramento são conectados de forma independente para garantir a comunicação entre eles. Resistores de terminação de barramento de 120Ω (conforme ilustrado na Figura 17) são colocados em ambas as extremidades da rede CAN para evitar interferências nos dados. Conforme a ISO 11898, o número máximo de nós CAN é de 32 unidades de controle.

Figura 17 – Conexão das ECUs no barramento CAN clássico



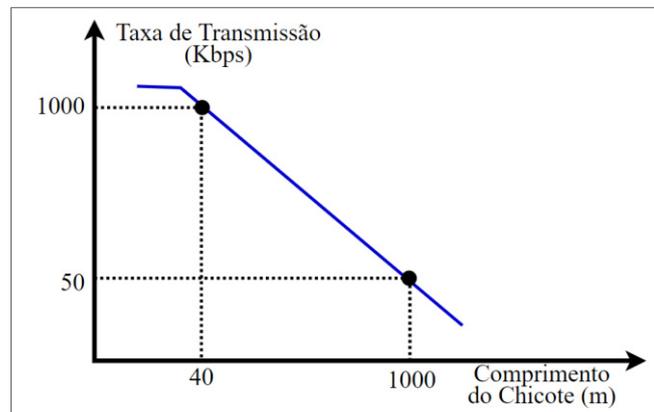
Fonte: O autor (2023)

Ao contrário de um barramento tradicional, como *USB* ou *Ethernet*, o CAN não envia grandes blocos de dados ponto a ponto, sob a supervisão de um barramento central. Em uma rede CAN, mensagens curtas são transmitidas para toda a rede, permitindo a consistência dos dados em todos os nós do sistema. O barramento CAN, trabalha no conceito de multi-mestre,

onde todos os módulos podem se tornar mestres em determinado momento e escravos em outros momentos. Além disso, suas mensagens são enviadas em regime *multicast*, ou seja, todas as mensagens são enviadas para todos os módulos existentes na rede (GMB, 1991).

A velocidade de transmissão desse barramento é inversamente proporcional ao comprimento do barramento. A maior taxa de transmissão é de 1Mbps , considerando-se um barramento de até 40 metros, conforme ilustrado na Figura 18 (GUIMARÃES, 2003).

Figura 18 – Relação entre taxa de transmissão e comprimento do barramento



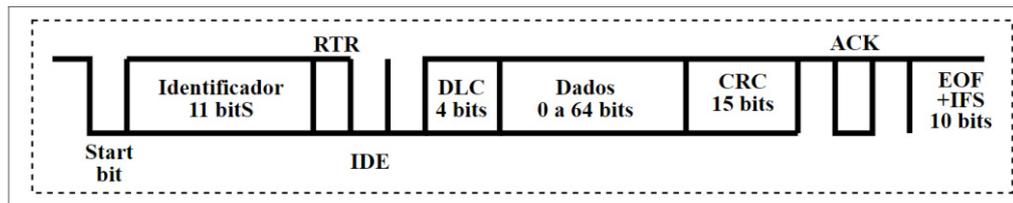
Fonte: Modificada de (GUIMARÃES, 2003)

O barramento CAN é um protocolo de comunicação serial utilizado em sistemas de rede de controle e automação, nos quais as diferentes partes do sistema precisam se comunicar de forma confiável e rápida. Sua principal característica é o uso de um barramento compartilhado, no qual todas as ECUs se comunicam (ZELTWANGER, 2007).

Esse protocolo inclui mecanismos de prioridade e detecção de erro para garantir a confiabilidade e segurança do veículo ou sistema. As mensagens mais críticas, como aquelas relacionadas a sistemas de segurança, têm maior prioridade e são transmitidas com maior frequência (ZELTWANGER, 2007). Se ocorrer algum erro na comunicação, o protocolo detecta e corrige automaticamente o erro, garantindo a transmissão correta das informações (CORRIGAN, 2008).

Existem dois tipos de protocolo CAN: o CAN 2.0A e o CAN 2.0B. O protocolo CAN 2.0A utiliza um identificador de 11 bits para as mensagens e, portanto, é capaz de endereçar até 2048 dispositivos em uma rede. Esse formato é amplamente utilizado em sistemas de baixa complexidade, como em veículos e maquinários industriais. A Figura 19 apresenta o quadro de mensagem do CAN 2.0A (GUIMARÃES, 2003).

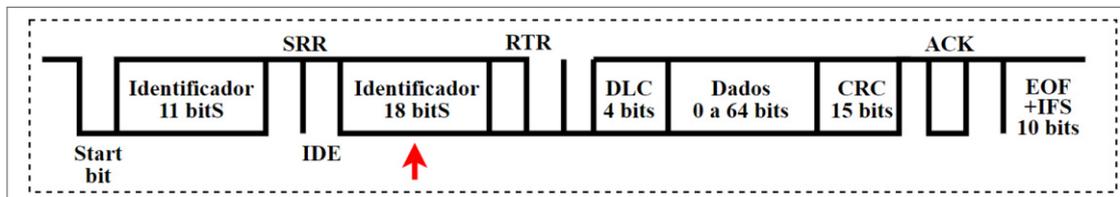
Figura 19 – Quadro de Mensagens do protocolo CAN 2.0A



Fonte: Modificada de (GUIMARÃES, 2003)

De acordo com GUIMARÃES (2003), o protocolo CAN 2.0B utiliza um identificador de 29bits, que permite a identificação de até 536 milhões de tipos mensagens. Esse protocolo é amplamente empregado em sistemas complexos e de alta exigência, como equipamentos médicos de alta precisão. A Figura 20 apresenta o quadro de mensagem do CAN 2.0B.

Figura 20 – Quadro de Mensagens do protocolo CAN 2.0B



Fonte: Modificada de GUIMARÃES (2003)

Ambos os tipos de protocolos CAN são amplamente utilizados na indústria automotiva e em outras aplicações em que a comunicação confiável e rápida entre diferentes dispositivos é essencial (GUIMARÃES, 2003). No funcionamento do protocolo CAN, cada mensagem é identificada por um único identificador, e cada ECU pode enviar uma mensagem ao barramento, identificando-a através desse identificador único. Quando uma unidade eletrônica de controle recebe uma mensagem, ela verifica o identificador da mensagem para determinar sua relevância. Em caso de relevância, a ECU processa as informações contidas na mensagem e realiza ações de controle ou alerta (ZELTWANGER, 2007).

O uso do protocolo CAN traz diversas vantagens, como a diminuição do número de fios e conectores necessários no sistema, o aumento da robustez do sistema e a possibilidade de expansão e atualização do sistema com facilidade. Entretanto, também apresenta desvantagens, como a necessidade de utilização de um *software* de controle para a rede de comunicação e a dificuldade de determinar a taxa de transmissão ideal para uma dada aplicação.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados de onze estudos do estado da arte relacionados a veículos elétricos e autônomos em escala reduzida. A seção 3.1 abordará as publicações sobre veículos em escala reduzida semi-autônomos, que são capazes de executar algumas tarefas automaticamente, mas ainda requerem intervenção humana em situações específicas. Na seção 3.2, serão discutidos os estudos sobre veículos em escala reduzida totalmente automatizados, que possuem a capacidade de operar de forma autônoma. A seção 3.3 analisará o *Platoon* de veículos em escala reduzida automatizados.

Por fim, na seção 3.4, será apresentada uma tabela comparativa dos estudos mencionados, fornecendo um resumo das principais contribuições, metodologias e resultados das pesquisas, permitindo a comparação entre as diferentes abordagens e técnicas utilizadas em cada estudo.

3.1 VEÍCULOS EM ESCALA REDUZIDA SEMI-AUTÔNOMOS

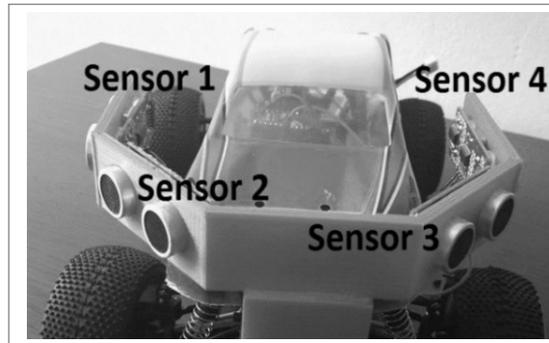
De acordo com Sensuse et al. (2020), os veículos semi-autônomos possuem a capacidade de assumir algumas funções de direção, como controle de velocidade, manutenção de faixa, frenagem automática, entre outros. No entanto, ainda requerem a intervenção de um motorista humano em determinadas situações. A seguir, serão apresentados alguns estudos que abordam temas relacionados aos veículos semi-autônomos.

Ciuciu et al. (2019) desenvolveu um veículo semi-autônomo em pequena escala capaz de navegar com ou sem intervenção humana. O veículo é projetado para seguir uma rota predefinida enquanto exibe os dados coletados por meio de um aplicativo móvel via comunicação serial *Bluetooth*. De acordo com Ciuciu et al. (2019), os veículos em pequena escala são ideais para realizar testes e coletar dados no desenvolvimento de carros autônomos.

O protótipo apresentado por Ciuciu et al. (2019) foi construído utilizando um chassi em escala 1/18 e equipado com os seguintes componentes: um motor *brushless* DC de 18 amperes com um controlador eletrônico para movimentação e controle da velocidade, permitindo alcançar velocidades de até 32km/h ; sensores ultrassônicos HC-SR04 posicionados na parte frontal e lateral do veículo, conforme ilustrado na Figura 21, para detectar obstáculos e distância entre paredes laterais, auxiliando o veículo a efetuar curvas; sensores de velocidade; controle do nível de bateria por meio de um divisor de tensão; e um sensor de inclinação desenvolvido

pelo autor, que utiliza um tubo cilíndrico com uma esfera interna.

Figura 21 – Posicionamento dos sensores no veículo desenvolvido por CIUCIU et al.

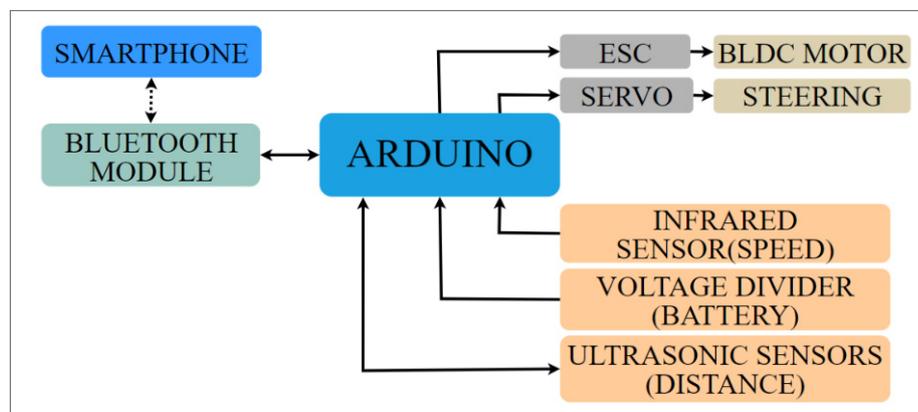


Fonte: (CIUCIU et al., 2019)

Para o envio das informações coletadas pelos sensores do veículo, foi utilizado um módulo *Bluetooth* HC-06. O *Arduino Nano* foi escolhido como componente principal responsável pelo processamento das informações de acordo com Ciuciu et al. (2019), devido ao seu baixo custo e consumo de energia. Um servomotor foi posicionado para permitir o controle das posições angulares específicas da direção do veículo.

Seguindo as informações de Ciuciu et al. (2019) o funcionamento do veículo de pequeno porte é iniciado através da conexão do *smartphone* do usuário com o *Arduino* via *Bluetooth*. Essa conexão permite o envio e recebimento de dados coletados pela placa *Nano*, como o nível de carga da bateria, a velocidade atual do veículo e leituras dos sonares, entre outros. A Figura 22 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle e aquisição de dados do veículo desenvolvido por Ciuciu et al. (2019).

Figura 22 – Diagrama em blocos do veículo autônomo proposto por CIUCIU et al.



Fonte: Modificada de (CIUCIU et al., 2019)

De acordo com Ciuciu et al. (2019), o veículo foi equipado com sensores de baixo custo para detecção de obstáculos, além de ter a capacidade de seguir uma rota pré-programada e re-

conhecer situações de risco sistêmico, como perda de contato com o solo e rampas, que podem impactar o motor de forma significativa. Segundo os autores, os veículos em escala reduzida são amplamente utilizados para testar funcionalidades autônomas antes de implementá-las em carros de tamanho real, trazendo benefícios como custo reduzido e segurança nos testes.

O estudo conduzido por Duarte e Figueiredo (2022) aborda os sistemas de direção, acelerador e freios presentes em todos os automóveis vendidos atualmente, sendo essenciais para aumentar a segurança e o conforto dos passageiros. Para isso, os autores desenvolveram dois sistemas de controle baseados em controladores PID (*Proportional Integral Derivative*), juntamente com uma rede de comunicação entre essas unidades de controle por meio do protocolo CAN.

Utilizando a teoria de sistemas de controle, a pesquisa explorou ferramentas virtuais como *Matlab* e *Simulink*¹ para modelar e simular sistemas de controle e comunicação entre unidades eletrônicas de controle. O objetivo foi obter resultados que demonstrassem o comportamento dos subsistemas e os dados obtidos por diferentes tipos de entradas, aplicáveis a veículos em escala reduzida com sistemas embarcados para testes de validação (DUARTE; FIGUEIREDO, 2022).

No contexto do estudo, a plataforma veicular escolhida por Duarte e Figueiredo (2022) foi um veículo em escala de 1/4 do modelo Jeep Wrangler da empresa Bandeirantes conforme a Figura 23, juntamente com a plataforma Arduino Nano e Pro Mini responsáveis pelo processamento das informações dos sensores e a execução dos atuadores.

Figura 23 – Jeep Bandeirantes utilizado por DUARTE; FIGUEIREDO



Fonte: (DUARTE; FIGUEIREDO, 2022)

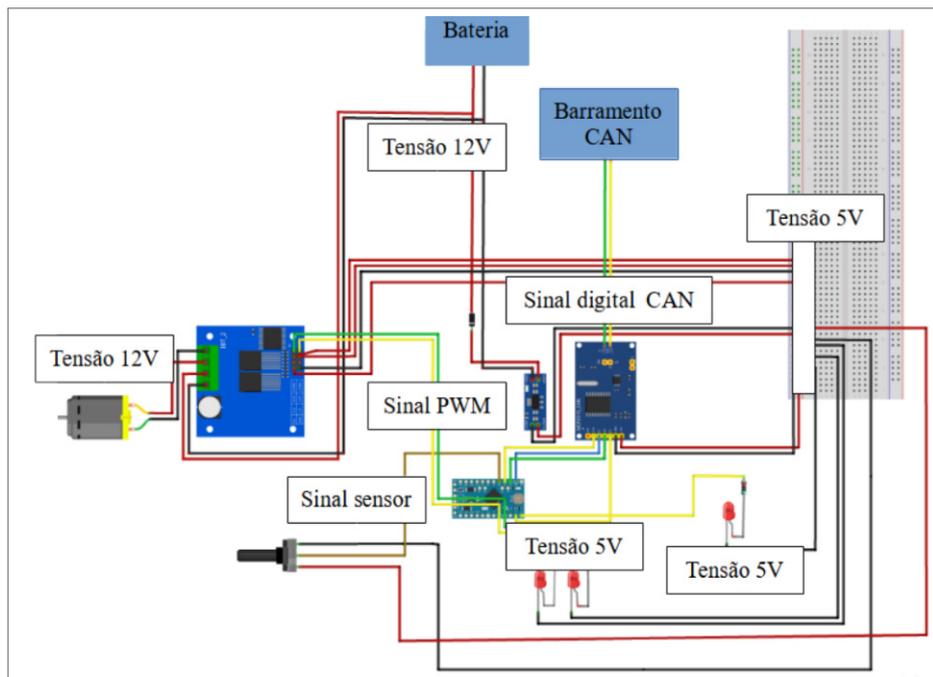
O controle dos motores do veículo de pequeno porte é realizado por meio de Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation, PWM*), que permite controlar a direção e o sentido

¹ O Simulink é uma extensão do Matlab que permite a modelagem e simulação de sistemas dinâmicos por meio de diagramas de blocos.

de rotação, utilizando pontes H do tipo BTS 7960, instaladas no veículo. Foram adicionados encoders rotativos nas rodas traseiras para medir a velocidade, e um potenciômetro linear foi fixado na barra de direção, por meio de uma caixa de redução impressa em 3D, para medir o ângulo de direção.

Para realizar a comunicação e o controle no barramento CAN, a proposta de Duarte e Figueiredo (2022) utiliza a plataforma Arduino em conjunto com os módulos MCP2515 TJA1050, cada um desempenhando uma função específica. As Unidades Eletrônicas de Controle (ECUs) são montadas em uma placa perfurada, contendo Arduino Pro Mini, reguladores de tensão, módulos de comunicação CAN e diodos. Essa disposição é necessária para que os sistemas de controle possam ser incorporados ao veículo e sejam capazes de atuar por meio de controle de radiofrequência. A Figura 24 ilustra o diagrama elétrico do sistema de controle lateral, enquanto a Figura 25 mostra o sistema de controle longitudinal, conforme descrito por Duarte e Figueiredo (2022).

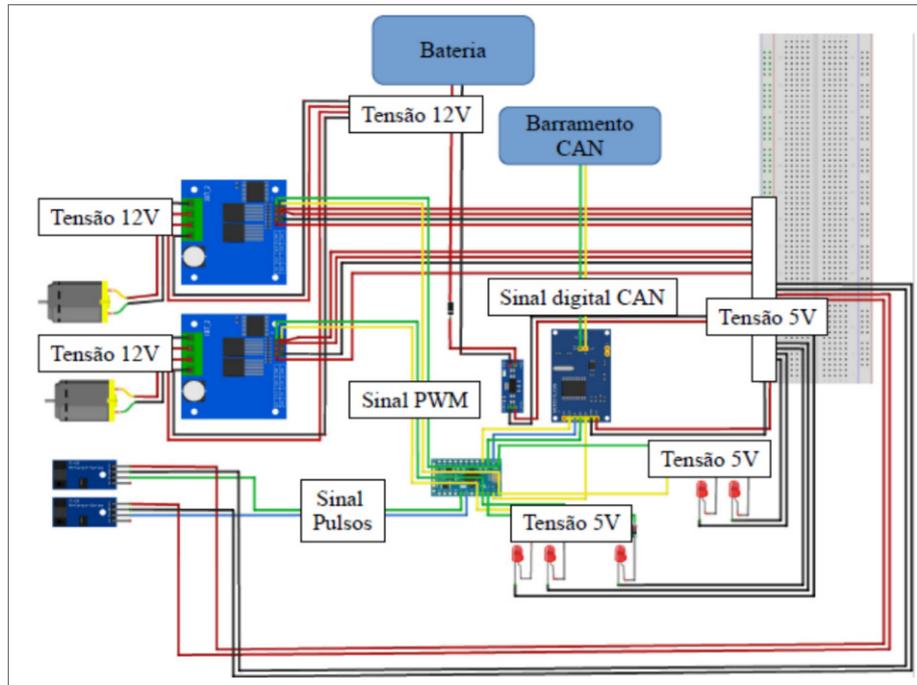
Figura 24 – Diagrama elétrico do controle lateral proposto por DUARTE; FIGUEIREDO



Fonte: (DUARTE; FIGUEIREDO, 2022)

De acordo com Duarte e Figueiredo (2022), a arquitetura eletrônica foi montada e testada em uma bancada antes de ser acoplada ao veículo definitivamente. Essa circunstância é importante porque permitiu a realização de testes por meio da interface de desenvolvimento do Arduino, por meio da qual os códigos de controle foram estruturados e executados.

Figura 25 – Diagrama elétrico do controle longitudinal proposto por DUARTE; FIGUEIREDO



Fonte: (DUARTE; FIGUEIREDO, 2022)

Além disso, é por meio dessa interface que se estabelece a comunicação CAN entre os dois módulos CAN MCP2515, para que a referência possa ser encaminhada para o controlador por meio do barramento CAN.

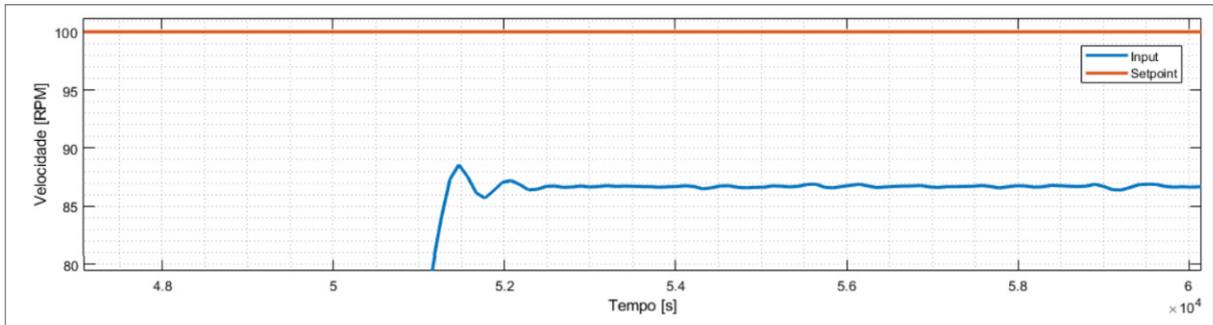
No que diz respeito ao *software* de controle, os testes realizados por Duarte e Figueiredo (2022) durante todo o desenvolvimento mostrou uma evolução na escolha do tipo de controlador, tanto no subsistema de direção quanto nos de aceleração e frenagem. No sistema de direção, a escolha do controlador proporcional resultou em um *overshoot* alto. Ao adicionar um termo integral (controlador PI), o *overshoot*² não foi reduzido, ou seja, o desempenho da resposta não melhorou.

Após usar o controlador PD, o *overshoot* foi reduzido, mas permaneceu em um valor alto, o que não é ideal para o sistema de direção. Ao utilizar um controlador PID, o impasse presente em outros controladores foi resolvido, apresentando um *overshoot* muito baixo e um tempo de acomodação adequado para a aplicação.

Nos sistemas de aceleração e frenagem, a avaliação do sistema de controle por meio de testes foi realizada de maneira semelhante, e percebeu-se que o uso de controladores proporcionais (conforme Figura 26) resulta em altos erros em regime permanente (DUARTE; FIGUEIREDO, 2022).

² Overshoot é a ultrapassagem temporária de um limite desejado em sistemas dinâmicos, como respostas de controle. O valor excede brevemente o objetivo antes de se estabilizar.

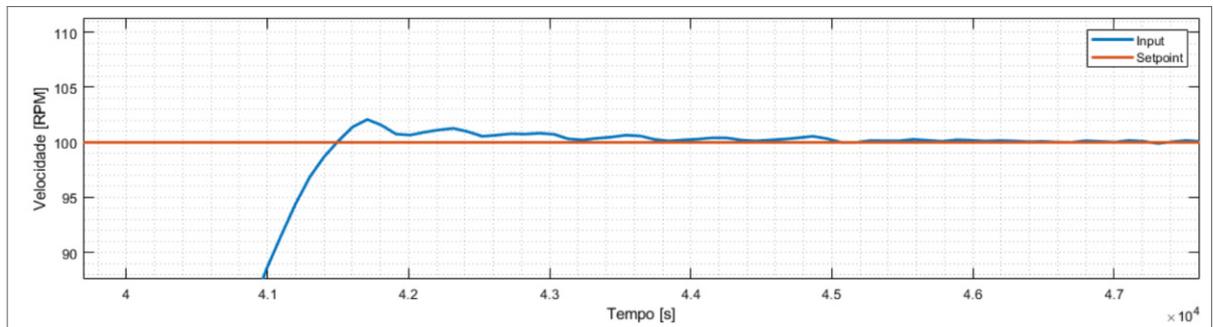
Figura 26 – Resposta do sistema para o teste com controladores proporcionais



Fonte: (DUARTE; FIGUEIREDO, 2022)

A adição de um termo integral (controlador PI) pode reduzir significativamente o erro mencionado anteriormente, mas pode gerar um *overshoot* indesejado. Já os controladores PD podem reduzir o *overshoot*, mas trazem de volta o erro de estado estacionário. Por isso, o controlador PID (conforme ilustra a Figura 27) se mostra como a opção mais completa e adequada para a aplicação, pois resolve tanto o problema de *overshoot* quanto os erros em regime permanente (DUARTE; FIGUEIREDO, 2022).

Figura 27 – Resposta do sistema para o teste com controladores PID



Fonte: (DUARTE; FIGUEIREDO, 2022)

Além disso, a pesquisa evidencia que a escolha adequada dos controladores, como o PID, é fundamental para garantir um bom desempenho do sistema de controle de direção, aceleração e frenagem. A realização de testes durante todo o desenvolvimento permitiu avaliar diferentes controladores e escolher o mais adequado para cada subsistema, resultando em um sistema de controle eficiente e preciso.

No entanto, como mencionado pelos autores, o trabalho ainda tem espaço para melhorias, e a inclusão de outros sensores, como radares e câmeras, pode trazer maior precisão e confiabilidade para o sistema. Dessa forma, a pesquisa de Duarte e Figueiredo (2022) representa um importante avanço no desenvolvimento de sistemas autônomos em veículos de pequeno porte, com potencial para contribuir para a evolução da tecnologia em veículos de maior escala. Vale

ressaltar que cada um dos autores está atual trabalhando em projetos automotivos em veículos de escala real: Pedro Henrique na IAV do Brasil³, enquanto João Victor na Stellantis⁴.

3.2 VEÍCULOS EM ESCALA REDUZIDA AUTOMATIZADOS

Os veículos automatizados são aqueles que possuem a capacidade de realizar todas as funções de direção de forma autônoma, sem a necessidade de intervenção de um motorista humano. Esse tipo de veículo utiliza tecnologias avançadas, como sensores, câmeras e sistemas de GPS, para identificar obstáculos, reconhecer sinais de trânsito e tomar decisões de direção (YILDIRIM; MOAVENZADEH; NAJM, 2017; LITMAN, 2018; SINGH; GAURAV, 2017; WINSTON; MANNERING, 2018).

Beleno et al. (2012) apresentaram uma técnica de controle de trajetória para veículo terrestre que utiliza o rastreamento baseado na análise de orientação e posição do objeto em relação à trajetória final projetada. Os autores aplicaram controladores em testes experimentais em um ambiente de simulação computacional por meio de um modelo matemático que leva em consideração aspectos relacionados à cinemática veicular.

Beleno et al. (2012) utilizaram uma plataforma fabricada pela empresa Tamiya⁵ na escala 1/10 (dimensões de 42cm de comprimento e 18cm de largura), com diferencial nas quatro rodas acionado por motores DC e guiado pelo direcionamento das rodas dianteiras por meio de servomotores (BELENO et al., 2012). A plataforma utilizada, bem como o sistema de sensoriamento, podem ser visualizados na Figura 28.

Figura 28 – Veículo desenvolvido por BELENO et al., com seus sistemas sensoriais



Fonte: (BELENO et al., 2012)

³ A IAV do Brasil é uma empresa especializada em engenharia automotiva, líder mundial na prestação de serviços para a indústria do setor.

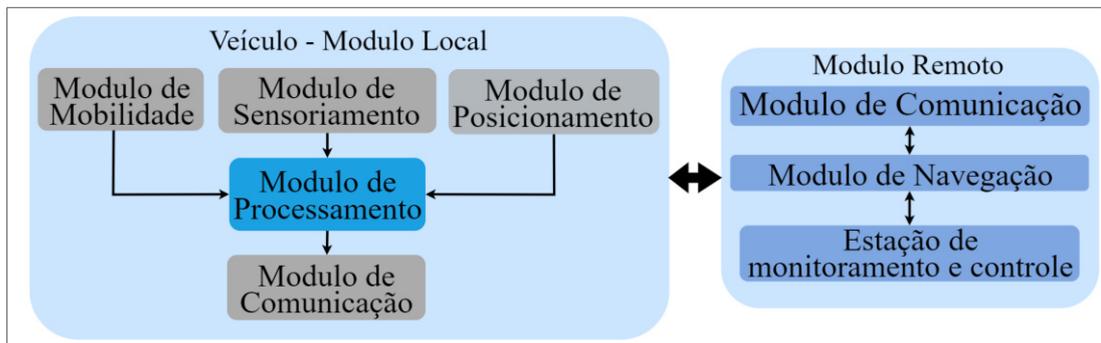
⁴ A Stellantis, grupo do ramo automotiva formada pela fusão da FCA e PSA Group, abrange um vasto universo de marcas renomadas, como Alfa Romeo, Jeep, Peugeot e muitas outras.

⁵ Disponível em: <https://www.tamiya.com/>

É importante ressaltar que a infraestrutura robótica utilizada no estudo de Beleno et al. (2012) consiste na interação de sistemas embarcados e remotos, nos quais os módulos de sensoriamento, comunicação e atuação estão interligados.

A parte remota é responsável por fornecer a navegação autônoma e as manobras de controle. O sistema de comunicação entre o sistema remoto e embarcado, conforme proposto por Beleno et al. (2012), é apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Arquitetura em blocos da plataforma autônoma proposta por BELENO et al.



Fonte: Modificada de (BELENO et al., 2012)

Os autores explicam que os módulos de sensoriamento e posicionamento são interligados para fornecer as informações necessárias para a determinação da posição e orientação do veículo através da bússola e do GPS. Para determinar a orientação do veículo, é utilizado um modelo cinemático que descreve a física do movimento e representa sua posição e orientação, independentemente das forças que o afetam (BELENO et al., 2012).

A origem das coordenadas do sistema está no centro de gravidade (XY) do veículo e o modelo cinemático combina características de não-linearidade e não-holonomicidade, permitindo planejar o projeto de controle para o seguimento de trajetórias.

Apesar de não ser o objetivo principal do trabalho de Beleno et al. (2012), a construção de um veículo terrestre em pequena escala foi necessária para a validação do modelo matemático veicular e do controle de orientação, o qual poderá ser replicado na produção de um veículo real.

Os resultados obtidos por Beleno et al. (2012) garantem a mobilidade do sistema desenvolvido e a funcionalidade do módulo de navegação. A minimização dos erros de posicionamento pode ser alcançada por meio da implementação de um sistema de correção do sinal, que calcula o valor médio dos fluxos de dados coletados.

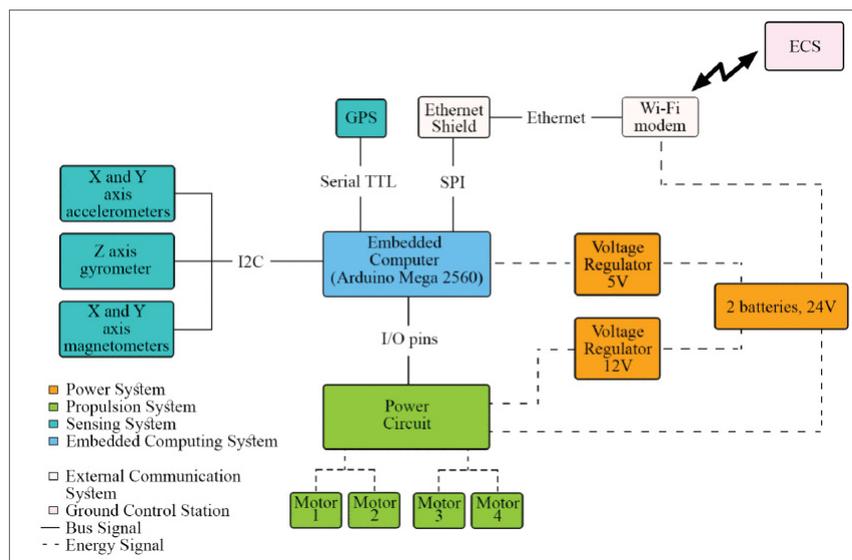
O trabalho de Almeida et al. (2019) teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de navegação autônomo para um veículo terrestre de pequena escala fabricado pela empresa

Robôs SuperDroid⁶, ao custo de US\$3.400,00, equipado com quatro motores de Corrente Contínua (CC) para deslocamento. Para a implementação do sistema, foi utilizado um Arduino Mega 2560, uma plataforma baseada no microcontrolador ATmega2560 AVR.

O diagrama do *hardware* eletrônico do veículo terrestre SuperDroid utilizado no estudo pode ser visualizado na Figura 30. A escolha dessa plataforma deveu-se à quantidade de entradas/saídas digitais e portas seriais (UARTs⁷) disponíveis.

O subsistema de comunicação externa proposto por Almeida et al. (2019) utiliza dois dispositivos para permitir a comunicação entre o computador de bordo e a Estação de Controle de Solo (*Ground Control Station, GCS*). O primeiro dispositivo é um *Ethernet Shield* diretamente conectado ao barramento interno do computador do veículo, enquanto o segundo é um *Ethernet wifi Bridge* conectada por cabo ao *Ethernet Shield*.

Figura 30 – Diagrama do hardware eletrônico a bordo do veículo terrestre SuperDroid



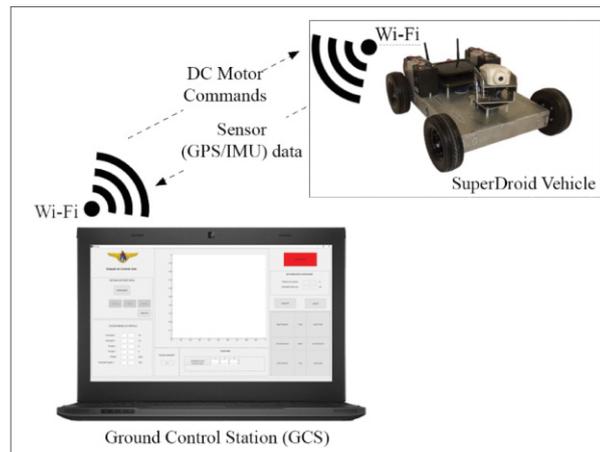
Fonte: (ALMEIDA et al., 2019)

A Figura 31 apresenta o diagrama do subsistema de comunicação externa do veículo.

⁶ Disponível em: <https://www.superdroidrobots.com/>

⁷ É um tipo de interface de comunicação serial assíncrona amplamente utilizada em sistemas eletrônicos para transmitir e receber dados de forma serial entre dispositivos

Figura 31 – O sistema de navegação autônoma proposto por ALMEIDA et al.



Fonte: (ALMEIDA et al., 2019)

O sistema sensorial do veículo é composto por uma Unidade de Medição Inercial (IMU) de baixo custo com 3 magnetômetros inclusos e um receptor GPS padrão. O computador de bordo envia dados dos sensores para a Estação de Controle de Solo (*Ground Control Station, GCS*), e recebe comandos de navegação a partir dela, os quais são usados para acionar os motores de corrente contínua (CC) do veículo terrestre por meio de sinais de Modulação de Largura de Pulso (PWM).

O diferencial da proposta de Almeida et al. (2019) foi o emprego de um Filtro Kalman Estendido (*Extended Kalman filter, KF*) no *software* do GCS. Este filtro é um algoritmo de computação usado para estimar estados de um sistema dinâmico linear onde entradas e saídas de sensores foram corrompidos por ruído. O KF serve para fusão de dados dos sensores, como, por exemplo, GPS que pode sofrer com a ação adversa de grandes edifícios, podendo fazer com que a navegação do veículo se torne inviável.

Como solução, Almeida et al. (2019) apontam para a possibilidade de integração das informações recebidas do GPS com um Sistema de Navegação Inercial (*Inertial Navigation System, INS*), formada por uma Unidade de Medição Inercial e seu *software* de processamento. O teste foi realizado com o veículo percorrendo um caminho com aproximadamente 250 metros de comprimento total e a duração foi de 241 segundos.

Almeida et al. (2019) afirma que os resultados da simulação e da experiência no mundo real foram muito próximos, e que a etapa de simulação foi importante para o ajuste correto dos parâmetros do KF e do modelo dinâmico do veículo, o que demonstra que a boa qualidade do modelo dinâmico do veículo usado para a simulação do veículo e o correto funcionamento do algoritmo de fusão de dados do sensor, pois o KF funcionou corretamente, mesmo usando

uma IMU de baixo custo.

O trabalho de Bill e Shahnasser (2019) baseia-se na premissa de que carros autônomos podem contribuir significativamente para a resolução de problemas enfrentados por motoristas na estrada, salvando vidas por meio da redução de acidentes através da direção autônoma. No entanto, eles reconhecem que alcançar uma autonomia total e confiável requer não apenas *hardware* capaz de realizar uma análise rápida de dados, mas também *software* que possa gerenciar os dados dos sensores e o acionamento dos atuadores em veículos autônomos.

O veículo proposto por Bill e Shahnasser (2019) utiliza como plataforma de chassi o modelo Maisto RC Rock Crawler⁸, que possui escala 1/18 e três motores: um para o movimento de direção e dois para o movimento das rodas dianteiras e traseiras para frente e para trás, conforme ilustrado na Figura 32. Segundo Bill e Shahnasser (2019), a escolha dessa plataforma se deu pelo fato de ser de baixo custo, com um valor médio de US\$30,00.

O uso de duas plataformas distintas para a automação do modelo proposto por Bill e Shahnasser (2019) é bastante interessante. O Arduino UNO, que é uma placa de prototipagem eletrônica amplamente utilizada em projetos de automação e robótica, e sua combinação com os sensores infravermelhos foi uma escolha acertada para a detecção de obstáculos próximos ao veículo.

Figura 32 – Plataforma Maisto RC utilizada por BILL; SHAHNASSER

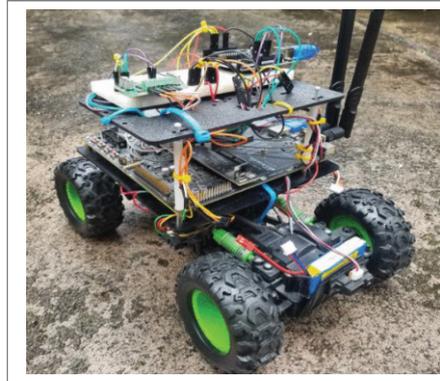


Fonte: (BILL; SHAHNASSER, 2019)

A plataforma de computação Jetson TX2 é uma opção mais sofisticada, capaz de processar aprendizado de máquina para aprimorar a detecção de objetos e pessoas com maior precisão. Uma escolha comum e adequada para essa tarefa é a utilização da biblioteca *TensorFlow*. Na Figura 33, é possível visualizar a plataforma veicular desenvolvida pelos autores.

⁸ Disponível em: <https://www.maisto.com>

Figura 33 – Veículo usando Jetson TX2 utilizado por BILL; SHAHNASSER

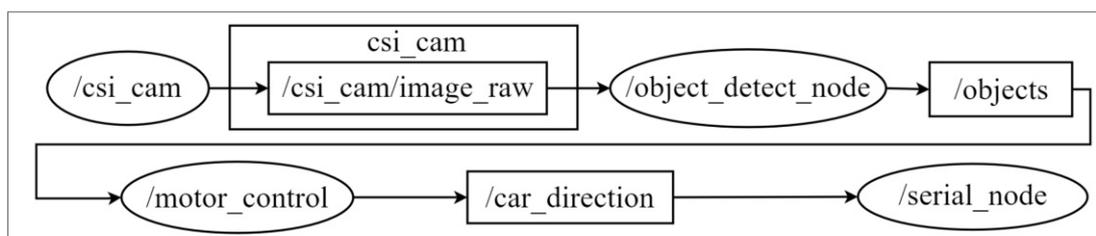


Fonte: (BILL; SHAHNASSER, 2019)

O desenvolvimento do projeto proposto por Bill e Shahnasser (2019) visa a criação de um sistema de baixo custo. Para isso, foram utilizadas estruturas de *software* de código aberto, como o ROS (*Robot Operating System*) e o *TensorFlow* do *Google*. A flexibilidade da proposta permite o desenvolvimento de vários componentes de *software* capazes de responder em tempo real às necessidades do sistema, como evitar obstáculos e controlar a velocidade do motor.

A fim de permitir o compartilhamento de informações entre as entidades do projeto, foi estabelecida uma rede de comunicação TCP/IP, que foi desenvolvida usando o *framework* ROS. Essa arquitetura de publicação-assinatura da biblioteca permite que os módulos desenvolvidos para veículos autônomos funcionem independentemente uns dos outros, garantindo que a falha de um módulo não prejudique o funcionamento de outros módulos. A Figura 34 mostra a arquitetura do sistema proposto.

Figura 34 – Gráfico ROS do veículo autônomo proposto por BILL; SHAHNASSER



Fonte: (BILL; SHAHNASSER, 2019)

De acordo com Bill e Shahnasser (2019), o sistema proposto realiza uma série de processos paralelos. Os autores constataram que o tempo de execução de todas as funções poderia se tornar muito lento se essa rotina de trabalho não fosse tratada com a devida atenção. Para evitar essa situação, eles desenvolveram uma arquitetura que permite que o sistema operacional gerencie toda a memória, enquanto o ROS auxilia na comunicação entre os processadores por meio do estabelecimento de uma rede baseada em TCP/IP.

A avaliação do trabalho de Bill e Shahnasser (2019) foi realizada por meio de um conjunto de experimentos envolvendo a detecção de um pedestre hipotético posicionado em diferentes lugares ao redor do robô. Após a detecção, o estado de movimento do robô é exibido com base em um esquema de mapeamento numérico para direção. Nesse esquema, -1 representa "mover carro para trás", 0 significa "parar carro", 1 indica "mover carro para a frente", 2 corresponde a "mover carro para a esquerda" e 3 representa "mover carro para a direita" (BILL; SHAHNASSER, 2019).

Como resultado, Bill e Shahnasser (2019) afirma que a plataforma de condução autônoma utilizada nos experimentos representa uma possibilidade de aplicar uma estrutura moderna de aprendizagem profunda, como o *TensorFlow*, ao mesmo tempo, em que estabelece a interface com uma GPU. Além disso, a utilização de múltiplas estruturas de *software*, como OpenCV e ROS, demonstra como o aproveitamento da potência e acessibilidade do *software* de código aberto pode contribuir para o avanço do campo, por meio do compartilhamento de *software* e algoritmos.

Amado et al. (2019) propuseram um sistema de navegação autônomo baseado em *deep learning 'End-to-End'*. Eles avaliaram a influência do sistema multicâmeras com diferentes tipos de imagens, RGB⁹ e profundidade, e diferentes posições, lateral e frontal. Ao todo, quatorze combinações diferentes de aquisição de imagens RGB e profundidade foram testadas no ambiente de simulação *V-REP PRO EDU V3.5.0*. Essas combinações de imagens foram utilizadas como entradas para uma versão adaptada da rede neural convolucional (*Convolutional Neural Network*, CNN) Pilotnet (BOJARSKI et al., 2016), para gerar, como saída, o ângulo do volante em graus.

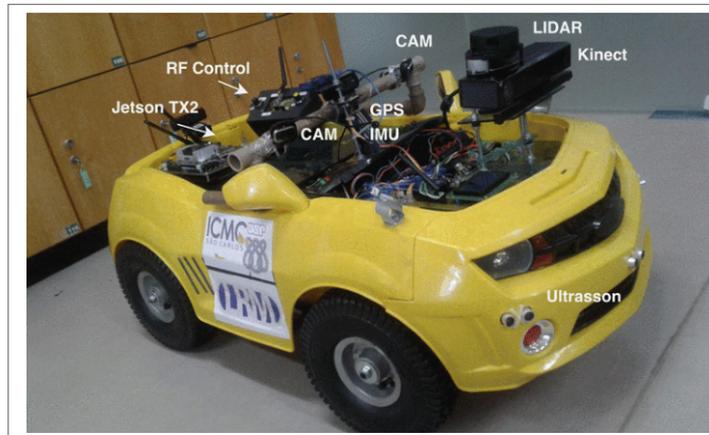
Visando decidir a melhor configuração, os resultados dessas combinações aplicadas na Pilotnet foram avaliados sob a perspectiva das métricas de erro médio das saídas e uma avaliação qualitativa da trajetória realizada pelo veículo, utilizando a comparação do rastreamento das posições do veículo com as posições geradas por um controlador humano.

Para validar a metodologia proposta em situações do mundo real, Amado et al. (2019) prototiparam um veículo elétrico em escala reduzida, batizado de Smart Camaro. A Figura 35 mostra este protótipo desenvolvido em escala 1/4. O Smart Camaro foi equipado com sensores ultrassônicos, GPS, IMU, LiDAR, câmeras monoculares e Kinect v2. Todo o processamento dos dados foi realizado no sistema operacional Linux 16.04 com Sistema Operacional Robô

⁹ É um modelo de cores aditivo que descreve a forma como as cores são combinadas em dispositivos eletrônicos, como monitores, telas de televisão e câmeras digitais.

(*Robot Operating System, ROS*) e Python/C++.

Figura 35 – Smart Camaro - protótipo de veículo autônomo proposto por AMADO et al.

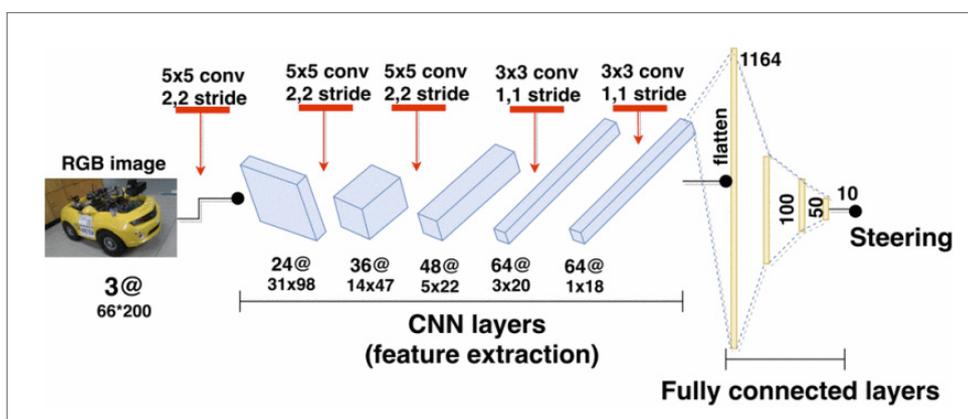


Fonte: (AMADO et al., 2019)

Amado et al. (2019) utilizaram duas arquiteturas CNN, a Pilotnet original desenvolvida por Bojarski et al. (2016) e uma versão modificada da Pilotnet para aceitar seis canais como entradas, ao invés de apenas três na versão original. Essas arquiteturas recebem como entrada as combinações de imagens propostas, com resolução de 66×200 píxeis, possuem 3 camadas convolucionais com *kernel* 5×5 , seguidas de 2 camadas convolucionais com *kernel* 3×3 , 4 camadas totalmente conectadas e geram como saída o ângulo de direção, conforme ilustrado na Figura 36.

A saída da Pilotnet foi aplicada diretamente no volante do veículo. Os experimentos foram realizados adotando um valor de velocidade de condução constante.

Figura 36 – Arquitetura Pilotnet original utilizada no Smart Camaro



Fonte: (AMADO et al., 2019)

Amado et al. (2019) relataram a existência de algumas discrepâncias entre os resultados simulados e os prototipados, que podem ser explicadas pela qualidade dos dados entregues à

CNN Pilotnet. Isso ocorre porque a simulação emprega imagens sintéticas e quase perfeitas, enquanto o protótipo adquire imagens ruidosas e com problemas causados pela influência da luminosidade.

Como resultado, tem-se o estudo do desempenho de um sistema de navegação autônomo baseado em *deep learning* proposto por Amado et al. (2019), utilizando múltiplas câmeras para captar imagens em RGB e profundidade. A configuração com melhor desempenho apresentou um erro médio de [2,41] graus e trajetória mais próxima da referência. Testes em ambiente real também validaram o sistema, com outras configurações obtendo resultados precisos.

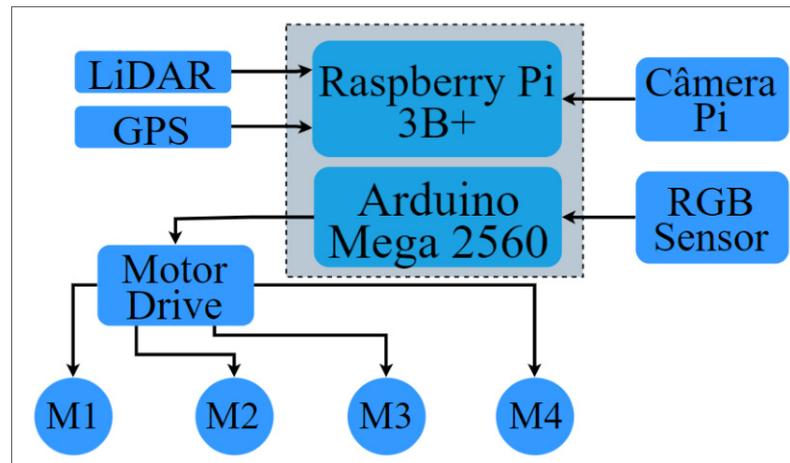
O artigo de El-Hassan (2020) investiga a eficácia de sensores de baixo custo para o adequado funcionamento de veículos autônomos. Para esse fim, foi desenvolvido um protótipo em pequena escala de um veículo autônomo com sensores de baixo custo, e em seguida foram realizados testes experimentais para avaliar a detecção de objetos, prevenção de colisões, detecção de semáforos, faixas de pedestres e o término de rota.

O autor reconhece que há diversos desafios comuns a todos os veículos autônomos, independentemente do custo, e que a precisão dos sensores desempenha um papel fundamental na segurança e eficiência do trânsito. Um dos desafios é a falta de compartilhamento de dados entre veículos, uma vez que os veículos autônomos dependem de várias tecnologias e equipamentos, GPS, LiDAR, câmeras de alta definição e inteligência artificial, para uma navegação segura e eficaz. Além disso, é necessário que esses veículos coletem e analisem continuamente um grande volume de dados, estimado em cerca de 2,6 terabytes por hora (EL-HASSAN, 2020).

O protótipo proposto por El-Hassan (2020) é baseado em componentes como LiDAR, câmera Pi, sensores de cores RGB, Arduino MEGA 2560, GPS, Raspberry Pi 3B+ e uma ponte H dupla. Esses componentes foram conectados a um chassi 4WD de acrílico em escala 1/20.

O veículo autônomo em escala reduzida é testado em uma estrutura de estrada artificial, com recursos para detecção de objetos, prevenção de colisões, detecção de faixas de pedestres e semáforos. A Figura 37 ilustra o diagrama em blocos do protótipo proposto por El-Hassan (2020).

Figura 37 – Diagrama de blocos do protótipo desenvolvido por EL-HASSAN

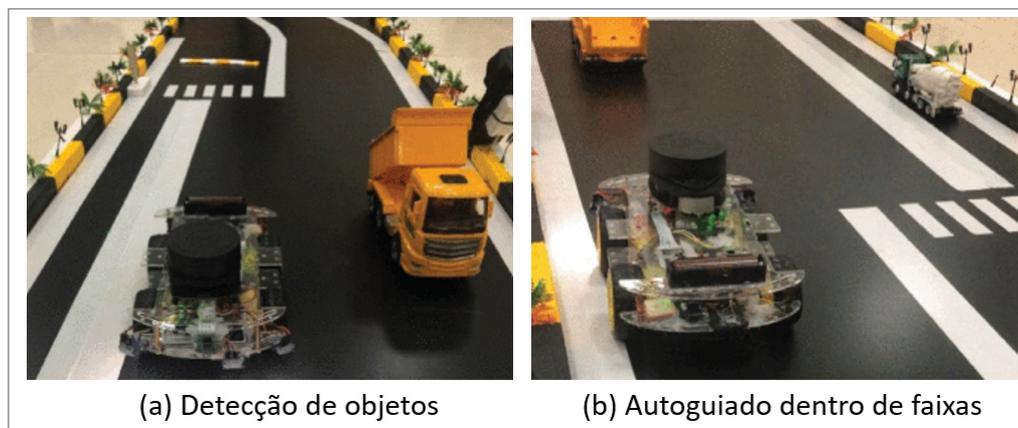


Fonte: Modificada de (EL-HASSAN, 2020)

De acordo com El-Hassan (2020), a ponte H dupla se conecta à placa do microcontrolador para fornecer controle de PWM a quatro motores, onde cada motor é dedicado a uma roda. A ponte H dupla controla independentemente um par de motores em ambas as direções, para frente e para trás, onde a velocidade de cada conjunto varia com uma corrente de pico de até 2 ampères.

Para testar as funcionalidades dos sistemas de detecção de faixas, detecção de objetos e prevenção de colisões, foi realizado um experimento com um veículo de brinquedo na pista de testes. O protótipo demonstrou ser capaz de manter uma direção autônoma, detectar objetos na estrada, realizar manobras e evitar colisões com o veículo de brinquedo, conforme ilustrado na Figura 38(a) e 38(b).

Figura 38 – Teste do protótipo em estrutura rodoviária artificial



(a) Detecção de objetos

(b) Autoguiado dentro de faixas

Fonte: (EL-HASSAN, 2020)

O sistema utiliza três sensores de cor que identificam as linhas brancas nos lados direito e esquerdo da estrada, bem como a faixa de pedestres. Além disso, foi testada a capacidade

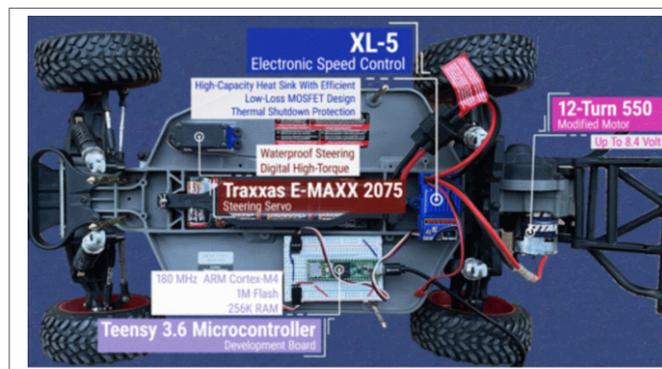
do veículo de parar adequadamente em um semáforo vermelho, para o qual foi utilizado um modelo de semáforo na pista de testes. O protótipo foi capaz de detectar o sinal vermelho e parar corretamente (EL-HASSAN, 2020).

Embora os resultados tenham sido promissores nas condições controladas com obstáculos simulados, El-Hassan (2020) reconhece que fora dessas condições, os sensores de baixo custo podem ter sua eficiência reduzida, o que pode colocar o condutor em risco. Portanto, para garantir a segurança, seriam necessários mais sensores e técnicas adicionais, além dos testados no protótipo, a fim de aprimorar a capacidade de detecção e prevenção de colisões em diferentes cenários.

Yu et al. (2021) propõe o desenvolvimento de um veículo autônomo em escala reduzida e de baixo custo, equipado com uma unidade de processamento da NVIDIA, um Ydlidar G4¹⁰ LiDAR e uma câmera estéreo ZED para detecção e reconhecimento de objetos.

A unidade de processamento é um Jetson TX2. O veículo é composto por três níveis que suportam diferentes componentes, sendo o nível mais baixo o chassi do veículo (conforme ilustrado na Figura 39), baseado no carro de controle remoto Traxxas *Scale Remote Control AWD* de escala 1/20. O sistema de bateria também está alocado nesse nível.

Figura 39 – Primeiro nível da estrutura veicular autônoma proposta por YU et al.



Fonte: (YU et al., 2021)

O segundo nível do veículo autônomo proposto por Yu et al. (2021) é sustentado por quatro espaçadores e contém a placa de desenvolvimento da NVIDIA a Jetson TX2 ilustrado na Figura 40(a), uma ferramenta desenvolvida para computação de inteligência artificial de alta performance capaz de processar grandes quantidades de dados e transferi-los rapidamente.

Além disso, uma câmera estéreo ZED foi instalada na parte frontal do segundo nível, juntamente com a NVIDIA Jetson TX2, permitindo detecção de objetos em 3D a longo alcance

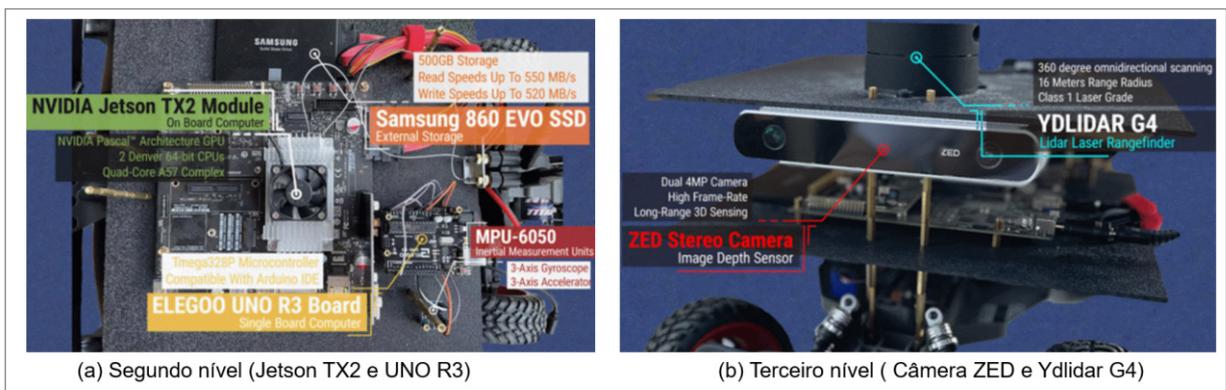
¹⁰ O Ydlidar G4 é um modelo específico de sensor LiDAR que oferece detecção de alta precisão e é amplamente utilizado em sistemas de navegação autônoma.

e rastreamento de movimento. A Jetson é alimentada pela bateria por meio de uma conexão USB, que também fornece alimentação para outros sensores.

No terceiro nível conforme ilustrado na Figura 40(b), o *scanner* Ydlidar G4 LiDAR é utilizado para a detecção de objetos, obstáculos, mapeamento e localização. Ele gira em alta velocidade e emite raios verticais para medir a distância ao seu redor.

Os sensores transferem os dados para a placa de computação por meio de uma porta *USB*, que, por sua vez, envia sinais para a Unidade de Controle de Movimento (MCU), responsável pelo controle do movimento e da frenagem do veículo (YU et al., 2021).

Figura 40 – Níveis 2 e 3 do veículo autônomo proposto por YU et al.



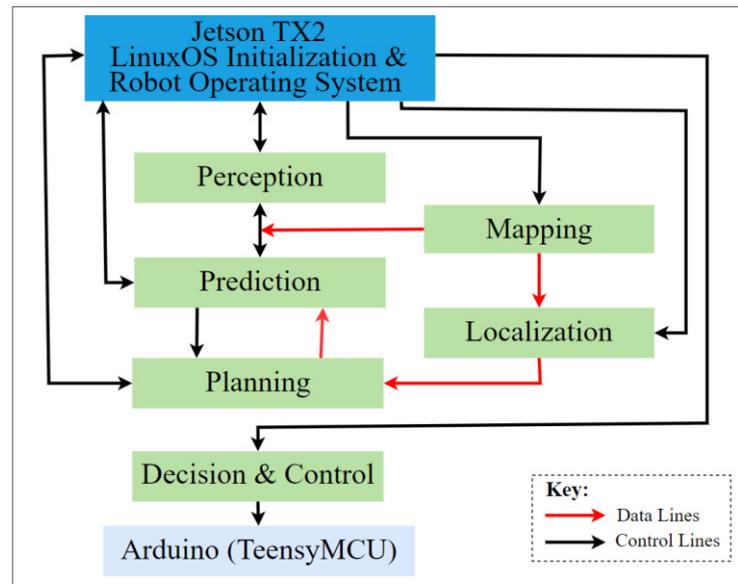
Fonte: Modificada de (YU et al., 2021)

De acordo com Yu et al. (2021), a base do *software* (conforme Figura 41) é o sistema operacional Ubuntu 18.04, baseado em ARM, que utiliza o sistema ROS, voltado para processamento, troca e coordenação de dados de diferentes módulos autônomos relacionados à condução e para tomada de decisões.

Os módulos autônomos incluem localização, mapeamento, percepção, previsão, planejamento e controle, que recebem entradas dos sensores de câmera, LiDAR e IMU, trocando informações com o ROS para alcançar decisões finais e controlar o movimento dos motores através do Arduino.

Yu et al. (2021) desenvolveram essa abordagem ao reconhecerem que executar o módulo de percepção continuamente enfraqueceria consideravelmente o desempenho da unidade de computação. Portanto, a linha adotada visa promover uma economia de carga computacional. O desempenho do veículo foi testado em um espaço que simula um estacionamento com comprimento de 4,28 metros e largura de 3,0 metros. Fitas amarelas foram utilizadas para indicar os limites e as vagas, que possuem largura de 0,7 metros.

Figura 41 – Arquitetura de software proposta por YU et al.



Fonte: Modificada de (YU et al., 2021)

Para avaliar o desempenho, os autores desenvolveram uma ferramenta de desenvolvimento baseada no OpenCV para gerar um mapa virtual do estacionamento e calcular as coordenadas de cada linha. Esse mapa calibrado é utilizado pelo módulo de planejamento de trajeto para gerar o percurso para o veículo autônomo.

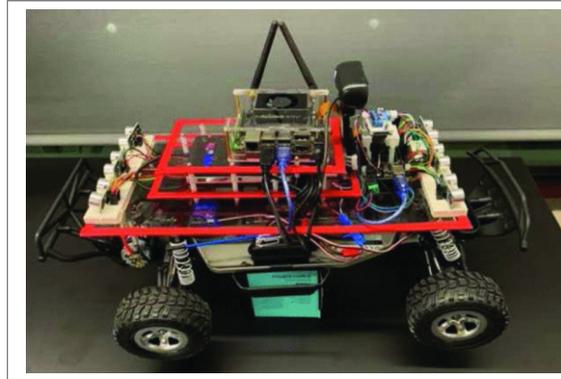
Desta forma, o veículo autônomo se movimentou com sucesso e ajustou o movimento em situações desafiadoras, sendo capaz de contornar obstáculos e alcançar os destinos planejados. Outro ponto positivo é que o algoritmo demonstrou robustez e eficiência mesmo em situações complexas, com economia de carga computacional.

O objetivo do trabalho de Robila et al. (2021) é desenvolver modelos autônomos em pequena escala, com ênfase na modelagem e implementação de controladores PID (*Proportional Integral Derivative*) para o controle e orientação de veículos pequenos, bem como sistemas de detecção de obstáculos.

O protótipo do veículo em escala reduzida foi construído a partir de um modelo Traxxas¹¹, um caminhão em escala 1/10 com tração nas duas rodas (como ilustra a Figura 42), equipado com motores Titan 12-Turn 550 e controladores eletrônicos de velocidade XL5. Esse modelo é semelhante às experiências de direção do mundo real e permite que o veículo opere em uma variedade de condições climáticas (ROBILA et al., 2021).

¹¹ Disponível: <https://traxxas.com/products/models/electric/58024slash>.

Figura 42 – O veículo Traxxas proposto por ROBILA et al.

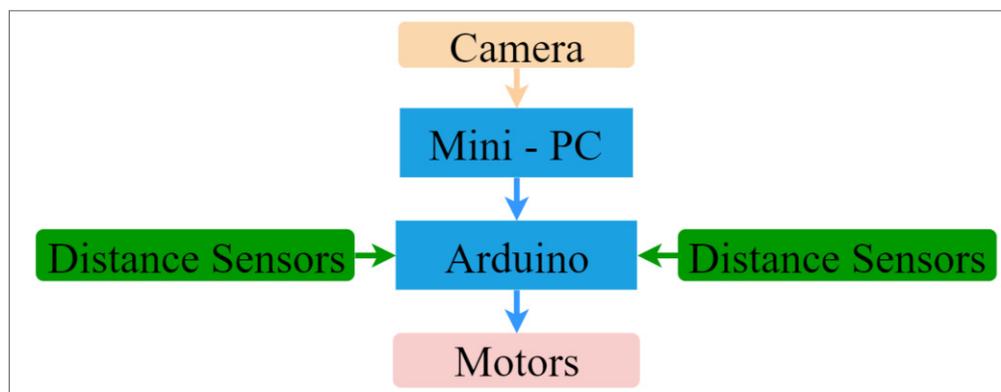


Fonte: (ROBILA et al., 2021)

De acordo com Robila et al. (2021), a escolha da plataforma para o sistema de computação física foi a NVIDIA Jetson Xavier, executando o sistema operacional Ubuntu 18.04. Essa plataforma foi selecionada por ser pequena, leve e poderosa o suficiente para atender às necessidades do projeto. A placa Arduino MEGA 2560 foi escolhida para executar os algoritmos de controle de direção baseados em PID e enviar comandos aos motores para movimentar o veículo no ambiente de direção.

Para coletar informações visuais do ambiente, uma câmera de alta resolução foi fixada na parte superior do veículo, permitindo recursos como rastreamento de faixa e reconhecimento de sinais de trânsito em tempo real. Os dados coletados pela câmera são convertidos em instruções enviadas ao veículo para controlar a aceleração, desaceleração e direção. A Figura 43 apresenta a arquitetura dos componentes do veículo autônomo desenvolvido por Robila et al. (2021).

Figura 43 – A arquitetura do veículo autônomo proposto por ROBILA et al.



Fonte: Modificada de (ROBILA et al., 2021)

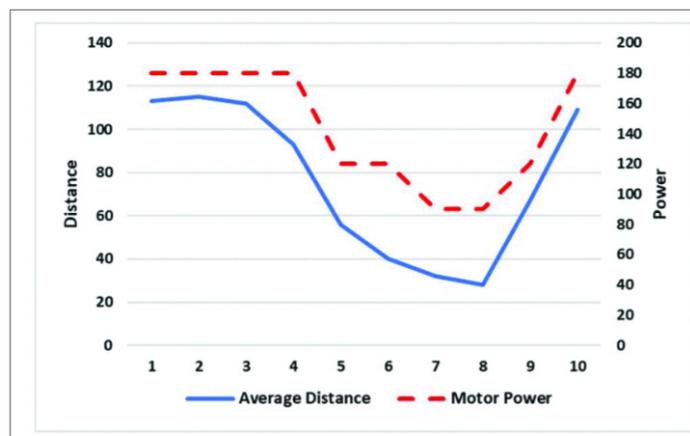
O veículo autônomo desenvolvido por Robila et al. (2021) é capaz de executar tarefas como detecção de obstáculos, detecção de sinais de parada e rastreamento de faixa, utilizando

uma combinação de câmera de alta resolução, sensores de distância SONAR, um sistema de computação física composto por NVIDIA Jetson Xavier e Arduino MEGA 2560, além do ROS como plataforma de comunicação entre os componentes.

Segundo Robila et al. (2021), os principais componentes de *software* utilizados neste veículo autônomo são o ROS, Python e Arduino, que são executados simultaneamente em um sistema operacional Ubuntu. A utilização do ROS é responsável pela comunicação entre os sensores e os programas relacionados a eles, enquanto o PID no Arduino é responsável pela execução dos componentes mecânicos do robô, como a direção e velocidade. Para isso, foram utilizados os editores e assinantes do ROS para publicar os dados em canais específicos que o código do Arduino pudesse acessar e processar.

O trabalho de Robila et al. (2021) foi dividido em três partes: detecção de obstáculos, detecção de sinais de parada e rastreamento de faixa, todas envolvendo o uso do algoritmo PID e a comunicação entre as seções por meio do ROS. Na Figura 44, é possível visualizar o mapeamento dos resultados combinados de três sensores em 10 pontos de dados obtidos em um teste veicular. Os autores utilizaram uma prancha na frente do veículo para simular um obstáculo, medindo simultaneamente a distância do veículo até o obstáculo e a sua velocidade, como relatado por (ROBILA et al., 2021).

Figura 44 – Gráfico da distância medida pelos ultrassônicos (linha azul) e a potência do motor (linha vermelha)



Fonte: (ROBILA et al., 2021)

Os dados foram extraídos de uma matriz que foi atualizada repetidamente, contendo as informações de distância dos 3 sensores (valores de ponto flutuante), velocidade e valores de direção (valores inteiros). A linha azul na Figura 44 representa o mapeamento da distância combinada, enquanto a linha vermelha tracejada representa a potência do motor.

Como resultado, os autores obtiveram uma implementação funcional do controlador PID

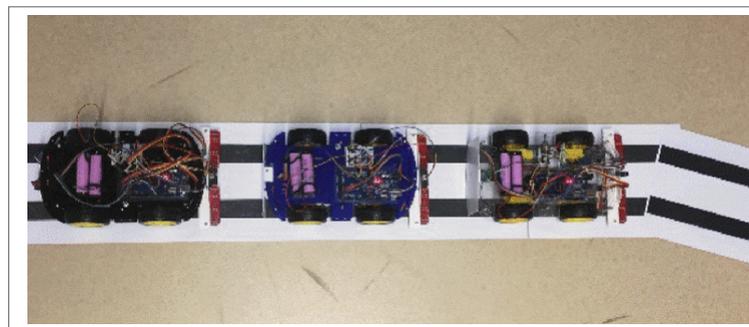
em conjunto com o ROS, capaz de responder rapidamente a todos os experimentos. Além disso, realizou-se a integração dos módulos de dados do sensor com os módulos de controle, garantindo que os valores fossem enviados corretamente pelos programas de rastreamento de faixa e detecção de sinal de parada, e recebidos pelo PID do Arduino e convertidos adequadamente.

3.3 PLATOON DE VEÍCULOS EM ESCALA REDUZIDA

O *Platoon* é uma técnica de direção que permite que veículos se movam em formação próxima, para melhorar a eficiência do transporte rodoviário e reduzir o consumo de combustível. O pelotão de veículos autônomos é mais comumente usado em veículos comerciais, como caminhões, ônibus e vans, nos quais é possível obter economias significativas de combustível ao seguir em formação próxima, melhorando a segurança nas estradas, uma vez que os veículos podem se comunicar e coordenar suas ações em tempo real (AREM; EENENNAAM; VISSER, 2018).

O artigo de Luu, Lupu e Chirita (2019) apresentou protótipos de carros em pequena escala que podem ser organizados em um platoon, como pode ser visto na Figura 45. Cada componente foi testado separadamente em tempo real antes da integração. O objetivo do estudo foi fornecer uma análise mais eficiente da tecnologia de controle de navegação com um para evitar colisões (*Collision Avoidance, CA*). O desenvolvimento foi dividido em duas etapas: *hardware* e *software*.

Figura 45 – Protótipos de veículos para platooning e lane following proposto por LUU; LUPU; CHIRITA



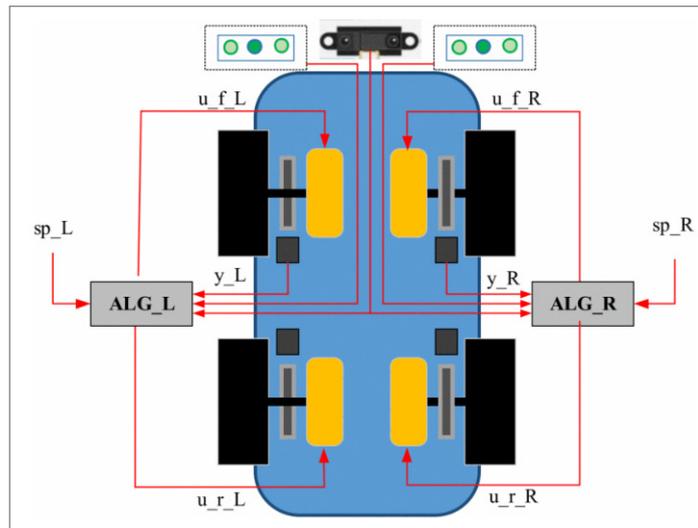
Fonte: (LUU; LUPU; CHIRITA, 2019)

No que diz respeito ao *hardware*, foi utilizado um chassi 4WD (*Four Wheel Drive*) de acrílico na escala 1/20, controlado por duas mini pontes H L9110S e uma plataforma Arduino Mega 2560. Os sensores utilizados foram o *IR SHARP*¹² para o reconhecimento de objetos

¹² É um sensor infravermelho usado para medir distâncias. Ele utiliza luz infravermelha para emitir um feixe

e obstáculos, um sensor *Line Tracker* de 3 canais para localização da linha preta em uma superfície branca de estrada, e sensores encoders fixados em cada motor para obter informações de velocidade. A Figura 46 apresenta o diagrama do veículo desenvolvido por Luu, Lupu e Chirita (2019).

Figura 46 – Diagrama do veículo para controle lateral



Fonte: (LUU; LUPU; CHIRITA, 2019)

No aspecto do *software*, Luu, Lupu e Chirita (2019) utilizaram a linguagem C++ para programar a plataforma Arduino Mega 2560, permitindo o controle em tempo real do comportamento do carro, evitando colisões e mantendo uma distância segura do veículo à frente na estrada. O sistema de controle do carro foi projetado e construído com o algoritmo de controle RST (*Reference Signal Tracking*).

Como resultado, Luu, Lupu e Chirita (2019) implementaram um veículo facilmente disponível no mercado e de baixo custo, capaz de operar em ambientes fechados. Os autores conseguiram identificar a precisão e a sensibilidade dos dispositivos, mesmo sendo de baixo custo. O carro foi capaz de navegar evitando colisões com controle lateral e longitudinal. Além disso, eles planejam implementar um algoritmo RST em tempo real para o *Platoon*, permitindo o seguimento de faixa, a manutenção de distância e velocidade seguras entre os veículos, bem como o desenvolvimento de protocolos de comunicação V2V (LUU; LUPU; CHIRITA, 2019).

A proposta apresentada por Lee et al. (2022a) consiste em uma plataforma aberta de pesquisa denominada Cyclops, voltada para a validação de ideias e abordagens relacionadas a pelotões de veículos pesados autônomos. No entanto, existem várias dificuldades associadas de luz e detectar o reflexo desse feixe quando atinge um objeto.

ao uso de caminhões em tamanho real, como seu tamanho, peso, espaço necessário para validação e o risco de colisões, entre outros.

Para contornar essas dificuldades, Lee et al. (2022a) optaram pela prototipagem de caminhões semi-reboques fabricados pela empresa Tamiya em 2008. Esses modelos elétricos possuem um chassi de alumínio e estão na escala de 1/14. Os protótipos são equipados com uma câmera frontal com um campo de visão de 180 graus, instalada na parte superior, um sensor LiDAR com alcance de detecção de 25 metros, a placa Nvidia Jetson AGX Xavier e a plataforma de controle OpenCR. Além disso, os caminhões contam com recursos de computação, comunicação WiFi e controle. A Figura 47 apresenta algumas fotos desses caminhões em escala reduzida.

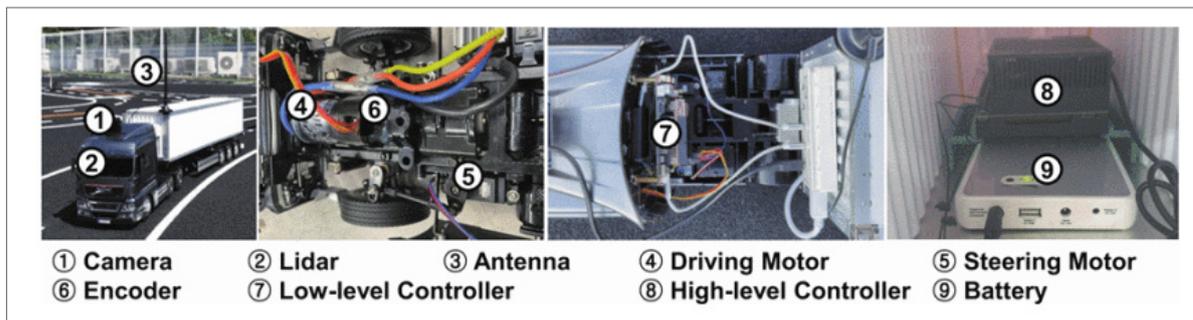
Figura 47 – Cyclops



Fonte: (LEE et al., 2022a)

Para movimentação da direção os autores utilizaram um servomotor com torque de $3,3Kg/cm$, para tração do veículo a escolha foi o motor BLCD de 1800KV. Todo o sistema elétrico do veículo é alimentado por uma bateria BiXPower com capacidade de 96Wh e um conversor de 10 Volts. A Figura 48 destaca os principais componentes, como sensores e plataformas de computação Lee et al. (2022a).

Figura 48 – Projeto do caminhão em escala reduzida desenvolvido por Lee et al. (2022a)



Fonte: (LEE et al., 2022a)

A proposta de Lee et al. (2022a) se originou pela constatação de que os simuladores

Hardware-in-the-Loop (HiL) são geralmente utilizados para validar algoritmos de controle, mas não para validar contramedidas para cenários críticos de segurança. Buscando contornar essa situação, foi desenvolvido um banco de teste de pelotões de caminhões em escala.

De acordo com Lee et al. (2022a), o sistema de percepção para cada veículo é composto por um sistema de rastreamento de objetos baseado em LiDAR e um sistema de detecção de faixas de rodagem, sendo que a atribuição do primeiro é a de manter a distância até o veículo líder, enquanto o segundo é o de manter o veículo dentro da pista. O sistema de detecção de faixa de rodagem é otimizado para o posicionamento de caminhões.

Portanto, a câmera detecta as faixas da pista para controle lateral, enquanto o LiDAR mede a distância longitudinal e a localização lateral de um trailer anterior. Como resultado, Lee et al. (2022a) constataram a viabilidade de se manter uma velocidade de $1,2m/s$ para os veículos em escala reduzida, o que corresponderia a $60km/h$ em caminhões reais, o que permite reduzir a lacuna entre os caminhões do pelotão para até $0,6m$, correspondendo a $8,4m$ em caminhões reais, desde que mantida uma velocidade de $1,0m/s$.

3.4 COMPARAÇÃO DOS TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, serão apresentadas as características comparativas dos trabalhos relacionados que serviram de embasamento para o trabalho proposto, tais como: (i) os sensores utilizados; (ii) a presença de algum tipo de Sistema Avançado de Assistência ao Condutor (ADAS) nos veículos; (iii) a inclusão dos protótipos desenvolvidos em um *Platoon*; (iv) a Computação de Alto Desempenho (*High-Performance Computing*, HPC); (v) a escala da plataforma utilizada; e (vi) a plataforma microcontrolada (MCU) utilizada.

Ao analisar a Tabela 1, observa-se uma prevalência de estudos voltados para a viabilidade de veículos autônomos em pequena escala, nos quais são utilizados equipamentos de baixo custo, dependendo da plataforma. No entanto, os autores identificaram a velocidade e a necessidade de processar múltiplos dados simultaneamente como obstáculos a serem superados. Essa complexidade aumenta em situações de trânsito real com a presença de pedestres, informações de trânsito, condições da pista e outros veículos, o que inviabiliza a utilização desses elementos de baixo custo.

Por essa razão, todos os artigos relacionados abordaram veículos automatizados ou controlados, mesmo que não fossem diretamente aplicados em um pelotão. A escolha dos sensores e da plataforma embarcada de computação é importante, pois define as possíveis limitações na

percepção do ambiente rodoviário e direciona a implementação do ADAS ou ADS que podem ser melhor aplicados nos veículos em pequena escala e, posteriormente, nos veículos em escala real.

Quanto ao desenvolvimento dos protótipos, foram utilizadas várias alternativas, como a compra de um veículo de pequena escala pronto, que precisava apenas de adaptações, ou a impressão em 3D das peças necessárias, como no trabalho dos autores Duarte e Figueiredo (2022). A plataforma Traxxas utilizada pelos Robila et al. (2021), Yu et al. (2021) e Ciuciu et al. (2019) tem como ponto negativo a questão de suas dimensões, o que não permite a implementação de equipamentos mais robustos, além da autonomia da bateria também ser um fator importante.

O foco na viabilidade do uso de equipamentos de baixo custo pode explicar, em parte, o número reduzido de pesquisas com foco em pelotões de veículos autônomos. As exceções dos trabalhos apresentados são as pesquisas de Lee et al. (2022a) e Luu, Lupu e Chirita (2019). No entanto, a proposta de Luu, Lupu e Chirita (2019) não leva em conta as condições de tráfego reais, o que é um ponto positivo no trabalho de Lee et al. (2022a), já que os testes dos veículos desenvolvidos foram efetuados em rodovias reais. O primeiro caso, a proposta é construir um banco de dados de cenários de pesquisas sobre veículos autônomos em comboio para simulações. No segundo caso, a proposta é desenvolver uma arquitetura eletrônica e comunicacional do projeto que permita a abordagem em comboio.

Quanto aos sensores, não há grandes diferenças entre os trabalhos abordados, pois a maioria investiga a utilização de sensores infravermelhos e sonares para medição de distâncias e velocidades, plataformas de computação da Nvidia projetadas para aplicações de inteligência artificial e aprendizado de máquina, ou mini computador como no caso do Raspberry Pi 3, utilizado para o processamento de dados. Além disso, são utilizadas câmeras de alta definição e câmeras estéreo para identificação de objetos e faixas da pista, bem como sistemas de posicionamento global (GPS), RADAR e LiDAR.

A proposta deste trabalho se diferencia dos outros trabalhos por ser o desenvolvimento de uma infraestrutura veicular em pequena escala para um pelotão de veículos autônomos. Esses protótipos serão equipados para realizar as funções de direção automatizada, utilizando câmera estereoscópica e radar de ondas milimétricas, juntamente com os sistemas de controle de cruzeiro adaptativo (ACC), detecção de objetos (OD), frenagem automática de emergência (AEBS) e assistente de permanência em faixa de rodagem (LKAS).

Tabela 1 – Comparativo do trabalhos relacionados

Trabalhos	Sensores	ADAS	Platoon	HPC	Escala	MCU
Beleno et al. (2012)	Câmera, Bússola, Acelerômetros, GPS, Giroscópios	OD, LKAS	-	-	1/10	Arduino Mega 2560, RF XBEE
Almeida et al. (2019)	GPS, IMU, Câmera, Giroscópio	OD	-	Computador GCS	1/4	Arduino Mega 2560, Internet Shied
Ciuciu et al. (2019)	Sonar, Infrared, Tensão, Inclinação	OD	-	-	1/18	Arduino NANO
Luu, Lupu e Chirita (2019)	SHARP IR, Line Tracker, Encorders	-	X	Jetson TX2	1/20	Arduino UNO
Amado et al. (2019)	Radar, GPS, IMU LiDAR, câmeras	LKAS	-	Jetson TX2	1/4	Arduino Mega 2560
Bill e Shahnasser (2019)	SHARP IR, Câmera	-	-	Jetson TX2	1/18	Arduino UNO
El-Hassan (2020)	Sonares, LiDAR, RGB, GPS, Câmera	OD, LKAS	-	Raspberry Pi 3B+	1/20	Arduino Mega 2560
Yu et al. (2021)	LiDAR, Câmera, IMU	OD	-	Jetson TX2	1/20	ELEGOO UNO R3 e Teensy 3.6
Robila et al. (2021)	Câmera, Sonares	OD	-	Jetson Xavier	1/10	Arduino Mega 2560
Lee et al. (2022a)	LiDAR, Câmera	OD, LKAS	X	Jetson AGX Xavier	1/14	OpenCR 1.0
Duarte e Figueiredo (2022)	Potenciômetro, Encorders	LKAS, AEBS	-	-	1/4	Arduino Nano, Pro Mini
Proposto	Encorders, Potenciômetro, Micro Switch, Radar, Câmeras	ACC, AEBS, LKAS, OD	X	Jetson AGX Orin	1/4	Arduino Mega 2560 ESP32

Fonte: O autor (2023)

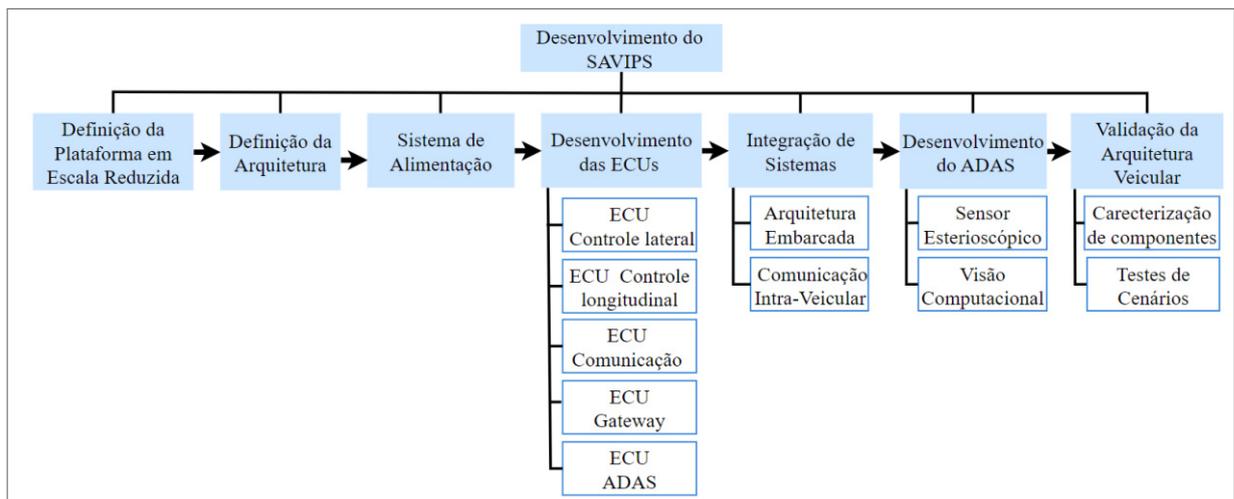
4 SAVIPS: UMA INFRAESTRUTURA DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS EM PEQUENA ESCALA PARA PLATOON

A proposta do SAVIPS é o desenvolvimento de uma infraestrutura veicular em escala reduzida, que será instrumentalizada para permitir que os usuários validem e analisem dados em um sistema ADAS aplicado a um *Platoon*. Essa infraestrutura representa uma alternativa de baixo custo em relação à utilização de um veículo em escala real.

4.1 FLUXO DO PROJETO SAVIPS

O método utilizado para organizar o desenvolvimento deste trabalho foi o EAP (*Project Analytical Structure*) conforme mostra a Figura 49.

Figura 49 – Fluxo do desenvolvimento do projeto



Fonte: O autor (2023)

O EAP é um diagrama que divide o escopo de um projeto visual e hierarquicamente em partes menores para facilitar o gerenciamento do cronograma. É exibido em forma de árvore com um "tronco" na parte superior e "ramos" na parte inferior (ESPINHA, 2020).

O fluxo começa à esquerda, com a definição da plataforma em escala reduzida, na qual uma nova arquitetura foi implementada e o sistema de alimentação foi modificado. Em seguida, o desenvolvimento das ECUs é detalhado, com uma ramificação para a criação individual de cada ECU. A integração dos sistemas ocorre por meio da arquitetura embarcada e da comunicação intra-veicular. Uma das partes mais importantes do diagrama é o desenvolvimento do ADAS, que utiliza sensores estereoscópicos e visão computacional.

O último bloco à direita do fluxo destina-se à validação da arquitetura veicular, que se divide em fases de teste do que foi desenvolvido na parte esquerda do fluxo. Esses testes são realizados por meio de osciloscópio, multímetro e no próprio veículo em escala reduzida em diferentes cenários, a fim de obter resultados gráficos que permitam a análise dos sistemas de controle.

Nas próximas seções deste capítulo, serão apresentadas as principais etapas do desenvolvimento deste trabalho.

4.2 DEFINIÇÃO DA PLATAFORMA EM ESCALA REDUZIDA

No Capítulo 3, foram abordados artigos que tratam de veículos em escala reduzida. Cada artigo apresentou características específicas, no entanto, a maioria deles optou por componentes embarcados semelhantes e de baixo custo. Esses artigos serviram como base para a definição da plataforma em escala reduzida utilizada neste trabalho.

Para a definição da plataforma foram analisadas algumas características de cada modelo utilizado pelos autores citados, como escala, dimensões, tração, motores, chassi, entre outros. A Tabela 2 apresenta algumas das características analisadas nos veículos mencionados.

Tabela 2 – Características dos veículos em escala reduzida citados no Capítulo 3

Fabricante	Escala	Dimensões	Modelo do motor	Tração
Traxxas	1/10	Não informado	Brushless, 12V	4x2
Bandeirantes	1/4	124(C)x71(L)x74(A)cm	8.000RPM 12.000RPM, 12V	4x2
Tamiya	1/10	42(C)x18(L)cm	Motor/Diferencial	4x2
SuperDroid	1/6	71(C)x58(L)x25(A)cm	12RPM, 24V	4x4
Maisto RC	1/18	28(C)x16(L)x15(A)cm	Não informado	4x4
Bandeirantes	1/4	117(C)x70, 5(L)x47, 5(A)cm	Não informado	4x2
Não informado	1/20	25, 6(C)x15(L)x6, 5(A)cm	200RPM, 6V	4x4
Traxxas	1/20	Não informado	Titan12-Turn550	4x2
Traxxas	1/10	53, 5(C)x28, 1(L)x20, 6(A)cm	Titan12-Turn550	4x2
Não informado	1/20	25, 6(C)x15(L)x6, 5(A)cm	200RPM, 6V	4x4
Tamiya	1/14	53, 2(C)x19, 3(L)x30(A)cm	BLCD/Transmissão	4x2

Fonte: O autor (2023)

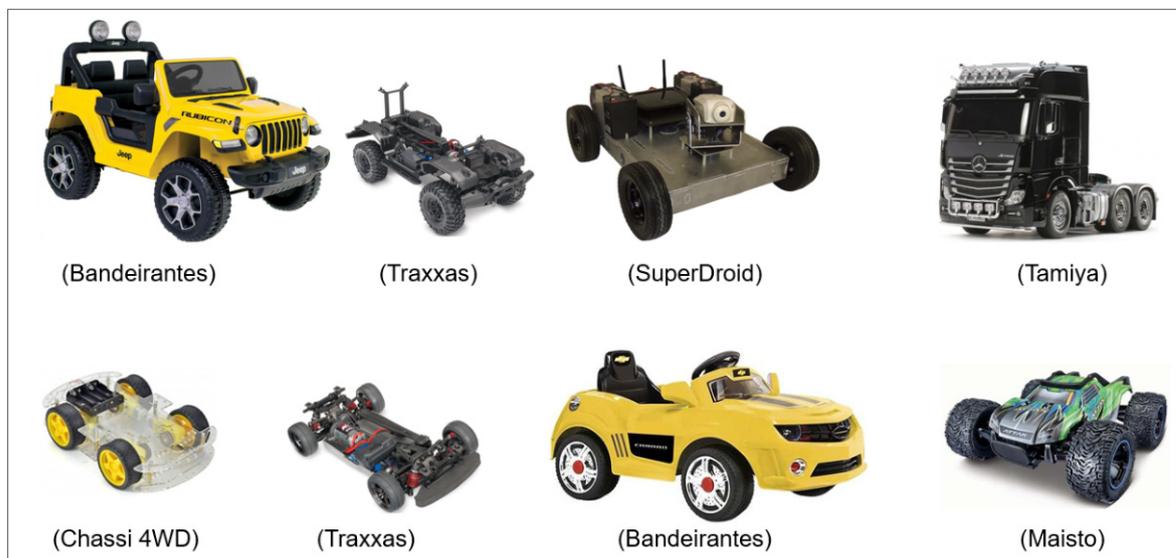
Existem várias opções de plataformas de veículos em escala reduzida disponíveis para projetos de veículos autônomos. Uma das plataformas mais populares é a Traxxas, conhecida

por sua durabilidade e capacidade de personalização. Os autores Yu et al. (2021) e Robila et al. (2021) escolheram a plataforma Traxxas para o desenvolvimento de seus trabalhos devido à sua facilidade de personalização, à disponibilidade de diversos acessórios e à robustez, com um chassi resistente e componentes duráveis, capazes de suportar condições extremas de uso.

Outra opção é a plataforma Tamiya, valorizada por sua alta qualidade de construção e facilidade de personalização, escolhida pelos autores Beleno et al. (2012) e Lee et al. (2022a). A Tamiya também oferece uma ampla variedade de modelos em diferentes escalas. A SuperDroid é uma empresa que oferece plataformas altamente personalizáveis com motores robustos e é frequentemente utilizada em projetos de pesquisa e desenvolvimento de veículos autônomos e controlados, conforme escolhido por Almeida et al. (2019).

O modelo de chassi definido por Luu, Lupu e Chirita (2019) e El-Hassan (2020) é construído em acrílico e é uma plataforma popular para projetos de robótica e veículos autônomos. Esse modelo de chassi é leve, durável e equipado com quatro motores e rodas independentes, além de ter um baixo custo em comparação com outros modelos. Todas as plataformas mencionadas podem ser equipadas com uma variedade de sensores e sistemas de controle para permitir a operação autônoma ou controlada. A Figura 50 ilustra essas plataformas.

Figura 50 – Plataformas em pequena escala



Fonte: O autor (2023)

Os autores Duarte e Figueiredo (2022) escolheram o Jeep Bandeirantes¹ como plataforma veicular para o desenvolvimento do projeto de veículo elétrico em escala reduzida. O Jeep Bandeirantes é baseado no icônico Jeep Willys e apresenta um *design* robusto, com carroceria

¹ Disponível em: <https://brinquedosbandeirante.com.br/produtos/jeep-wrangler-amarelo-r-c-eletrico-12v/>

em plástico resistente e pneus de borracha maciça. Esse modelo possui as maiores dimensões e semelhança com um veículo em escala real em comparação com outros modelos disponíveis. A montagem do veículo é relativamente simples e pode ser realizada por qualquer pessoa com ferramentas básicas, seguindo as instruções detalhadas fornecidas no manual do fabricante.

Desta forma, a escolha pelo modelo Jeep Bandeirantes Wrangler (ver Figura 51) foi baseada em critérios como o espaço interno, suficiente para acomodar todos os equipamentos necessários, a tração traseira nas rodas e a opção de esterçamento do volante para ambos os lados, permitindo a realização de testes sem a necessidade de um motorista.

Figura 51 – Veículo elétrico em escala reduzida



Fonte: O autor (2023)

Em relação ao esterçamento da direção, o Jeep Bandeirantes Wrangler apresenta geometrias das barras do sistema de direção semelhantes ao princípio de Ackermann². Isso significa que os braços de direção estão dispostos de forma quase paralela, como mostrado na Figura 52. Essa configuração resulta em ângulos de esterçamento quase iguais tanto para a direção à direita quanto para a direção à esquerda.

Figura 52 – Conjunto mecânico da direção do Jeep Bandeirantes



Fonte: O autor (2023)

² Conceito de geometria de direção que visa garantir que as rodas dianteiras de um veículo sigam trajetórias precisas durante curvas, permitindo que as rodas internas e externas girem em diferentes raios

Outro fator é que este modelo é bastante comum no mercado brasileiro e pode ser facilmente modificado para a instalação dos equipamentos necessários para o desenvolvimento do *Platoon*. Neste trabalho, foram utilizados dois veículos em escala 1/4, os quais foram instrumentalizados, possibilitando a implementação do sistema de formação de pelotão e permitindo a realização de testes em diferentes cenários para validar a eficácia do sistema proposto. A Tabela 3 descreve as principais especificações do Jeep Bandeirantes Wrangler.

Tabela 3 – Especificações do veículo elétrico em escala reduzida

Autonomia da bateria	45min
Bateria	12V/7A
Frequência do controle remoto	2,4GHz
Velocidade Máxima	5Km
Peso do veículo	19Kg
Material do Chassi	Plástico
Motores	8000RPM e 12000RPM
Peso Suportado	35Kg no máximo

Fonte: (BANDEIRANTES, 2018)

Este modelo de veículo elétrico em escala reduzida possui três caixas de redução (conforme Figura 53) responsáveis pelo deslocamento do veículo. Uma das caixas de redução é destinada ao controle do esterçamento da direção e possui um motor corrente contínua de 8.000 RPM, enquanto as outras duas caixas de redução possuem motores de 12.000 RPM, as quais são responsáveis pela tração, permitindo assim que o veículo alcance uma velocidade média de até 5km/h.

Figura 53 – Caixas de reduções do Jeep Bandeirantes Wrangler



Fonte: O autor (2023)

As caixas de reduções são constituídas por conjuntos de engrenagens e um motor conforme Figura 54, com a finalidade de aumentar o torque da tração do veículo elétrico de pequeno porte.

Figura 54 – Componentes internos da caixa de redução



Fonte: O autor (2023)

A escolha desses veículos em escala reduzida permite o desenvolvimento e teste de algoritmos para sistemas ADAS e ADS de forma mais acessível e segura. Além disso, possibilita a realização de testes em ambientes controlados, o que é difícil de obter com veículos em escala real. Essa abordagem contribui para o avanço da pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas à condução autônoma, com menor custo e maior disponibilidade.

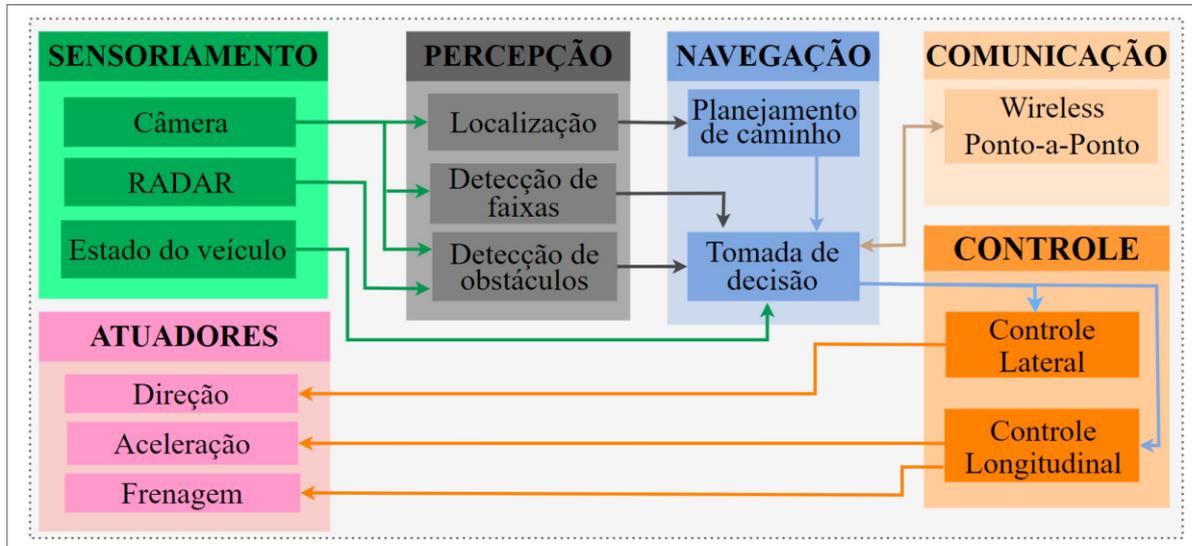
É importante ressaltar que o uso desses veículos elétricos pode aumentar a produtividade dos testes, permitindo a realização de mais testes em um período mais curto. Além disso, o tamanho reduzido dos veículos facilita a simulação das interações entre o veículo e o ambiente, o que é especialmente relevante para testes de segurança.

4.3 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA

De acordo com Liu et al. (2021), a arquitetura de um sistema veicular autônomo em pequena escala é composta por vários módulos e sistemas, como ECUs, sistemas de navegação, sensoriamento, comunicação e atuadores. Cada um desses módulos/sistemas desempenha uma função específica e trabalha em conjunto para garantir o correto funcionamento do sistema veicular autônomo.

Assim, a definição da arquitetura dos veículos elétricos em escala reduzida neste trabalho envolveu desde a seleção dos componentes eletrônicos e tecnologias aplicáveis em veículos de escala real até a definição da comunicação entre esses componentes. A Figura 55 ilustra a arquitetura geral de *software* e *hardware* proposta para os veículos elétricos de pequena escala do SAVIPS (*A Small-Scale Autonomous Vehicle Infrastructure for Platoon*).

Figura 55 – Proposta de arquitetura



Fonte: O autor (2023)

Essa arquitetura inclui camadas de *software* e *hardware* que trabalham em conjunto para permitir que o veículo opere de forma autônoma. As camadas são: sensoriamento, percepção, navegação, comunicação, controle e atuadores.

4.3.1 Sensoriamento

Segundo Rosero et al. (2020) a camada de sensoriamento é responsável por coletar informações sobre o ambiente externo e o estado do veículo por meio de uma variedade de sensores. Essa camada é composta por câmeras, radares e sensores veiculares, os quais são responsáveis por capturar dados brutos. Dados esses que são posteriormente interpretados e convertidos em informações úteis pela camada de percepção. A seguir, cada um desses componentes será detalhado:

- **Câmeras:** são dispositivos ópticos que captam imagens do ambiente visando identificar objetos e reconhecer padrões.
- **Radar:** é um sensor que utiliza ondas milimétricas para detectar a presença e a posição de objetos no ambiente.
- **Sensores veiculares:** são projetados para monitorar o estado e o comportamento do veículo. Eles podem incluir acelerômetros, giroscópios, potenciômetros, encoders, entre outros.

4.3.2 Percepção

A camada de percepção processa as informações coletadas pela camada de sensoriamento, permitindo a interpretação dos dados. Nessa etapa, ocorre a análise dos dados obtidos pelos sensores para identificar e compreender o ambiente em que o veículo está inserido. Algoritmos de Visão Computacional e Aprendizado de Máquina são aplicados para transformar os dados brutos em informações úteis (RUSSELL, 2016; LIU et al., 2018). Alguns dos principais processamentos realizados pela camada de percepção incluem:

- **Localização:** a utilização de técnicas e algoritmos para determinar com precisão a localização do veículo no espaço. Essa tarefa é realizada por meio da fusão de dados provenientes de diversos sensores/equipamentos.
- **Detecção de faixas:** por meio do processamento das informações provenientes das câmeras e outros sensores, a camada de percepção é capaz de identificar as faixas de tráfego presentes na estrada.
- **Detecção de obstáculos:** A camada de percepção utiliza técnicas de processamento de imagens e dados de radares, juntamente com outros sensores, para identificar e detectar diversos obstáculos presentes no ambiente, como pedestres, ciclistas, objetos estáticos, entre outros.

4.3.3 Navegação

Com base nas informações fornecidas pelo sistema de percepção, o sistema de navegação determina a melhor rota a ser seguida pelo veículo para atingir seu destino. Este sistema leva em consideração informações como a localização atual do veículo, as condições do tráfego e restrições de velocidade. A camada de navegação é responsável por duas tarefas: o planejamento de caminho e a tomada de decisão:

- **Planejamento de caminho:** esta camada utiliza as informações disponíveis sobre o ambiente, como mapas, dados de sensores e informações de localização, para determinar a melhor rota. O planejamento de caminho considera fatores como a distância, o tempo de percurso e as condições do ambiente, a fim de escolher a melhor trajetória.

- **Tomada de decisão:** Essa etapa ocorre em tempo real durante a execução do percurso e envolve a avaliação contínua das informações recebidas dos sensores, como a detecção de obstáculos e a situação do tráfego. A tomada de decisão leva em consideração aspectos de segurança, regras de trânsito e interações com outros veículos e pedestres (BRECHTEL; GINDELE; DILLMANN, 2011).

4.3.4 Comunicação

O veículo pode se comunicar com outros veículos e sistemas externos, como semáforos inteligentes, para obter informações adicionais sobre o ambiente e ajustar sua rota ou velocidade conforme necessário. A camada de comunicação é responsável por permitir a troca de informações entre os diferentes componentes e sistemas do veículo autônomo. Ela desempenha um papel essencial na coordenação e no compartilhamento de dados entre os diversos módulos, sensores e atuadores, possibilitando o funcionamento integrado do sistema na totalidade.

Dentro da camada de comunicação, são definidos o protocolo de comunicação e o tipo de comunicação a serem utilizados. O protocolo de comunicação estabelece as regras, formatos e procedimentos para o envio e recebimento de dados entre os dispositivos. Ele define, por exemplo, como os pacotes de dados são estruturados, como são endereçados e como são verificados para garantir a integridade e a confiabilidade das informações transmitidas.

4.3.5 Controle

A camada de controle tem a responsabilidade de executar as ações definidas pelo sistema de planejamento. Assim, essa camada ajusta a velocidade e a direção do veículo a fim de garantir que ele siga a rota planejada e evite colisões. Esta camada opera em conjunto com as informações provenientes das camadas anteriores, como sensoriamento, percepção, navegação e comunicação, a fim de tomar decisões e enviar comandos aos atuadores do veículo. Dentro dessa camada, são encontradas duas subcamadas: controle lateral e controle longitudinal, que serão descritas a seguir:

- **Controle lateral:** refere-se ao ajuste do movimento lateral ou da direção do veículo. Ele está relacionado com o alinhamento do veículo no centro da faixa de rolagem ou com ações para manter-lo paralelo a uma determinada trajetória, desvio de obstáculos e

mudanças de faixa (KHODAYARI et al., 2010). Geralmente as ações do controle lateral são baseadas na captura de imagens coletadas por meio de câmeras (KUUTTI et al., 2020).

- **Controle longitudinal:** refere-se ao controle do movimento longitudinal ou de velocidade do veículo. O controle longitudinal atua sobre os mecanismos de aceleração e freio do veículo, mantendo a velocidade relativamente constante ou distância segura em relação a um veículo predecessor (KHODAYARI et al., 2010). Ele também pode atuar como evita colisões traseiras. Para o cálculo de suas ações o controle longitudinal depende de medições de velocidade e distância relativa para veículos predecessores ou sucessores (KUUTTI et al., 2020).

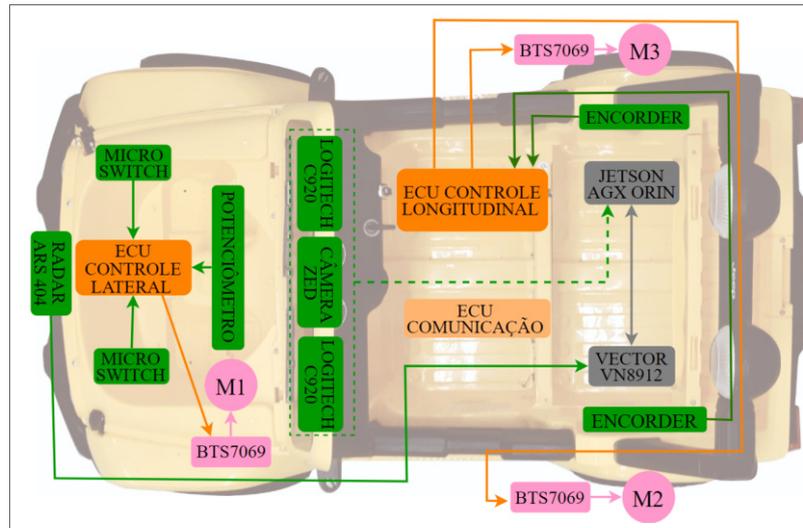
4.3.6 Atuadores

A camada de atuadores é responsável por converter os comandos de controle provenientes da camada superior em ações físicas no veículo. Essa camada abrange os componentes responsáveis por executar essas ações, como os sistemas de aceleração/frenagem e direção. No caso do controle de aceleração/frenagem, os atuadores são responsáveis por controlar a potência dos motores elétricos do veículo, aumentando ou diminuindo sua velocidade. Ao receber os comandos da camada de controle, eles ajustam a saída de corrente elétrica (no caso dos veículos elétricos) para alcançar a aceleração ou frenagem desejada.

No controle da direção, o atuador (motor) é responsável por movimentar o sistema de direção do veículo, como o volante. Eles recebem os comandos da camada de controle e movem o volante para a esquerda ou direita, permitindo que o veículo mude de direção conforme as instruções recebidas. Esses atuadores são projetados para garantir respostas rápidas e precisas, possibilitando o controle adequado do veículo autônomo. É importante ressaltar que a camada de atuadores trabalha em conjunto com a camada de controle para garantir a execução correta das ações no veículo. Os comandos de controle são convertidos em movimentos físicos pelos atuadores, possibilitando o controle efetivo e seguro do veículo autônomo.

A arquitetura adotada para os veículos elétricos de pequeno porte é composta por várias camadas que operam de forma integrada para garantir o funcionamento eficiente e seguro do sistema. Essas camadas desempenham funções específicas no processamento de informações e controle do veículo. A Figura 56 ilustra os componentes e blocos que compõem cada camada dessa arquitetura em um veículo em escala reduzida.

Figura 56 – Proposta da nova arquitetura para os veículos de pequeno porte



Fonte: O autor (2023)

4.4 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O Jeep Wrangler elétrico possui um sistema elétrico simples, composto por motores DC, faróis dianteiros e luzes auxiliares, um *MP3 player*, uma central de comando constituída de relés, um pedal (interruptor) que aciona a movimentação do veículo no modo manual, uma alavanca seletora de sentido de rotação e uma ignição para ligar e desligar o veículo (vide Figura 57). Todo o sistema elétrico é alimentado por uma bateria de chumbo-ácido selada com capacidade nominal de $7Ah$ e $12V$, que tem autonomia de no máximo 45 minutos.

Figura 57 – Composição do sistema elétrico do Jeep Wrangler



Fonte: O autor (2023)

No entanto, durante o desenvolvimento deste trabalho, foi necessário realizar uma mo-

dificação no sistema de alimentação de cada veículo de pequeno porte. Essa alteração foi realizada para assegurar o correto funcionamento de todos os equipamentos, sensores e ECUs instalados em cada veículo.

Um aspecto crucial na modificação do sistema de alimentação é compreender a potência e corrente consumidas pelos equipamentos e unidades eletrônicas, a fim de garantir que o novo sistema de alimentação possa fornecer energia adequada para o veículo e seus sistemas de controle.

Portanto, a Tabela 4 apresenta o consumo elétrico estimado dos equipamentos que serão embarcados em cada veículo.

Tabela 4 – Levantamento de consumo das correntes dos equipamentos

Equipamentos	Corrente	Tensão	Potência
Câmera ZED2i	0,38A	5V	2W
Jetson AGX Orin	6,67A	20V	40W
Radar ARS404	0,375A	12V	4,5W
Vector VN8912	1,35A	24V	16W
ECU A	0,205A	5V	0,22W
ECU B	0,205A	5V	0,22W
ECU C	0,205A	5V	0,22W
Motores	5,8A	12V	95W
Inversor	8,9A	12V	50W
Total	24,09A	5V a 24V	208,6W

Fonte: O autor (2023)

Com base na previsão do consumo elétrico dos equipamentos e unidades eletrônicas, que totaliza aproximadamente 24,09A, torna-se inviável utilizar a bateria original do Jeep Wrangler, que possui capacidade nominal de 7Ah. Além disso, alguns equipamentos, como o Vector VN8912 e a Jetson AGX Orin, possuem sua própria fonte de alimentação, o que torna necessário estabelecer uma rede de Corrente Alternada (*Alternating Current, AC*) de 220V.

Para atender a essas demandas, a bateria original do veículo foi substituída por duas baterias estacionárias de 45A para garantir uma autonomia de pelo menos 120 minutos de uso contínuo. A Tabela 5 descreve as características do modelo de bateria escolhido.

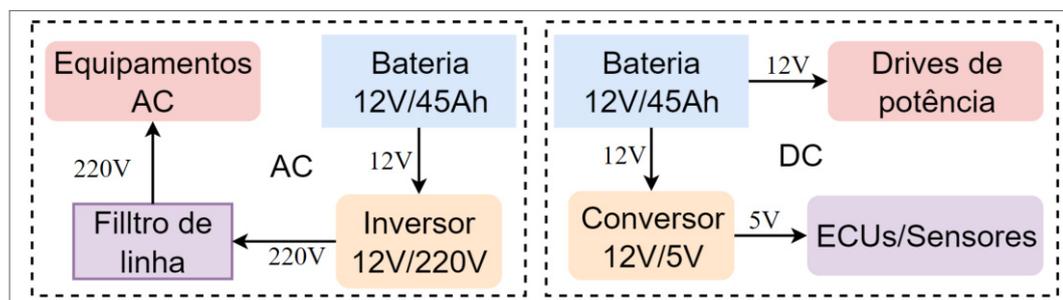
Tabela 5 – Características da bateria estacionária de 45A

Tensão Nominal	12V
Tipo de Bateria	Chumbo-ácida estacionária
Capacidade	45Ah
Tensão de Flutuação	13,4V/25°C a 13,8V/25°C
Tensão de Equalização	14,16V/25°C a 14,4V/25°C
Máxima Corrente de Recarga	9,2A
Peso	11,8Kg

Fonte: (MOURA, 2017)

As baterias estacionárias foram instaladas de forma independente, sendo uma bateria para a alimentação da rede CA e outra para a rede DC, o que aumentou a confiabilidade do sistema e permitiu maior flexibilidade na realização de manutenções e substituições. O diagrama de blocos da nova arquitetura de alimentação para veículos em pequena escala é apresentado na Figura 58.

Figura 58 – Diagrama de blocos do novo sistema de alimentação



Fonte: O autor (2023)

A instalação das baterias no piso do veículo conforme a Figura 59 é uma estratégia comum em projetos de conversão para veículos elétricos, pois ajuda a manter a estabilidade e o centro de gravidade adequado do veículo. A divisão das baterias para fornecimento de tensão AC e DC permite que os equipamentos eletrônicos sejam alimentados de forma mais adequada, evitando interferências e ruídos.

Além disso, o uso de um inversor permitiu que equipamentos que operam em corrente alternada por meio de uma fonte de 220V/12V ou 220V/24V, como a NVIDIA Jetson AGX Orin e Vector VN8912, entre outros equipamentos que possuem fonte própria, possam ser utilizados no veículo.

Figura 59 – Baterias instaladas no piso do veículo



Fonte: O autor (2023)

O inversor utilizado neste trabalho (conforme Figura 60) é do tipo de onda senoidal pura com potência de pico de 1000W, a escolha deste modelo se dá por conta da disponibilidade no mercado e por ter potência suficiente para atender a todas as cargas CA do veículo. Segundo o fabricante, este modelo tem uma eficiência de conversão de até 95%.

Figura 60 – Inversor de onda senoidal pura (DC/AC)



Fonte: O autor (2023)

A Tabela 6 ilustra as principais características do inversor utilizado. Desta forma o veículo possui uma rede de 220V para alimentação de equipamentos com fonte externa própria.

Tabela 6 – Características do inversor de onda senoidal pura

Tensão de Entrada	12V (DC)
Tensão de Saída	220V (AC)
Frequência de Saída	60Hz
Potência de Pico	1000W
Potência Continua	500W
Peso	1,35Kg

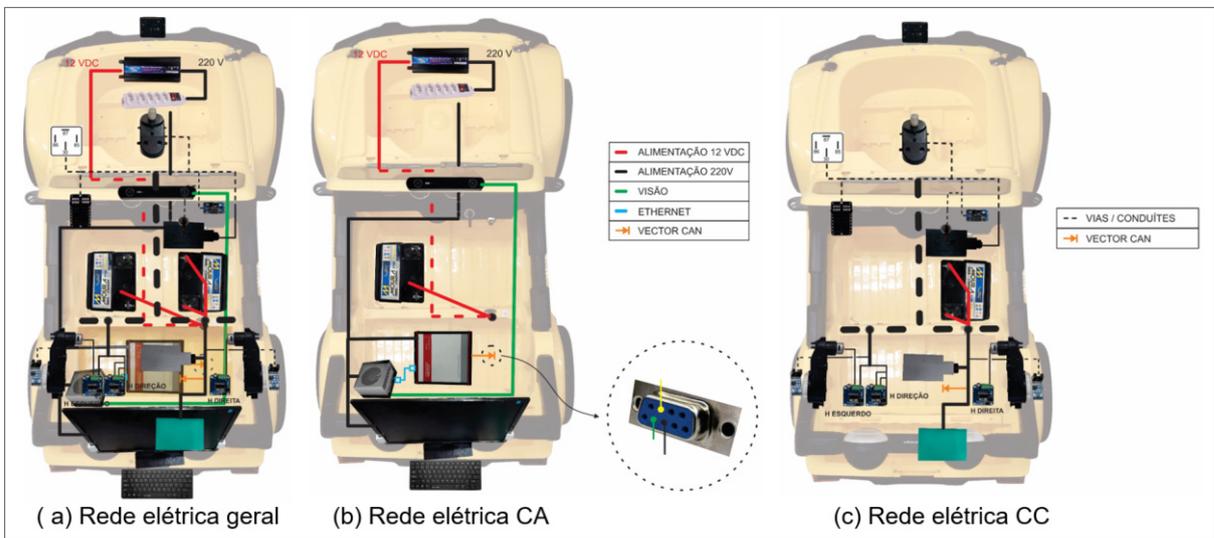
Fonte: O autor (2023)

Para a alimentação elétrica das ECUs e sensores instalados no veículo, foi utilizado um conversor de tensão DC/DC do tipo *step down* para reduzir a tensão de 12V (bateria) para

5V. A rede DC do veículo foi dividida em duas partes: 12V, que alimenta as pontes H (drives de potência) responsáveis pelo controle das caixas de reduções, e 5V para as ECUs e sensores.

Uma caixa de fusível automotiva foi modificada para receber as tensões de 12V e 5V em sua entrada, e cada parte da caixa ficou com seis fusíveis de proteção. Em comparação com os outros veículos em escala reduzida apresentados no Capítulo 3, as baterias utilizadas neste trabalho têm maior capacidade e autonomia, por serem baterias de veículos em escala real. A Figura 61 ilustra uma visão geral do sistema de alimentação depois das modificações.

Figura 61 – Visão geral das redes elétricas CC e CA



Fonte: O autor (2023)

Outros dispositivos eletrônicos de uso geral usados no projeto são mostrados na Figura 62. Esses componentes são responsáveis pelo processamento de dados, transdução de ângulo e velocidade, regulação da tensão, entre outros.

Figura 62 – Principais componentes do sistema eletrônico do veículo



Fonte: O autor (2023)

Cada veículo montado foi equipado com cinco unidades eletrônicas. A primeira é responsável pelo controle lateral, enquanto a segunda é encarregada do controle longitudinal. A terceira unidade é dedicada à comunicação, a quarta atua como *gateway* no barramento CAN, e a quinta executa as funções do ADAS.

A escolha da plataforma Arduino para o desenvolvimento das ECUs de controle lateral e longitudinal foi baseada em seu baixo custo e compatibilidade com uma ampla variedade de sensores, módulos e componentes eletrônicos. O Arduino é uma plataforma de desenvolvimento de código aberto, muito popular e amplamente utilizada na comunidade de prototipagem eletrônica. Ele oferece uma interface amigável para programação e integração com diversos sensores e dispositivos eletrônicos.

As etapas de desenvolvimento de cada ECU serão descritas nas subseções a seguir

4.5 DESENVOLVIMENTO DAS UNIDADES DE CONTROLE ELETRÔNICO

As unidades eletrônicas de controle (ECU) são dispositivos essenciais na arquitetura de um veículo, sendo responsáveis pelo controle do motor, dos freios, sistema de climatização, entretenimento e outros. As ECUs usadas nos veículos em escala reduzida, foco deste trabalho, foram implementadas para o controle longitudinal e lateral, de forma que ações como frenagem, aceleração, e manobras de manutenção e mudança de faixa pudessem ser feitas com maior precisão, compensando variações provocadas por fatores externos.

Para as duas abordagens de controle optamos por aplicar o controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID), devido a sua simplicidade e robustez. Segundo Ogata et al. (2001), o PID é o controlador mais utilizado no mundo industrial. O PID calcula o sinal de controle com base no erro entre o valor desejado e o valor real do sistema. Sua resposta ao sinal de erro é baseada em três termos:

- **Proporcional (P):** Este termo está diretamente relacionado ao erro atual do sistema. Quanto maior o erro, maior será o sinal de controle gerado para corrigir o desvio. O termo proporcional ajuda a direcionar o veículo de volta à trajetória desejada.
- **Integral (I):** Considera a acumulação dos erros ao longo do tempo. Ele compensa pequenos desvios que podem não ser corrigidos pelo termo proporcional. O termo integral é responsável por eliminar o chamado "erro em regime permanente".

- **Derivativo (D):** Considera a taxa de variação do erro. Ele prevê as tendências futuras do erro e ajuda a reduzir a resposta do sistema a mudanças rápidas nas condições de condução. O termo derivativo melhora a resposta do sistema, tornando-a mais rápida e estável.

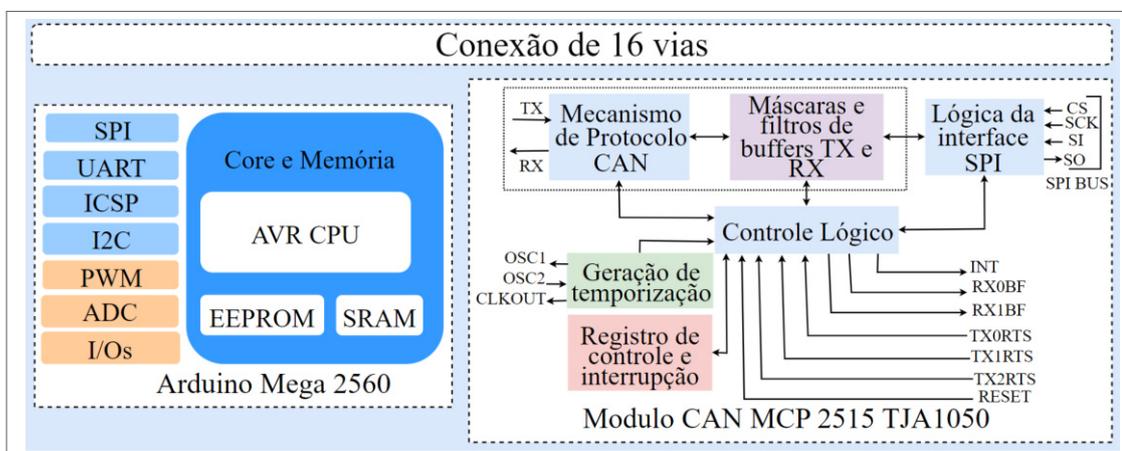
O valor adequado para cada um desses parâmetros do controlador PID é crucial para garantir um desempenho estável. Para determinar o valor de cada deles foi aplicado método de Ziegler-Nichols, que se baseia na identificação das características dinâmicas do sistema controlado através de observações práticas.

4.5.1 Unidade de Controle Lateral

A função do controle lateral em um veículo, seja em escala reduzida ou real, é manter o veículo na pista, entre as faixas adjacentes, e evitar colisões. Neste contexto, foi desenvolvida uma ECU utilizando a plataforma Arduino Mega 2560 para o controle da direção nos veículos em escala reduzida. Esse modelo foi escolhido por sua capacidade de processamento, que permite lidar com dados de sensores e acionar atuadores para controle da direção do veículo.

Esta plataforma microcontrolada possui diversas entradas/saídas digitais, controle de PWM e interfaces de comunicação como USB, I2C e SPI. No entanto, é importante notar que esse modelo não possui um controlador CAN incorporado, o que levou à inclusão de um módulo MCP2515 TJA1050 na unidade eletrônica. A Figura 63 apresenta a arquitetura em blocos da ECU para o controle lateral dos veículos.

Figura 63 – Arquitetura em blocos da unidade de controle da direção



Fonte: O autor (2023)

As principais características do modelo da placa Arduino utilizada no desenvolvimento da ECU são descritas na Tabela 7.

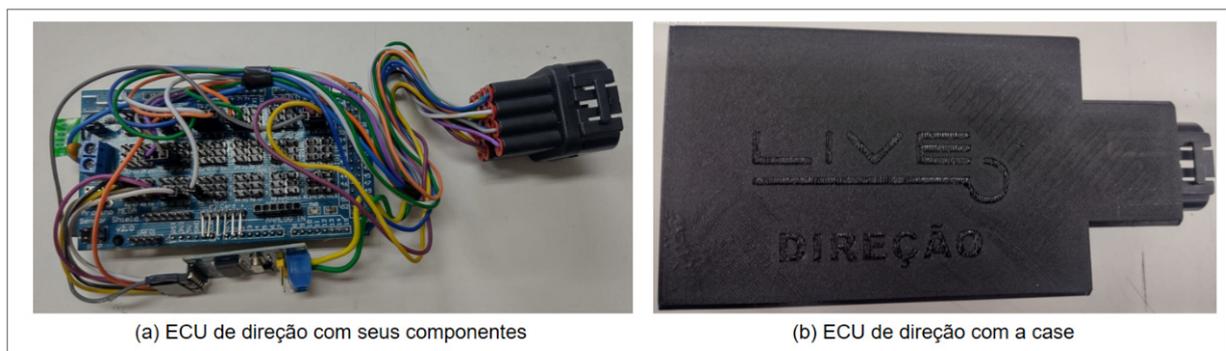
Tabela 7 – Principais especificações do Arduino Mega 2560

Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de Operação	5V
Tensão de Entrada	7 – 12V
Portas Digitais	54 (14 são PWM)
Portas Analógicas	16
Portas Seriais	4
Corrente Pinos I/O	40mA
Memória Flash	256KB (8KB usado no bootloader)
SRAM	8KB
Clock	16MHz

Fonte: (ARDUINO, 2021)

Durante o desenvolvimento da ECU, um sensor *shield* foi acoplado ao Arduino para aumentar a disponibilidade dos pinos de *I/O* e melhorar fixação dos fios na placa. Além disso, para facilitar a conexão com o chicote elétrico do veículo, foi adicionado um conector automotivo de 16 vias. Para proteger os componentes, um case foi impresso em 3D. A Figura 64 ilustra a ECU finalizada, pronta para ser instalada no veículo.

Figura 64 – Unidade de Controle da Direção com os componentes (a) e case de proteção (b)



Fonte: O autor (2023)

4.5.2 Unidade de Controle Longitudinal

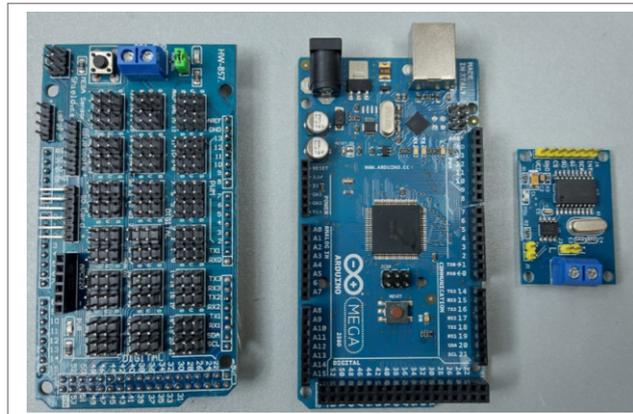
O controle longitudinal tem a responsabilidade de gerenciar a aceleração e a frenagem do veículo, visando manter sua estabilidade e proporcionar uma condução segura. Para isso, é utilizada uma combinação de *hardware* e *software* para controlar a aceleração e frenagem com

base em informações provenientes de sensores, como câmeras, radares, dados de mapeamento e localização.

Foi desenvolvida uma ECU específica para esse controle, seguindo a mesma estrutura da unidade de controle da direção, conforme apresentado na Figura 65. Embora o *hardware* seja o mesmo, os *softwares* utilizados são diferentes. Essa escolha de arquitetura visa facilitar os testes e substituições das ECUs sem a necessidade de construir uma nova.

A unidade de controle é composta por diversos componentes, destacando-se o Arduino Mega 2560, um módulo CAN MCP2515 e um sensor Shield conforme Figura 65 . Esses componentes são essenciais para o controle longitudinal do veículo, garantindo a gestão adequada da aceleração e da frenagem, mantendo a estabilidade e a segurança durante a condução.

Figura 65 – Principais componentes da unidade de controle longitudinal



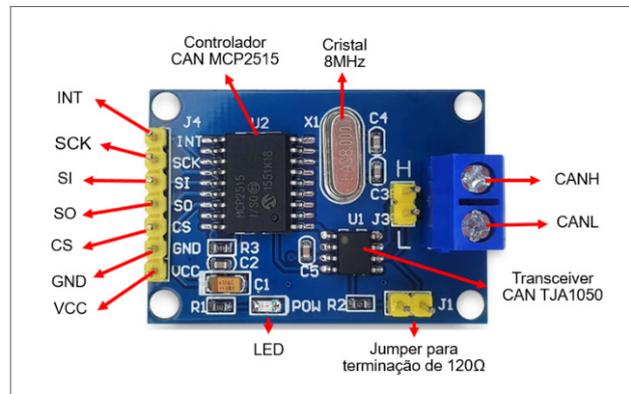
Fonte: O autor (2023)

O MCP2515 e o TJA1050 são componentes eletrônicos integrados em um único módulo ao qual foi integrado as ECUs. O MCP2515 é um controlador CAN (*Controller Area Network*) integrado, enquanto o TJA1050 é um transceptor CAN (*CAN Transceiver*). Ambos estão integrados em um único módulo eletrônico, que apresenta as seguintes características:

- Compatibilidade com o padrão CAN 2.0, que é um protocolo amplamente utilizado em aplicações automotivas.
- O módulo utiliza uma interface SPI para se comunicar com microcontroladores.
- Transceptor JA1050 integrado, responsável por converter os sinais digitais do MCP2515 em sinais analógicos que podem ser transmitidos pelo barramento CAN.
- Detecção e relatório de erros, como erros de transmissão, de recepção, de formatação e erros de sobrecarga.

A Figura 66 exibe os componentes e pinos do Módulo MCP2515 TJA1050.

Figura 66 – Componentes e pinos em um Módulo MCP2515



Fonte: Adaptada de (SILVA, 2019)

A conexão do módulo MCP2515 TJA1050 nas ECUs permite que elas se comuniquem em um barramento CAN nos veículos de pequeno porte desenvolvidos neste trabalho.

4.5.3 Unidade Eletrônica de Comunicação

A ECU de Comunicação Interveicular possibilita a comunicação entre veículos e dispositivos próximos, como computadores, utilizando diversas tecnologias de comunicação, tais como *WiFi*, *Bluetooth*, Radio Frequência ou redes celulares para trocar dados e coordenar ações.

Nos veículos em pequena escala utilizados neste trabalho, a função de coletar informações dos sensores e processá-las para auxiliar o veículo a tomar decisões precisas sobre a direção, velocidade, frenagem e outras funções de controle é desempenhada pela ECU de comunicação. Essas informações são enviadas a um computador, permitindo que o usuário visualize e modifique os parâmetros e ações dos veículos.

A plataforma ESP32 foi escolhida para o desenvolvimento da unidade de comunicação, devido às suas diversas vantagens, tais como conectividade *WiFi* e *Bluetooth* integradas, um processador dual-core de 32 bits com frequência de até 240MHz e compatibilidade com várias plataformas de desenvolvimento. A Tabela 8 apresenta as características da placa ESP32-S2, desenvolvida pela Espressif Systems³, que foi utilizada neste trabalho.

³ Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-s2>

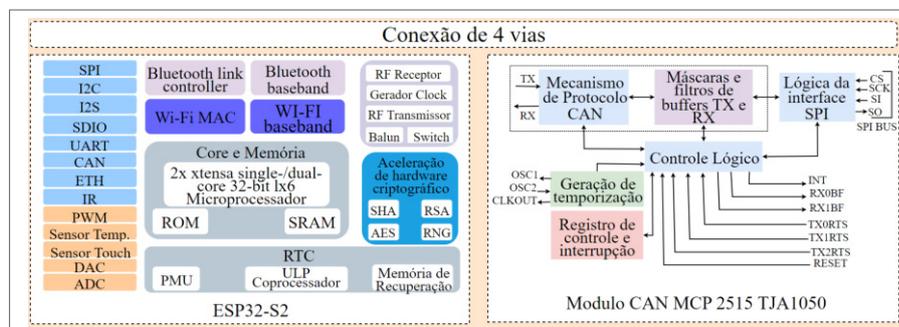
Tabela 8 – Especificações da plataforma ESP32

Microprocessador	2 Xtensa 32 – bit LX6 com até 600DMIPS
Tensão de Operação	2,3V a 3,6V
Portas Programáveis GPIOs	34
Controle PWM	16 canais
Conversores DAC	2 de 8bits
Interface SPI	4 com clock até 40MHz
Interface I2S	2 com clock até 40MHz
Interface I2C	2 com velocidade 5Mbps
Interfaces UARTs	3 com velocidade 5Mbps
Interface Bluetooth	v4.2 BR/EDR e Low Energy
Interface WI-fi	802.11 b/g/n – 802.11 n 2.4GHz, até 150Mbps
Memória Externa	4 com até 16MB de Flash e 16MB SRAMr
ROM	448KB
RAM	520KB

Fonte: (ESPRESSIF, 2021)

A plataforma ESP32 tem suporte para ser intergada no barramento CAN por meio de um controlador CAN integrado em seu chip. No entanto, ela não possui o *transceiver*, responsável por atuar como interface física entre o barramento da rede e o circuito eletrônico do dispositivo. Por isso, foi integrado à ECU um módulo MCP2515 TJA105, que é um controlador CAN com comunicação SPI e *transceiver* integrado, garantindo o gerenciamento da transmissão de mensagens na rede. A arquitetura em blocos da unidade de comunicação pode ser visualizado na Figura 67.

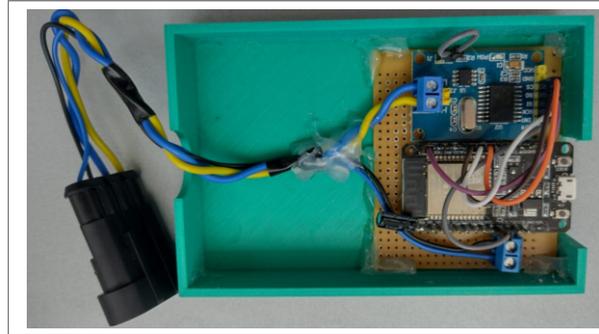
Figura 67 – A arquitetura em blocos da ECU de comunicação



Fonte: O autor (2023)

A unidade de controle foi montada em uma placa de fenolite perfurada, o que facilitou a fixação de todos os componentes, como pode ser visto na Figura 68.

Figura 68 – ECU de comunicação



Fonte: O autor (2023)

Para a comunicação da ECU com outros dispositivos externos, como um *notebook* para aquisição de dados, foi utilizado o protocolo ESP-NOW⁴, que é nativo dos módulos ESP32 e é usado para enviar dados entre dispositivos de forma eficiente e confiável.

4.5.4 Unidade Eletrônica de Gateway

A ECU de *gateway* é um módulo eletrônico encontrado em veículos modernos que funciona como uma interface entre diferentes sistemas de controle eletrônico no veículo. No contexto deste trabalho, essa unidade eletrônica tem a função de permitir a comunicação de dados entre diferentes redes de comunicação do veículo, garantindo que os dados corretos sejam transmitidos para os sistemas correspondentes.

A interface VN8912 (conforme Figura 69), desenvolvida pela empresa alemã Vector⁵, é um dispositivo de *hardware* dedicado que atua como uma ponte de rede entre diferentes protocolos de comunicação. Ela contém um processador integrado e o componente *Extended Real Time* (ERT), que permite que o dispositivo execute funções pré-definidas em tempo real.

A interface VN8912 é especialmente projetada para uso com os *softwares* de teste e análise da Vector, como o CANoe⁶ e o CANape⁷. Esses *softwares* são usados para testar e analisar sistemas de comunicação em tempo real em veículos, como o sistema de barramento de dados CAN. Com a interface VN8912, os usuários podem conectar o *software* CANoe ou CANape

⁴ Disponível em: <https://www.espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now>

⁵ Disponível em: <https://www.vector.com/br/pt/produtos/products-a-z/hardware/network-interfaces/vn89xx/>

⁶ *Software* de desenvolvimento e teste de sistemas eletrônicos para veículos, incluindo simulação, teste de comunicação e análise de mensagens CAN.

⁷ *Software* de calibração e ajuste de sistemas eletrônicos em tempo real, permitindo acesso, visualização e ajuste de parâmetros de ECUs.

a diferentes dispositivos eletrônicos em um veículo, permitindo que eles testem e analisem a comunicação entre esses dispositivos.

Figura 69 – Parte frontal do VN8912 (com módulo plug-in VN8970)



Fonte:(VECTOR, 2017)

A VN8912 oferece suporte a diversos protocolos de comunicação, incluindo CAN, LIN, FlexRay e Ethernet. Ela é compatível com uma ampla variedade de dispositivos eletrônicos em veículos, como sensores, atuadores, módulos de controle de motor e muito mais. A interface VN8912 é uma ferramenta poderosa para engenheiros automotivos que trabalham no desenvolvimento e teste de sistemas eletrônicos em veículos.

O módulo básico VN8912 possui um processador Intel Core-i7 integrado para a execução de aplicativos em tempo real com demandas de alto desempenho. A conexão com redes de usuários é fornecida por um módulo *plug-in* com transceptores de barramento individuais. A Tabela 9 descreve os principais dados do módulo VN8912.

Tabela 9 – Dados técnicos VN8912

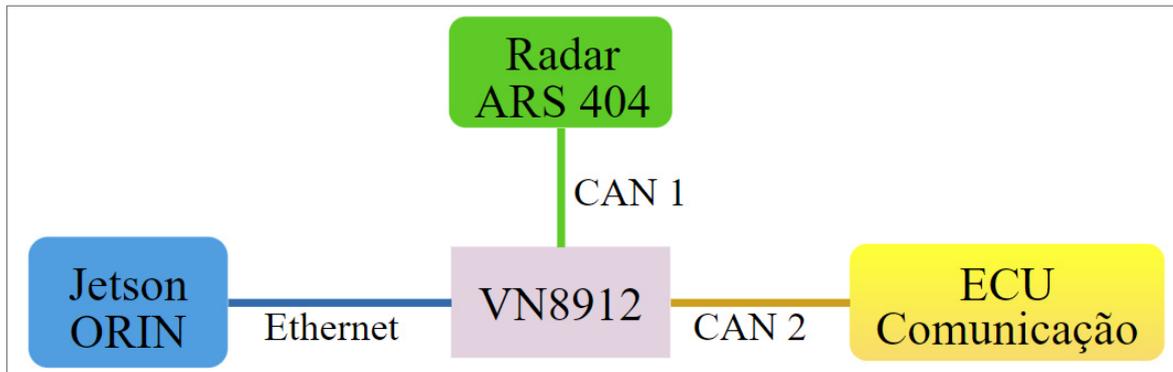
Processador	Intel Core-i7, 2x1.7GHz, 4MB Cache
Memória	4GB
Disco rígido	Cartão CFast, 8GB (duas partições, 4GB cada)
Transceptor	Depende do módulo plug-in e seus piggybacks
Interface do computador	USB 3.0, SuperSpeed
Corrente de saída das USB	máxima1350mA todas as portas combinadas
Fonte externa de alimentação	10 a 36VDC
Potência consumida	16W ligada a 24V
Ethernet	100 0Base-T/100 Base-TX/1 0Base-TIEEE1588

Fonte: (VECTOR, 2017)

O principal objetivo da utilização da VN8912 como ECU nos veículos de pequeno escala

deste trabalho foi integrar a NVIDIA Jetson AGX Orin ao barramento CAN (conforme ilustra a Figura 70) do veículo por meio da conexão *Ethernet*, uma vez que a Jetson não possui um controlador CAN integrado.

Figura 70 – Diagrama em blocos da VN8912 interligando outras ECUs



Fonte: O autor (2023)

Dessa forma, as mensagens enviadas da Jetson AGX para o barramento CAN dos veículos são recebidas pela unidade de controle de *gateway* por meio do protocolo TCP, utilizando a conexão *Ethernet* presente na VN8912.

4.5.5 Unidade Eletrônica de ADAS

O ADAS é responsável por controlar e monitorar vários sistemas de assistência ao motorista em um veículo, como o ACC, AEBS e o LKAS. Para essa função, uma (ECU) coleta informações de vários sensores instalados no veículo, como câmeras estereoscópicas, RADAR e SONAR, para determinar a posição, velocidade e direção do veículo e dos objetos ao redor.

Com base nessas informações, a ECU envia sinais para os sistemas de assistência ao motorista a fim de evitar colisões, manter a distância de segurança em relação a outros veículos e auxiliar em outras manobras.

Nesse contexto, a NVIDIA Jetson AGX Orin⁸ (conforme Figura 71) foi implementada como a unidade eletrônica do ADAS, responsável pelo processamento geral de dados e execução de algoritmos nos veículos elétricos de pequena escala deste trabalho. Ela realiza tarefas intensivas em processamento gráfico, como análise de imagens e vídeos em tempo real, de forma rápida (NVIDIA, 2021b).

⁸ Disponível em: <https://www.stereolabs.com/blog/getting-started-with-jetson-agx-orin-devkit/>

Figura 71 – NVIDIA Jetson AGX Orin



Fonte: (STEREOLABS, 2021b)

Segundo Black (2021), a NVIDIA Jetson AGX é um sistema em módulo (*System-on-Module, SoM*) de alto desempenho projetado para máquinas autônomas, como robôs e carros autônomos. Ele é construído em torno do Orin *System-on-a-Chip* (SoC) da NVIDIA, que possui 12 núcleos de CPU ARM Cortex-A78 e 2 GPUs NVIDIA Ampere, totalizando 4.096 núcleos CUDA. Essa configuração permite alcançar um desempenho de Inteligência Artificial de até 200 trilhões de operações por segundo (*Trillions of Operations per Second, TOPS*) (BLACK, 2021).

Conforme a NVIDIA (2021c), a Jetson AGX Orin está equipada com uma ampla variedade de interfaces de entrada/saída, incluindo *Gigabit Ethernet*, USB 3.1, PCIe Gen4 e HDMI, facilitando a conexão a uma variedade de sensores, câmeras e outros periféricos. A Jetson AGX também oferece suporte para múltiplas câmeras de alta resolução e fusão avançada de sensores, permitindo o processamento e análise em tempo real de grandes quantidades de dados provenientes de várias fontes.

Um dos principais recursos da Jetson AGX Orin é sua capacidade de executar várias redes neurais simultaneamente, o que a torna ideal para aplicativos complexos de IA, como reconhecimento de objetos, processamento de linguagem natural e navegação autônoma. Essa plataforma suporta uma ampla variedade de *frameworks* de *software*, incluindo o próprio *JetPack SDK* e TensorRT da NVIDIA, além de bibliotecas populares de aprendizado de máquina, como TensorFlow⁹ e PyTorch¹⁰ (NVIDIA, 2021c). A Tabela 10 descreve as principais especificações técnicas da Jetson AGX Orin.

⁹ Biblioteca de aprendizado de máquina e redes neurais usada para desenvolver e treinar modelos de inteligência artificial.

¹⁰ Biblioteca de aprendizado de máquina de código aberto com suporte para processamento de tensores e treinamento de redes neurais.

Tabela 10 – Principais especificações técnicas da Jetson AGX Orin

Desempenho de IA	200 TOPS (INT8)
GPU	Arquitetura NVIDIA Ampere com 1792 núcleos NVIDIA® CUDA® e 56 núcleos Tensor
Frequência da GPU	930MHz
CPU	8-core Arm® Cortex®-A78AE v8.2 64-bit CPU 2MB L2 + 4MB L3
Frequência da CPU	2.2GHz
Acelerador de visão	PVA v2.0
Memória	32GB 256-bit LPDDR5, 204.8 GB/s
Armazenamento	64GB eMMC 5.1
Câmera CSI	Até 6 câmeras (16 canais virtuais) 16 pistas MIPI CSI-2 D-PHY 2.1 (até 40Gbps) C-PHY 2.0 (até 164Gbps)
Codificação de vídeo	1x 4K60 3x 4K30 6x 1080p60 12x1080p30 (H.265) H.264, AV1
Decodificação de vídeo	1x 8K30 2x 4K60 4x 4K30 9x1080p60 18x 1080p30 (H.265) H.264, VP9, AV1
Rede	1x GbE, 1x 10GbE
Saída de vídeo	1x 8K60 multi-modo DP 1.4a (+MST)/eDP 1.4a/HDMI 2.1
Outras E/S	4x USB 2.0, 4x UART, 3x SPI, 4x I2S, 8x I2C, 2x CAN, DMIC e DSPK, GPIOs

Fonte: (NVIDIA, 2021b)

Para a instalação da Jetson Orin nos veículos de pequena escala, foi desenvolvida uma case em 3D para que ela fique fixa, conforme ilustra a Figura 72.

Figura 72 – Case modelada em CAD 3D



Fonte: O autor (2023)

Na Figura 73 mostra a Jetson AGX Orin (a) instalada em um dos veículos emde pequena escala, juntamente com um monitor (b) para visualização dos dados coletados e processados pela unidade de processamento.

Figura 73 – Jetson AGX Orin em fase de testes no veículo elétrico de pequena escala



Fonte: O autor (2023)

No contexto dos veículos autônomos de pequena escala deste trabalho, a Jetson AGX Orin foi implementada como a unidade eletrônica do ADAS, responsável pelo processamento geral de dados e execução de algoritmos. Essa plataforma é capaz de lidar com tarefas intensivas em IA e oferece suporte a diversas estruturas de *software*, tornando-se uma solução ideal para sistemas de assistência ao motorista.

4.6 INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS DESENVOLVIDOS

A integração de sistemas em veículos autônomos de pequena escala refere-se ao processo de conexão e sincronização de todos os componentes eletrônicos, mecânicos e de comunicação presentes nos veículos autônomos em um sistema unificado de controle de aceleração, frenagem e direção. O objetivo dessa integração é garantir que todos os sistemas dos veículos funcionem de forma harmoniosa e coordenada, permitindo que cada veículo autônomo opere com segurança e eficiência em um *Platoon*.

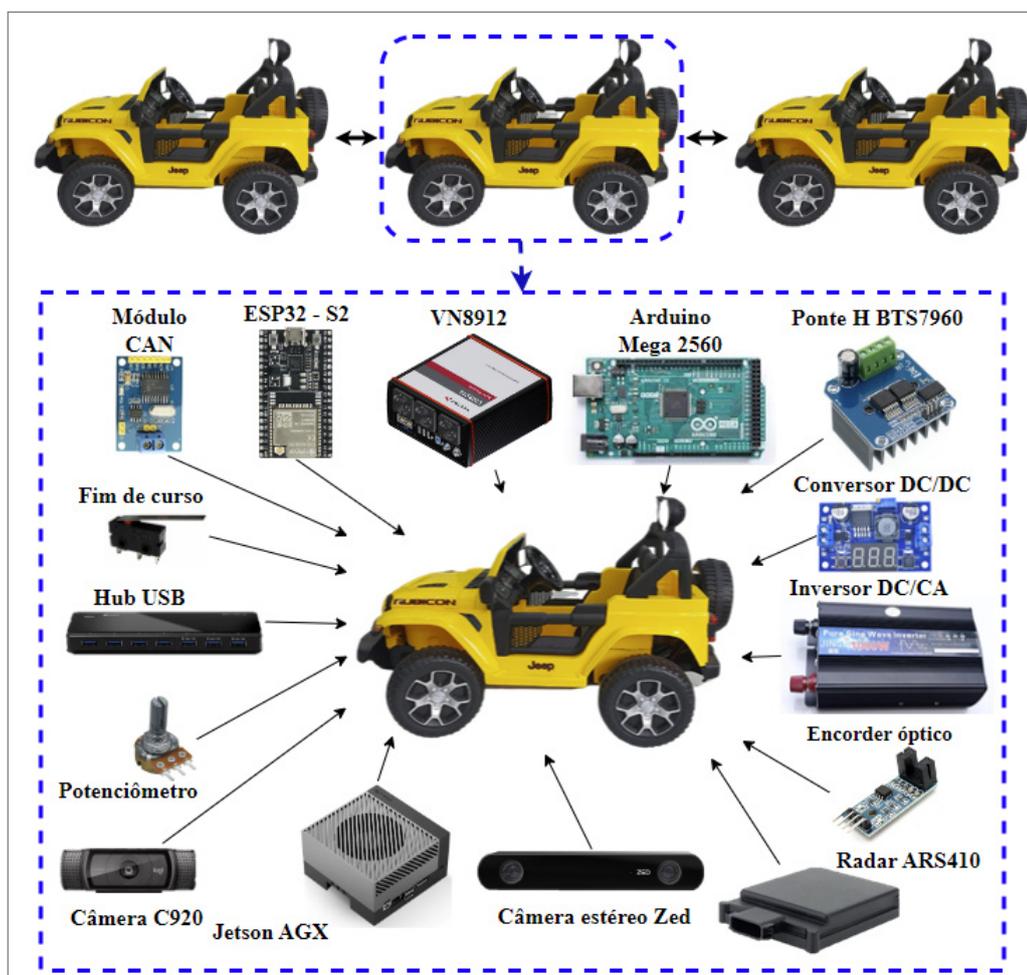
4.6.1 Arquitetura Embarcada

A integração da arquitetura embarcada é um processo essencial para garantir o bom desempenho de veículos em escala reduzida. Essa arquitetura abrange os sistemas eletrônicos que

controlam as funções do veículo, tais como motores, transmissão, sistema de freios, sistema de navegação, entre outros. A arquitetura embarcada é composta por um conjunto de sensores, controladores e atuadores, que são integrados em Placas de Circuito Impresso (PCI) ou micro-controladores. Esses dispositivos são responsáveis por coletar dados do ambiente, processá-los e controlar as funções do veículo.

Neste trabalho, foram instalados vários equipamentos em cada veículo elétrico autônomo em escala reduzida. A Figura 74 destaca os equipamentos embarcados em um dos veículos, incluindo Arduino Mega 2560, inversor DC/AC, *Hub USB* 3.0, módulo MCP2515 TJA1050, câmera Logitech C920, Jetson AGX Orin, câmera estéreo ZED, ESP32, Vector VN8912, ponte H BTS7069, RADAR, entre outros. No total, foram equipados três veículos em escala reduzida nos quais forma um *Platoon*.

Figura 74 – Visão geral dos equipamentos embarcados no SAVIPS



Fonte: O autor (2023)

A tabela 11 a seguir descreve a quantidade de equipamentos e componentes eletrônicos embarcados em cada veículo elétrico que compõe o *Platoon* proposto neste trabalho:

Tabela 11 – Quantidade de equipamentos/componentes embarcado em cada veículo

Equipamentos	Quantidade	Função
Vector VN8912	1	ECU de gateway
Arduino Mega 2560	2	ECUs de controle Longitudinal e Lateral
Ponte H BTS7960	3	Controles Longitudinal e Lateral
ESP32	1	ECU de comunicação
Inversor DC/CA	1	Rede de corrente alternada 220V
Jetson AGX Orin	1	ADAS
RADAR ARS404	1	ADAS
Câmera C920	2	ADAS
Câmera Stéreo ZED	1	ADAS
Encoder Óptico	2	Informação de velocidade
Módulo MCP2515/TJA105	4	Barramento de comunicação (CAN)
Micro switch	2	Informação do fim de esterçamento do volante
Potenciômetro B10K	1	Informação de posição da direção
Conversor DC/DC	1	Rede de corrente contínua 5V
Hub USB 3.0	1	Expansão de portas USB
Porta Fusíveis	1	Proteção contra curto-circuitos

Fonte: O autor (2023)

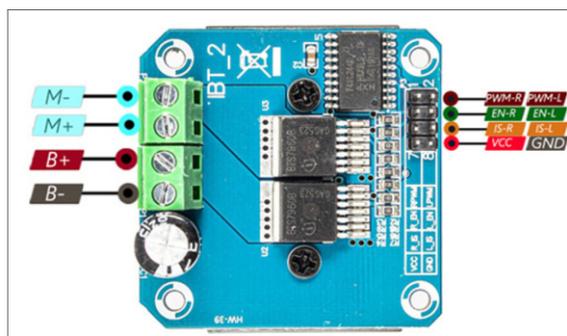
As próximas subseções serão destinadas a descrever as alterações e o desenvolvimento de cada sistema embarcado que foi integrado aos sistemas de controle de cada veículo em escala reduzida.

4.6.1.1 Sistema de Controle da Direção

A direção dos veículos em escala reduzida (Jeep Bandeirantes) é movida por meio de um controle remoto via rádio, com alcance de até 5m de distância. No entanto, esse sistema não permite o controle dos ângulos de esterçamento, já que a alimentação do motor responsável pela movimentação é feita por meio de dois relés que funcionam como interruptores ligando ou desligando o motor com potência total.

Para superar essa limitação, foi necessário efetuar modificações no controle de movimentação da direção, a fim de determinar quantos graus o volante se move para a direita ou esquerda. Os relés foram substituídos por uma ponte H do modelo BTS7069, como mostrado na Figura 75.

Figura 75 – Ponte H BTS7960

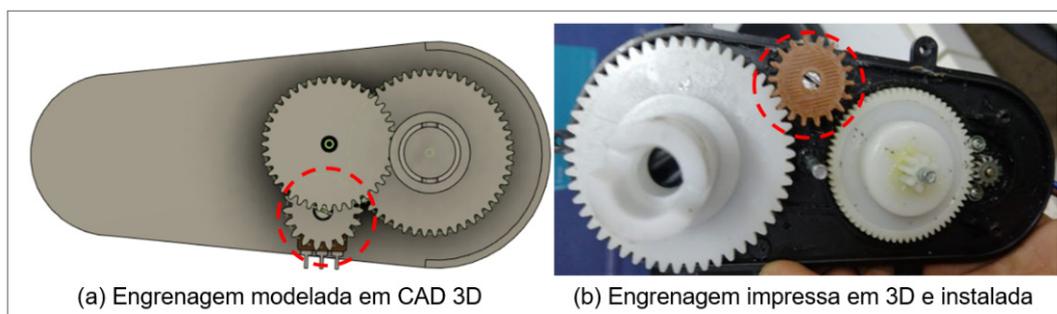


Fonte: O autor (2023)

O drive de potência BTS7960 é metade de uma ponte H projetada para controlar um único motor com capacidade de até 43A. Utiliza transistores de efeito de campo (MOSFET) com baixa corrente de acionamento de $7\mu\text{A}$. Operando em frequência de até 25kHz, permite o controle da velocidade e direção do motor. Com a implementação da ponte H, a ECU de direção irá controlar o motor da caixa de redução usando o PWM proporcionando um movimento mais suave do volante. Duas Micro switch foram adicionados nas extremidades da barra de direção para identificar o final do movimento.

Para um controle mais preciso, um potenciômetro foi adaptado na caixa de redução, com uma engrenagem impressa em 3D. A proporção de 2,5 : 1 foi alcançada com uma engrenagem maior de 50 dentes e uma engrenagem impressa de 20 dentes (conforme Figura 76). O potenciômetro linear *B10K* foi escolhido para medir o deslocamento angular. O movimento da engrenagem branca na barra de direção aciona a engrenagem marrom, conectada ao potenciômetro.

Figura 76 – Potenciômetro e engrenagem adaptada a caixa de redução



(a) Engrenagem modelada em CAD 3D

(b) Engrenagem impressa em 3D e instalada

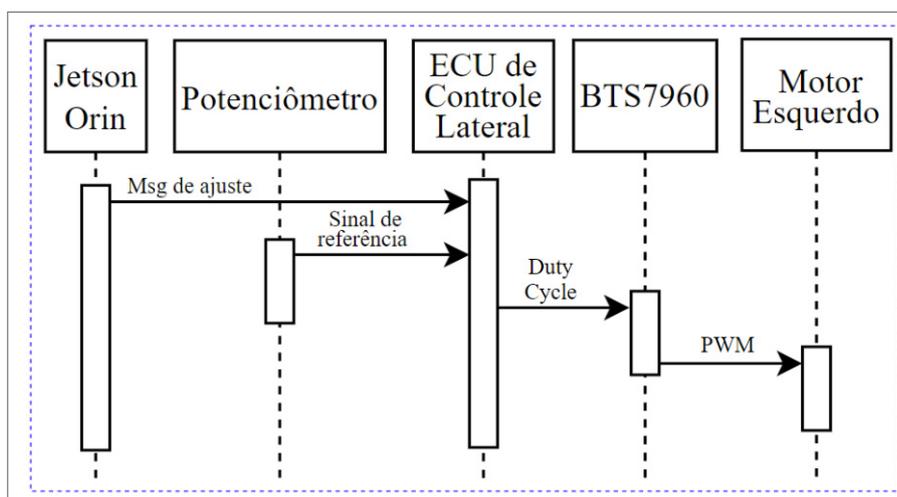
Fonte: O autor (2023)

A integração dos componentes do sistema de controle da direção é ilustrada no circuito elétrico na Figura 77 e é composto pelos seguintes componentes: (1) Ponte H BTS7069; (2)

cionados sensores, como câmera estéreo e um RADAR, além dos componentes eletrônicos e da ECU implementados. A câmera estereoscópica é responsável pela captura de imagens em 3D do ambiente ao redor dos veículos, enquanto o RADAR mede a distância entre o veículo e outros objetos presentes na área.

A Figura 79 ilustra o diagrama de sequência do controle lateral, que é uma ferramenta de modelagem da UML (*Unified Modeling Language*), permitindo visualizar a interação entre objetos em um determinado cenário ou processo. Nesse cenário, a Jetson Orin envia mensagens de ajuste de ângulos (1° , 25° e 50°) juntamente com os valores do potenciômetro (de $0,4K\Omega$ a $9,2K\Omega$) para a ECU de controle lateral. A ECU, por sua vez, envia um sinal de *duty cycle* para o drive de potência (BTS7960), que controla a caixa de redução da direção por meio de sinais PWM variando de 0 a 255, correspondendo a uma faixa de tensão de 0V a 12,7V.

Figura 79 – Diagrama de sequência do controle lateral



Fonte: O autor (2023)

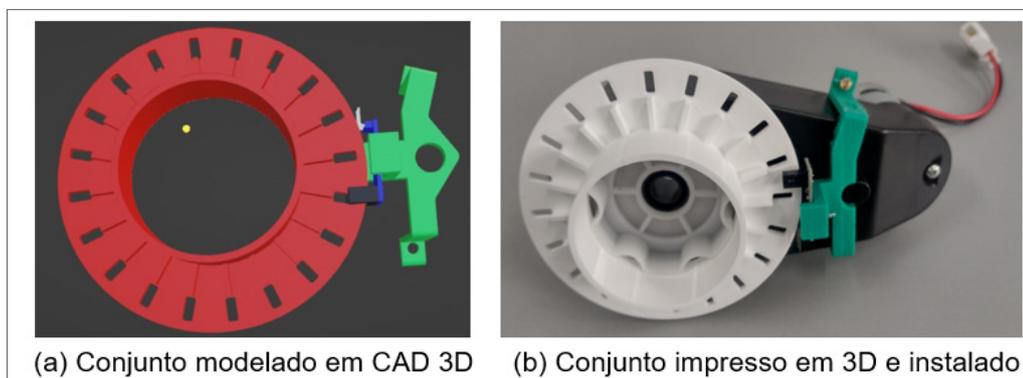
Assim, a ECU recebe os dados dos sensores e processa essas informações para controlar a direção do veículo. Com o auxílio de algoritmos de controle, o sistema permite ao veículo seguir uma trajetória pré-definida ou manter-se em uma faixa de rodagem, além de evitar colisões com objetos que estejam em seu caminho. Essas modificações no sistema de controle da direção foram fundamentais para tornar os veículos do *Platoon* autônomos e seguros em suas operações.

4.6.1.2 Sistema de Controle da Aceleração e Frenagem

Visando permitir a aceleração e frenagem autônomas (controle longitudinal) nos veículos de pequeno porte, foram implementadas pontes H BTS7069 para controlar as caixas de redução traseiras, responsáveis pela tração de cada veículo. Além disso, foram adicionados sensores, como o RADAR da Continental, que mede a distância entre o veículo e outros objetos ao redor, e sensores de posição, como o encoder óptico, que permite medir a velocidade e posição das rodas traseiras.

Para acoplar os encoders ópticos às caixas de redução, foi construída uma estrutura que posiciona os sensores corretamente, conforme ilustrado na Figura 80. Além disso, um disco perfurado foi desenvolvido e impresso para ser fixado em cada roda traseira do veículo. Esse disco permite que os furos do mesmo passem exatamente pelo feixe de luz infravermelha emitido pelo emissor e sejam detectados pelo receptor do sensor encoder.

Figura 80 – Conjunto de estrutura impressa (a) e a estrutura instalada na caixa de redução traseira(b)

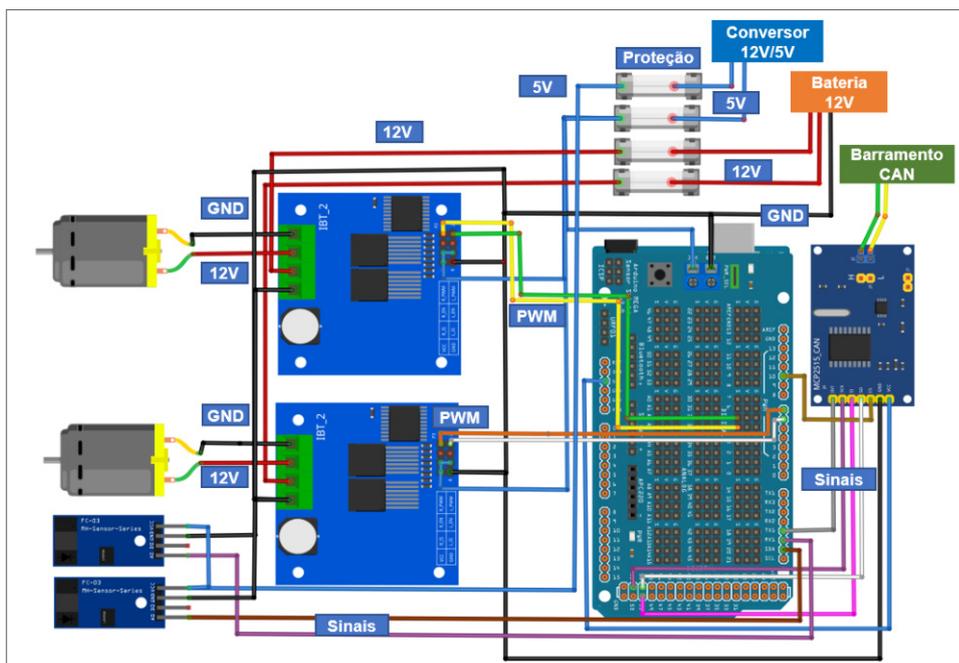


Fonte: O autor (2023)

Ao implementar o disco perfurado fixado à roda do veículo, é possível contar os pulsos do sensor a cada vez que a roda gira. Isso permite calcular a velocidade em RPM (Rotações Por Minuto), verificando o tempo entre um pulso e outro, considerando que o disco possui 20 furos distribuídos igualmente ao longo de 360 graus.

Dessa maneira, a cada volta completa da roda, são gerados 20 pulsos que podem ser contados pelo sensor, possibilitando a medição da velocidade com precisão. A Figura 81 apresenta a implementação do circuito elétrico do sistema de controle longitudinal, que inclui os seguintes componentes: (2) Ponte H BTS7069; (2) Encoders ópticos; (1) Arduino Mega2560; (1) Sensor Shield; (1) Módulo MCP2515 TJA105; (2) Caixa de redução.

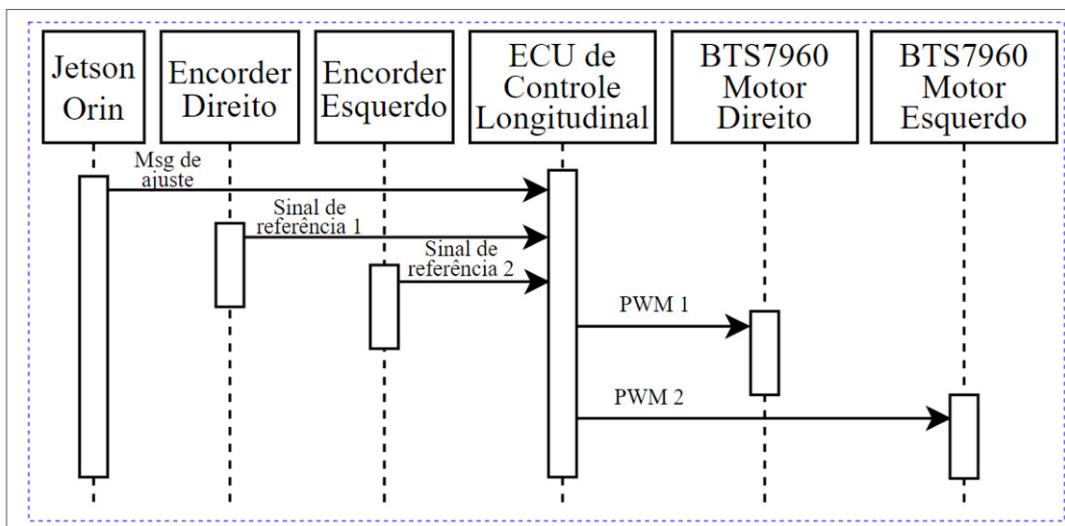
Figura 81 – Diagrama elétrico do sistema de controle de aceleração e frenagem



Fonte: O autor (2023)

A Figura 82 ilustra o diagrama de seqüência do controle de aceleração e frenagem dos veículos de pequena escala. Nesse cenário, a Jetson Orin envia mensagens de ajuste de velocidade (0 a 100 RPM), juntamente com os valores dos encoders (20 pulsos a cada giro completo da roda), para a ECU de controle longitudinal. A ECU, por sua vez, envia sinais de *duty cycle* para os dois drives de potência (BTS7960), que controlam, cada um, uma caixa de redução responsável pela tração dos veículos por meio de sinais PWM variando de 0 a 255, correspondendo a uma faixa de tensão de 0V a 12,7V.

Figura 82 – Diagrama de seqüência sistema de controle de aceleração e frenagem



Fonte: O autor (2023)

Com a implementação desse sistema, é possível controlar a aceleração e a frenagem do veículo de forma autônoma, aumentando a segurança em diferentes situações de tráfego.

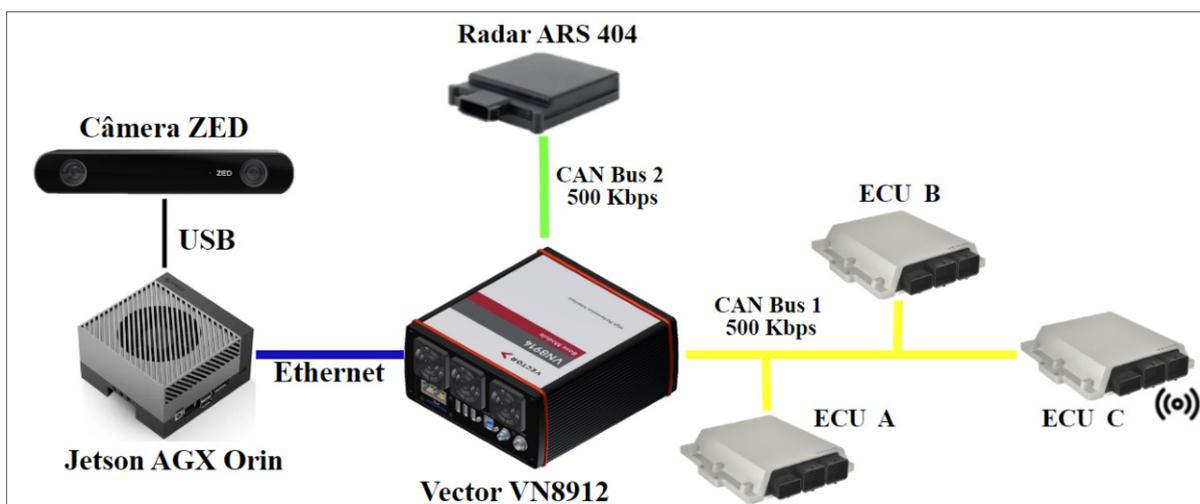
4.6.2 Rede Intra-Veicular

A rede intra-veicular desempenha um papel fundamental na implementação e desenvolvimento de sistemas de condução autônoma em veículos de escala real ou reduzida (ISO, 2015). No contexto dos veículos autônomos de pequena escala deste trabalho, a rede intra-veicular assume um papel importante na coordenação dos sensores, atuadores, ECUs e do barramento CAN. Os sensores, como câmeras, radar, encoders, micro switch e potenciômetros, coletam dados do ambiente, como imagens, distâncias e velocidades, e enviam essas informações para as ECUs por meio do barramento CAN na rede intra-veicular. As ECUs, por sua vez, processam esses dados, tomam decisões em tempo real e enviam comandos aos atuadores para controlar o movimento do veículo.

A escolha da comunicação CAN em vez do CAN-FD (*CAN with Flexible Data-Rate*) para veículos utilizados neste trabalho, se deu pelo baixo tráfego de dados necessário na comunicação interna desses veículos. O protocolo CAN, com sua taxa de transferência padrão de até *1Mbps* e tamanho máximo de pacote de dados de *8 bytes*, é suficiente para atender às necessidades de sistemas eletrônicos mais simples encontrados nesses veículos. Além disso, o uso do protocolo CAN é mais estabelecido, facilitando a disponibilidade de *hardware* e soluções de *software* a um custo mais acessível, tornando-o uma escolha prática e econômica para aplicações com menor complexidade e demanda de dados.

O protocolo CAN permite uma comunicação eficiente e confiável, suportando a transmissão de dados em alta velocidade e com tolerância a falhas, além de possibilitar a comunicação bidirecional entre as ECUs e os atuadores. Essa troca de informações em tempo real, facilitada pelo barramento CAN, é essencial para o funcionamento adequado do *Platoon* e contribui para a coordenação e sincronização dos veículos autônomos em escala reduzida. A Figura 83 ilustra a rede de comunicação interna de cada veículo de pequena escala.

Figura 83 – Rede intra-veicular do veículo de pequena escala



Fonte: O autor (2023)

Os componentes ilustrados na Figura 83, juntamente com suas funcionalidades nos veículos em escala reduzida, são detalhados na Tabela 12.

Tabela 12 – Descrição da rede intra-veicular do veículo em escala reduzida

ECU A	Controle Longitudinal
ECU B	Controle Lateral
ECU C	Comunicação Intra-veicular (V2V)
Câmera ZED	Sensoriamento
RADAR ARS404	Sensoriamento
Jetson AGX Orin	Central de processamento
Vector VN8912	Gateway

Fonte: O autor (2023)

A rede intra-veicular é composta por três barramentos, conforme ilustrado na Figura 83:

- **Barramento CAN 1:** Este barramento é destinado à comunicação das ECUs de controle lateral, longitudinal e comunicação. Cada uma dessas unidades eletrônicas foi equipada com um módulo MCP2515 TJA105, fornecendo a funcionalidade de comunicação CAN nessas unidades de controle. Isso permite que elas se comuniquem com outras unidades por meio do barramento CAN.
- **Barramento CAN 2:** Dedicado ao RADAR ARS 404-21, juntamente com o Vector VN891. Essa escolha se deve à alta taxa de dados enviada pelo ARS404-21 e à necessidade de uma comunicação direta entre ele e a VN8912, que desempenha o papel de uma ECU de *gateway*.
- **Barramento Ethernet:** Permite à Jetson AGX estabelecer uma

comunicação de alta velocidade e confiabilidade com os demais sistemas do veículo, incluindo a unidade de processamento central (Jetson). Isso é viabilizado por meio da ECU de *gateway* (VN8912).

Essa divisão em três barramentos permite uma comunicação eficiente e especializada entre os diferentes sistemas do veículo autônomo em escala reduzida. A VN8912 atua como *gateway*, possibilitando a comunicação entre os diferentes barramentos. Ela recebe mensagens de um barramento CAN e as encaminha para outro barramento específico, garantindo a troca adequada de informações entre os sistemas. Essa arquitetura bem definida e a utilização da VN8912 como *gateway* são essenciais para garantir um desempenho seguro e coordenado do veículo autônomo em todas as suas operações.

4.6.3 Rede Interveicular

A comunicação interveicular, também conhecida como V2V, é fundamental para a troca de informações em tempo real entre veículos, contribuindo para sistemas avançados de assistência ao motorista e direção autônoma. Esse intercâmbio de dados, tais como posição, velocidade e direção, é viabilizado por meio de redes sem fio como DSRC ou C-V2X.

Através da comunicação interveicular, é possível evitar colisões, otimizar o fluxo de tráfego e coordenar movimentações, especialmente em cruzamentos. Além disso, esse conceito é crucial para a implementação do *Platooning*, permitindo que um grupo de veículos autônomos viaje em formação coordenada, proporcionando tanto segurança quanto eficiência.

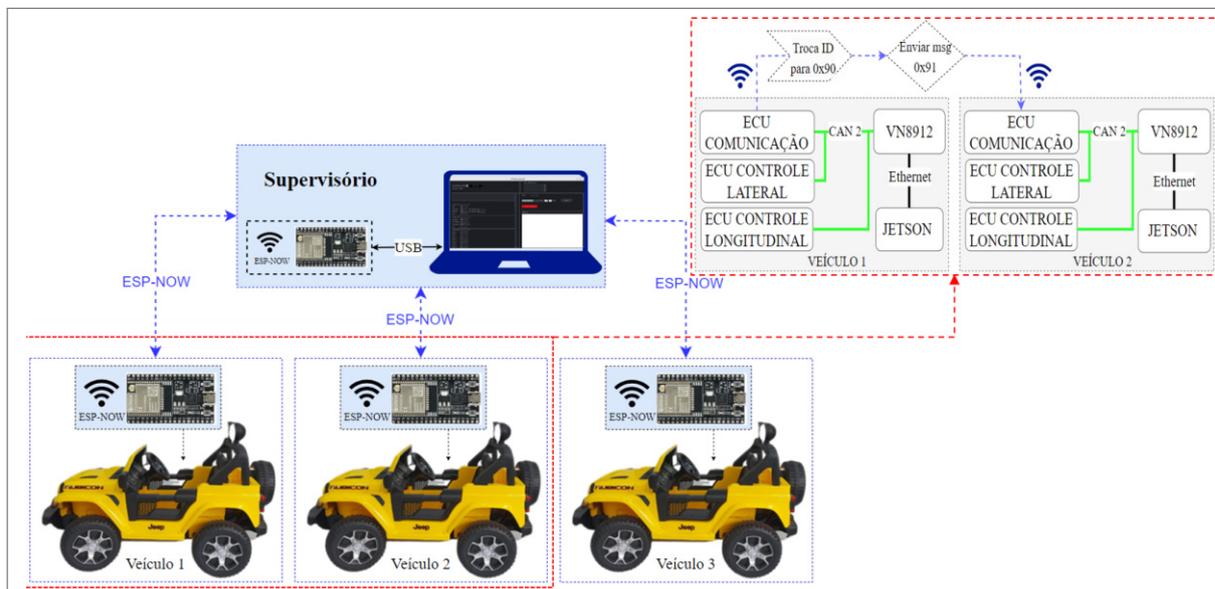
No âmbito de veículos de pequena escala, o desenvolvimento da rede interveicular se baseia na plataforma ESP32-S2, como mencionado na subseção conforme mencionado na subseção 4.5.3. A ESP32-S2 desempenha o papel de transmitir e receber dados, seja entre veículos ou entre os veículos e os usuários, utilizando o protocolo proprietário ESP-NOW¹¹ (*Espressif Systems Proprietary Network Protocol*), desenvolvido pela Espressif.

O ESP-NOW desempenha um papel crucial na operação coordenada dos veículos em escala reduzida, oferecendo não apenas alta taxa de transmissão de até 2Mbps, mas também robustez em ambientes de alta interferência eletromagnética. Quando dados são recebidos, a ECU os direciona para o barramento CAN, alterando o ID da mensagem original para a interpretação apropriada do sistema, seguindo o padrão de comunicação intra-veicular já descrito. A Figura

¹¹ Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/software/esp-now/overview>

84 ilustra a comunicação entre os veículos e um notebook por meio das plataformas ESP32 e um supervisor.

Figura 84 – Comunicação entre os veículos de pequena escala e usuário



Fonte: O autor (2023)

A arquitetura do sistema de comunicação ilustrada na Figura 82, evidenciando a interconexão entre veículos e um notebook através das plataformas ESP32 e um sistema de supervisão. A Figura 85, por sua vez, detalha a estrutura das mensagens de comunicação, destacando a importância de cada byte específico para a troca de informações entre a Jetson Orin e a ECU de comunicação do veículo.

Figura 85 – Códigos das mensagens de comunicação

MSG PLATOON (JETSON>> ECU COMUNICAÇÃO)								
ID msg	byte 0	byte 1	byte 2	byte 3	byte 4	byte 5	byte 6	byte 7
-	-	ID Carro	Destino	Localização	Pos.Direção	RPM Esquerdo	RMP Direito	Platoon GAP
0x91	Reservado	0x00-0xFF	0x00-0xFF	0x00-0xFF	0x01-0xC7	0x00-0xFF	0x00-0xFF	0x00-0xFF

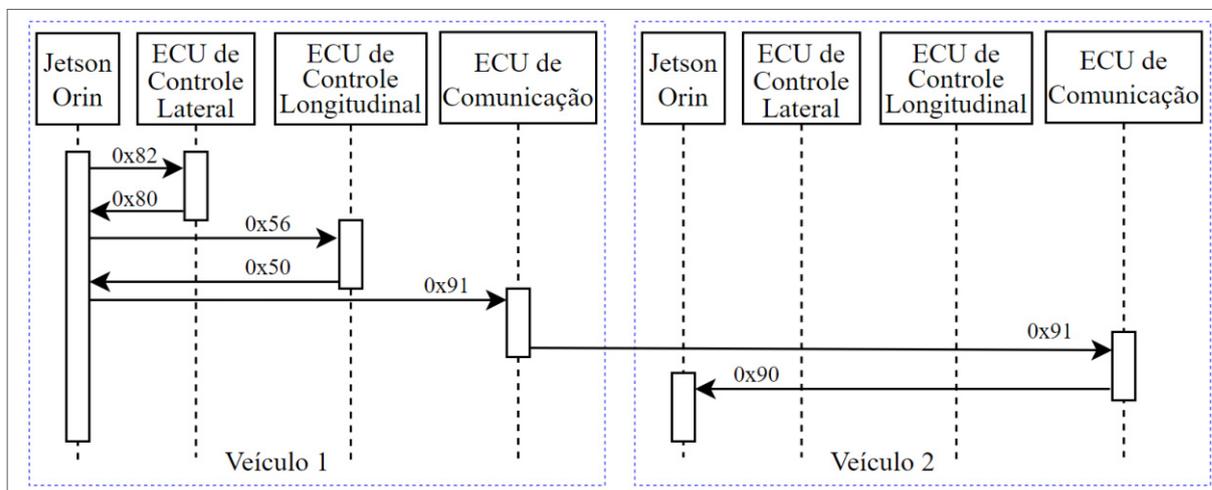
MSG PLATOON (ECU COMUNICAÇÃO>>JETSON)								
ID msg	byte 0	byte 1	byte 2	byte 3	byte 4	byte 5	byte 6	byte 7
-	-	ID Carro	Destino	Localização	Pos.Direção	RPM Esquerdo	RMP Direito	Platoon GAP
0x91	Reservado	0x00-0xFF	0x00-0xFF	0x00-0xFF	0x01-0xC7	0x00-0xFF	0x00-0xFF	0x00-0xFF

Fonte: O autor (2023)

Ao receber dados, a ECU repassa as informações para o barramento CAN com o ID (*Message Identifier*) original da mensagem trocada (conforme Figura 86). Essa troca de ID é necessária para que o sistema possa interpretar se é necessário enviar ou receber uma mensa-

gem. Após essa alteração, o sistema opera da mesma forma que foi descrito anteriormente na comunicação interveicular.

Figura 86 – Diagrama de sequência da rede interveicular



Fonte: O autor (2023)

A comunicação interveicular possibilita o compartilhamento de informações relevantes, como localização, velocidade, direção e estado operacional. Isso, por sua vez, aumenta a compreensão do ambiente de tráfego, permitindo a implementação de medidas adequadas para assegurar a segurança e a eficiência do veículo em escala reduzida.

4.7 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE PERCEPÇÃO

O desenvolvimento do sistema de percepção dos veículos em pequena escala neste trabalho teve a integração de vários sistemas de assistência ao motorista e uma arquitetura eletrônica adequada. Um ponto importante foi a definição dos sistemas a serem implementados e a ECU responsável por coletar e processar os dados dos diferentes sensores de cada veículo. A Jetson AGX Orin veio como solução de visão computacional, essencial para o funcionamento do ADAS, em conjunto com sensores estereoscópicos que utilizam duas ou mais câmeras para captar imagens de diferentes ângulos e permitir a reconstrução de uma imagem tridimensional, obtendo informações de profundidade.

4.7.1 Sensores Estereoscópicos

Os sensores estereoscópicos são amplamente utilizados em diversas áreas da robótica e visão computacional, permitindo medir a distância e profundidade de objetos em um ambiente

tridimensional por meio do princípio da visão estereoscópica.

Esses sensores são compostos por duas ou mais câmeras que simulam a posição dos olhos humanos, permitindo a capta de imagens de um objeto a partir de diferentes ângulos. A partir dessas imagens, é possível calcular a distância do objeto usando técnicas de triangulação (WANG; HUANG; ZHAO, 2018).

A técnica de visão estereoscópica é amplamente utilizada em diversas áreas da robótica, como em sistemas de navegação autônoma e em robôs industriais. Um exemplo é o uso de sensores estereoscópicos em veículos autônomos para a detecção e reconhecimento de objetos no ambiente, aumentando a segurança e eficiência da navegação.

4.7.1.1 Câmera Estéreo ZED2i

A câmera ZED2i, apresentada na Figura 87, é um sensor estereoscópico 3D produzido pela empresa Stereolabs¹². Além da detecção de objetos em 3D e medição de distâncias de alta precisão, a ZED2i possui funcionalidades adicionais, como rastreamento de movimento e geração de mapas de profundidade em tempo real (STEREOLABS, 2021a).

Figura 87 – Câmera estéreo ZED



Fonte:(STEREOLABS, 2021a)

Essas características a tornam uma ferramenta importante em aplicações de robótica, visão computacional e realidade virtual, incluindo o desenvolvimento de veículos autônomos e o mapeamento de ambientes para simulação (STEREOLABS, 2021a; HANG et al., 2018). A câmera ZED2i, em combinação com a NVIDIA Jetson AGX Orin, oferece uma solução poderosa para implementações e soluções em inteligência artificial. Segundo Stereolabs (2021a), a captura de imagens em estéreo pela câmera ZED2i fornece informações valiosas sobre o ambiente, como profundidade e posição.

A NVIDIA também disponibiliza ferramentas de *software*, como o NVIDIA JetPack¹³, que

¹² Disponível em: <https://www.stereolabs.com/blog/introducing-zed-2/>

¹³ O JetPack é um conjunto abrangente de ferramentas de desenvolvimento e software destinado a facilitar a criação e o desenvolvimento de aplicações para plataformas NVIDIA, como os sistemas em chip (SoCs) Jetson

facilitam o desenvolvimento e implantação de aplicações em sistemas embarcados (NVIDIA, 2021a). As principais características da ZED2i são detalhados na Tabela 13.

Tabela 13 – Principais características da câmera estéreo ZED2i

Lentes	Campo de visão de 120°, abertura f/1.8
Interface	USB 3.0 tipo C
Alimentação	5V/380mA
SDK-Requisitos do sistema	Dual-core 2, 3Ghz, 4GB RAM, GPU Nvidia
Sensores de movimento	Giroscópio, Acelerômetro, Magnetômetro
Profundidade	Faixa 0,2 – 10m, Linha 120mm, Fps 100Hz
Dimensões	175 x 30 x 33mm
Saída de vídeo	2208x1242 (15 fps), 1920x1080 (30 fps), 1208x720 (60 fps), 662x376 (100 fps)
Deteção de objetos	peçoas, veículos, faixas, rastreamento, faixa de detecção 2D e 3D

Fonte: (STEREOLABS, 2021a)

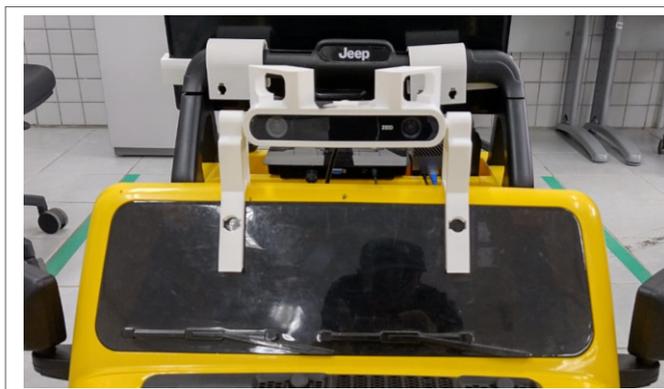
No contexto do ADAS, o uso de câmeras, conforme mencionado por Faruk et al. (2021), desempenha um papel importante na melhoria da segurança no trânsito e na redução de acidentes. Através do processamento das imagens capturadas pelas câmeras, é possível implementar funcionalidades como detecção de obstáculos e análise do comportamento de outros veículos na estrada.

Essas câmeras são posicionadas segundo o modelo e fabricante do veículo, geralmente instaladas em locais estratégicos como o para-brisa ou o painel frontal, visando obter uma visão clara da estrada à frente. Essa localização estratégica permite que a câmera capture imagens da via e sinais de trânsito, como placas de limite de velocidade e semáforos, para fornecer informações ao ADAS.

A posição da câmera desempenha um papel crucial para garantir uma visão desobstruída da estrada e capturar imagens de forma precisa e confiável. Sua instalação adequada considera fatores como o ângulo de visão, o ajuste de foco e o alinhamento correto, visando obter a melhor qualidade de imagem e desempenho do sistema ADAS. No caso específico do veículo de pequeno porte, a câmera ZED foi instalada na parte superior do para-brisa, como ilustrado na Figura 88, utilizando um suporte desenvolvido e fabricado por meio de impressão 3D.

Essa estratégia foi adotada para manter a câmera fixa e evitar vibrações causadas pelos movimentos do veículo, proporcionando uma visão clara da estrada para o sistema de assistência ao motorista.

Figura 88 – Câmera ZED fixada no veículo



Fonte: O autor (2023)

Foi implementado um monitor nos veículos elétricos em escala reduzida como uma forma comum de visualização das imagens capturadas pela câmera ZED2i, quando conectada à plataforma Jetson AGX Orin. Para visualizar as imagens da câmera ZED no monitor (conforme Figura 89), é necessário estabelecer a conexão adequada entre a câmera, a Jetson e o dispositivo de exibição. A câmera ZED2i é conectada diretamente à Jetson AGX Orin por meio de uma interface USB específica fornecida pela Stereolabs, fabricante da câmera (STEREOLABS, 2021b).

Figura 89 – Visão da ZED2i



Fonte: O autor (2023)

A Jetson AGX Orin é responsável por processar os dados provenientes da câmera ZED2i e exibi-los no monitor. Ela utiliza recursos avançados de processamento de imagem e inteligência artificial para analisar as imagens em tempo real, permitindo a detecção de objetos, reconhecimento de padrões e outras funcionalidades do ADAS (NVIDIA, 2021a). O monitor desempenha o papel de exibir as imagens processadas pela Jetson AGX Orin, permitindo que o usuário tenha uma visão em tempo real e de alta qualidade do ambiente.

4.7.1.2 RADAR ARS 404-21

O uso de tecnologias avançadas em veículos automotivos é fundamental para garantir a segurança dos ocupantes e demais usuários da estrada. Nesse sentido, o radar ARS 404-21 (*Advanced Radar Sensor, ARS*) da empresa Continental¹⁴ ilustrado na Figura 90 se destaca como um sensor utilizado em veículos autônomos para auxiliar na detecção e no monitoramento de objetos ao redor do veículo (CONTINENTAL, 2018).

Figura 90 – RADAR ARS 404-21



Fonte: (CONTINENTAL, 2018)

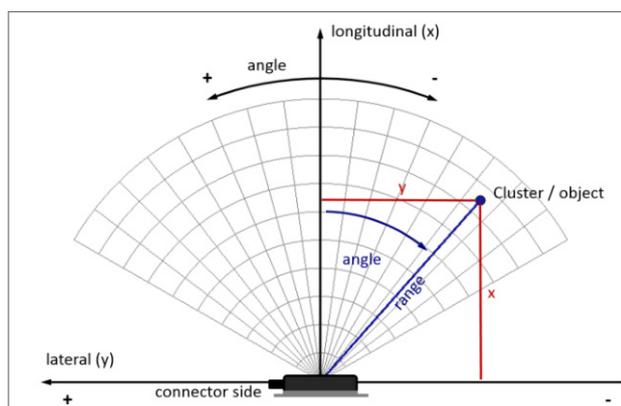
Segundo Yeong et al. (2021), a série ARS-400 é composta por radares que utilizam a tecnologia de onda contínua modulada em frequência (*Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW*) e possuem uma antena *Phased Array*. Esses radares são capazes de realizar medições em duas dimensões, fornecendo informações como distâncias longitudinais e laterais, além da seção transversal equivalente (*Radar Cross Section, RCS*) que representa a potência refletida.

Ao contrário de outros sensores de radar, os dados obtidos pelo ARS 404-21 já passam por um processo prévio de pré-processamento e filtragem, o que dispensa a necessidade de avaliar os dados brutos.

É importante ressaltar que o ARS 404-21 possui sua saída pré-processada, o que significa que o processamento dos dados brutos e a filtragem já estão concluídos. Isso elimina a necessidade de iniciar a avaliação dos dados em um nível bruto. A Figura 91 ilustra o sistema de coordenadas do sensor com um cluster e a nomenclatura dos eixos.

¹⁴ Disponível em: <https://conti-engineering.com/components/ars-404/>

Figura 91 – Sistema de coordenadas ARS 40X para clusters e objetos



Fonte: (CONTINENTAL, 2018)

O Radar ARS 404-21 é um dispositivo que utiliza ondas milimétricas na faixa de 76–81GHz para detectar objetos com alta precisão em uma distância de até 170m através de pulsos de rádio (CONTINENTAL, 2018). Com base nas informações captadas, o radar é capaz de calcular a distância entre o veículo e os objetos ao seu redor.

Além disso, o ARS 404 também é capaz de medir a velocidade relativa dos objetos, o que é crucial para determinar se um objeto está se aproximando ou se afastando do veículo. Essas funcionalidades são especialmente úteis na identificação de veículos em mudanças de faixa ou de pedestres em interseções. A Tabela 14 descreve as principais características do Radar ARS 404-21 da Continental.

Tabela 14 – Principais características do Radar ARS 404-21

Alcance Máximo	170m
Interface de comunicação	CAN (500Kbps)
Campo de Visão	Perto +/- 45°, Médio +/- 9°, Longe +/- 4°
Frequência	77GHz
Dimensões	136 x 68 x 34mm
Peso	172g
Taxa de Atualização	50ms
Potência Dissipada	4.5W
Tensão de Alimentação	8V a 32V
Corrente Dissipada	375mA a 12V

Fonte: (CONTINENTAL, 2018)

O Radar ARS 404-21 foi cuidadosamente instalado na posição frontal de cada veículo elétrico em escala reduzida (conforme mostra a Figura 92), a uma altura de 33cm do solo.

Figura 92 – RARS 404-21 instalado no veículo de pequena escala



Fonte: O autor (2023)

Essa localização foi escolhida devido à sua importância na detecção de obstáculos e objetos em movimento no ambiente circundante do veículo. A posição frontal, a 33cm do solo (conforme Figura 93), proporciona uma visão abrangente da estrada à frente do veículo, permitindo identificar objetos que se aproximam, mudam de faixa ou cruzam a estrada. Essa ampla perspectiva é fundamental para garantir a segurança do veículo e seus ocupantes, evitando possíveis colisões.

Um detalhe da instalação na parte frontal é a melhoria na linha de visão do ARS 404-21, pois evita obstruções e interferências que poderiam prejudicar a precisão da detecção. Com uma visão desobstruída, o radar pode fornecer informações mais precisas sobre o ambiente circundante, contribuindo ainda mais para a segurança do veículo.

Figura 93 – Altura do Radar em relação ao solo



Fonte: O autor (2023)

Além disso, a colocação do ARS 404-21 a 33cm do solo na frente do veículo facilita a integração harmoniosa com outros sistemas de segurança, como câmeras e LiDAR. Essa sinergia permite a obtenção de informações mais detalhadas e completas sobre o entorno do

veículo, proporcionando uma visão holística do cenário e otimizando ainda mais a eficácia dos sistemas de segurança integrados.

A escolha do modelo ARS 404-21 para a infraestrutura veicular de pequena escala foi feita devido ao seu tamanho compacto, tecnologia avançada e capacidade de detecção em grandes distâncias.

Vale ressaltar que este é um radar, que se diferencia de um sensor estereoscópico, que utiliza a captura de imagens em estéreo para criar uma visão tridimensional do ambiente. Em vez disso, o ARS 404-21 utiliza ondas de rádio para detectar a presença e a posição de objetos ao redor do veículo. Essas informações são usadas para auxiliar no controle e na navegação do veículo, especialmente em sistemas de assistência ao motorista e em aplicações de direção autônoma.

4.7.2 Visão Computacional

A visão computacional é fundamental para veículos autônomos, permitindo que eles "vejam" e interpretem o mundo ao seu redor. Nos veículos autônomos em pequena escala desenvolvidos neste trabalho para um *Platoon*, a visão computacional também é importante, pois eles precisam identificar com precisão a posição dos veículos próximos e realizar manobras com segurança.

Para isso, os veículos autônomos de pequeno porte utilizam técnicas de visão computacional, como detecção de objetos, reconhecimento de padrões, detecção de faixas, processamento de imagens, entre outras, com o uso de câmeras para capturar imagens do ambiente e processá-las, permitindo identificar objetos e orientar o veículo. Neste contexto, os veículos fazem uso de um conjunto de três câmeras: uma câmera estéreo ZED2i e duas câmeras Logitech C90 de alta definição.

A câmera estéreo ZED2i é responsável por capturar imagens em 3D, permitindo a percepção de profundidade e a criação de mapas tridimensionais do ambiente. As câmeras Logitech de alta definição fornecem imagens nítidas e detalhadas, sendo úteis para a detecção e reconhecimento de objetos com maior clareza. Essas câmeras em conjunto oferecem uma percepção abrangente do ambiente, auxiliando nas tarefas de condução autônoma e garantindo a segurança do *Platoon*.

Para fixação das câmeras em cada veículo elétrico de pequeno porte, foi desenvolvido um suporte e impresso em 3D conforme Figura 94. O suporte é compatível com as câmeras da

Logitech e ZED2i.

Figura 94 – Suporte para o conjunto de câmeras

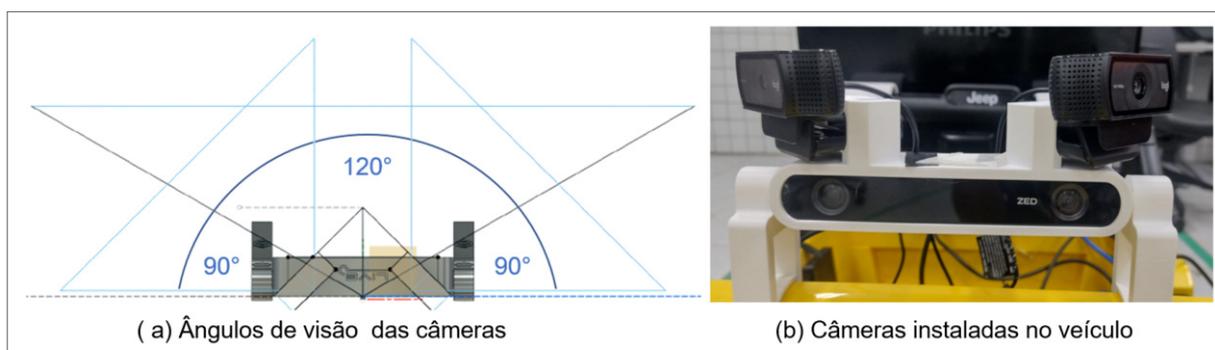


Fonte: O autor (2023)

Segundo Stereolabs (2021a), a ZED2i possui um amplo campo de visão (*Field of View*, FOV) de 120 graus, o que permite capturar uma área mais ampla em comparação com outras câmeras convencionais. Além disso, a ZED2i é capaz de capturar imagens em 3D, utilizando duas lentes estéreo para capturar duas imagens do mesmo cenário a partir de ângulos ligeiramente diferentes.

A Logitech C920 é uma webcam de alta qualidade e amplamente utilizada. Ela possui um campo de visão de 78 graus e uma resolução Full HD 1080p/30fps. As duas câmeras Logitech foram posicionadas nas laterais, formando um ângulo de 90 graus em relação à posição da ZED2i, conforme ilustrado na Figura 95 (a). A Figura 95 (b) ilustra as câmeras instaladas no veículo.

Figura 95 – Campo de visão das câmeras (a) e câmeras instalada no veículo (b)



Fonte: O autor (2023)

4.7.3 Visão Geral da Arquitetura Eletrônica Integrada

A arquitetura eletrônica integrada dos veículos em escala reduzida consiste em diversos componentes eletrônicos e sistemas interconectados. Seu propósito é fornecer controle e fun-

- **Gateway:** o bloco de gateway atua como um ponto de conexão entre os diferentes sistemas do veículo, facilitando a troca de informações e dados entre eles. Ele gerencia a comunicação interna e garante o fluxo de informações adequado entre os diferentes blocos.
- **ADAS:** Esse bloco engloba os sistemas de assistência ao motorista, que incluem recursos como detecção de obstáculos, frenagem automática de emergência, controle de cruzeiro adaptativo, entre outros. Esses sistemas ajudam a melhorar a segurança e o desempenho do veículo.

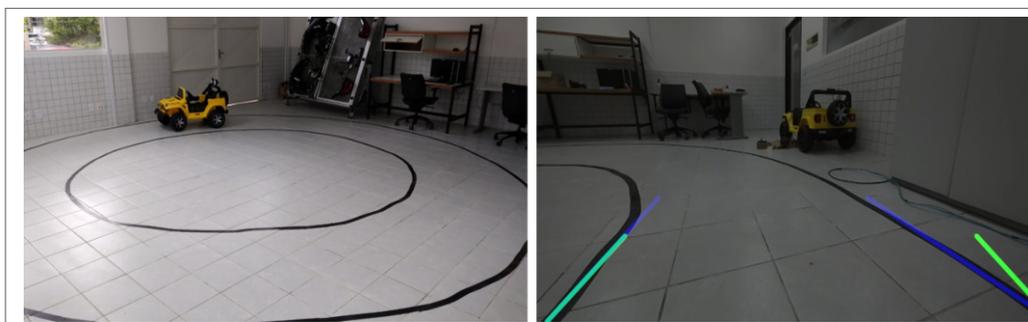
A divisão em blocos é essencial para garantir que os veículos em escala reduzida possam operar de maneira segura e eficiente, permitindo o controle autônomo e a integração adequada dos diferentes sistemas eletrônicos.

5 RESULTADOS

Nas seções seguintes deste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento de protótipos veiculares elétricos autônomos em escala reduzida. A seção 5.1 fornecerá uma visão geral dos veículos de pequeno porte. Em seguida, na seção 5.2, será descrito o sistema de alimentação elétrica, dividido em rede contínua e alternada. O sistema de controle lateral será abordado na seção 5.3, enquanto o sistema de controle longitudinal será abordado na seção 5.4. A comunicação intra-veicular será tratada na seção 5.5, e, por fim, a comunicação interveicular será descrita na seção 5.6.

Para coletar resultados, foram realizados testes com veículos de pequena escala em dois circuitos: um *Indoor* em formato circular (conforme Figura 97) e um *Outdoor* em uma área coberta (conforme Figura 98). O circuito *indoor* permitiu testar os sistemas de detecção de linhas e ajuste de direção, enquanto o circuito *outdoor* apresentou desafios do mundo real, como variação de iluminação e interação com o ambiente externo. Esses testes foram essenciais para avaliar o desempenho dos veículos em diferentes ambientes e aprimorar a infraestrutura veicular autônoma.

Figura 97 – Circuito Indoor



Fonte: O autor (2023)

Figura 98 – Circuito Outdoor



Fonte: O autor (2023)

5.1 VISÃO GERAL

O uso de plataformas em pequena escala desempenha um papel importante no desenvolvimento de veículos autônomos experimentais. Essas plataformas, também conhecidas como modelos em escala ou veículos de teste em miniatura, são versões em menor escala dos veículos autônomos.

Segundo GREGO (2016), elas possuem várias vantagens, como a realização de testes de conceito e validação, redução de riscos e custos, testes de algoritmos e sistemas, utilização em ambiente controlado, além de poderem ser usadas como ferramentas educativas e de conscientização para motoristas e profissionais da área.

Como resultado, foram desenvolvidos dois veículos em pequena escala (conforme Figura 99) instrumentalizados com uma variedade de sensores e equipamentos, como ECUs, encoders, radar, câmeras de alta definição e estereoscópicas, que permitem a detecção e monitoramento do ambiente ao redor.

Além disso, foram implementados algoritmos avançados de processamento de dados e controle, que permitem a estes veículos interpretar as informações dos sensores, tomar decisões de direção e velocidade, e se comunicar entre si para manter a formação de um *Platoon*.

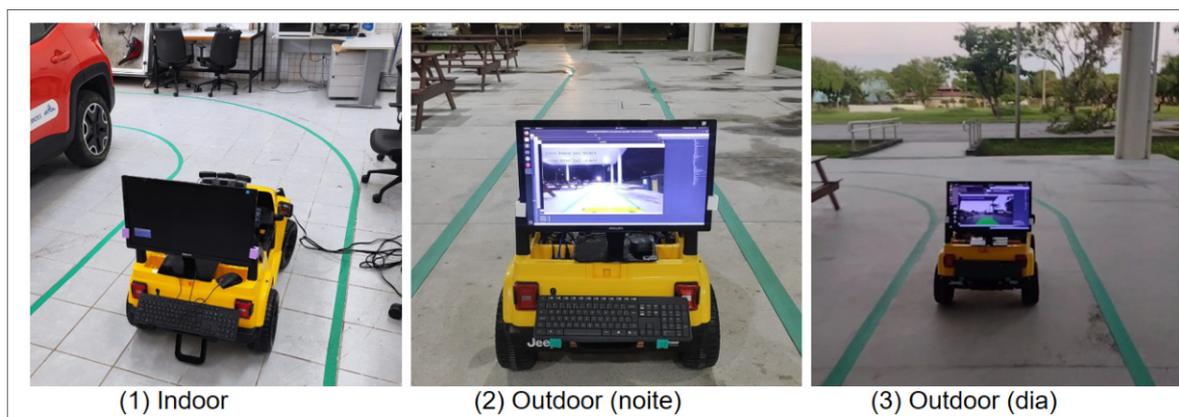
Figura 99 – Veículos elétricos instrumentalizados



Fonte: O autor (2023)

O desenvolvimento desses protótipos permite a realização de testes e avaliações das funções ADAS em um cenário realista, como ilustrado na Figura 100, em que os veículos autônomos interagem entre si e com o ambiente de tráfego.

Figura 100 – Veículo em testes nos circuitos Indoor e Outdoor



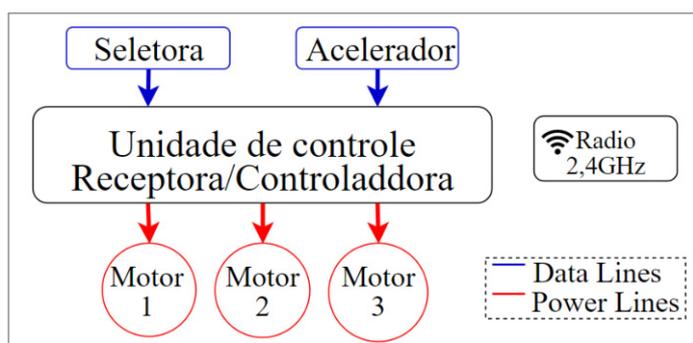
Fonte: O autor (2023)

Essas avaliações visam verificar a eficácia e a segurança das funções ADAS, como o ACC, AEBS e o LKAS, quando aplicadas em um contexto de formação de pelotão de veículos autônomos. Através dos resultados obtidos a partir desses protótipos, é possível avaliar o desempenho das funções ADAS em um agrupamento de veículos autônomos, identificar possíveis áreas de aprimoramento e desafios técnicos, contribuindo assim para o avanço da tecnologia de veículos autônomos.

Durante o desenvolvimento dos veículos elétricos em escala reduzida, ocorreu um aumento significativo no peso de cada veículo devido à instalação dos equipamentos necessários para a sua instrumentação. Inicialmente, o veículo possuía um peso de 22kg; no entanto, após a adição de dispositivos como o VN8912, Jetson AGX Orin, monitor, câmeras e, principalmente, baterias, o peso total aumentou para 45kg.

A Figura 101 ilustra a arquitetura original dos veículos elétricos em escala reduzida, modelo Jeep Bandeirantes, antes das modificações e instrumentação. Essa arquitetura é caracterizada por adotar uma abordagem de ECU centralizada, na qual todas as funções de controle e processamento do veículo são integradas em uma única unidade eletrônica.

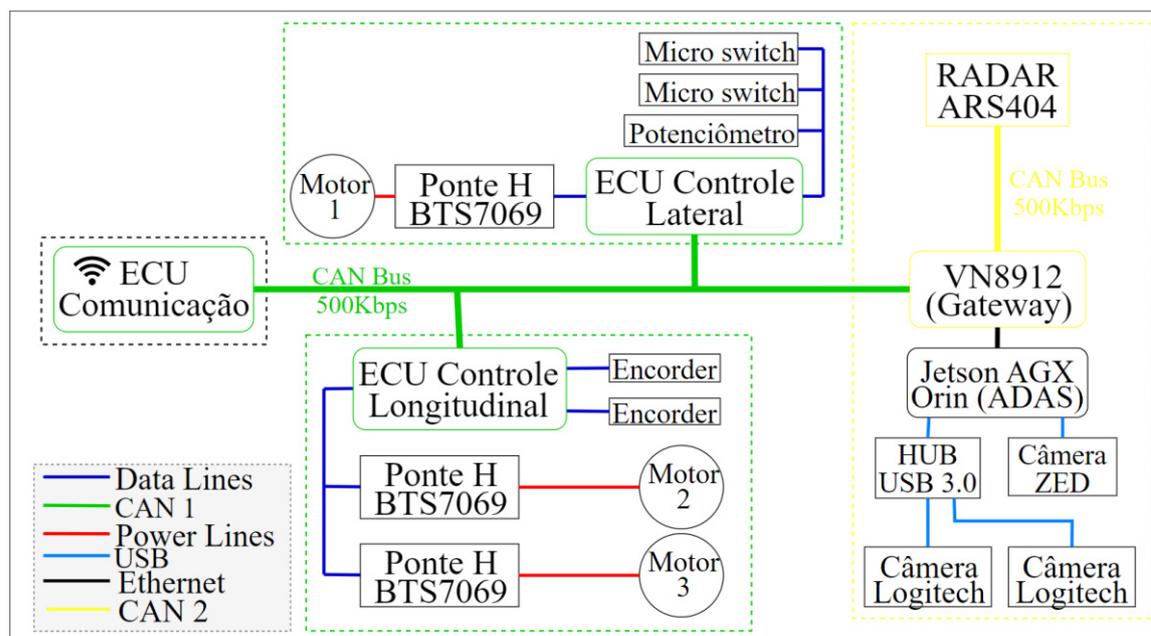
Figura 101 – Arquitetura em blocos do Jeep Bandeirantes



Fonte: O autor (2023)

Após as modificações necessárias para a instrumentação dos veículos de pequeno porte, foi adotada uma nova arquitetura de ECUs baseada no conceito de arquitetura distribuída. Nessa nova abordagem, várias unidades eletrônicas são interligadas por meio de dois barramentos CAN, permitindo o compartilhamento das diversas funções do veículo entre elas. O diagrama em blocos que representa essa nova arquitetura é apresentado na Figura 102.

Figura 102 – Diagrama em blocos da arquitetura desenvolvida para os veículos elétricos



Fonte: O autor (2023)

5.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA

Os veículos de pequena escala utilizados neste estudo, são alimentados por uma bateria de 12V com capacidade de descarga de até 7 ampères por hora. Importante ressaltar que esta capacidade não considera o peso máximo suportado pelo veículo, que é de 35kg, totalizando 57kg, incluindo o peso do próprio veículo de 22kg. Segundo o fabricante¹, o modelo possui autonomia de aproximadamente 30 a 45 minutos. No entanto, os equipamentos e sensores instalados consomem cerca de 24,1 ampères.

Para atender a essa demanda, alguns componentes do sistema requerem alimentação de corrente alternada, devido às suas fontes de energia específicas. Desta forma o sistema de alimentação foi modificado para acomodar todas as necessidades elétricas, dividido em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). Essa adaptação garante o suprimento adequado de

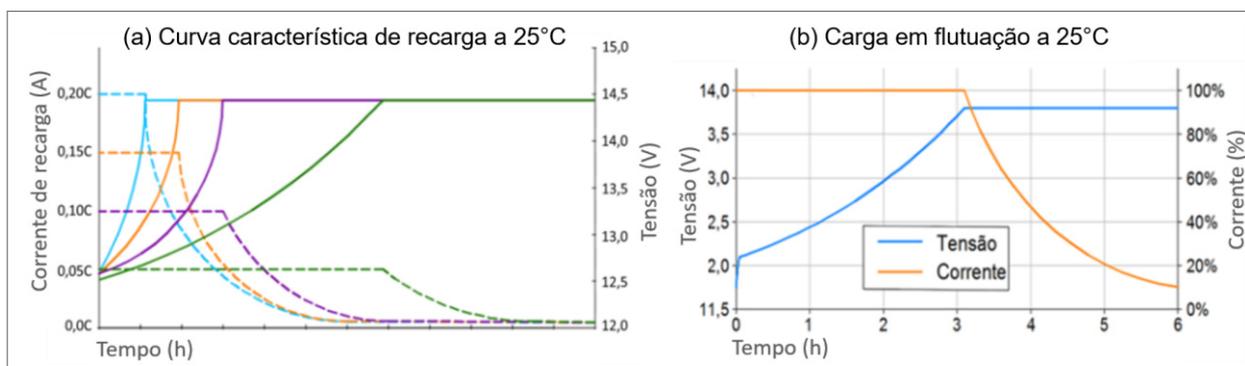
¹ Disponível em: <https://brinquedosbandeirante.com.br/novosite/wp-content/uploads/2908-JEEP-WRANGLER-RC-ELETRICO-12V-min.pdf>

energia para os diferentes dispositivos do veículo, assegurando seu funcionamento integrado.

A rede CC desenvolvida para esses veículos possui como peça central uma bateria estacionária da marca Moura, com capacidade de 12V/45Ah, substituindo a bateria original. Essa bateria armazena e fornece a energia necessária para a locomoção do veículo e alimentação dos diversos dispositivos elétricos. Uma análise criteriosa foi realizada para verificar sua adequação a esse propósito específico de suprimento elétrico para os veículos.

Foram levados em conta fatores como capacidade de armazenamento, durabilidade, ciclo de vida, segurança, tensão de flutuação e custo de aquisição da bateria. A Figura 103 apresenta os gráficos das curvas de recarga (a) e carga de flutuação (b) em temperatura ambiente, ilustrando as características da bateria.

Figura 103 – Curvas das características da bateria 12V45Ah



Fonte: (MOURA, 2021)

Ao analisar essas curvas, é possível avaliar diversos aspectos da bateria, como sua capacidade de fornecer corrente de partida, sua capacidade de recarga e a tensão de flutuação necessária para a manutenção do carregamento.

Para determinar a autonomia da bateria responsável pela rede elétrica CC, foram conduzidos testes em um dos veículos, com diferentes velocidades, levando em consideração a variação da corrente elétrica fornecida de conforme a rotação dos motores. Devido às limitações de espaço físico, os testes nos veículos foram realizados com um limite máximo de 70 RPM.

Os resultados obtidos nestes testes foram usados para calcular os valores médios de corrente para cada condição de velocidade. Esses dados estão apresentados de forma detalhada na Tabela 15, fornecendo uma visão abrangente das correntes médias encontradas durante os experimentos.

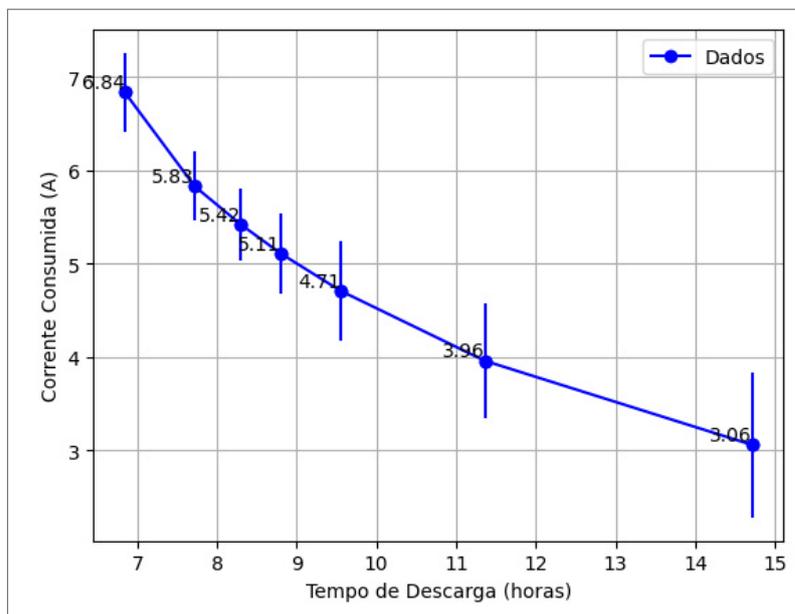
Tabela 15 – Valores médios das correntes em relação a velocidade

RPM	Corrente média (A)	Desvio Padrão
10,000	3,061	0,238
20,000	3,963	0,168
30,000	4,712	0,344
40,000	5,111	0,144
50,000	5,425	0,244
60,000	5,833	0,324
70,000	6,841	0,310

Fonte: O autor (2023)

Através da análise da corrente consumida pelos componentes da rede CC, é possível fazer uma projeção da autonomia da bateria com base na velocidade em RPM. Isso nos permite entender como a bateria se comporta durante o funcionamento do veículo. A Figura 104 apresenta o gráfico da curva de descarga da bateria em horas.

Figura 104 – Curvas de descarga da bateria em relação a velocidade do veículo



Fonte: O autor (2023)

A partir desses dados, podemos estimar que, em operação, o veículo terá uma autonomia máxima de aproximadamente 14 horas e 40 minutos quando operando a 10 RPM, enquanto a autonomia mínima será de 6 horas e 50 minutos a 70 RPM. Isso fornece uma visão clara das variações na autonomia em diferentes níveis de velocidade.

Um componente importante na rede CC é o conversor *step-down*², conhecido como conversor CC/CC com voltímetro, responsável por ajustar a tensão proveniente da bateria.

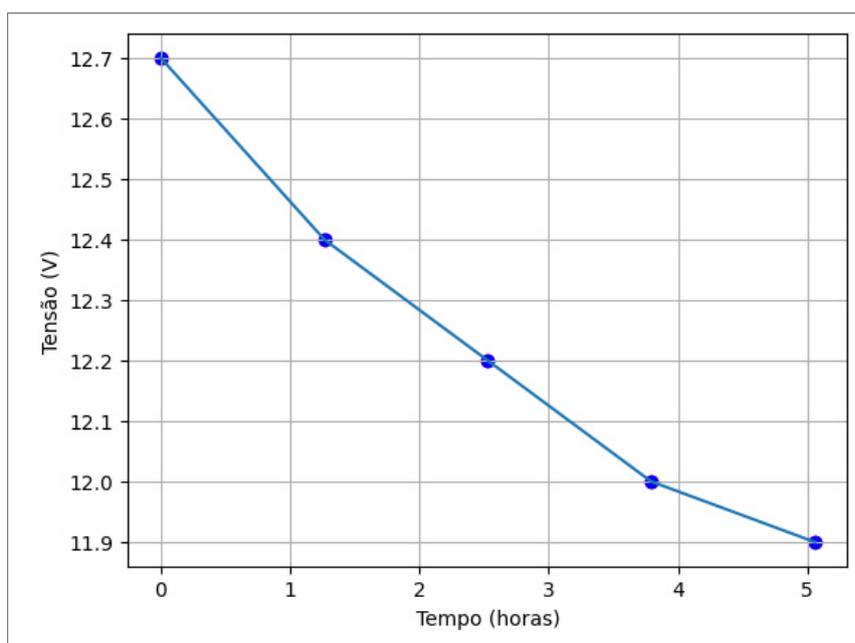
Como resultado se tem a rede CC é segmentada em 12V e 5V. A incorporação desse conversor foi necessária para atender às demandas das ECUs de controle lateral, controle longitudinal e comunicação, que operam com 5V de tensão contínua e consomem cerca de 500mA.

Por outro lado, a rede de corrente alternada (CA) alimenta equipamentos específicos. Essa rede compreende uma bateria estacionária 12V/45Ah e um inversor (senoidal pura) de corrente contínua para corrente alternada, responsável pela conversão. Além disso, um filtro de linha é utilizado para assegurar a qualidade da corrente alternada fornecida. Desta se tem uma rede de corrente alternada, operando com uma tensão de 220V.

Conseqüentemente, esta rede alimenta um monitor para visualização de dados e comandos, a central de processamento de dados (Jetson AGX Orin) e o Vector VN8912, desempenhando funções vitais no controle e processamento de dados do veículo. A autonomia dessa rede é de cerca de 5,5 horas.

A curva de descarga da bateria da rede CA é representada na Figura 105, apresentando um consumo máximo de 8,9 ampères, originado pelo inversor.

Figura 105 – Curva de descarga da bateria da rede de corrente alternada

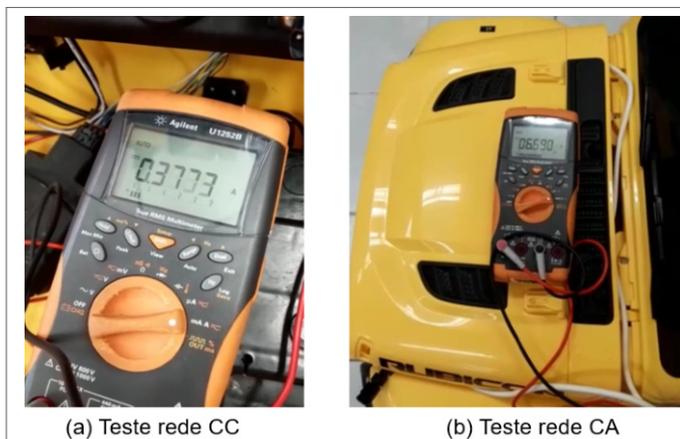


Fonte: O autor (2023)

² O LM2596 é um conversor DC/DC amplamente utilizado para reduzir a tensão de entrada e fornece uma fonte de alimentação estável para dispositivos eletrônicos de baixa tensão.

É importante destacar que tanto os testes da rede CC quanto da rede CA foram conduzidos utilizando um multímetro (conforme Figura 106) e baterias completamente carregadas.

Figura 106 – Testes das redes CC e CA



Fonte: O autor (2023)

5.3 SISTEMA DE CONTROLE LATERAL

O controle lateral desempenha um papel crucial na manutenção da trajetória desejada de um veículo de pequeno porte, realizando ajustes precisos no ângulo de direção das rodas dianteiras. Esse controle utiliza informações obtidas a partir das imagens capturadas pela câmera ZED e processadas pela Jetson AGX Orin, conforme ilustrado na Figura 107. Com base na posição do veículo, é calculado o ângulo necessário para efetuar a curva.

Figura 107 – Imagem captura pela câmera ZED



Fonte: O autor (2023)

Na Figura 107 os pontos ilustrados representam os pontos centrais que o veículo deve seguir, e a Jetson AGX envia os ângulos necessários por meio da interface CAN para a ECU de

controle lateral. Esses ângulos são definidos como: posição central de 25°, posição totalmente à esquerda de 1° e posição totalmente à direita de 50°.

Para realizar os testes de ângulos da direção, o veículo em escala reduzida foi posicionado no solo, e uma linha foi traçada na posição original da roda, com o volante centralizado, estabelecendo assim uma referência inicial. A condução destes testes foi facilitada pelo uso de um goniômetro, conforme ilustrado na Figura 108, onde a posição do centro da direção do veículo, com um ângulo de 25 graus, serviu como ponto de partida (0 grau) no goniômetro.

Figura 108 – Testes com o goniômetro



Fonte: O autor (2023)

Foram efetuadas 30 medições para cada incremento de 5 graus. A média e o desvio padrão de cada medida foram calculados, uma abordagem que assegura a robustez dos testes. Essa quantidade de repetições de cada medida (30) é recomendada visando a consistência dos resultados. A Tabela 16 apresenta os ângulos obtidos por meio de 30 repetições para cada ângulo desejado.

A Figura 109 ilustra o gráfico obtido através das amostras coletadas. Para avaliar a eficiência do controlador lateral, são enviadas mensagens através do barramento CAN para a ECU e comparamos o ângulo de giro das rodas com o ângulo de referência, informado por um potenciômetro linear.

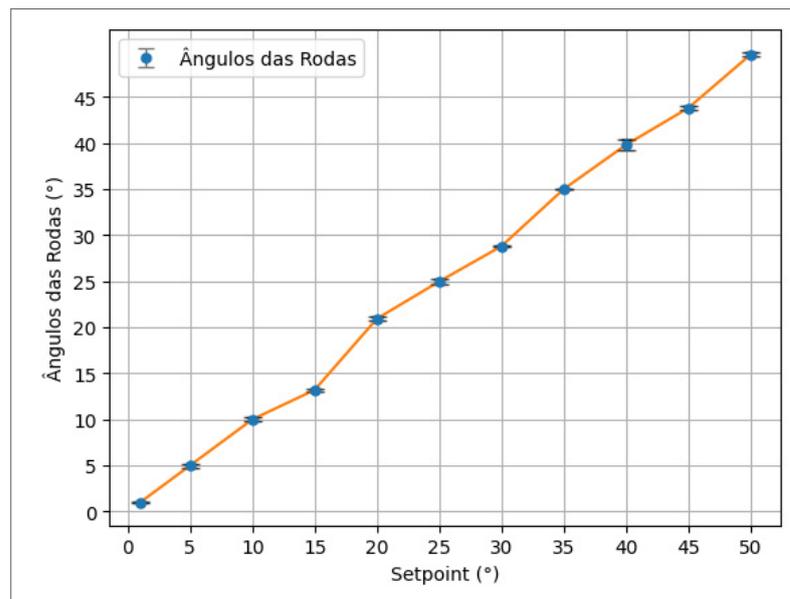
Após os testes, constatamos um erro médio de $\pm 3^\circ$. Esse erro relativamente alto é atribuído à falta de robustez mecânica da caixa de redução e à baixa resolução do sistema atual.

Tabela 16 – Métricas do controle dos ângulos da direção do veículo de pequeno porte

Setpoint (°)	Ângulos das rodas (°)	Desvio Padrão
1,0	1,00	0,05
5,0	5,00	0,22
10,0	10,0	0,22
15,0	13,2	0,15
20,0	20,9	0,25
25,0	24,9	0,29
30,0	28,8	0,13
35,0	0,00	35,0
40,0	39,8	0,65
45,0	43,8	0,23
50,0	49,6	0,26

Fonte: O autor (2023)

Figura 109 – Variação angular das rodas dianteira em função do setpoint



Fonte: O autor (2023)

5.4 SISTEMA DE CONTROLE LONGITUDINAL

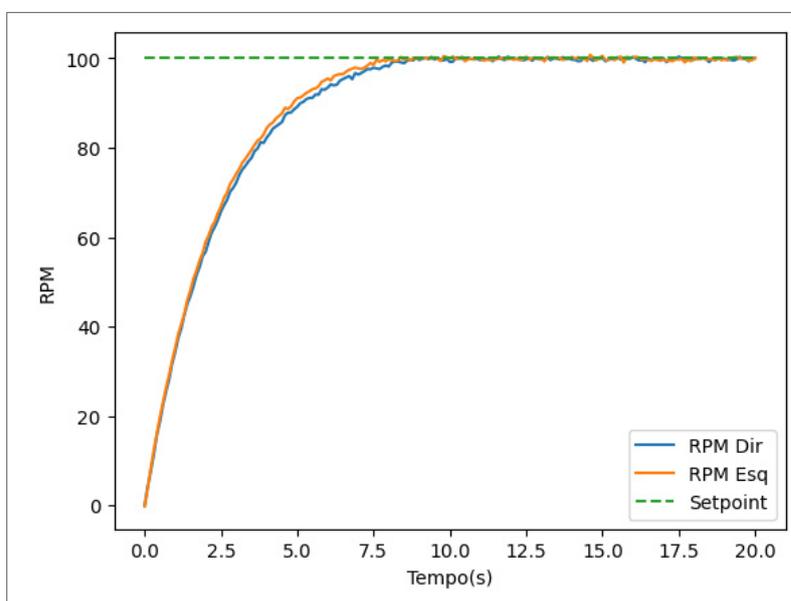
O sistema de controle longitudinal utiliza informações de sensores *on-board* capazes de medir distâncias e velocidades relativas de outros veículos ou objetos que possam interferir na trajetória do veículo, como a câmera ZED, o Radar ARS-404 e os encoders rotativos.

Os dados da câmera e do radar são processados pela Jetson AGX Orin e traduzidos em comandos de aceleração e frenagem. Informações recebidas via comunicação inter-veicular também podem ser usadas para esse fim. Para testar o controle longitudinal o veículo em

escala reduzida foi levado até o percurso de testes e via rádio foi enviado um comando para ajustar o *setpoint* para 100 RPM.

O monitoramento da velocidade de cada roda do veículo foi executado pela Jetson AGX Orin, através da leitura de mensagens CAN enviadas pela ECU de controle longitudinal. Esses dados, mostrados na Figura 110, indicam que o PID foi capaz de garantir a velocidade estabelecida via *setpoint*. Esses dados também mostram que os motores de tração do veículo tem uma pequena diferença de resposta.

Figura 110 – Controle da velocidade em relação ao tempo



Fonte: O autor (2023)

O motor da esquerda alcança o *setpoint* frações de segundos antes do motor da direita. Isso provavelmente se deve a diferenças construtivas dos motores, mesmo ambos tendo a mesma referência. Contudo, as correções do controle lateral tornaram os efeitos dessa diferença imperceptíveis.

Outro teste foi efetuado, porém, desta vez foram enviados valores de RPM fixo e comparado com os valores reais de cada roda. Tabela 16 ilustra o valores em RPM fornecidos e o valores reais de cada roda.

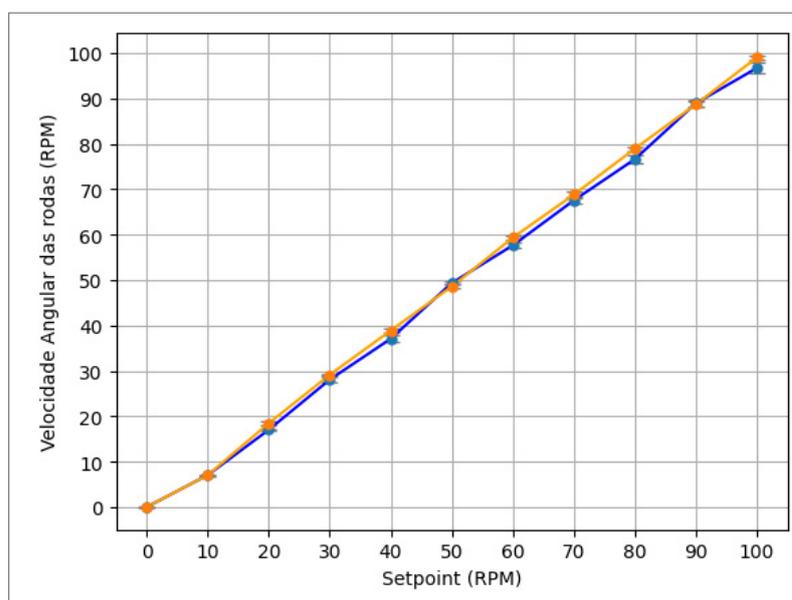
Tabela 17 – Métricas do controle da rotação do veículo de pequeno porte

Setpoint	R. Direita	Desvio Padrão	R. Esquerda	Desvio Padrão
0,00 RPM	0,00 RPM	0,00	0,00 RPM	0,00
10,00 RPM	8,36 RPM	0,35	7,03 RPM	0,18
20,00 RPM	18,44 RPM	0,43	16,77 RPM	0,62
30,00 RPM	29,12 RPM	0,16	27,59 RPM	0,69
40,00 RPM	38,88 RPM	0,52	36,98 RPM	0,65
50,00 RPM	49,34 RPM	0,29	46,48 RPM	0,95
60,00 RPM	59,34 RPM	0,38	57,64 RPM	0,59
70,00 RPM	68,80 RPM	0,63	67,54 RPM	0,78
80,00 RPM	78,94 RPM	0,44	76,62 RPM	0,88
90,00 RPM	88,71 RPM	0,63	88,94 RPM	0,81
100,00 RPM	99,02 RPM	0,40	96,70 RPM	1,12

Fonte: O autor (2023)

A Figura 111 ilustra o gráfico obtido através dos testes. É possível visualizar que o motor da esquerda tem uma rotação diferente do motor da direita. Isso é constatado devido a diferenças construtivas dos motores, mesmo ambos tendo a mesma referência.

Figura 111 – Métricas das rotações em comparação ao setpoint



Fonte: O autor (2023)

Em relação a frenagem por desaceleração, o sistema de controle longitudinal envia uma mensagem intraveicular através do protocolo CAN para a unidade de controle longitudinal. O tempo necessário para que o veículo freie completamente depende da velocidade em que ele se encontra ao enviar a mensagem. Durante esse intervalo até a frenagem completa, o veículo

percorre uma distância, mesmo que desacelerado, o que pode resultar em uma colisão com um objeto caso a distância entre o veículo e o objeto seja muito curta em relação à sua velocidade. Em tais casos, o sistema envia uma mensagem para ativar a frenagem de emergência, freando o veículo de forma abrupta.

A Tabela 18 exibem os valores relativos à distância e ao tempo necessários para que o veículo freie completamente dependendo da velocidade em que o veículo se encontra.

Tabela 18 – Distância e tempo necessário até o veículo parar completamente

Velocidade (RPM)	Distancia (cm)	Tempo (s)
10,00	20,00	2,77
20,00	62,00	4,16
30,00	102,00	5,54
40,00	147,00	7,34
50,00	183,00	8,76

Fonte: O autor (2023)

5.5 COMUNICAÇÃO INTRA-VEICULAR

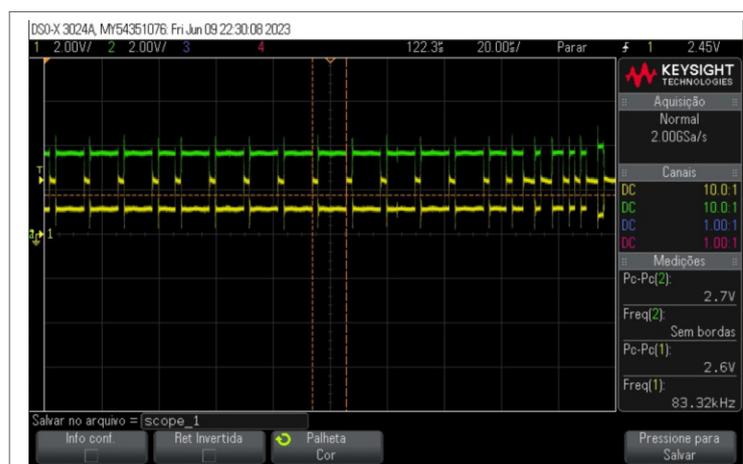
A comunicação intra-veicular refere-se à troca de informações e dados entre os componentes e sensores de um veículo. Esse processo é executado via barramentos CAN.

Nos veículos de pequena escala abordados neste estudo, a rede intra-veicular é constituída por dois barramentos CAN e um sistema Ethernet. Esses barramentos são sistemas de comunicação utilizados em veículos automóveis para interconectar diversos dispositivos eletrônicos, como sensores, atuadores e unidades de controle.

Utilizando um osciloscópio, foi possível capturar as mensagens trocadas pelas ECUs via barramento CAN. Nessa análise, foram empregados dois canais do osciloscópio, considerando a quantidade de fios elétricos como meio de transmissão dos dados. A rede nos veículos de pequeno porte utiliza dois fios denominados CAN_H (CAN High) e CAN_L (CAN Low) para a transmissão dos sinais de dados.

Dessa maneira, é fundamental interpretar os dados enviados pela rede através da análise da diferença de potencial entre os fios CAN_H e CAN_L. O canal 1 do osciloscópio foi conectado à linha CAN_H identificada pela cor amarela (Figura 112), enquanto o canal 2 foi conectado à linha CAN_L na cor verde. Para a captura do sinal, o osciloscópio foi configurado com uma base de tempo de 20 μ s.

Figura 112 – Captura de tela da mensagem CAN via Osciloscópio



Fonte: O autor (2023)

A VN8912, utilizada como ECU de *gateway*, é uma interface de barramento CAN desenvolvida pela Vector Informatik para monitorar e analisar o tráfego de dados. Ao enviar informações pelo barramento CAN, é crucial compreender os conceitos de desempenho da comunicação, como Bus Load (%), Peak Load (%) e Std. Frame:

- **Bus Load (%):** Reflete a quantidade de dados transmitidos em relação à capacidade máxima do barramento. Valores próximos a 100% indicam alta utilização, enquanto valores próximos a 0% sugerem uso mínimo.
- **Peak Load (%):** Representa o máximo de carga durante uma transmissão, identificando momentos de alta demanda de dados.
- **Std. Frame:** Tipo de quadro com identificador de 11 bits usado no barramento CAN para mensagens. Comum em redes automotivas e industriais.

Essas métricas (Bus Load, Peak Load e Std. Frame) avaliaram a comunicação nos barramentos CAN nos veículos deste trabalho. Resultados nas Tabelas 19 (CAN1) e 20 (CAN 2) utilizando o *software* CANoe³.

O CANoe oferece recursos para simulação, análise e diagnóstico do tráfego de dados em barramentos CAN, permitindo configuração, monitoramento e visualização de mensagens trocadas. Criação de cenários de teste realistas e emulação de dispositivos também são suportados.

³ O CANoe é um *software* de análise e simulação de redes veiculares baseadas em barramentos CAN, permitindo o desenvolvimento, teste e análise de sistemas de comunicação em veículos.

Tabela 19 – Métricas do barramento CAN 1

Métricas	Média	Desvio Padrão
Bus Load(%)	0,309	0,001
Peak Load(%)	0,343	0,004
Std.Data(fr/s)	13	0,261

Fonte: O autor (2023)

Tabela 20 – Métricas do barramento CAN 2

Métricas	Média	Desvio Padrão
Bus Load(%)	3,774	0,112
Peak Load(%)	4,778	0,240
Std.Data(fr/s)	1701	8,186

Fonte: O autor (2023)

Foram feitas 18 amostras para calcular a média e o desvio padrão de cada valor, representando medições repetidas dos dados em 18 ocasiões distintas. O cálculo da média envolve somar todos os valores nas amostras e dividir pelo total de amostras 18. Isso fornece uma média que representa uma estimativa geral dos dados coletados. A média do uso do barramento CAN 1 é de 0,309% da capacidade máxima, indicando baixo tráfego de dados. A média do uso máximo é 0,343%, apontando picos baixos de uso do barramento. Observamos apenas a média de dados transmitidos por segundo (13 frames), sem o número específico de Std. Frames.

Na situação do barramento CAN 2, a média da carga deste barramento (Bus Load) é de 3,774% da capacidade máxima, indicando um nível moderado de tráfego de dados no barramento. Quanto à média da carga máxima (Peak Load), esta atinge 4,778%, evidenciando também a ocorrência de picos baixos de utilização do barramento em momentos específicos. De maneira similar ao barramento CAN 1, não possuímos informações detalhadas sobre a quantidade de frames Std. transmitidos, restando-nos apenas a média dos dados transmitidos por segundo, totalizando 1701 frames.

Os resultados indicam que os barramentos CAN 1 e CAN 2 estão operando adequadamente, com uma carga de dados baixa a moderada e sem ocorrência de perda de pacotes. No entanto, é relevante destacar que o barramento do Radar ARS 404-21 apresenta uma taxa de transmissão de frames consideravelmente superior em comparação com o veículo elétrico. Isso implica que o ARS 404-21 está transmitindo uma quantidade significativamente maior de dados em um

período de tempo específico, quando comparado ao veículo elétrico. Essas discrepâncias nos dados sugerem que a rede CAN do Radar ARS 404-21 está submetida a uma carga de dados consideravelmente mais elevada em comparação com a rede CAN das ECUs.

A análise das métricas médias no barramento Ethernet de veículos de pequena escala proporciona *insights* sobre a capacidade e a robustez para gerenciar o tráfego, otimizando o desempenho global e garantindo uma comunicação confiável.

Isso fica evidente quando analisamos as médias de dados apresentadas na Tabela 21 para o barramento Ethernet, as quais destacam o desempenho médio da comunicação, sem levar em conta a ocorrência de perda de pacotes. Essas médias são de extrema importância para compreender as taxas de transmissão e recepção ao longo do tempo, bem como a constância desses processos.

Tabela 21 – Métricas do barramento Ethernet

Métricas	Média	Desvio Padrão
Rx Bit rate(Mbit/s)	0,0732	0,0097
Tx Bit rate(Mbit/s)	0,0613	0,0096
Rx Peak rate(Mbit/s)	0,1247	0,0021
Tx Peak rate(Mbit/s)	0,0938	0,0028

Fonte: O autor (2023)

As métricas específicas na Tabela 21 oferecem informações detalhadas:

- **Rx Bit rate (Mbit/s):** A média da taxa de bits de recepção é 0,0732 Mbit/s, indicando que, em média, o barramento Ethernet está recebendo uma taxa moderada de transferência de informações.
- **Tx Bit rate (Mbit/s):** A média da taxa de bits de transmissão é 0,0613 Mbit/s, representando a taxa média de envio de dados pelo barramento Ethernet.
- **Rx Peak rate (Mbit/s):** A média da taxa de pico de recepção é 0,1247 Mbit/s, refletindo o valor máximo alcançado durante a recepção de dados em um determinado momento.
- **Tx Peak rate (Mbit/s):** A média da taxa de pico de transmissão é 0,0938 Mbit/s, indicando o valor máximo atingido durante a transmissão de dados em um momento específico.

De modo geral, os valores médios indicam que o barramento Ethernet está operando dentro de limites aceitáveis para taxas de transmissão e recepção de dados. As discrepâncias entre essas taxas podem ser influenciadas por protocolos de comunicação, priorização de dados ou cargas do sistema.

As taxas de pico refletem a capacidade do barramento em lidar com momentos de alta demanda. No entanto, uma avaliação completa do desempenho deve incorporar métricas adicionais, como latência, qualidade de serviço (*Quality of Service*, QoS) e estabilidade da comunicação, a fim de determinar se esses valores médios atendem às necessidades específicas do cenário de utilização do barramento Ethernet.

5.6 COMUNICAÇÃO INTERVEICULAR

O desenvolvimento da rede interveicular promoveu a troca de informações e dados entre veículos de pequeno porte e a infraestrutura circundante. Essa comunicação viabiliza o compartilhamento de informações relevantes, como localização, velocidade, direção e estado operacional, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada do ambiente de tráfego e possibilitando a adoção de medidas adequadas para garantir a segurança e eficiência dos veículos em escala reduzida.

A abordagem adotada fundamenta-se em uma lógica simples, onde se priorizam as mensagens de Controle Longitudinal. Isto se justifica pelo fato de que, ao detectar qualquer problema ou anomalia, uma resposta imediata do veículo é essencial, podendo inclusive envolver a parada completa do veículo. Na sequência, encontram-se as mensagens relacionadas à Direção e, por fim, as mensagens associadas à comunicação interveicular. As mensagens de Controle Longitudinal são exemplificadas abaixo:

- **0x50:** Status do veículo de pequena escala.
- **0x52:** Ajuste da velocidade do motor esquerdo.
- **0x54:** Ajuste da velocidade do motor direito.
- **0x56:** Ajuste do PWM do motor esquerdo.
- **0x5A:** Ajuste do PWM do motor direito.
- **0x5C:** Ajuste do PWM de ambos os motores.

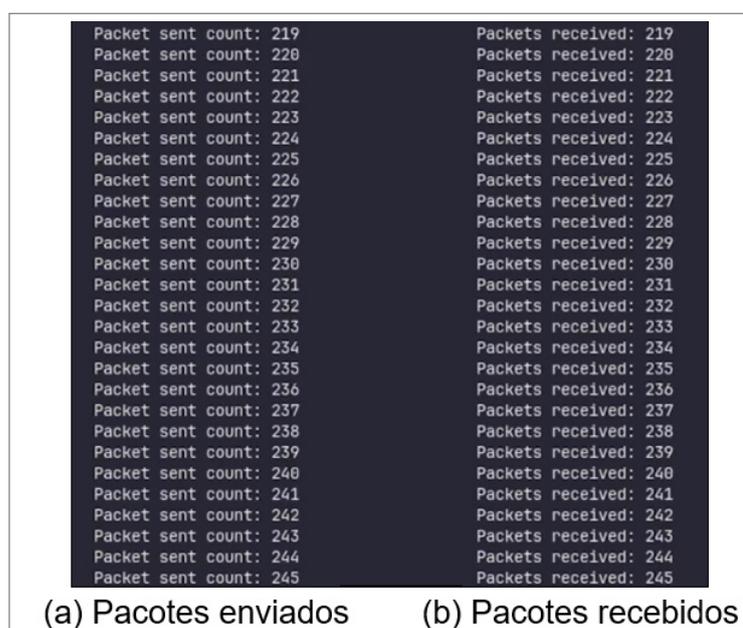
- **0x5E:** Configuração dos ganhos do PID do motor esquerdo.
- **0x60:** Configuração dos ganhos do PID do motor direito.
- **0x62:** Leitura dos ganhos PID do motor esquerdo.
- **0x64:** Leitura dos ganhos PID do motor direito.
- **0x66:** Leitura dos ganhos PID de ambos os motores.
- **0x6A:** Acionamento da frenagem de emergência.
- **0x6E:** Reinicialização da ECU.

Em ambas as unidades de controle, o conjunto de mensagens também é organizado de modo a priorizar as mensagens de status e controle, seguidas por mensagens mais específicas, como atualizações relativas ao algoritmo de controle (PID) e reinícios emergenciais.

Os testes foram executados utilizando a ECU de comunicação no veículo, em conjunto com o módulo PC RF (plataforma ESP32-S2) conectado a um computador. Os pacotes enviados e recebidos foram monitorados na tela do computador, usando o monitor serial como interface.

Durante os testes, 250 pacotes foram enviados em intervalos de 1 segundo, 500 milissegundos e 10 milissegundos. A Figura 113 ilustra o processo de envio (a) e recebimento (b) dos pacotes, entre o veículo e a infraestrutura (computador com a ESP32-S2).

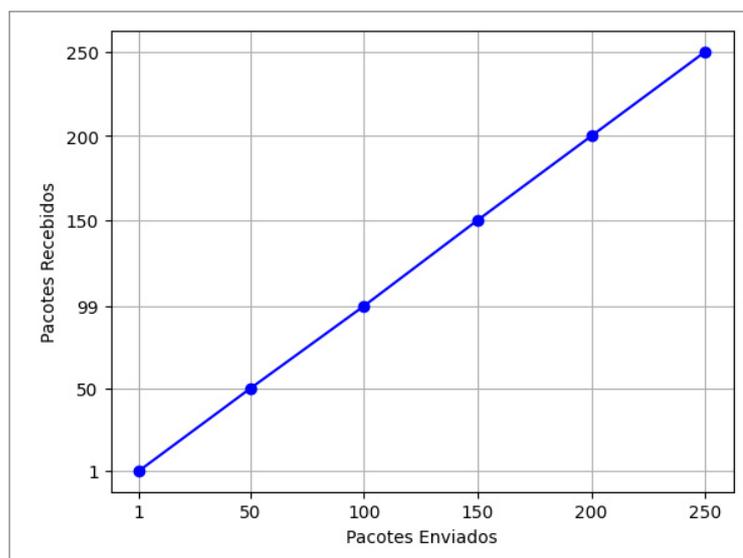
Figura 113 – Captura de tela do envio/recebimento dos pacotes da rede interveicular



Fonte: O autor (2023)

A avaliação da comunicação interveicular foi realizada em um ambiente controlado, ou seja, em um ambiente de laboratório. Observou-se que todos os pacotes enviados pela unidade de comunicação foram recebidos pelo módulo PC RF, em um intervalo de tempo inferior a 10 milissegundos. A Figura 114 apresenta o gráfico que exhibe os resultados desses testes.

Figura 114 – Pacotes enviados x pacotes recebidos



Fonte: O autor (2023)

As unidades de direção, aceleração e frenagem adotam a plataforma Arduino Mega 2560. Esta plataforma exhibe uma resposta ágil, isto é, a habilidade de reagir prontamente a estímulos ou eventos externos, desencadeando ações correspondentes com eficiência e pontualidade.

Os testes de resposta das ECUs com Arduino Mega 2560 demonstraram um tempo de aproximadamente 0,00052 milissegundos (ou 0,52 microssegundos) desde o envio até o recebimento. Esse resultado sinaliza uma resposta excepcionalmente veloz, evidenciando uma eficácia elevada na intercomunicação dos dispositivos. A Figura 115 exhibe a interface do monitor serial no ambiente de programação do Arduino.

Figura 115 – Teste de resposta das ECUs

```
COM4
Enviar
Recieve by CAN: id 86 (56)HEX 0 0 0 0 1 64 1 64
105.24,18508
105.24,18560
105.24,18611
105.24,18662
105.24,18713
Recieve by CAN: id 86 (56)HEX 0 0 0 0 1 64 1 64
Recieve by CAN: id 86 (56)HEX 0 0 0 0 1 64 1 64
105.24,18764
105.24,18816
93.42,18867
93.42,18918
93.42,18969
93.42,19020
Recieve by CAN: id 86 (56)HEX 0 0 0 0 1 64 1 64
93.42,19072
93.42,19123
Recieve by CAN: id 86 (56)HEX 0 0 0 0 1 64 1 64
93.42,19174
93.42,19225
93.42,19276
Recieve by CAN: id 86 (56)HEX 0 0 0 0 1 64 1 64
93.42,19328
93.42,19379
99.33,19430
99.33,19481
99.33,19532
Recieve by CAN: id 86 (56)HEX 0 0 0 0 1 64 1 64
99.33,19584
Recieve by CAN: id 86 (56)HEX 0 0 0 0 1 64 1 64
99.33,19635
99.33,19686
99.33,19737
99.33,19788
99.33,19840
Recieve by CAN: id 86 (56)HEX 0 0 0 0 1 64 1 64
 Auto-rolagem  Show timestamp
Nova-linha 115200 velocidade Deleta a saída
```

Fonte: O autor (2023)

É importante resaltar que, embora o Arduino seja um microcontrolador poderoso e versátil, ele possui limitações em termos de poder de processamento e recursos. Portanto, ao projetar sistemas que requerem alta responsividade, pode ser necessário otimizar o código, utilizar técnicas de hardware e considerar o uso de microcontroladores mais avançados, dependendo dos requisitos específicos do projeto.

6 CONCLUSÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar as considerações finais sobre os principais tópicos abordados neste trabalho, incluindo as contribuições alcançadas e indicações para trabalhos futuros.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na última década, os veículos autônomos evoluíram significativamente, impulsionados pelo interesse das grandes empresas de tecnologia, avanços em algoritmos de aprendizado de máquina, inteligência artificial e maior poder computacional dos processadores gráficos. Tecnologias como sistemas inteligentes de transporte (ITS) e sistemas de *Platoon* contribuem para aprimorar a segurança, eficiência e sustentabilidade do transporte.

Para a adoção em massa dos veículos autônomos, é crucial garantir a segurança dos passageiros e pedestres. Tecnologias como sensores, câmeras, radar, lidar e uso de inteligência artificial para análise de dados são fundamentais, além do desenvolvimento de sistemas de comunicação, como a comunicação entre veículos (V2V) e com a infraestrutura (V2I).

Neste contexto, o desenvolvimento de protótipos de veículos em pequena escala tem se mostrado viável e econômico para desenvolver tecnologias autônomas, em comparação com veículos em escala real.

A infraestrutura veicular desenvolvida neste estudo mostrou-se promissora ao permitir a realização de testes e validações das funções ADAS em um sistema de *Platoon* em fase de desenvolvimento. Durante os testes, algumas observações foram feitas: a autonomia da bateria da rede corrente apresentou variações consideráveis, oscilando entre 6 horas e 50 minutos a 14 horas e 40 minutos. Além disso, o controle lateral demonstrou um erro médio aceitável de ± 3 graus, revelando sua eficiência nas manobras, enquanto o controle longitudinal mostrou sua eficácia na manutenção da velocidade desejada.

Um destaque foi a comunicação intra-veicular, que operou com baixa carga de dados, representando apenas 0,309% (CAN 1) e 3,774% (CAN 2) da capacidade máxima. Isso reforça a eficiência do sistema de transmissão de informações entre os componentes do veículo, otimizando o funcionamento do sistema autônomo. Além disso, a comunicação interveicular também demonstrou alta confiabilidade, com apenas 1 pacote perdido de 250 transmitidos

por radiofrequência, o que é crucial para a segurança e coordenação adequada entre veículos em ambientes de tráfego complexos.

Desta forma, a pergunta de pesquisa feita por este trabalho (Seção 1.3) é respondida. Esses resultados indicam que a plataforma SAVIPS proposta é robusta para avaliar e desenvolver funções ativas direcionadas a aplicações ADAS no desenvolvimento de veículos autônomos. Além disso, a plataforma permite a inclusão de novos sensores, contribuindo para soluções mais seguras e eficientes.

6.2 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho apresenta contribuições acadêmicas e tecnológicas significativas, incluindo:

- **Desenvolvimento de uma infraestrutura viável:** O resultado deste trabalho é uma infraestrutura veicular autônoma em pequena escala, viável e acessível. Isso permite a implementação de tecnologias autônomas com um custo reduzido em comparação a veículos de escala real.
- **Validação de teorias e conceitos:** A infraestrutura desenvolvida tem o potencial de contribuir para a validação de teorias e conceitos relacionados à aplicação de tecnologias autônomas utilizando veículos de pequena escala.
- **Geração de conhecimento científico:** Os resultados obtidos com esta infraestrutura veicular podem contribuir para a geração de conhecimento científico na área de veículos controlados, tanto autônomos como não autônomos. Isso proporciona *insights* valiosos para futuras pesquisas e estudos, impulsionando avanços na tecnologia.
- **Testes e validações:** O desenvolvimento do SAVIPS possibilita a realização de testes e validações de tecnologias autônomas em um ambiente controlado. Essa abordagem permite analisar o desempenho, eficiência e segurança dos sistemas implementados, garantindo um desenvolvimento seguro e confiável.

6.3 LIMITAÇÕES

Foram identificadas algumas limitações no trabalho proposto, a saber:

- **Fidelidade limitada a um carro real:** Devido às diferenças de tamanho e complexidade, um veículo de pequena escala, como o Jeep Bandeirantes, pode não representar com total fidelidade um carro real. Isso pode afetar a validade dos testes e a capacidade de generalização dos resultados para veículos em tamanho real.
- **Alteração na dinâmica do veículo:** A adição de equipamentos e sensores para tornar o veículo autônomo pode afetar a dinâmica do Jeep Bandeirantes. O peso atual do veículo é de $47Kg$, principalmente por conta das baterias, o que pode alterar a resposta do veículo em relação à aceleração, frenagem e curvas, tornando-o diferente de um carro em tamanho real.
- **Limitações de testes de alta velocidade:** Devido às características e restrições do veículo de pequena escala, pode ser impossível criar cenários de testes em alta velocidade com o Jeep Bandeirantes. Isso limita a capacidade de avaliar o desempenho e a segurança do veículo autônomo em condições de velocidade mais realistas.

É importante levar em consideração essas limitações ao projetar e testar veículos autônomos em pequena escala, reconhecendo que os resultados obtidos podem não ser diretamente transferíveis para veículos em tamanho real.

6.4 TRABALHOS FUTUROS

A seguir, são apresentados os próximos passos deste trabalho, baseados nos resultados alcançados nesta pesquisa:

- **Desenvolvimento de uma PCI:** Será realizado o desenvolvimento de uma PCI utilizando plataformas similares às usadas em veículos de escala real. O objetivo é substituir as ECUs atuais, buscando maior eficiência e desempenho. Exemplo as PCIs desenvolvidas na Universidade de Brasília (UnB).
- **Implementação do terceiro veículo:** Será instrumentado um terceiro veículo em escala reduzida para a inclusão no *Platoon*. Isso permitirá a realização de testes mais abrangentes e avançados da tecnologia autônoma.
- **Implementação do LiDAR VLP-16:** Será feita a integração do sensor LiDAR VLP-16 nos veículos autônomos deste trabalho. Essa adição irá aprimorar a percepção do ambi-

ente pelos veículos, possibilitando uma melhor capacidade de detecção e mapeamento do entorno.

- **Implementação do Cohda:** Será realizada a implementação da plataforma MK6C da Cohda para a comunicação C-V2X. O objetivo é aprimorar a segurança e eficiência nas trocas de informações entre veículos e o ambiente viário.
- **Autenticação e Identificação Segura:** Serão implementados mecanismos de autenticação e identificação segura para garantir que apenas dispositivos e sistemas autorizados tenham acesso ao veículo autônomo e suas funcionalidades, protegendo contra possíveis ciberataques.
- **Início da implementação dos sistemas em veículos de escala real:** Uma etapa crucial será a transição dos sistemas desenvolvidos e testados em ambientes controlados para veículos de escala real. Essa etapa permitirá validar e aprimorar ainda mais a tecnologia autônoma em situações reais de tráfego.

Esses são os próximos passos deste trabalho, visando contribuir com o desenvolvimento de soluções mais avançadas e eficientes para a mobilidade autônoma, trazendo benefícios significativos para a sociedade e o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, H.; REIMER, B.; MEHLER, B. Advanced driver assistance systems (adas): A consideration of driver perceptions on training, usage & implementation. In: SAGE PUBLICATIONS SAGE CA: LOS ANGELES, CA. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. [S.l.], 2017. v. 61, n. 1, p. 1954–1958.
- ALI, R.; LIU, R.; HE, Y.; NAYYAR, A.; QURESHI, B. Systematic review of dynamic multi-object identification and localization: Techniques and technologies. *IEEE Access*, IEEE, v. 9, p. 122924–122950, 2021.
- ALMEIDA, H. P.; JÚNIOR, C. L. N.; SANTOS, D. S. dos; LELES, M. C. R. Autonomous navigation of a small-scale ground vehicle using low-cost imu/gps integration for outdoor applications. In: IEEE. *2019 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. [S.l.], 2019. p. 1–8.
- AMADO, J. A. D.; AMARO, J.; GOMES, I. P.; WOLF, D.; OSÓRIO, F. S. Multi camera system analysis for autonomous navigation using end-to-end deep learning. In: SBC. *Anais do XV Workshop de Visão Computacional*. [S.l.], 2019. p. 25–30.
- ANDERSSON, B.; TOVAR, E. The utilization bound of non-preemptive rate-monotonic scheduling in controller area networks is 25 percent. In: IEEE SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL EMBEDDED SYSTEMS. *SIES 2009*. [S.l.], 2009.
- ARDUINO. *Mega 2560 Rev3*. 2021. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>>. Acesso em: 08 fev. 2023.
- AREM, B. van; EENENNAAM, M. van; VISSER, R. Platooning of automated vehicles: A research agenda for europe. *European Transport Research Review*, v. 10, p. 1–18, 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12544-018-0289-x>>.
- ATKINS, W. Research on the impacts of connected and autonomous vehicles (cavs) on traffic flow. *Stage 2: Traffic Modelling and Analysis Technical Report*, Department for Transport London, UK, 2016.
- BAARS, M.; HELLENDOORN, H.; ALIREZAEI, M. Control of a scaled vehicle in and beyond stable limit handling. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 70, n. 7, p. 6427–6437, 2021.
- BADUE, C.; GUIDOLINI, R.; CARNEIRO, R. V.; AZEVEDO, P.; CARDOSO, V. B.; FORECHI, A.; JESUS, L.; BERRIEL, R.; PAIXAO, T. M.; MUTZ, F. et al. Self-driving cars: A survey. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 165, p. 113816, 2021.
- BALADOR, A.; BAZZI, A.; HERNANDEZ-JAYO, U.; IGLESIA, I. de la; AHMADVAND, H. A survey on vehicular communication for cooperative truck platooning application. *Vehicular Communications*, Elsevier, p. 100460, 2022.
- BALL, J. E.; TANG, B. *Machine learning and embedded computing in advanced driver assistance systems (ADAS)*. [S.l.]: MDPI, 2019. 748 p.
- BANDEIRANTES. *JEEP WRANGLER (AMARELO) R/C ELÉTRICO 12V*. 2018. Disponível em: <<https://brinquedosbandeirante.com.br/produtos/jeep-wrangler-amarelo-r-c-eletrico-12v/>>. Acesso em: 08 fev. 2023.

- BARROS, E.; CAVALCANTE, S. Introdução aos sistemas embarcados. *Artigo apresentado na Universidade Federal de Pernambuco-UFPE*, p. 36, 2010.
- BAYOUDH, K.; KNANI, R.; HAMDAOUI, F.; MTIBAA, A. A survey on deep multimodal learning for computer vision: advances, trends, applications, and datasets. *The Visual Computer*, Springer, p. 1–32, 2021.
- BECHTEL, M. G.; MCELLHINEY, E.; KIM, M.; YUN, H. DeepPicar: A low-cost deep neural network-based autonomous car. In: IEEE. *2018 IEEE 24th international conference on embedded and real-time computing systems and applications (RTCSA)*. [S.l.], 2018. p. 11–21.
- BELENO, R. D. H.; VITOR, G. B.; FERREIRA, J. V.; MEIRELLES, P. S. Proposal for a test platform for the development of autonomous vehicles. In: *XIX Congresso Brasileiro de Automática-CBA 2012*. [S.l.: s.n.], 2012. v. 1, p. 2735–2742.
- BILL, L.; SHAHNASSER, H. Development and implementation of an autonomously driven vehicle prototype. In: IEEE. *2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET)*. [S.l.], 2019. p. 310–314.
- BLACK, J. *NVIDIA Jetson AGX Orin Charts New Path for Edge AI and Robotics*. 2021. Disponível em: <<https://developer.nvidia.com/blog/nvidia-jetson-agx-orin-charts-new-path-for-edge-ai-and-robotics/>>. Acesso em: 08 mar. 2023.
- BOHM, F.; HÄGER, K. *Introduction of autonomous vehicles in the Swedish traffic system: Effects and changes due to the new self-driving car technology*. [S.l.: s.n.], 2015.
- BOJARSKI, M.; TESTA, D. D.; DWORAKOWSKI, D.; FIRNER, B.; FLEPP, B.; GOYAL, P.; JACKEL, L. D.; MONFORT, M.; MULLER, U.; ZHANG, J. et al. End to end learning for self-driving cars. *arXiv preprint arXiv:1604.07316*, 2016.
- BRECHTEL, S.; GINDELE, T.; DILLMANN, R. Probabilistic mdp-behavior planning for cars. In: IEEE. *2011 14th international IEEE conference on intelligent transportation systems (ITSC)*. [S.l.], 2011. p. 1537–1542.
- CHEN, Y.; YANG, L.; LI, K.; JIANG, Z.-P. Platoon-based cooperative control for connected and automated vehicles: A review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 838–855, 2021.
- CIGNO, R. L.; SEGATA, M. Cooperative driving: A comprehensive perspective, the role of communications, and its potential development. *Computer Communications*, Elsevier, v. 193, p. 82–93, 2022.
- CIUCIU, C.; BARBUTA, D.; SASAUJAN, S.; SIPOS, E. Autonomous scale model car with ultrasonic sensors and arduino board. 12 2019.
- CNT, C. N. d. T. *Painel CNT de Consultas Dinâmicas de Acidentes Rodoviários 2021*. 2021. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/painel-acidente>>. Acesso em: 06 fev. 2023.
- CONTESINI, L. *Afinal o que é ECU? Como elas funcionam?* 2017. Disponível em: <<https://flatout.com.br/afinal-o-que-e-ecu-como-elas-funcionam/>>. Acesso em: 07 fev. 2023.

CONTINENTAL. *ARS 404, Overview*. 2018. Disponível em: <<https://conti-engineering.com/components/ars-404/>>. Acesso em: 20 jan. 2023.

COPPOLA, P.; SILVESTRI, F. Autonomous vehicles and future mobility solutions. In: *Autonomous vehicles and future mobility*. [S.l.]: Elsevier, 2019. p. 1–15.

CORRIGAN, S. Controller area network physical layer requirements. *Application Report*..... *slla270*, 2008.

DUARTE, J. V. C.; FIGUEIREDO, P. H. L. *Desenvolvimento de Arquitetura Eletroeletrônica para Veículos de Pequena Escala*. Monografia (Graduação em Engenharia Automotiva) — Bacharelado em Engenharia Automotiva, Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

EL-HASSAN, F. T. Experimenting with sensors of a low-cost prototype of an autonomous vehicle. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 20, n. 21, p. 13131–13138, 2020.

ESPINHA, R. G. *EAP (Estrutura Analítica do Projeto): entenda na prática o que é e como fazer uma sem erros!* 2020. Disponível em: <<https://artia.com/blog/como-fazer-eap-na-gestao-de-projetos/>>. Acesso em: 08 fev. 2023.

ESPRESSIF. *ESP32-S2-DevKitM-1*. 2021. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32s2/hw-reference/esp32s2/user-guide-devkitm-1-v1.html>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

FAGNANT, D. J.; KOCKELMAN, K. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, v. 77, p. 167–181, 2015.

FARUK, M. R. I.; SHAMS, T.; AMIN, M. R.; AMIN, M. M. Development of advanced driver assistance systems (adas) and their challenges. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier, v. 127, p. 103178, 2021.

FERNANDES, L. C.; SOUZA, J. R.; PESSIN, G.; SHINZATO, P. Y.; SALES, D.; MENDES, C.; PRADO, M.; KLASER, R.; MAGALHÃES, A. C.; HATA, A. et al. Carina intelligent robotic car: architectural design and applications. *Journal of Systems Architecture*, Elsevier, v. 60, n. 4, p. 372–392, 2014.

FREITAS, L. C. d. *Análise de técnicas de testes funcionais e de caixa-branca aplicadas em ECUs*. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

FURLANI, V. *Chevrolet Impala: o estilo americano em pessoa*. 2017. Disponível em: <<https://www.noticiasautomotivas.com.br/chevrolet-impala/>>. Acesso em: 01 de jan. 2023.

GALVANI, M. History and future of driver assistance. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, IEEE, v. 22, n. 1, p. 11–16, 2019.

GMB, H. B. *CAN specification, ver. 2.0*. Stuttgart, Germany: Robert Bosch GmbH. 1991.

GREGO, B. A. d. S. *Segurança Automóvel: Sistemas de Apoio à Condução*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações) — Universidade de Aveiro, Aveiro,, Aveiro, Portugal, 2016. Disponível em: <<https://ria.ua.pt/handle/10773/21668>>.

- GUIMARÃES, A. d. A. *Um Roteiro de Implementação de Uma Rede CAN (Controller Area Network)*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- HANG, K.; WANG, J.; DAI, Y.; GOOL, L. V. Stereo vision-based semantic 3d object and ego-motion tracking for autonomous driving. *Image and Vision Computing*, Elsevier, v. 77, p. 14–27, 2018.
- HASENJÄGER, M.; WERSING, H. Personalization in advanced driver assistance systems and autonomous vehicles: A review. In: IEEE. *2017 IEEE 20th international conference on intelligent transportation systems (itsc)*. [S.l.], 2017. p. 1–7.
- HERRÁEZ, D. C. Self-driving car autonomous system overview-industrial electronics engineering-bachelors' thesis. Servicio de Publicaciones. Universidad de Navarra, 2020.
- ISO, I. O. f. S. *ISO 11898-1:2015 - Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signalling*. 2015. <<https://www.iso.org/standard/64812.html>>. Acesso em: 31 de maio de 2023.
- KAMALI, M.; DENNIS, L. A.; MCAREE, O.; FISHER, M.; VERES, S. M. Formal verification of autonomous vehicle platooning. *Science of computer programming*, Elsevier, v. 148, p. 88–106, 2017.
- KEMSARAM, N.; DAS, A.; DUBBELMAN, G. Architecture design and development of an on-board stereo vision system for cooperative automated vehicles. In: IEEE. *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. [S.l.], 2020. p. 1–8.
- KHAN, M. A.; SAYED, H. E.; MALIK, S.; ZIA, M. T.; ALKAABI, N.; KHAN, J. A journey towards fully autonomous driving—fueled by a smart communication system. *Vehicular Communications*, Elsevier, p. 100476, 2022.
- KHAN, M. A.; SAYED, H. E.; MALIK, S.; ZIA, T.; KHAN, J.; ALKAABI, N.; IGNATIOUS, H. Level-5 autonomous driving—are we there yet? a review of research literature. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, ACM New York, NY, v. 55, n. 2, p. 1–38, 2022.
- KHODAYARI, A.; GHAFFARI, A.; AMELI, S.; FLAHATGAR, J. A historical review on lateral and longitudinal control of autonomous vehicle motions. In: IEEE. *2010 International Conference on Mechanical and Electrical Technology*. [S.l.], 2010. p. 421–429.
- KOIFMAN, V. *GM Self-Driving Car Has 5 LiDARs and 16 Cameras*. 2018. Disponível em: <<http://image-sensors-world.blogspot.com/2018/01/gm-self-driving-car-has-5-lidars-and-16.html>>. Acesso em: 22 fev. 2023.
- KRÖGER, F. Automated driving in its social, historical and cultural contexts. In: _____. *Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. p. 41–68. ISBN 978-3-662-48847-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8_3>.
- KUKKALA, V. K.; TUNNELL, J.; PASRICHA, S.; BRADLEY, T. Advanced driver-assistance systems: A path toward autonomous vehicles. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, IEEE, v. 7, n. 5, p. 18–25, 2018.

- KUUTTI, S.; BOWDEN, R.; JIN, Y.; BARBER, P.; FALLAH, S. A survey of deep learning applications to autonomous vehicle control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 712–733, 2020.
- LAURENT, T.; ARCAINI, P.; ISHIKAWA, F.; VENTRESQUE, A. Achieving weight coverage for an autonomous driving system with search-based test generation. In: IEEE. *2020 25th International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS)*. [S.l.], 2020. p. 93–102.
- LEE, H.; PARK, J.; KOO, C.; KIM, J.-C.; EUN, Y. Cyclops: Open platform for scale truck platooning. In: IEEE. *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.], 2022. p. 8971–8977.
- LEE, H.; PARK, J.; KOO, C.; KIM, J.-C.; EUN, Y. Cyclops: Open platform for scale truck platooning. In: IEEE. *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.], 2022. p. 8971–8977.
- LI, X.; LIN, K.-Y.; MENG, M.; LI, X.; LI, L.; HONG, Y.; CHEN, J. Composition and application of current advanced driving assistance system: A review. *arXiv preprint arXiv:2105.12348*, 2021.
- LITMAN, T. *Autonomous vehicle implementation predictions*. [S.l.]: Victoria Transport Policy Institute Victoria, BC, Canada, 2017.
- LITMAN, T. Autonomous vehicle implementation predictions: Implications for transport planning. *Transport Reviews*, v. 38, p. 1–27, 2018. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01441647.2018.1428092>>.
- LIU, S.; LI, L.; TANG, J.; WU, S.; GAUDIOT, J.-L. *Creating autonomous vehicle systems*. [S.l.]: Springer, 2018.
- LIU, Y.; LI, H.; WU, J.; LI, S.; XIE, X. Design and implementation of an intelligent vehicle infrastructure system based on vehicle-to-everything communication. *IEEE Access*, IEEE, v. 9, p. 127611–127621, 2021.
- LUU, D. L.; LUPU, C.; CHIRITA, D. Design and development of smart cars model for autonomous vehicles in a platooning. In: IEEE. *2019 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*. [S.l.], 2019. p. 21–24.
- MAURER, M.; GERDES, J. C.; LENZ, B.; WINNER, H. Autonomous driving: Technical, legal and social aspects. In: . [S.l.: s.n.], 2016.
- MIAO, Y.; LI, K.; JIANG, H. Platoon control for automated vehicles: A review. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 158084–158099, 2019.
- MOURA. *Manual Técnico CLEAR MF V1.5*. 2021. <<https://s34918.pcdn.co/wp-content/uploads/2023/01/Manual-tecnico-CLEAN-MF-V1.5-PORT.pdf>>. Acesso em: 30 de Junho, 2023.
- MOURA, B. *Baterias Estacionárias*. 2017. Disponível em: <<https://www.moura.com.br/blog/especificacoes-das-baterias-nobreak-moura/>>. Acesso em: 01 fev. 2023.

NIDAMANURI, J.; NIBHANUPUDI, C.; ASSFALG, R.; VENKATARAMAN, H. A progressive review: Emerging technologies for adas driven solutions. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, IEEE, v. 7, n. 2, p. 326–341, 2021.

NOYES, P. *Module 1: Introduction to ITS*. 2020. Disponível em: <<https://www.pcb.its.dot.gov/eprimer/module1.aspx>>. Acesso em: 2 dez. 2022.

NVIDIA. Jetson agx xavier series. 2021. <<https://www.nvidia.com/pt-br/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier-series/>>.

NVIDIA. *NVIDIA Jetson AGX Orin*. 2021. Disponível em: <<https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/jetson-agx-orin/>>. Acesso em: 08 maio de 2023.

NVIDIA. *NVIDIA Jetson AGX Orin Datasheet*. 2021. Disponível em: <<https://www.nvidia.com/content/dam/en-zz/Solutions/jetson/AGX-Orin/NVIDIA-Jetson-AGX-Orin-DS.pdf>>. Acesso em: 08 maio de 2023.

OGATA, H.; AUDIC, S.; RENESTO-AUDIFFREN, P.; FOURNIER, P.-E.; BARBE, V.; SAMSON, D.; ROUX, V.; COSSART, P.; WEISSENBACH, J.; CLAVERIE, J.-M. et al. Mechanisms of evolution in rickettsia conorii and r. prowazekii. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 293, n. 5537, p. 2093–2098, 2001.

OLIVEIRA, M. L. D.; PEREIRA, F. M.; FERREIRA, D. M. A comprehensive survey of communication protocols for vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 3605–3644, 2019.

OMS, W. *OMS.(2018) Global status report on road safety 2018*. ISBN: 9789241565684. 2018.

ONSV, O. N. d. S. V. *Iris:O portal de estatísticas do Observatório*. 2017. Disponível em: <<http://iris.onsv.org.br/>>. Acesso em: 06 fev. 2023.

POLESE, B. Dispositivo de telemetria veicular multiprotocolo com transmissão via internet. Universidade de Passo Fundo, 2017.

QUADRI, C.; MANCUSO, V.; MARSAN, M. A.; ROSSI, G. P. Platooning on the edge. In: *Proceedings of the 23rd International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–10.

RIZZO, O. F. *O que são os sistemas de assistência à condução ADAS e como funcionam?* 2022. Disponível em: <<https://www.purosautos.com/tecnologia/que-son-y-como-funcionan-los-sistemas-de-asistencia-a-la-conduccion-adas>>. Acesso em: 05 jun. 2022.

ROBILA, V.; PAULINO, L.; RAO, M.; LI, I.; ZHU, M.; WANG, W. Design and implementation of pid-based steering control for 1/10-scale autonomous vehicle. In: IEEE. *2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*. [S.l.], 2021. p. 0758–0762.

ROSETO, L. A.; GOMES, I. P.; SILVA, J. A. R. da; SANTOS, T. C. d.; NAKAMURA, A. T. M.; AMARO, J.; WOLF, D. F.; OSÓRIO, F. S. A software architecture for autonomous vehicles: Team lrm-b entry in the first carla autonomous driving challenge. *arXiv preprint arXiv:2010.12598*, 2020.

RUPP, A.; TRANNINGER, M.; WALLNER, R.; ZUBAČA, J.; STEINBERGER, M.; HORN, M. Fast and low-cost testing of advanced driver assistance systems using small-scale vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 52, n. 5, p. 34–39, 2019.

RUSSELL, S. *Artificial Intelligence: A Modern Approach, eBook, Global Edition*. [S.l.]: Pearson Education, Limited, 2016.

SABBAGH, V. B. Desenvolvimento de um sistema de controle para um veículo autônomo. *Projeto Final de Curso (Engenharia de Controle e Automação)-Universidade Federal de Minas Gerais*, 2019.

SAE, I. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. *SAE international*, v. 4970, n. 724, p. 1–5, 2018.

SENSUSE, D. I.; SYAHRIZAL, A.; ADITYA, F.; NAZRI, M. Information security risk management planning of digital certificate management case study: Balai sertifikasi elektronik. In: IEEE. *2020 Fifth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*. [S.l.], 2020. p. 1–7.

SHAN, M.; NARULA, K.; WONG, Y. F.; WORRALL, S.; KHAN, M.; ALEXANDER, P.; NEBOT, E. Demonstrations of cooperative perception: Safety and robustness in connected and automated vehicle operations. *Sensors*, MDPI, v. 21, n. 1, p. 200, 2020.

SHEN, Z.; LIU, Y.; LI, Z.; NABIN, M. H. Cooperative spacing sampled control of vehicle platoon considering undirected topology and analog fading networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 23, n. 10, p. 18478–18491, 2022.

SHIWAKOTI, N.; STASINOPOULOS, P.; FEDELE, F. Investigating the state of connected and autonomous vehicles: A literature review. *Transportation Research Procedia*, Elsevier, v. 48, p. 870–882, 2020.

SHLADOVER, S. E.; DESOER, C. A.; HEDRICK, J. K.; TOMIZUKA, M.; WALRAND, J.; ZHANG, W.-B.; MCMAHON, D. H.; PENG, H.; SHEIKHOESLAM, S.; MCKEOWN, N. Automated vehicle control developments in the path program. *IEEE Transactions on vehicular technology*, IEEE, v. 40, n. 1, p. 114–130, 1991.

SILVA, I. L. da. *Barramento CAN entre Arduinos UNO*. 2019. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/barramento-can-entre-arduinos-uno/>>. Acesso em: 08 fev. 2023.

SILVA, R. A. et al. *Método de mapeamento por perspectiva inversa aplicado à determinação da distância de objetos em sistemas avançados de assistência ao condutor*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

SILVA, R. R. d. *Modelagem e análise de redes automotivas em ambiente virtual*. 2015.

SINGH, B.; GUPTA, A. Recent trends in intelligent transportation systems: a review. *Journal of Transport Literature*, SciELO Brasil, v. 9, p. 30–34, 2015.

SINGH, S.; GAURAV, K. Self-driving cars: A survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 77, p. 421–452, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X16303327>>.

- SINGULARITY. *Previsões da Singularity University até 2038*. 2018. Disponível em: <<http://clearinovacao.com.br/previsoes-singularity-university-2038/>>. Acesso em: 27 de dez. 2022.
- SOUSA, N.; ALMEIDA, A.; COUTINHO-RODRIGUES, J.; NATIVIDADE-JESUS, E. Dawn of autonomous vehicles: review and challenges ahead. In: THOMAS TELFORD LTD. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*. [S.l.], 2018. v. 171, n. 1, p. 3–14.
- STANEK, D.; MILAM, R. T.; HUANG, E.; WANG, Y. A. *Measuring autonomous vehicle impacts on congested networks using simulation*. [S.l.], 2018.
- STEREOLABS. *Introducing the ZED 2 - Long Range 3D Camera*. 2021. <<https://www.stereolabs.com/blog/introducing-zed-2/>>. [Online; accessed 13-May-2023].
- STEREOLABS. *ZED Box: The Latest Embedded Mini-PC for Edge Computing*. 2021. Disponível em: <<https://www.stereolabs.com/blog/zed-box-the-latest-embedded-mini-pc-for-edge-computing/>>. Acesso em: 23 jan. 2023.
- STURM, T.; KRUPITZER, C.; SEGATA, M.; BECKER, C. A taxonomy of optimization factors for platooning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 22, n. 10, p. 6097–6114, 2020.
- TIENTRAKOOL, P.; HO, Y.-C.; MAXEMCHUK, N. F. Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance. In: IEEE. *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*. [S.l.], 2011. p. 1–5.
- TYAGI, A. K.; ASWATHY, S. Autonomous intelligent vehicles (aiv): Research statements, open issues, challenges and road for future. *International Journal of Intelligent Networks*, Elsevier, v. 2, p. 83–102, 2021.
- VECTOR. *VN8900 - Modular FlexRay/CAN FD/LIN/J1708/K-Line Network Interface with up to 8 Channels*. 2017. Disponível em: <<https://www.vector.com/br/pt/produtos/products-a-z/hardware/network-interfaces/vn89xx/#>>. Acesso em: 08 fev. 2023.
- VELOZO, M. J. Aplicação cabo flexível para dispositivo de diagnóstico eletrônico veicular na indústria automotiva. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- WANG, Y.; HUANG, X.; ZHAO, L. Autonomous vehicle navigation with stereo vision. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 19, n. 11, p. 3692–3702, 2018.
- WINSTON, C.; MANNERING, F. The role of public policy in automated vehicle deployment. *Annual Review of Public Health*, v. 39, p. 19–34, 2018. Disponível em: <<https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-publhealth-040617-013400>>.
- YAAKUB, S.; ALSIBAI, M. H. A review on autonomous driving systems. *International Journal of Engineering Technology and Sciences*, v. 5, n. 1, p. 1–16, 2018.
- YEONG, D. J.; VELASCO-HERNANDEZ, G.; BARRY, J.; WALSH, J. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review. *Sensors*, MDPI, v. 21, n. 6, p. 2140, 2021.

YILDIRIM, M. B.; MOAVENZADEH, F.; NAJM, W. G. Autonomous vehicles: Technology, drivers' perceptions, and regulatory issues. *Journal of Public Transportation*, v. 20, p. 1–17, 2017. Disponível em: <<https://scholarcommons.usf.edu/jpt/vol20/iss1/3/>>.

YU, T.; LU, W.; LUO, Y.; NIU, C.; WU, W. Design and implementation of a small-scale autonomous vehicle for autonomous parking. In: IEEE. *2021 6th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*. [S.l.], 2021. p. 398–402.

ZELTWANGER, H. Controller area network (CAN). *Bosch Automotive Handbook*, v. 7, p. 335–348, 2007.