

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE ENERGIA

CARLOS AUGUSTO LEITE

**ESTUDO E ANÁLISE DE SENSORES PARA O APERFEIÇOAMENTO
DO SISTEMA DE DIREÇÃO DE VEÍCULO ELÉTRICO E AUTÔNOMO**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE ENERGIA

CARLOS AUGUSTO LEITE

**ESTUDO E ANÁLISE DE SENSORES PARA O APERFEIÇOAMENTO
DO SISTEMA DE DIREÇÃO DE VEÍCULO ELÉTRICO E AUTÔNOMO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para aprovação na unidade
curricular TCC22009.

Orientador:
Prof. Adriano de Andrade Bresolin, Dr. Eng

Coorientador:
Prof. Andre Luiz Fuerback, Dr. Eng

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Leite, Carlos Augusto Leite

Estudo e Análise De Sensores Para o Aperfeiçoamento do Sistema de Direção de Veículo Elétrico e Autônomo / Carlos Augusto Leite; orientação de Adriano de Andrade Bresolin; coorientação de Andre Luiz Fuerback. - Florianópolis, SC, 2026.

65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Sistema de Direção. 2. Veículo Elétrico. 3. Sensores. 4. Beifang. 5. BYD. I. Bresolin, Adriano de Andrade Bresolin. II. Fuerback, Andre Luiz Fuerback. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. Estudo e Análise De Sensores Para o Aperfeiçoamento do Sistema de Direção de Veículo Elétrico e Autônomo.

ESTUDO E ANÁLISE DE SENSORES PARA O APERFEIÇOAMENTO DO SISTEMA DE DIREÇÃO DE VEÍCULO ELÉTRICO E AUTÔNOMO

CARLOS AUGUSTO LEITE

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 27 de julho, 2026.

Banca Examinadora:

Adriano de Andrade Bresolin, Dr. Eng

Prof. Andre Luiz Fuerback, Dr. Eng
IFSC

Prof. Daniel Godoy Costa, Msc. Eng.
IFSC

RESUMO

O trabalho de conclusão de curso aborda um estudo analítico do comando de estacionamento automatizado para veículos elétricos (VEs), utilizando sensores de proximidade, câmeras de auxílio do sistema de direção, tendo como base a análise comportamental de uma bancada de treinamento e a adaptação de um algoritmo em Arduino. O crescente interesse na transição de veículos à combustão para VEs, impulsionada pela expansão do mercado de veículos elétricos e pela demanda por novas tecnologias e mão de obra especializada no Brasil é a justificativa para este estudo que pretende contribuir para a transição energética e também para segurança operacional dos veículos. O estudo foi realizado no Laboratório de Mobilidade Elétrica (EMOL), que é pioneiro no Brasil ao adotar a tecnologia Beifang para treinamento em veículos elétricos e híbridos, com bancadas fornecidas por empresas como BYD e Toyota. A metodologia combina uma investigação bibliográfica sobre sensores e sistemas de direção em VEs com atividades práticas no laboratório, onde o funcionamento dos componentes do sistema de direção foi detalhado, e falhas relacionadas aos sensores foram simuladas. A pesquisa visa adaptar e testar um algoritmo em Arduino para simular a funcionalidade básica, para entender sua aplicabilidade prática em sistemas maiores. As conclusões apontam para a viabilidade do projeto e a importância das atividades práticas no desenvolvimento de soluções inovadoras em engenharia elétrica.

Palavras-chave: Sistema de Direção. Veículo Elétrico. Sensores. Beifang. BYD.

ABSTRACT

The paper addresses the analytical study of automated parking control system for electric vehicles (EVs), using proximity sensors and steering assist cameras, based on the behavioral analysis of a training bench and the adaptation of an algorithm in Arduino. The growing interest in the transition from combustion vehicles to EVs, driven by the expansion of the electric vehicle market and the demand for new technologies and specialized workforce in Brazil. Justifies this study, which aims to contribute both to the energy transition and to the operational safety of vehicles. The study was conducted at the Electric Mobility Laboratory (Emol), a pioneer in Brazil in adopting Beifang technology for electric and hybrid vehicle training, with benches supplied by companies such as BYD and Toyota. The methodology combines a bibliographic investigation on sensors and steering systems in EVs with practical activities in the laboratory, where the operation of steering system components was analyzed in detail, and sensor-related failures were simulated. The research aims to adapt and test an algorithm in Arduino to simulate its basic function, for understanding his applicabilities in more complex systems. The findings indicate the feasibility of the project and highlight the importance of practical activities in the development of innovative solutions in electrical engineering.

Keywords: Steering System. Electric vehicles. Sensors. Beifang. BYD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Direção Elétrico	13
Figura 2 - Sistema de Direção Hidráulico.....	14
Figura 3 – Forças Atuantes em uma Roda.....	15
Figura 4 – Ponto Central.....	16
Figura 5 - Sistema Pinhão Cremalheira	16
Figura 6 – Sistema de Direção Pinhão Cremalheira	17
Figura 7 - Princípio Básico de Funcionamento de um Sensor.....	17
Figura 8 - Vista Frontal e Posterior do Sensor de Torque da BYD	18
Figura 9 - Sensor de Torque no Sistema de Direção	19
Figura 10 - Sensor de Posição Rotativa Analógico	19
Figura 11: Sensores Ópticos.....	21
Figura 12 - Câmera Comum (RGB) comparado com Câmera Térmica durante o dia	22
Figura 13 - Câmera Comum (RGB) comparado com Câmera Térmica durante à noite	23
Figura 14 – Panorama Geral das Tecnologias de um Veículo Autônomo	27
Figura 15 – Diagrama Resumido dos Seis Níveis de Automação	30
Figura 16 - Volkswagen Fusca, Honda Fit e Fiat Mobi.....	32
Figura 17 - Mitsubishi Diamante 1995, Toyota Corolla e Honda Civic.....	33
Figura 18 - Nissan Leaf e Tesla	35
Figura 19 – <i>Heads-Up Display</i>	36
Figura 20 - Mercedes-Benz EQS SUV e Honda Legend Hybrid EX.....	37
Figura 21 – Divulgação do Sistema Nível 3 da Mercedes-Benz.....	38
Figura 22 – Táxi Autônomo.....	39
Figura 23 – Arduino UNO	43
Figura 24 – Sensor de Distância Ultrassônico (HC-SR04) e Motor de Passo (28BYJ-48 5VDC).....	44
Figura 25 – Esquema de Ligação do Motor de Passo (28BYJ-48 5VDC) no Arduino UNO	45
Figura 26 – Protótipo Arduíno Montado para o Experimento Prático.....	46
Figura 27 - Radar em Operação no Processing.....	50
Figura 28 - Radar Detectando um Objeto a 19cm de Distância	50
Figura 29 – Rastro do Objeto Detectado Recentemente.....	51
Figura 30 – (a) LiDAR Aplicado na Imagem de uma Câmera Térmica e (b) Reconstrução dos Pontos Térmicos.	58
Figura 31 - Resultado do Rastreamento de Pedestres.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cronograma.....	42
----------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Anti-lock Braking System</i> - Sistema de anti-travagem de freios
ACC	<i>Adaptive Cruise Control (Controle de Cruzeiro Adaptativo)</i>
ADAS	<i>Advanced driver-assistance system</i> (Sistema avançado de assistência ao condutor)
AEB	<i>Automatic Emergency Braking</i> (frenagem automática de emergência).
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVRC	<i>Automated Vehicle Research (AVR) Consortium</i> (Consórcio para pesquisa de veículos autônomos).
BYD	Montadora Chinesa Build Your Dreams - BYD
CAMP	<i>Crash Avoidance Metrics Partnership</i> (Parceria para Métricas de Prevenção de Acidentes).
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
DDT	Dynamic Driving Task (Tarefa Dinâmica De Condução)
DMS	Driver Monitoring System (Sistema de Monitoramento do Condutor)
ECU	Electric Control Unit (Unidade de Controle Eletrônico)
EMOL	Laboratório de Mobilidade Elétrica
EMBRAPII	Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
EPS	Electric Power Steering (Sistema de Direção Assistida Eletricamente)
ESC	Electronic Stability Control (controle eletrônico de estabilidade)
FEESC	Fundação Stemmer para Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
HUD	Heads-Up Display (Tela de projeção no para-brisa)
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IR	<i>Infrared (Infravermelho)</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i> (Detecção e Alcance da Luz)
LKA	<i>Lane Keeping Assist</i> (assistência de permanência na faixa)
ODD	Operational Design Domain (Domínio Operacional Projetado)
ORAD	On-Road Automated Driving (ORAD) Committee- Comitê de Condução Automatizada da SAE
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedade dos Engenheiros Automotivos)
TOR	Take-Over Request (Solicitação de Tomada de Controle)
TOT	Take-Over Time (Tempo de Reação à Tomada de Controle)
VE	Veículo Elétrico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Justificativa	9
1.2	Definição do Problema	10
1.3	Objetivo Geral.....	11
1.4	Objetivos Específicos	12
1.5	Estrutura do Trabalho.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Sistema de Direção de um VE.....	13
2.1.1	Contexto Histórico.....	13
2.1.2	Princípio Básico de um Sistema de Direção	15
2.2	Sensores atuantes no Sistema de Direção	17
2.2.1	Sensor de Torque	18
2.2.2	Sensor de Posição Rotativa Analógico	19
2.2.3	Sensor de Luz	20
2.2.4	Sensor Infravermelho	21
2.2.5	Sensor Ultrassônico	24
3	VEÍCULOS AUTÔNOMOS	26
3.1	Os Seis Níveis de Automação da Condução Definidos pela SAE	28
3.2	Nível 0 - Sem Automação de Condução.....	31
3.3	Nível 1 - Assistência ao Motorista	32
3.4	Nível 2 - Automação Parcial da Condução.....	34
3.5	Nível 3 - Automação Condicional	35
3.6	Nível 4 - Automação Elevada	38
3.7	Nível 5 - Automação Total	40
4	METODOLOGIA E CRONOGRAMA DE TRABALHO.....	41
5	ABORDAGEM PRÁTICA DOS SENSORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	43
5.1	Protótipo Arduino	43
5.1.1	Componentes Utilizados	43
5.1.2	Integração de Software (IDE Arduino)	46
5.1.3	Interface Gráfica e Visualização de Dados (Processing)	49
5.2	Aplicação nos Veículos Autônomos	54
5.3	Aplicações Práticas de Outros Sensores	55
5.3.1	Sensor de Proximidade	55
5.3.2	Sensor Óptico	56
5.3.3	Câmera Térmica com LiDAR	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
7	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Segundo Dunn (2011, p. 1), “Os sensores estão no início de todo sistema de medição, seja um líquido em um termômetro que responde a uma mudança de temperatura ou um bastão em nossa retina que detecta um único fóton de luz.”

Progressivamente, os sensores foram se tornando cada vez mais integrados aos VEs (veículos elétricos). Nas primeiras gerações de VEs, eram apenas utilizados sensores básicos para medir a velocidade, o nível de tensão da bateria e outras pequenas medições. Entretanto, a demanda por sensores mais avançados foi aumentando significativamente, isto ocorreu devido ao surgimento de tecnologias como o ABS (Sistema de anti-travagem dos freios) e nos últimos anos com o *Advanced driver-assistance system* - ADAS (Sistema avançado de assistência ao condutor) e futuramente, todos estes sensores, aliados a outros, visam a condução autônoma dos veículos.

Os sensores são dispositivos que respondem de maneira específica a estímulos físicos, químicos ou biológicos, e então os converte em sinais elétricos em sua saída, posteriormente estes sinais elétricos serão recebidos por outros equipamentos. O surgimento dos sensores teve raízes em diferentes áreas da ciência e tecnologia. No entanto, foi na indústria automobilística onde os sensores começaram a ganhar muita relevância, pois auxiliam em dois fatores importantes: segurança e comodidade. A partir disso, seu uso se tornou cada vez mais popular e se expandiu para diversas áreas.

Atualmente, sensores são componentes inseparáveis de VEs, atuando em tecnologias como frenagem de emergência automática (ABS) e estacionamento automatizado (ADAs). Além disso, os sensores são componentes essenciais e mais importantes para tornar possível a transição da condução manual para a condução autônoma, pois somente eles são capazes de fornecer dados para o sistema de direção, freios, etc., com rapidez e precisão.

1.1 Justificativa

Os VEs (veículos elétricos) têm aumentado exponencialmente suas vendas nos últimos anos, pois a transição de veículos movidos à combustão para o uso de

eletricidade contribui significativamente para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, através das reduções das emissões de poluentes, principalmente os gases CO₂. Em alguns países da Europa, como a Noruega, a venda de veículos elétricos já superou os veículos a combustão, e eventualmente em poucas décadas a previsão é que a maioria da matriz de veículos do mundo será movida à motores elétricos. Visto ser uma área em franco crescimento e com diversas empresas do exterior anunciando a instalação de plantas industriais no Brasil para iniciar a produção de VEs dentro do país, conseqüentemente terá demanda por mão de obra e novas tecnologias para tornar este feito possível.

O Laboratório de Mobilidade Elétrica (Emol) do IFSC - Câmpus Florianópolis foi criado em 2016 dentro da expansão dos cursos superiores do IFSC. O Emol realiza diversas pesquisas na área de mobilidade elétrica e abre periodicamente oportunidades para alunos do curso de engenharia elétrica a participarem dos projetos de pesquisa e extensão. Este é o primeiro e único Laboratório do país com tecnologia Beifang - a maior empresa de treinamento de automobilística da China. As bancadas de treinamento em veículos elétricos e híbridos, desenvolvidos pela BYD e Toyota, foram comprados pelo laboratório através do projeto Converte, que é uma parceria entre IFSC, CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina) e FEESC (Fundação Stemmer para Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação), com apoio financeiro da EMBRAPII (Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial).

Estas bancadas de treinamento têm sua ênfase às atividades práticas. A atividade prática desempenha um papel crucial na formação de um engenheiro para trabalhar na indústria, pois ela possibilita aplicar conceitos teóricos aprendidos na sala de aula a situações do mundo real, e a solidificar o entendimento e a internalização dos princípios fundamentais da engenharia.

1.2 Definição do Problema

Nos tempos atuais, infelizmente, são fatídicos os índices de acidentes e mortes no trânsito comum, vindo da utilização direta de automóveis. Quando comparados com os meios de transporte mais seguros do mundo (aviões e elevadores), há algo em comum que corrobora para um aumento drástico na

segurança: o mínimo de intervenção humana em controlar o veículo, ou seja, a utilização massiva de sensores e automação contribui fortemente para o aumento da segurança dos veículos e de sua utilização. O desafio de lidar com a segurança humana em diferentes contextos, como na aviação comercial, destaca a realidade inegável das limitações inerentes à condição humana. O erro humano continua sendo uma das principais causas de acidentes, levantando questões sobre sua natureza e prevenção efetiva. Esses erros “não intencionais” podem ser atribuídos a diversas fontes, incluindo decisões equivocadas, erros de habilidade e falhas perceptuais. Na maioria dos casos, são reflexos das limitações cognitivas e físicas inerentes aos seres humanos. Além disso, fatores externos como privação de sono podem agravar essas limitações, diminuindo a atenção e a velocidade de reação. É crucial reconhecer que os seres humanos não são máquinas infalíveis, mas sim seres suscetíveis a influências externas e internas que afetam seu desempenho (Cusick *et al.*, 2005, p. 161; Loewenstein, 2005).

Neste sentido, busca-se neste trabalho estudar, aperfeiçoar e simular falhas dos sensores e suas aplicações na bancada de sistema de direção do VE, provido pela BYD do laboratório de eletromobilidade do IFSC - Emol. A principal aplicação destes sensores será a automatização de ações cotidianas como estacionar seu veículo, e futuramente estas bancadas de treinamento serão utilizadas como material de aprendizado para alunos do curso, e por fim este trabalho pretende focar no uso destes sensores de direção em veículos autônomos.

1.3 Objetivo Geral

Investigar a aplicação e a funcionalidade do comando de estacionamento automatizado para veículos elétricos, utilizando os sensores de proximidade e câmeras do sistema de direção, através da análise comportamental da bancada de treinamento e adaptação de um algoritmo em Arduino, visando uma futura aplicação em veículos autônomos.

1.4 Objetivos Específicos

Para delimitar o escopo que é relativamente amplo, seguem abaixo os objetivos específicos do trabalho:

- a) pesquisar o estado da arte a respeito do tema, visando o aprofundamento do conhecimento sobre os sensores e o sistema de direção do VE;
- b) entender os componentes e funcionamento da banca do sistema de direção do VE, provido pela BYD;
- c) estudar a linguagem Arduino e/ou *Processing*, possibilitando a adaptação de um algoritmo para mostrar sua utilidade prática no controle de sensores automotivos.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos. Iniciando com o presente capítulo introdutório, onde são apresentados os objetivos, justificativas e a problemática.

O segundo capítulo descreverá o referencial teórico do sistema de direção veicular eletrificado, apresentando brevemente o contexto histórico, após isso iniciam-se os tópicos do sistema de direção, finalizando com o estudo dos sensores.

O terceiro capítulo será voltado aos veículos autônomos com ênfase no sistema de direção, elucidando cada nível de automação.

O capítulo quatro apresenta a descrição da metodologia e o cronograma referente à realização dos estudos e atividades relacionados ao presente trabalho.

O capítulo cinco é onde foi feito o experimento prático em Arduino com sensor ultrassônico, além disso, ele aborda aplicações práticas de outros sensores, algumas já utilizadas em veículos comerciais.

O capítulo seis faz as considerações finais, e por fim apresentam-se as referências bibliográficas no capítulo sete.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para desenvolvimento do referencial teórico foi feita uma busca aprofundada sobre a história do sistema de direção do VE e sua relação com os sensores, tipos de sensores e os componentes presentes tanto no sistema de direção quanto nos sensores. Também será feita uma análise sobre as principais utilizações dos sensores, dando ênfase ao estacionamento automatizado.

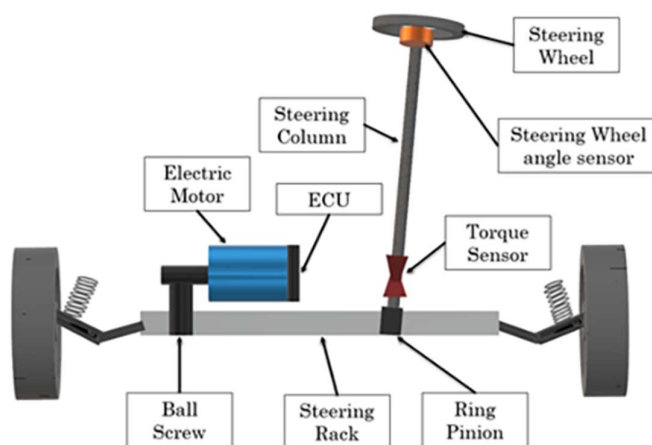
2.1 Sistema de Direção de um VE

A seguir, serão abordados os referenciais teóricos a respeito do sistema de direção, desde sua história e princípio de funcionamento, até sua relação com os sensores.

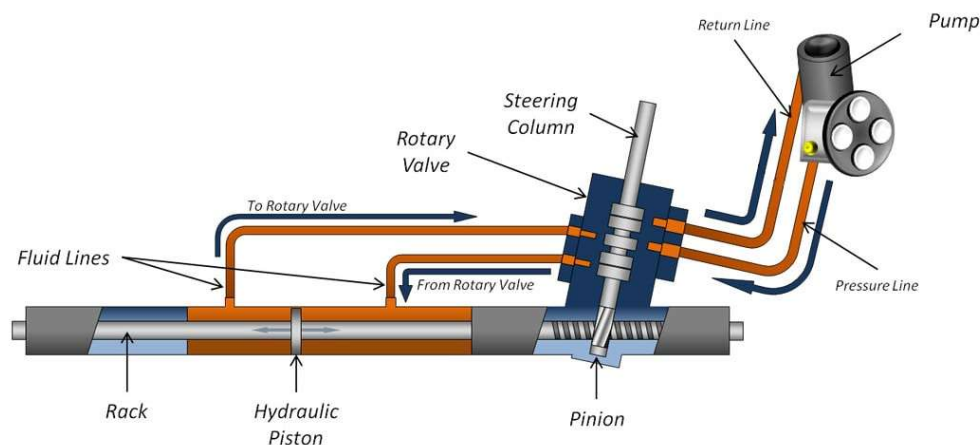
2.1.1 Contexto Histórico

O desenvolvimento do sistema de direção começou com a direção manual, passando para a direção hidráulica e a direção elétrica. Abaixo seguem as Figura 1 e Figura 2, que descrevem um projeto simplificado da direção elétrica e da direção hidráulica, a fins de comparação.

Figura 1 – Sistema de Direção Elétrico



Fonte: Pop (2023).

Figura 2 - Sistema de Direção Hidráulico

Fonte: D S Auto (2018).

Atualmente, a tendência do mercado mostra que a direção elétrica é a preferida em comparação com os outros dois sistemas de direção. A direção elétrica foi escolhida por causa de sua operação leve e facilidade no sistema de controle. No entanto, para veículos grandes, tende-se a usar a direção hidráulica por questões de esforço mecânico.

A vantagem da direção assistida por energia elétrica em comparação com a hidráulica, é que ela é ativada somente quando necessário. Isso é chamado de sistema de potência sob demanda, ou seja, a energia é fornecida somente quando o carro é dirigido.

O resultado é um consumo médio de energia bastante baixo, o que leva a uma melhor quilometragem, autonomia, e menos emissões de gases que contribuem para a poluição atmosférica (Gaedke, 2017).

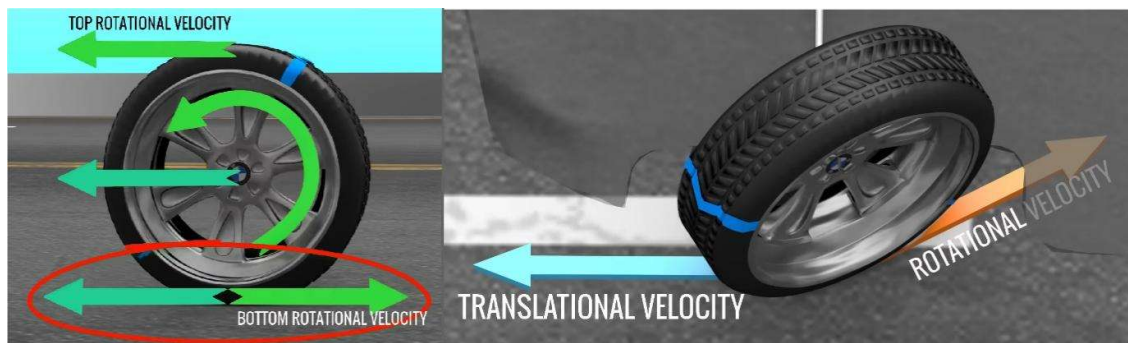
Segundo Holt (2002), espera-se uma melhoria na economia de combustível de 5% a 15% ao mudar de um sistema de direção hidráulico para um sistema de direção elétrico. O sistema de direção elétrico é mais leve do que o sistema de direção hidráulico, pois não utiliza a bomba hidráulica, o fluido hidráulico ou as linhas de fluido. Além disso, a direção elétrica também permite o controle eletrônico preciso do sistema de direção, sendo algo muito bem vindo para aplicação de novos recursos como o estacionamento automatizado.

2.1.2 Princípio Básico de um Sistema de Direção

O sistema de direção de um carro envolve física e mecanismos complexos, a fim de simplificar e facilitar o manejo do usuário ao controlar o veículo. A capacidade do carro de fazer curvas se baseia na física de uma das máquinas mais antigas inventadas pelo ser humano, a roda.

Supondo uma roda ideal, sua velocidade no ponto de contato com o solo é zero, no qual evita o deslizamento entre a roda e a estrada. Isso é obtido porque a roda tem dois tipos de forças atuando nela: a aceleração tangencial (avança junto com o carro) e a aceleração centrípeta (gira em torno de seu próprio eixo). Esses dois movimentos se cancelam no ponto de contato. A Figura 3 tem o objetivo de ilustrar as forças atuantes em uma roda (Lesics, 2018).

Figura 3 – Forças Atuantes em uma Roda



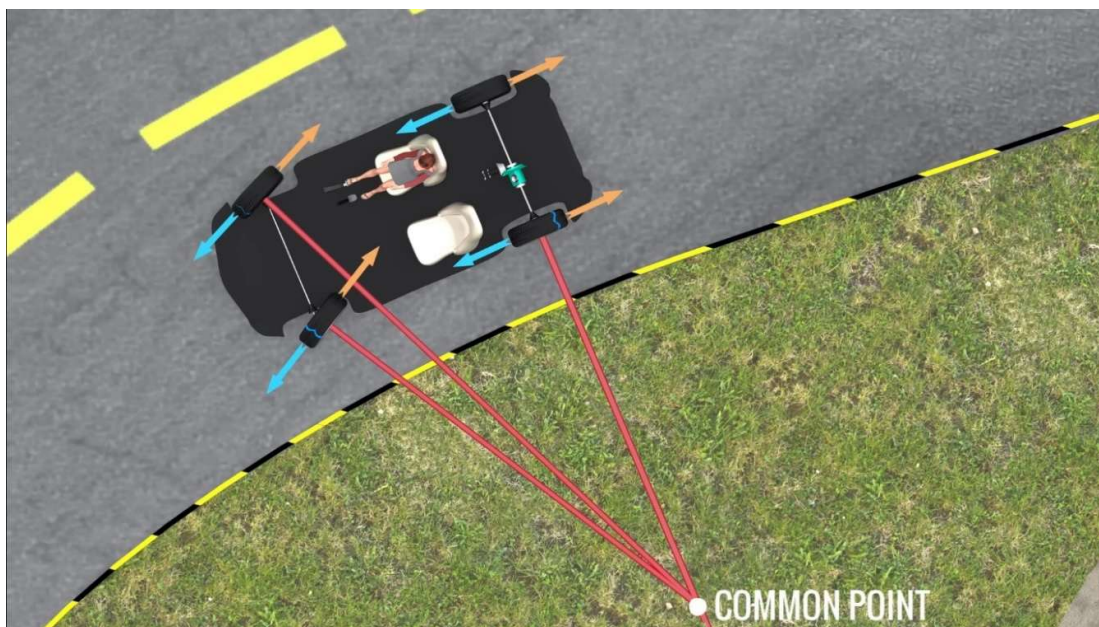
Fonte: Adaptado de Lesics (2018).

Se o carro continuasse se movendo em linha reta mesmo depois que as rodas fossem giradas, a velocidade de rotação das rodas seria inclinada, enquanto a velocidade de translação permaneceria reta.

Essa incompatibilidade resultaria em derrapagem. A única maneira de evitar a derrapagem é garantir que o carro inteiro gire em torno de um ponto central específico, conforme exposto na Figura 4.

Assim, alinha-se a velocidade de translação com a velocidade de rotação nos pontos de contato das rodas, atingindo a velocidade zero e evitando a derrapagem (Lesics, 2018).

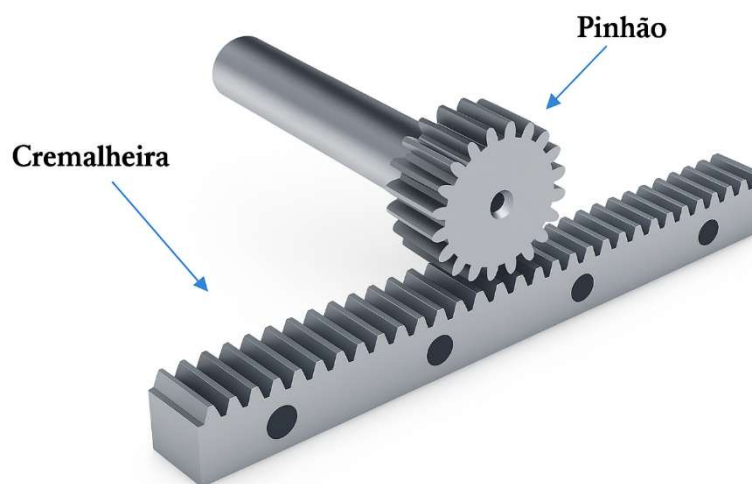
Figura 4 – Ponto Central



Fonte: Lesics (2018).

O mecanismo de direção mais comum nos veículos modernos é o Sistema Pinhão Cremalheira, representado pela Figura 5. Nesse mecanismo, uma cremalheira (uma barra reta) é forçada a se mover apenas em linha reta. O pinhão, conectado ao volante, move a cremalheira de um lado para o outro.

Figura 5 - Sistema Pinhão Cremalheira



Fonte: Adaptado de Gomes (2014).

Cada roda dianteira é conectada à cremalheira por meio de um braço de direção e um tirante, como representado na Figura 6. O braço de direção só pode girar em torno de um eixo fixo, e o tirante permite movimentos de rotação e translação (Holt, 2002).

Figura 6 – Sistema de Direção Pinhão Cremalheira

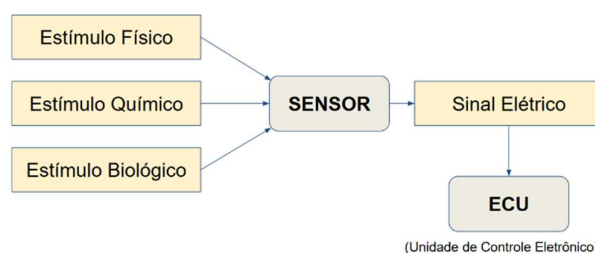


Fonte: Adaptado de Holt (2002).

2.2 Sensores atuantes no Sistema de Direção

Os sensores são dispositivos que respondem de maneira específica a estímulos físicos, químicos ou biológicos, e então os converte em sinais elétricos como sua saída, nos quais serão recebidos por outros equipamentos, como representado na Figura 7.

Figura 7 - Princípio Básico de Funcionamento de um Sensor



Fonte: Elaboração Própria (2024).

Nesta seção serão abordados os sensores atuantes no sistema de direção, dando ênfase aos sensores relacionados à movimentação do veículo.

2.2.1 Sensor de Torque

Uma das variáveis mais importantes fornecidas pelo usuário é o torque aplicado ao volante do veículo. A partir desta medição, a unidade de controle eletrônico (ECU, representado na Figura 9) consegue atuar e trazer a maleabilidade - facilidade - que normalmente se tem no volante, após ligar o veículo. A qualidade desta medição deve ser garantida, pois o motorista a percebe diretamente. Se houver quaisquer problemas de precisão e resolução de medição, o motor EPS pode acionar incorretamente e mover o volante de forma involuntária e incontrolável (Gaedke, 2017).

A Figura 8 ilustra o sensor de torque da BYD e a Figura 9 mostra onde o sensor se encontra no sistema de direção.

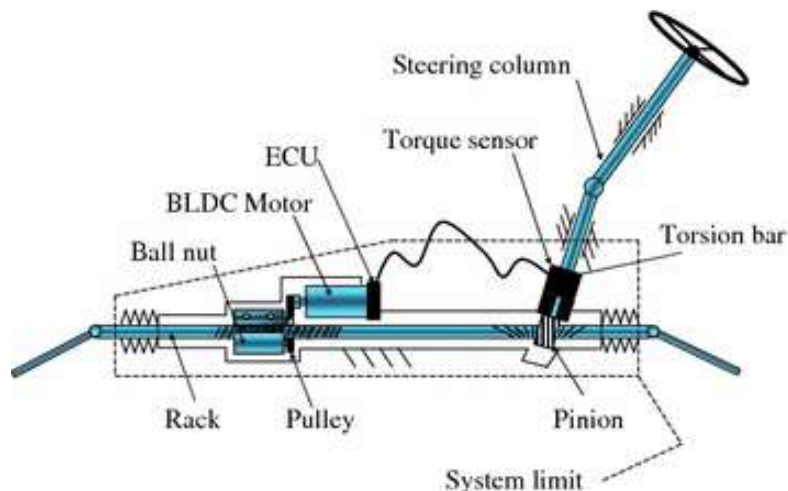
Figura 8 - Vista Frontal e Posterior do Sensor de Torque da BYD



Fonte: Adaptado de Aliexpress (2024).

Os sensores de torque podem ser classificados por sua configuração mecânica como sensores com ou sem haste de torção mecânica, e também podem ser classificados com base em seu método de medição (ângulo de torção, a deformação da superfície e a carga de torção). Atualmente os VE utilizam somente os sensores de torque com haste de torção mecânica.

Figura 9 - Sensor de Torque no Sistema de Direção



Fonte: Brunner (2016).

2.2.2 Sensor de Posição Rotativa Analógico

O sensor de posição rotativa analógico, também conhecido como *resolver*, se parece com um pequeno transformador como ilustrado na Figura 10; é comumente utilizado para medir posição angular em sistemas mecânicos e elétricos.

Figura 10 - Sensor de Posição Rotativa Analógico



Fonte: Servo Motors Adjust (2024).

O *resolver* consiste em um enrolamento primário e dois enrolamentos secundários orientados a 90° um do outro. O enrolamento primário é alimentado com um sinal senoidal de alta frequência, enquanto os enrolamentos secundários são responsáveis por gerar sinais de saída senoidal e cossenoidal que variam com a posição angular do eixo do resolver.

O campo magnético pulsante do enrolamento do rotor induz uma tensão alternada nos enrolamentos de medição de seno e cosseno, cujas amplitudes são influenciadas pela posição angular do rotor. A relação entre os graus mecânicos e elétricos varia dependendo do número de velocidades do resolver. Por exemplo, um resolver de 1 velocidade tem uma relação de 360 graus elétricos para 360 graus mecânicos, enquanto um de 2 velocidades tem uma relação de 360 graus elétricos para 180 graus mecânicos, e assim por diante.

A excitação dos enrolamentos do resolver é feita por uma tensão de entrada AC de referência, mantida a uma frequência constante. A diferença de fase de 90 graus entre os enrolamentos resulta em sinais senoidais e cossenoidais. A tensão induzida nos enrolamentos é proporcional ao ângulo do eixo de entrada em relação aos enrolamentos secundários, utilizando as funções seno (*sen*) e cosseno (*cos*) do ângulo do eixo (Basu *et al.*, 2018, p. 112; Servo Motors Adjust, 2024).

2.2.3 Sensor de Luz

Os sensores ópticos ou de luz, consistem em um componente emissor de luz e um componente fotossensível. Ambas as partes são separadas por um componente adequadamente estruturado. O fluxo luminoso do transmissor para o receptor é influenciado pelo ângulo de torção de uma barra de torção.

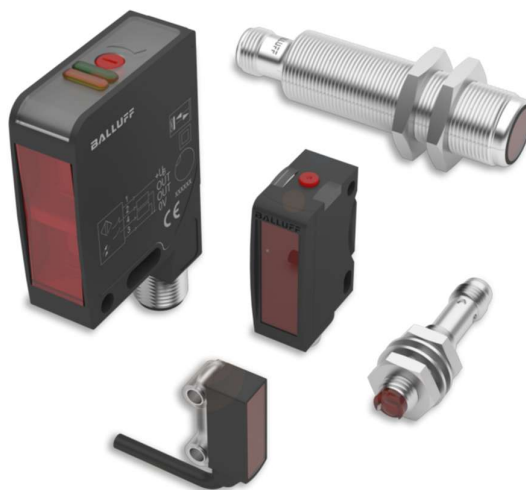
De acordo com Lee *et al* (2008, p. 49) e Bachani *et al* (2016, p. 390), sensores de luz são simples, fáceis de integrar e uma solução possível para a integração de um sistema de estacionamento automatizado; porém sua vulnerabilidade na detecção precisa de veículos é altamente prejudicada por fatores externos, como, por exemplo, se o estacionamento está sob abrigo ou sem abrigo, a altura do veículo a partir da base da vaga de estacionamento, a localização da vaga de estacionamento em relação ao ângulo de chegada da luz do sol, entre outros. Além disso, todos os fatores citados anteriormente devem ser previstos no algoritmo, o que aumenta drasticamente sua complexidade.

A principal desvantagem dos sensores ópticos são sua dificuldade de detecção dos extremos do espectro de cor (preto e branco). A cor preta absorve quase toda a radiação, fazendo com que pouquíssima luz seja refletida a depender da

intensidade do preto, e isso dificulta a detecção por câmeras RGB e sensores ópticos. Já a cor branca reflete quase toda a luz, podendo causar saturação do sensor, resultando em perda de detalhes. Levando isso em consideração, Knoop et al. (2019) e Ding *et al.* (2024), indiretamente demonstram a importância de combinar múltiplos sensores, pois nenhum sensor sozinho é confiável em todos os cenários.

A Figura 11 apresenta um exemplo de sensores ópticos utilizados na indústria automotiva, sendo este exemplo um sensor difuso. Esses sensores difusos detectam objetos dependendo de sua superfície, cor e material. Seu alcance de varredura depende do tamanho, da forma, da cor e da natureza da superfície reflexiva do objeto.

Figura 11: Sensores Ópticos



Fonte: Balluff (2025)

2.2.4 Sensor Infravermelho

Os sensores infravermelhos (IR) são dispositivos para detecção de radiação eletromagnética na faixa do infravermelho, situada entre $0,7 \mu\text{m}$ e $1000 \mu\text{m}$, logo abaixo do espectro de frequência da luz visível. Conforme a Lei da Radiação de Planck, descreve-se a distribuição de energia irradiada por um corpo em função do comprimento de onda e da temperatura; o que permite a medição remota de calor e a

visualização de objetos em ambientes com pouca ou nenhuma iluminação visível (do ponto de vista humano).

Os sensores IR geralmente operam em duas categorias principais: ativos, que emitem radiação própria (como LEDs IR) e medem a reflexão para detectar presença e distância; e passivos, que captam a radiação emitida naturalmente pelos objetos, como nas câmeras térmicas. Seu princípio de funcionamento baseia-se em elementos fotossensíveis (fotodiodos ou microbolômetros) que convertem energia térmica em sinais elétricos, posteriormente processados para gerar imagens ou leituras de temperatura. Essa tecnologia é amplamente utilizada por permitir detecção não invasiva, operação em baixa luminosidade e sensoriamento de variações térmicas sutis (Thakur, 2017, p. 83-84; Altaf *et al.*, 2022, p. 9165).

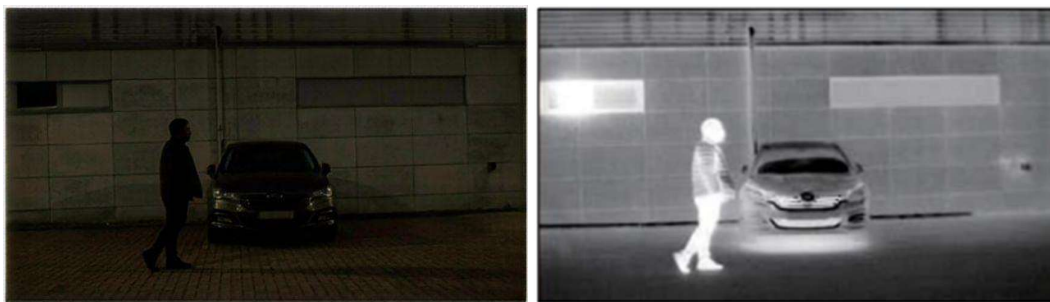
Nos veículos elétricos e autônomos, os sensores IR podem trazer muitos benefícios em todas as funções do veículo, trazendo qualidade e praticidade na condução, conforto dos passageiros e aumento na segurança. Como demonstrado na Figura 12 e Figura 13, Câmeras IR (especialmente no espectro próximo ao infravermelho - NIR) permitem detecção de pedestres, animais e obstáculos em condições de iluminação excessiva, escuridão, neblina, chuva ou neve; isso complementa sensores visuais (RGB) e aumenta a confiabilidade da percepção do ambiente, permitindo operação segura de veículos autônomos em ambientes de pouca iluminação (Thakur, 2017, p. 83-85).

Figura 12 - Câmera Comum (RGB) comparado com Câmera Térmica durante o dia



Fonte: Adaptado de Altaf (2022).

Figura 13 - Câmera Comum (RGB) comparado com Câmera Térmica durante à noite



Fonte: Adaptado de Altaf (2022).

Seguindo nas aplicações, o sensor IR também é usado em sistemas de monitoramento do condutor (*Driver Monitoring System* - DMS) para rastrear olhos, face e postura do condutor, mesmo no escuro (também pode estimar fadiga e distração).

Utilizando de redes neurais, pode-se interpretar imagens IR em tempo real, com reconhecimento de pedestres, ciclistas e animais; algoritmos de *deep learning* já conseguem segmentar partes do corpo humano em imagens térmicas, útil para segurança viária.

Por outro lado, sensores térmicos aliados a aprendizado de máquina permitem reconhecimento de atividade humana e monitoramento de ocupantes dentro do veículo, isto aplicado em sistemas HVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado) permite detecção térmica precisa de ocupantes, otimizando uma climatização localizada em vez de todo o habitáculo. Isso reduz consumo de energia, aumentando a autonomia de veículos elétricos (Altaf *et al.*, 2022, p. 9165–9168).

Outra aplicação futura que será muito útil para a qualidade do veículo, são estudos que abordam o uso de câmeras térmicas infravermelhas (IR) para monitoramento de temperatura em baterias de íon-lítio usadas em veículos elétricos (EVs). As câmeras IR conseguem identificar *hotspots* (áreas de aquecimento anormal) que podem indicar falhas internas, curto-circuitos ou *thermal runaway* (fuga térmica). Este método permite detecção precoce de falhas, reduzindo o risco de incêndios e explosões, além disso, a tecnologia é não invasiva e pode ser integrada ao sistema de gerenciamento da bateria. Os resultados mostraram que a termografia infravermelha pode monitorar distribuições de temperatura em tempo real com alta

precisão, mesmo durante carregamento rápido. Logo esta monitorização constante possibilita manutenções preditivas.

Pode-se ir além e utilizar câmeras térmicas combinadas com algoritmos de IA para mapear a distribuição de calor em pacotes de baterias. Estas aplicações foram testadas, resultados mostraram que a análise IR otimizou o sistema de resfriamento, reduziu custos de manutenção, melhorou eficiência e aumentou vida útil das baterias. (Cheng *et al.*, 2023, p. 7–9; Tichý *et al.*, 2021, p. 3-6).

2.2.5 Sensor Ultrassônico

Os sensores ultrassônicos são classificados como um nicho dentro dos sensores de proximidade. Eles utilizam ondas sonoras de alta frequência (>20 kHz, acima do limite da faixa de audição humana), sua medição é realizada sem contato físico, e devido a isso são muito utilizados em medição de sistemas de navegação e detecção de obstáculos.

Sun *et al.* (2016) destacam que sensores ultrassônicos possuem grande capacidade de transmissão em meios como ar, líquidos e sólidos, sendo amplamente empregados em medição de deslocamento e detecção de falhas.

Seu princípio de funcionamento mais comum baseia-se na emissão de pulsos ultrassônicos que se propagam pelo ar e qualquer objeto ou parede que estiver no caminho; a presença de outras coisas além do ar é distinguida pela ECU, no qual faz o cálculo da distância pelo tempo de retorno do eco. As ondas sonoras se propagam na velocidade do som, por isso é possível a abordagem pelo tempo de retorno do eco.

O método de detecção se chama *Time-of-Flight* – ToF (Tempo de voo), também é chamado de método de detecção de pulso-eco. O sensor possui um componente chamado transdutor, no caso do HC-SR04, transdutores ultrassônicos piezoelétricos convencionais (cerâmicos). Todo sensor ultrassônico que utiliza o método ToF possui dois transdutores, um transdutor transmissor e um transdutor receptor. O transdutor transmissor emite uma rajada de pulsos de ondas ultrassônicas, e estas ondas são refletidas de volta para o transdutor receptor após encontrar obstáculos (Tong *et al.*, 2021).

As equações 1 e 2 representam o princípio fundamental de funcionamento de um sensor ultrassônico, a depender do modelo, as equações podem mudar conforme a forma no qual o modelo atua. Para o HC-SR04 e boa parte dos sensores simples, a velocidade do som é uma constante 343 m/s, assumindo uma temperatura média de ambiente de 20°C.

$$d = \frac{v * t}{2} \quad (1)$$

$$v = 331 + 0,6T \quad (2)$$

Onde:

- d = distância até o obstáculo (m);
- v = velocidade do som no ar, em função da temperatura em °C;
- t = tempo entre emissão e recepção do eco (s);
- T = temperatura em °C.

A principal vantagem dos sensores ultrassônicos é seu baixo custo, baixa exigência computacional, simplicidade eletrônica e consequentemente sendo fácil de fazer integração com microcontroladores. Possuem boa precisão em curta distância e situações que a velocidade do som não limita o tempo de reação, e funcionam independente da iluminação. Porém ruídos e condições ambientais aumentam erros de medição, o mesmo ocorre com materiais absorventes e superfícies estreitas, isso reduz a qualidade do eco. Além disso, os sensores ultrassônicos tradicionais apresentam limitações relacionadas à taxa de amostragem e ao alcance operacional, exigindo melhorias algorítmicas para aplicações automotivas mais avançadas. (Farej *et al.*, 2025; Shin *et al.*, 2016).

3 VEÍCULOS AUTÔNOMOS

Neste capítulo será abordado os tipos, modos e demais informações importantes a respeito dos veículos autônomos, buscando elucidar as normativas, taxonomia e definições da condução para veículos motorizados em estradas. Para alcançar a autonomia (sem necessidade de atuação humana), os veículos utilizam uma combinação de dispositivos tecnológicos que trabalham em conjunto para captar, interpretar e reagir ao ambiente ao seu redor.

Estes equipamentos criam uma visão detalhada do ambiente, detectando a pista de rolagem, os obstáculos, pedestres, placas de sinalização e outros veículos. Os sistemas de assistência ao motorista (controle de cruise adaptativo, alerta de colisão e monitoramento de ponto cego) são fundamentais para garantir a precisão e confiabilidade da navegação automatizada. Para que o veículo " enxergue " o mundo e tome decisões seguras, uma combinação de diferentes tecnologias é utilizada, sendo os principais conjuntos de sensores utilizados:

- **Lidar (Detecção e Telemetria por Luz):** Emite pulsos de laser para criar um mapa 3D de alta precisão do ambiente ao redor, calculando distâncias com exatidão, mesmo à noite.

- **Câmeras:** Funcionam como os olhos humanos, capturando imagens coloridas. São essenciais para reconhecer semáforos, placas de trânsito, pedestres e faixas na pista.

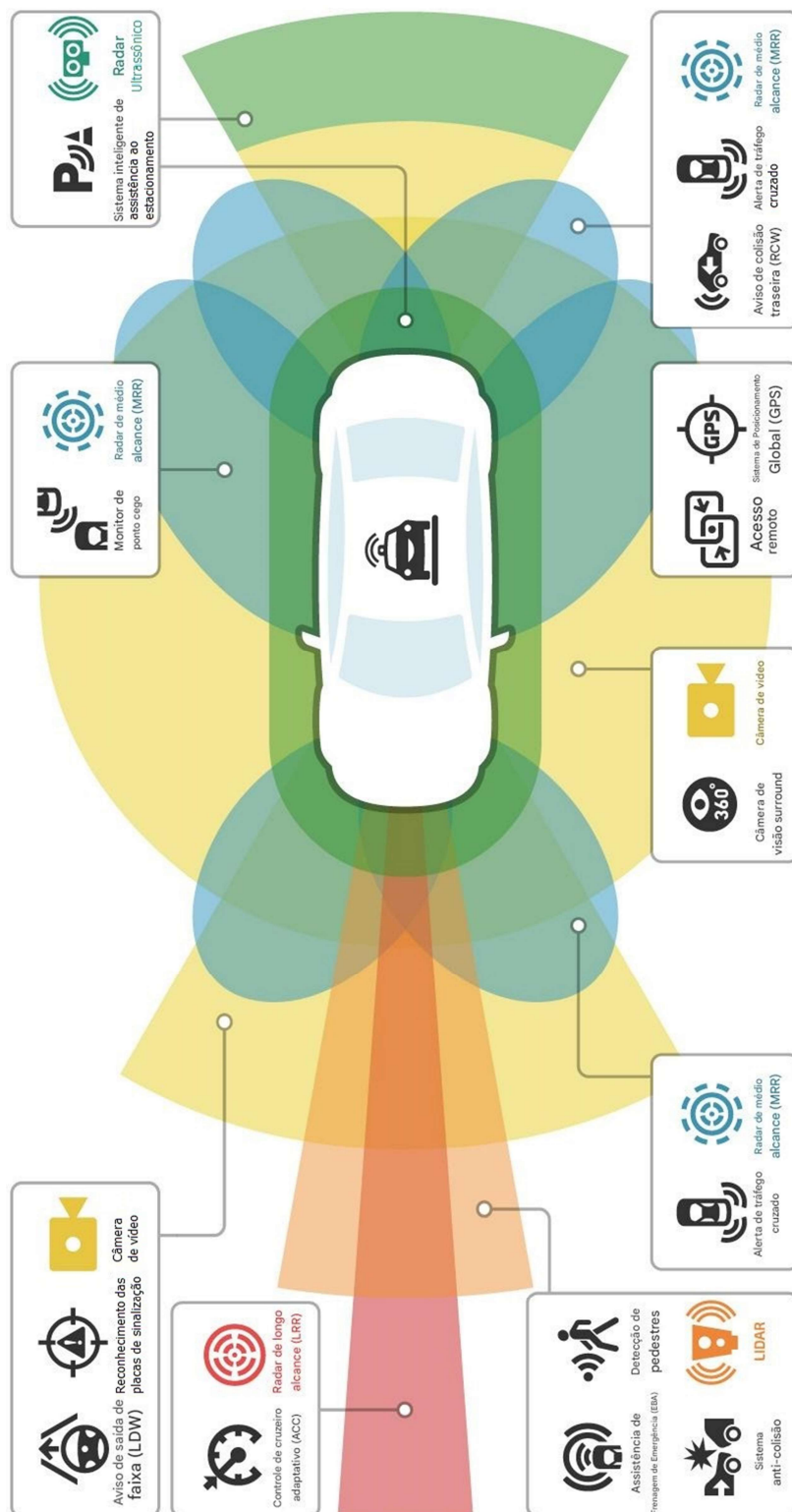
- **Radar:** Usa ondas de rádio para detectar objetos próximos e calcular a velocidade de outros veículos. Muito eficaz em condições climáticas ruins.

- **Sensores Ultrassônicos:** Enviam ondas sonoras de alta frequência. São usados principalmente em velocidades mais baixas para manobras de estacionamento e detecção de obstáculos muito próximos.

- **GPS e Unidades de Medição Inercial (IMU):** Fornecem a localização exata do veículo no mapa e ajudam a rastrear a direção e a velocidade, garantindo que o carro siga a rota correta.

A Figura 14 ilustra essa complexa rede de sensores e dispositivos distribuídos ao redor do veículo.

Figura 14 – Panorama Geral das Tecnologias de um Veículo Autônomo



Fonte: Adaptado de Paluszczyszyn (2024).

3.1 Os Seis Níveis de Automação da Condução Definidos pela SAE

A Society of Automotive Engineers (SAE) exerce um papel importante na padronização dos níveis de automação veicular. Isso faz com que a indústria automotiva global tenha um entendimento comum sobre as diferentes fases da automação. Para chegar a essa padronização, a última revisão do padrão SAE J3016 foi um esforço colaborativo a nível mundial. Em 2018, um grupo de trabalho conjunto foi formado, unindo o Comitê de Condução Automatizada da SAE (ORAD) com o grupo ISO TC204/WG14. Essa parceria reuniu pesquisadores e especialistas de todo o mundo, com conhecimento em tecnologia de automação e segurança veicular.

A definição desses níveis de automação surgiu da necessidade de estabelecer um consenso no setor automobilístico; assim garantindo uma base uniforme para pesquisa, desenvolvimento e regulamentação de veículos automatizados. O documento passou por atualizações significativas (atualmente a versão mais recente é de 2021), incluindo novos termos e definições, e correções para esclarecer conceitos frequentemente mal compreendidos, tornando-os mais acessíveis, especialmente para pessoas não falantes nativas de inglês.

Além disso, a revisão do SAE J3016 levou em consideração o histórico a partir de discussões com diferentes partes interessadas e pesquisas conduzidas em projetos como o *AdaptIVe Project*, na Europa, o *Crash Avoidance Metrics Partnership* (CAMP) e o *Automated Vehicle Research (AVR) Consortium*, nos Estados Unidos. Esse esforço conjunto contribuiu para melhorar e atualizar o documento, além de facilitar a implementação de padrões consistentes na indústria automotiva global.

O documento da SAE J3016 definiu uma classificação clara para os níveis de automação da condução de veículos, abrangendo desde a ausência de automação (Nível 0) até a automação total da condução (Nível 5). Esses níveis foram definidos para descrever os sistemas de automação veicular que desempenham parte ou a totalidade da *Dynamic Driving Task* - DDT (Tarefa Dinâmica de Condução).

Veículos autônomos são automóveis capazes de navegar, tomar decisões e operar sem a intervenção humana contínua, utilizando sistemas de inteligência artificial, sensores e algoritmos para perceber o ambiente e controlar a direção,

frenagem e aceleração. A autonomia é classificada internacionalmente em 6 níveis (padrão SAE International):

- **Nível 0 (Sem automação):** O motorista humano controla 100% do veículo. Sistemas de aviso são apenas de suporte.

- **Nível 1 (Assistência ao motorista):** Sistemas como controle de cruzeiro adaptativo ou frenagem de emergência auxiliam em tarefas específicas, mas o humano mantém o controle principal.

- **Nível 2 (Automação parcial):** O carro pode controlar direção e aceleração/frenagem em cenários específicos (como engarrafamentos), mas o motorista deve estar atento e pronto para assumir o controle imediatamente.

- **Nível 3 (Automação condicional):** O veículo dirige sozinho em situações ideais (como rodovias), mas pede que o motorista assuma o controle quando necessário.

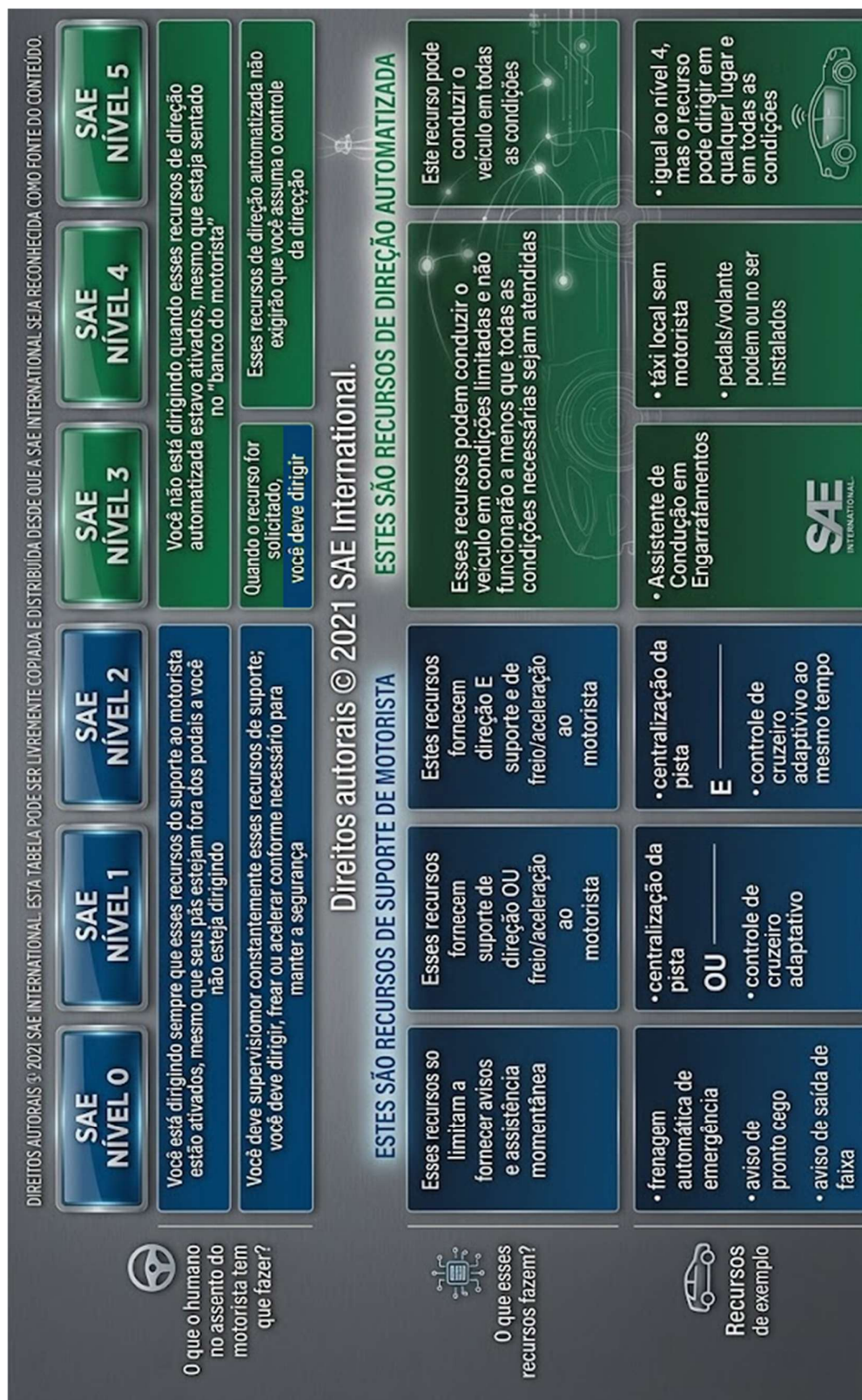
- **Nível 4 (Alta automação):** O carro dirige sozinho na maior parte do tempo e não exige que o motorista assuma o controle. Pode não operar em condições climáticas severas ou áreas não mapeadas.

- **Nível 5 (Automação total):** O veículo opera sem qualquer necessidade de intervenção humana em qualquer cenário ou condição.

Essa classificação ajuda a entender o papel do motorista e do sistema automatizado em cada fase, focando na interação entre os três elementos principais: o usuário humano, o sistema de automação e os demais componentes do veículo.

A Figura 15 oferece uma visão inicial dessa classificação (SAE International, 2021).

Figura 15 – Diagrama Resumido dos Seis Níveis de Automação



Fonte: Adaptado de SAE International (2021).

É importante destacar que a definição do nível de automação depende das funcionalidades ativas em determinado momento, não apenas das capacidades gerais do veículo. O mesmo veículo pode estar equipado com múltiplos sistemas de automação que operam em diferentes níveis, mas o nível de automação aplicado será determinado pela função específica em uso durante a condução.

O documento exclui da classificação os sistemas de segurança ativa: controle eletrônico de estabilidade (ESC) e a frenagem automática de emergência (AEB). Também são excluídos alguns sistemas de assistência ao motorista: assistência de permanência na faixa (LKA). Isso ocorre porque esses sistemas não realizam de forma sustentada parte ou a totalidade da condução, mas sim intervenções momentâneas para evitar situações de risco, sem alterar o papel do motorista na condução do veículo.

No caso dos níveis mais avançados de automação (Níveis 3 a 5), em que o sistema assume a responsabilidade total pela condução em determinadas condições, recursos de mitigação e prevenção de colisões fazem parte da funcionalidade do sistema de direção automatizado (ADS). Dessa forma, a SAE J3016 fornece uma base sólida para a padronização global da automação veicular, auxiliando na regulamentação, no desenvolvimento tecnológico e na adoção segura dessas inovações no setor automotivo.

3.2 Nível 0 - Sem Automação de Condução

Segundo a norma da SAE J3016, o nível 0 não possui nenhuma automação da condução, o motorista humano é 100% responsável pela direção e aceleração/frenagem. Em termos técnicos: todos os aspectos da tarefa dinâmica de condução (DDT) são responsabilidade exclusiva do motorista humano.

Hopkins e Schwanen (2021, p. 2) também reforçam que o nível 0 corresponde a veículos fabricados antes da introdução de assistentes de condução (ex.: veículos fabricados anteriormente à década de 1970), sem nenhum tipo de suporte automatizado. Esse nível mostra o paradigma tradicional: toda a responsabilidade de segurança, decisão e operação está no condutor humano.

Inagaki e Sheridan (2018, p. 1) afirmam que o nível 0 é um nível extra na escala. Por mais que possuam sistemas de aviso e segurança (alerta de colisão, cinto, entre outros), o veículo continua no nível 0, pois não exerce controle longitudinal (aceleração/frenagem) ou lateral (direção). Assim, observa-se que o nível 0 representa a ausência total de automação, caracterizando-se como a forma tradicional de condução, onde não há delegação de tarefas à máquina.

Dentro deste nível, ainda atualmente enquadram-se boa parte dos veículos de entrada como Fiat Mobi, Renault Kwid Zen e Citroën C3 Live; ou modelos antigos de veículos à combustão, como Honda Fit até 2017 e Kia Cerato até 2018, além de todos os veículos comerciais comuns de antes da década de 1990, como Volkswagen Fusca, Chevrolet Opala, Ford Corcel e Fiat 147. A Figura 16 retrata alguns dos veículos citados. A maioria dos veículos de entrada ainda estão no nível zero, o que torna a penetração de frota um grande obstáculo para o desenvolvimento dos veículos autônomos.

Figura 16 - Volkswagen Fusca, Honda Fit e Fiat Mobi



Fonte: Automaistv (2025).

3.3 Nível 1 - Assistência ao Motorista

A partir deste nível é onde se inicia os recursos de automação de um veículo. De acordo com a SAE J3016, o Nível 1 corresponde ao estágio em que o sistema executa pelo menos uma das funções da tarefa dinâmica de condução (DDT) de forma sustentada; podendo ser controle longitudinal (ex.: controle de cruzeiro adaptativo – ACC); ou controle lateral (ex.: assistência de permanência em faixa – LKA).

Conforme as funções de automação vão sendo implementadas nos veículos, surge o risco de o condutor não compreender adequadamente e utilizá-la da forma errada, sendo considerado imperícia da parte do condutor por superestimar

uma nova tecnologia. Esse risco é reforçado por Teoh (2020, p. 146), ao apontar que motoristas muitas vezes não compreendem plenamente as limitações das tecnologias em seus veículos e chegam a relatar disposição em se envolver em atividades secundárias à direção.

É de suma importância entender que o nível 1 assume apenas uma parte da DDT, logo o motorista deve estar ativamente supervisionando a condução e intervir quando for necessário. Portanto, o nível 1 marca a transição entre a direção totalmente humana e a automação, mas mantém o condutor como elemento central da segurança.

Os primeiros carros a oferecerem recursos que se enquadram nesse nível de automação foram equipados com Controle de Cruzeiro Adaptativo (ACC) e surgiram na década de 1990 (Mitsubishi Diamante 1995 e Mercedes-Benz 1999). Modelos recentes de veículos comerciais como Toyota Corolla, Honda Civic e Volkswagen Golf oferecem sistemas ACC ou assistência de permanência em faixa, caracterizando exemplos de automação nível 1 quando essas funções atuam isoladamente. A Figura 17 ilustra alguns dos veículos, destacando o pioneiro.

Figura 17 - Mitsubishi Diamante 1995, Toyota Corolla e Honda Civic



Fonte: Automaistv (2025) e Cars (2026).

3.4 Nível 2 - Automação Parcial da Condução

Pela definição normativa da SAE J3016, o Nível 2 é quando o sistema já executa simultaneamente o controle longitudinal (aceleração/frenagem) e lateral (direção) de forma sustentada. O motorista ainda segue responsável em supervisionar a condução e intervir quando for necessário.

Hopkins e Schwanen (2021, p. 2) comentam sobre como os níveis intermediários geram expectativas sociais e políticas sobre “futuro autônomo”, que ainda não se concretizam. Deve-se atentar que o nível 2 é uma etapa de transição, mas não uma “autonomia real”. E novamente Teoh (2020, p. 146) reforça o risco de mau uso e distração no Nível 2, onde o carro “parece mais autônomo” do que realmente é.

O primeiro veículo relevante com recursos de automação nível 2 foi o Tesla, que atingiu grande popularidade ao se mostrar muito efetivo em evitar acidentes. Um exemplo prático da capacidade do sistema *Autopilot* em evitar colisões pode ser visto em compilações como a de McGill (2020), que reúne situações reais de Teslas desviando de acidentes. De acordo com Elon Musk (sócio fundador da Tesla), o foco do desenvolvimento do piloto automático está em “redes neurais cada vez mais sofisticadas que podem operar em computadores de tamanho razoável no carro”, “o carro aprenderá com o tempo”, inclusive com outros carros.

Knoop et al. (2019, p. 319) relatam que testes de campo com veículos de nível 2 mostraram instabilidades em comboios com mais de quatro veículos, evidenciando que a automação parcial ainda possui limitações significativas em cenários complexos de tráfego. Apesar disso, sistemas comerciais como o *ProPILOT* da Nissan Leaf, o *Super Cruise* do Cadillac CT6, os assistentes de condução da Mercedes-Benz Classe S e *Autopilot* do Tesla Model 3 demonstram como o nível 2 já está amplamente disponível no mercado.

Com estes exemplos em mente pela Figura 18, o nível 2 é o mais popular atualmente e, conseqüentemente, também o mais problemático em termos de uso incorreto, uma vez que a supervisão humana continua indispensável.

Figura 18 - Nissan Leaf e Tesla

Fonte: Automaistv (2025) e Cars (2026).

3.5 Nível 3 - Automação Condicional

Do nível 3 adiante é onde se inicia a desvinculação do condutor (parcial ou completo) enquanto o sistema estiver ativo, logo o condutor pode se engajar em atividades secundárias (ex.: assistir a um vídeo, atender ligações, entre outros), mas deve estar pronto para intervir quando solicitado. De acordo com a definição normativa (SAE J3016), o nível 3 é quando o sistema executa toda a Tarefa Dinâmica de Condução (DDT) dentro do domínio operacional projetado (ODD).

Embora o motorista esteja livre de qualquer tarefa de direção enquanto o sistema de automação estiver ativado, espera-se que ele esteja receptivo a uma solicitação de intervenção (RTI) emitida pela automação e também que execute o *fallback* (plano B - opção de contingência que é utilizada quando o método principal falha.) de DDT em tempo hábil. O maior desafio está no tempo de resposta do condutor, estudos mostram que nem sempre o motorista está atento o suficiente para reassumir o controle. (Inagaki e Sheridan, 2018, p. 570).

A Figura 19 demonstra a evidência prática do efeito do HUD (Heads-up Display) do Mercedes-Benz Classe S ou EQS. O HUDs é um sistema que projeta informações importantes diretamente no campo de visão do usuário, geralmente no para-brisa, para que ele possa visualizá-las sem desviar o olhar do ponto principal.

Figura 19 – Heads-Up Display

Fonte: Cars (2021).

Uma revisão sistemática e meta-análise feita por Sekadakis e Yannis (2023, p. 7–8) analisa o *Take-Over Time* (TOT) do motorista; no artigo, o pedido de retorno do controle é denominado Take-Over Request (TOR) e o tempo que o motorista leva para responder é medido como Take-Over Time (TOT). TORs com alertas reduzem o TOT em aproximadamente 64.7%; *Heads-Up Displays* reduzem TOT em aproximadamente 14.8% comparado ao painel clássico; tráfego mais denso tende a reduzir TOT (motoristas mais atentos), enquanto rodovias têm TOT maior; TOT curto associa-se a manobras mais bruscas (maior aceleração lateral/longitudinal) e a um leve aumento em batidas e acidentes.

Estes estudos indicam a forte importância de o veículo possuir sistemas de alertas eficientes para melhorar a qualidade da condução. Para mitigar os riscos associados ao TOT, a literatura recomenda a implementação de sistemas de solicitação de intervenção multimodais (visual + auditivo + sináptico) combinados com displays no para-brisa (HUDs) e monitoramento adaptativo do condutor; essas medidas reduziram empiricamente o tempo de tomada de controle e melhoraram a prontidão do condutor (Sekadakis; Yannis, 2023, p. 7–8; Lee *et al.*, 2020, p. 3–5; Gerber *et al.*, 2023, p. 4–6).

Mensagens educativas e sessões de familiarização com o sistema têm mostrado calibrar expectativas e reduzir a propensão ao excesso de confiança, sendo

recomendadas antes da liberação do uso regular do sistema por usuários leigos. Além disso, especialistas defendem que atividades não relacionadas à direção devem ser limitadas ou adaptadas ao contexto, por exemplo, permitir apenas tarefas auditivas quando o sistema de monitoramento do condutor indicar baixa carga visual, para preservar o estado *fallback-ready* do usuário (Souders; Agrawal; Peeta, 2021, p. 11–12; Gerber *et al.*, 2023, p. 4–6).

É importante relatar que este nível de autonomia acabou criando problemas e discussões regulatórias, por exemplo: quem é responsável em caso de acidente quando o sistema está no controle? Por isso, o nível 3 é considerado polêmico, por criar uma ‘zona cinzenta’ entre autonomia do sistema e responsabilidade legal do condutor.

Um exemplo prático e confirmado é o sistema *DRIVE PILOT* da Mercedes-Benz, demonstrado na Figura 21. Este é um sistema de automação condicional (SAE Nível 3) autorizado em certos países, que permite ao condutor realizar atividades secundárias enquanto o sistema está ativo, desde que esteja pronto para retomar o controle (*fallback-ready*). Outro veículo que se enquadra no nível 3 é o Honda Legend Hybrid EX, que possui o sistema *Honda Sensing Elite*, os veículos citados podem ser vistos na Figura 20.

Figura 20 - Mercedes-Benz EQS SUV e Honda Legend Hybrid EX



Fonte: Automaistv (2025) e The Wheel Network (2021).

A primeira aplicação comercial foi em 2021, limitando a velocidade do veículo para 60 km/h enquanto opera no nível 3 de automação. Em dezembro de 2024 foi aprovada uma melhoria que eleva a velocidade máxima operacional para 95 km/h sob condições específicas (rodovias alemãs), com expectativa de aplicação comercial em 2025.

Esses dados demonstram que o nível 3 já está se tornando realidade prática, embora com ODD restritos. (Mbusa, 2025; Mercedes-Benz, 2025).

Figura 21 – Divulgação do Sistema Nível 3 da Mercedes-Benz

ATÉ 95 KM/H*:

MERCEDES-BENZ AUMENTA A VELOCIDADE MÁXIMA DO DRIVE PILOT SAE NÍVEL 3

O DRIVE PILOT pode assumir a tarefa de direção dinâmica até uma velocidade de 95 km/h (somente em rodovias alemãs).





Os clientes podem se envolver em certas atividades secundárias, como trabalhar ou assistir a um filme, e outras, enquanto o sistema estiver ativo.

O DRIVE PILOT é atualmente o sistema SAE Nível 3 mais rápido do mundo em um veículo de produção em série.

Novo: também disponível no trânsito em movimento sob certas condições, como seguir outro veículo na faixa da direita em uma rodovia alemã.

Os clientes atuais do Mercedes-Benz DRIVE PILOT receberão a atualização gratuita pelo ar (OTA) ou na concessionária

*A função de direção condicionalmente automatizada (SAE Nível 3) assume certas tarefas de direção. No entanto, um motorista ainda é necessário. O motorista deve estar pronto para assumir o controle do veículo o tempo todo quando solicitado a intervir. A direção condicionalmente automatizada está disponível sob certas condições, especialmente em situações de tráfego pesado ou congestionamento em trechos adequados de rodovias até uma velocidade de 60 km/h. Na Alemanha, espera-se que o DRIVE PILOT esteja disponível na faixa da direita da rodovia a até 95 km/h no primeiro semestre de 2025, desde que um veículo adequado esteja circulando à frente e certas condições sejam atendidas. A disponibilidade e o uso das funções do DRIVE PILOT em rodovias dependem das opções, países e leis aplicáveis. As tarefas secundárias exibidas são apenas para fins ilustrativos. Nem todas as tarefas secundárias são permitidas.

Fonte: Mercedes-Benz (2025).

3.6 Nível 4 - Automação Elevada

A maior parte da literatura empírica para nível 4 e 5 ainda é escassa, o desenvolvimento e a aplicação prática estão muito concentrados até o nível 3, onde a tecnologia atual conseguiu atingir com alta penetração de frota. De acordo com a definição normativa da SAE J3016, O nível 4 corresponde ao estágio em que o sistema executa toda a Tarefa Dinâmica de Condução (DDT) dentro do seu Domínio Operacional Projetado (ODD), sem necessidade de intervenção humana.

Os níveis 4 e 5 tornam obsoleta a necessidade de TOR e TOT, porque o sistema não solicita intervenção do motorista, ou seja, estes parâmetros são relevantes até o nível 3 (Sekadakis; Yannis, 2023, p. 7).

O nível 4 elimina a necessidade de “*fallback-ready user*”, mas cria novos desafios de aceitação social e de confiança. Há estudos que comparam gravidade de acidentes em simulações e dados de múltiplas fontes, mostrando que os níveis 4 e 5

reduzem significativamente o risco de lesões graves, mas a efetividade depende da penetração da frota, isto é, da porcentagem de veículos autônomos em circulação dentro do total de veículos de uma região. Em cenários com baixa penetração, os ganhos de segurança são limitados pela interação com veículos dirigidos por humanos; já em cenários com alta penetração, os benefícios se ampliam. Embora teoricamente mais seguro, o nível 4 ainda terá ODDs limitados em cidades específicas e rotas fixas (Gerber *et al.*, 2023, p. 5–6; Ding *et al.*, 2024, p. 4).

A primeira aplicação comercial foi em 2023 na China, táxis autônomos oferecendo serviços de transporte, sem um motorista presente no veículo. Porém sua área de operação é limitada a apenas em cidades com alta infraestrutura, com estradas, faixas e placas de trânsito bem definidas; e acesso à internet móvel 5G. A Figura 22 ilustra o táxi autônomo que opera na China.

Figura 22 – Táxi Autônomo



Fonte: Uol (2026).

Atualmente, as discussões sobre nível 4 criam forte expectativa social e política de um futuro sem motoristas, mas esse futuro ainda é “indefinido” e longe da realidade prática. Será necessário avanços em diversas áreas, incluindo infraestrutura, tecnologia e viabilidade econômica para isso ser completamente implementado em todos os veículos (Hopkins; Schwanen, 2021, p. 3).

3.7 Nível 5 - Automação Total

Sendo o nível final da automação e brevemente mencionado por inúmeros pesquisadores, o nível 5 representa o ideal aspiracional da indústria, porém “muito distante” devido a barreiras técnicas, éticas, legais e de aceitação social. Há críticas quanto ao discurso político e mercadológico em torno do nível 5, pois reforça a visão de um “futuro sem motoristas”, quando na prática esse horizonte é incerto. (Gerber *et al.*, 2023, p. 6–7; Hopkins; Schwanen, 2021, p. 3-4).

Com base na definição normativa da SAE J3016, O nível 5 representa a automação total, sem necessidade de volante, pedais ou *fallback* humano. Sua principal diferença em relação ao nível 4, é o sistema não ser restrito ao ODD, sendo livre a utilização em qualquer lugar.

Simulações mostram que o nível 5 causaria uma redução drástica de acidentes e mortes, mas somente com alta penetração da frota. Ou seja, em cenários de convivência com motoristas humanos, os ganhos podem ser limitados (Ding *et al.*, 2024, p. 5).

Apesar do seu potencial transformador, a plena implementação do nível 5 enfrenta desafios consideráveis. Do ponto de vista técnico, ainda não existem sistemas de inteligência artificial capazes de lidar com todas as situações imprevistas de trânsito, clima e interação com pedestres. No campo ético e legal, permanecem dúvidas sobre a responsabilidade em acidentes e sobre a programação de veículos em dilemas morais. Já no aspecto social, fatores como confiança pública, aceitação cultural e viabilidade econômica desempenham papel central na adoção. Dessa forma, o nível 5 deve ser entendido menos como uma realidade próxima e mais como um horizonte de longo prazo, que depende de avanços multidisciplinares para se concretizar.

4 METODOLOGIA E CRONOGRAMA DE TRABALHO

A metodologia deste trabalho baseia-se em uma investigação bibliográfica que inclui o uso de artigos científicos, livros, publicações relacionadas a veículos elétricos e sensores, e a aplicação prática de um tipo de sensor utilizado nos sistemas autônomos de veículos elétricos. Em conjunto com a investigação bibliográfica, houveram diversas atividades práticas no laboratório EMOL, com as bancadas de treinamento em veículos elétricos e híbridos, desenvolvidos pela BYD e Toyota.

A princípio o foco da pesquisa deste trabalho acadêmico foi aplicado na análise do sistema de direção do VE e os sensores presentes em todo o veículo. Este estudo inicial forneceu a fundamentação necessária para compreender os equipamentos e o comportamento do veículo, assim visando implementar o sistema de estacionamento automatizado.

Com base nas informações levantadas, foram definidos os conceitos do sistema de direção e seus principais componentes que permitem a movimentação do veículo, como também os componentes responsáveis por computar as ações do condutor.

Quanto as atividades em laboratório, foi utilizada a metodologia STEAM (acrônimo de *Science, Technology, Engineering, Arts e Mathematics*). É uma proposta de metodologia de aprendizado, que deriva muito de projetos e “mão na massa”. Ao contrário do método tradicional no qual envolve muita teoria, este método propõe uma união da teoria e prática, por meio de resolução de um problema real no qual os alunos irão alcançar resultados e testemunhar a solução (Brino Robótica Educacional, 2021).

A metodologia STEAM (Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática) promove uma abordagem multidisciplinar e centrada no usuário, aproximando o projeto acadêmico da realidade do mercado de trabalho. Esta metodologia é importante para os seguintes aspectos:

- Design Centrado no Humano (Artes): Garante que o projeto tenha uma interface intuitiva, seja ergonômico e esteticamente agradável, melhorando a aceitação do produto pelo usuário final;

- Resolução Complexa de Problemas (Matemática e Ciências): Fundamenta o embasamento teórico para o dimensionamento de circuitos, eficiência energética e modelagem de sistemas elétricos complexos;

- Viabilidade Tecnológica (Tecnologia e Engenharia): Foca na aplicação prática de softwares de simulação, prototipagem e integração de hardware e software (IoT, microcontroladores);

- Inovação e Criatividade: Estimula o estudante a pensar fora da caixa, resultando em soluções que aliam alta tecnologia a uma experiência de uso otimizada.

Abaixo segue o cronograma das atividades envolvidas neste trabalho de conclusão de curso.

Tabela 1 - Cronograma

Etapa	Descrição	Data de início	Data de término
Leitura e Tradução de Manuais	Leitura do livro "Veículos Elétricos E Híbridos: Fundamentos, Características E Aplicações" do autor Max Mauro Dia Santos. Os manuais e informações providas da BYD estão em mandarim, será necessário traduzi-las.	02/11/2023	29/02/2024
Parte Teórica Sistema de Direção	Pesquisa e elaboração da parte teórica do capítulo de sistema de direção.	01/03/2024	30/04/2024
Parte Teórica Sensores	Pesquisa e elaboração da parte teórica do capítulo de sensores.	01/05/2024	31/07/2024
Defesa Pré-TCC	Defesa do desenvolvimento inicial do TCC, para conclusão da disciplina TCC I.	04/09/2024	04/09/2024
Parte Teórica Veículos Autônomos	Pesquisa e elaboração da parte teórica do capítulo de veículos autônomos.	25/10/2024	03/11/2025
Preparação Laboratório	Período preparatório para iniciação posterior das atividades em laboratório.	04/11/2025	18/12/2025
Laboratório	Em conjunto com as atividades no laboratório, período em que ocorreram as práticas no laboratório com o orientador, professores e outros orientandos.	18/03/2026	15/05/2026
Resultados e Conclusão	Elaborar o capítulo de resultados do que foi realizado em laboratório. Escrever as considerações finais.	15/05/2026	29/05/2026
Revisão Geral	Última análise finalização do trabalho de TCC	01/06/2026	21/06/2026
Entrega e Apresentação	Entrega e Defesa do TCC, a ser marcado.	-	

Fonte: Elaboração própria (2024).

5 ABORDAGEM PRÁTICA DOS SENSORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Neste capítulo será abordada uma utilização prática dos sensores nos veículos autônomos, dando ênfase ao sensor ultrassônico HC-SR04 a partir de um experimento prático com Arduino.

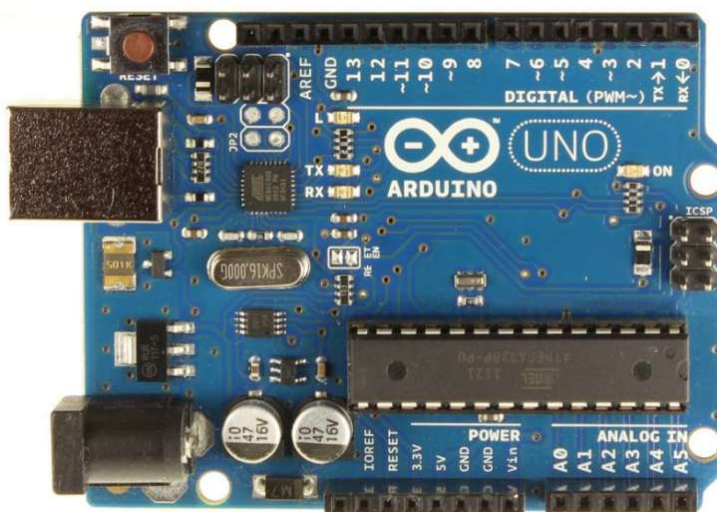
5.1 Protótipo Arduino

Para a validação prática dos conceitos dos sensores, mapeamento perimetral e detecção de obstáculos discutidos nos capítulos anteriores, foi desenvolvido um protótipo experimental microcontrolado. O objetivo do dispositivo consiste em simular um sistema de radar ativo de curto alcance, integrando capacidade de varredura angular e medição de distâncias lineares em tempo real.

5.1.1 Componentes Utilizados

A montagem física do protótipo foi estruturada sobre uma matriz de contatos (*protoboard*) utilizando fios condutores para a interconexão dos módulos de hardware representados pela Figura 23 e Figura 24.

Figura 23 – Arduino UNO



Fonte: Usinainfo (2026).

- **Arduíno UNO e Conector USB:** Plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto baseada no microcontrolador ATmega328P, responsável pela execução do algoritmo principal, temporização dos pulsos ultrassônicos e modulação dos passos de rotação mecânica.

- **Sensor de Distância Ultrassônico (HC-SR04):** Transdutor composto por um emissor e um receptor de ondas acústicas de alta frequência (40 kHz). Opera com base no princípio *Time-of-Flight*, calculando a distância física de obstáculos a partir do intervalo temporal entre a emissão do pulso e a recepção do eco correspondente (Figura 19).

- **Motor de Passo (28BYJ-48 5VDC):** Atuador eletromecânico responsável por rotacionar o elemento de sensoriamento. Esse motor converte pulsos elétricos em deslocamentos angulares discretos e precisos. Uma volta completa de 360° equivale a 2048 passos neste motor (Figura 19).

Figura 24 – Sensor de Distância Ultrassônico (HC-SR04) e Motor de Passo (28BYJ-48 5VDC)



Fonte: Usinainfo (2026).

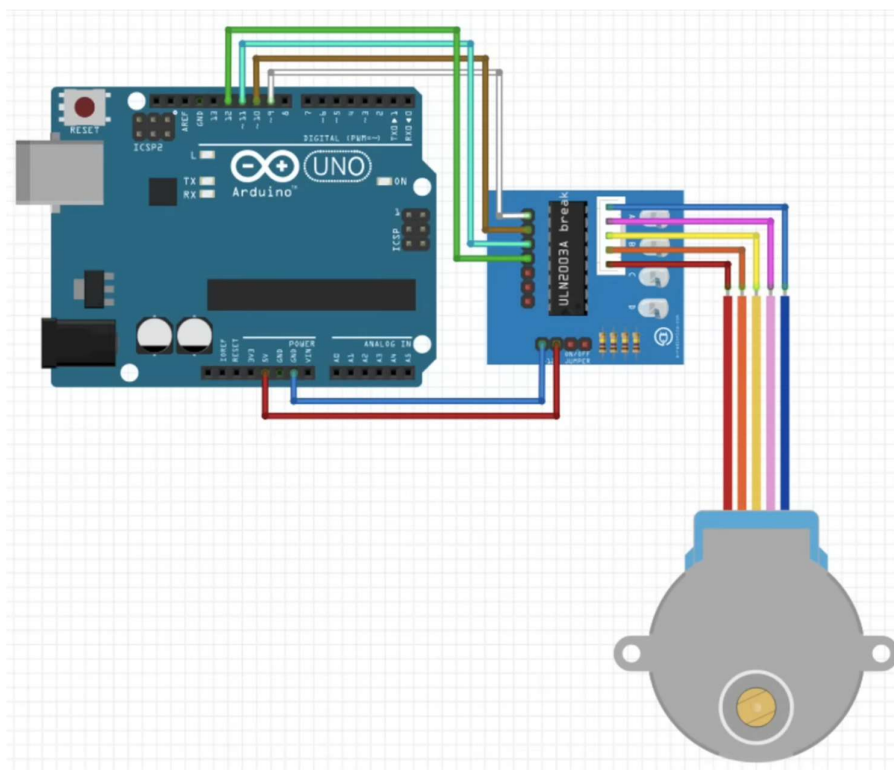
Originalmente, os arranjos experimentais clássicos para essa categoria de projeto utilizam servomotores comerciais de pequeno porte, como o modelo SG90, devido à sua simplicidade de controle por Modulação por Largura de Pulso (PWM). Todavia, dada a indisponibilidade deste componente para a execução do presente ensaio, foi utilizado o motor de passo 28BYJ-48. Ao contrário do servomotor convencional, que possui feedback interno de posição restrito e comando direto via biblioteca unificada, o motor de passo exige o acionamento sequencial explícito de suas bobinas internas em malha aberta. Como o experimento prático é uma aplicação

simplificada, foi necessário apenas adaptar o algoritmo para operar o motor de passo disponível.

O esquema de ligação do Sensor e do Motor de Passo é demasiado simples. O sensor HC-SR04: Os fios de VCC e GND são conectados na entrada de 5V do Arduino e seu aterramento, já fios *Trig* e *Echo* são conectados nos pinos digitais do Arduino, neste caso foram escolhidos os pinos 6 e 7. O Motor de Passo segue lógica similar como demonstrado na Figura 25.

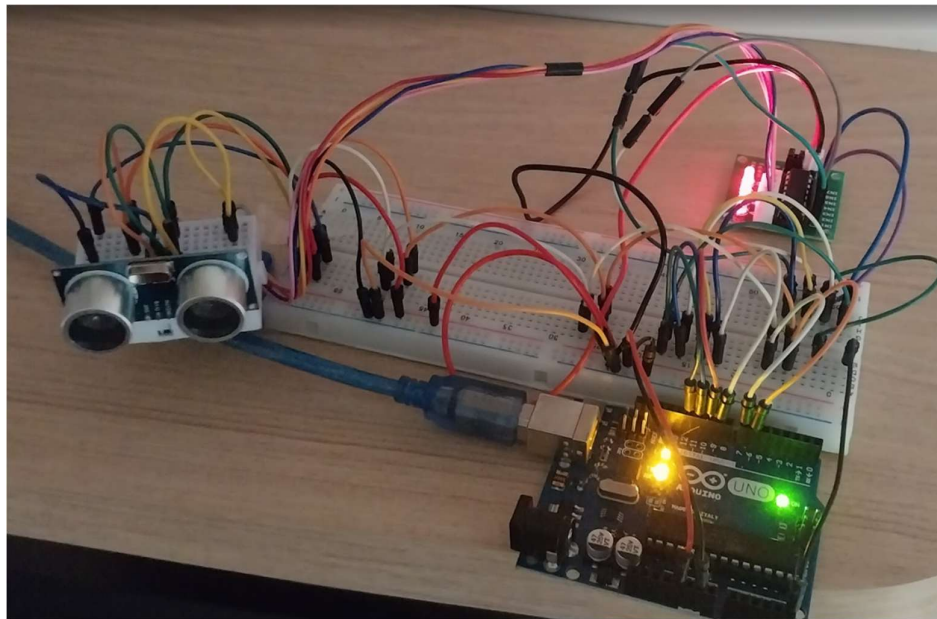
A Figura 26 é a montagem do circuito completo, no qual será utilizado para o experimento prático.

Figura 25 – Esquema de Ligação do Motor de Passo (28BYJ-48 5VDC) no Arduino UNO



Fonte: Nikodem Bartnik (2018).

Figura 26 – Protótipo Arduino Montado para o Experimento Prático



Fonte: Elaboração Própria (2026).

5.1.2 Integração de Software (IDE Arduino)

O ecossistema de software do protótipo foi feito em duas camadas interdependentes: o firmware embarcado na placa microcontrolada (desenvolvido em C/C++ na IDE Arduino) e a interface gráfica de telemetria (desenvolvida na linguagem *Processing*). O algoritmo na IDE Arduino atua em uma rotina cíclica (*loop*) de varredura contínua cobrindo um arco de 105° geométricos (equivalente a 600 passos discretos do motor de passo 28BYJ-48). A lógica operacional do programa segue o fluxo metodológico:

1. O microcontrolador executa a função *OneStep()*, acionando os pinos digitais correspondentes às bobinas do motor de passo para avançar uma fração angular na direção estipulada;
2. O pino de gatilho (*trigPin*) é submetido a um pulso lógico alto por um intervalo controlado de tempo;
3. O pino de leitura (*echoPin*) monitora o retorno da onda acústica. O tempo decorrido é mensurado e convertido matematicamente em distância linear em centímetros, considerando a velocidade de propagação do som no ar atmosférico;

4. Os valores instantâneos correspondentes ao passo mecânico atual e à distância calculada são concatenados e transmitidos via protocolo de comunicação assíncrona UART (Porta Serial) a uma taxa de transmissão de 9600 bps *baud rate*.

Após atingir o limite angular máximo de 600 passos (105°), a variável de direção lógica é invertida, assim o motor de passo faz o caminho de retorno e se comporta como um dispositivo que faz o monitoramento perimetral. Porém devido à uma limitação intrínseca do motor de passo utilizado, ele não é capaz de enviar informação da posição angular do eixo. Isso significa que o algoritmo não tem como receber a informação da posição inicial do eixo, nem de sua posição atual conforme está operando, então cabe ao operador do experimento, ajustar manualmente a posição inicial adequada.

O código completo desenvolvido para o microcontrolador Arduino está descrito a seguir:

Algoritmo do Arduino IDE

```
// Definições do Motor de Passo
#define STEPPER_PIN_1 9
#define STEPPER_PIN_2 10
#define STEPPER_PIN_3 11
#define STEPPER_PIN_4 12

// Pinos do Sensor Ultrassônico
const int trigPin = 6;
const int echoPin = 7;

long duration;
int distance;
int step_number = 0;

// O motor 28BYJ-48 precisa de 2048 passos para 360°.
// 180° = 1024 passos.
const int maxSteps = 600;

void setup() {
  pinMode(STEPPER_PIN_1, OUTPUT);
  pinMode(STEPPER_PIN_2, OUTPUT);
  pinMode(STEPPER_PIN_3, OUTPUT);
  pinMode(STEPPER_PIN_4, OUTPUT);
  pinMode(trigPin, OUTPUT); // [cite: 38]
  pinMode(echoPin, INPUT); // [cite: 39]
  Serial.begin(9600); // [cite: 40]
```

```

}

void loop() {
  // Rotação de 0 a 180 graus (1024 passos)
  for (int s = 0; s <= maxSteps; s++) {
    OneStep(true); // Gira para frente
    enviarDadosRadar(s);
    delay(5); // Ajuste a velocidade aqui
  }

  // Rotação de 180 a 0 graus
  for (int s = maxSteps; s > 0; s--) {
    OneStep(false); // Gira para trás
    enviarDadosRadar(s);
    delay(5);
  }
}

void enviarDadosRadar(int currentStep) {
  // Converte o passo atual em ângulo (0 a 180) para o Processing
  int angle = map(currentStep, 0, maxSteps, 0, 180);

  distance = calculateDistance();

  // Formato exigido pelo Processing: "angulo,distancia." [cite: 51, 54]
  Serial.print(angle);
  Serial.print(",");
  Serial.print(distance);
  Serial.print(".");
}

int calculateDistance() {
  digitalWrite(trigPin, LOW);      // [cite: 70]
  delayMicroseconds(2);             // [cite: 71]
  digitalWrite(trigPin, HIGH);     // [cite: 73]
  delayMicroseconds(10);           // [cite: 74]
  digitalWrite(trigPin, LOW);      // [cite: 75]

  duration = pulseIn(echoPin, HIGH); // [cite: 76, 77]
  distance = duration * 0.034 / 2;   // [cite: 79]
  return distance;                  // [cite: 80]
}

void OneStep(bool dir) {
  if (dir) {
    switch (step_number) {
      case 0: digitalWrite(STEPPER_PIN_1, HIGH); digitalWrite(STEPPER_PIN_2, LOW);
        digitalWrite(STEPPER_PIN_3, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_4, LOW); break;
      case 1: digitalWrite(STEPPER_PIN_1, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_2, HIGH);
        digitalWrite(STEPPER_PIN_3, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_4, LOW); break;
    }
  }
}

```

```

        case 2: digitalWrite(STEPPER_PIN_1, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_2, LOW);
digitalWrite(STEPPER_PIN_3, HIGH); digitalWrite(STEPPER_PIN_4, LOW); break;
        case 3: digitalWrite(STEPPER_PIN_1, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_2, LOW);
digitalWrite(STEPPER_PIN_3, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_4, HIGH); break;
    }
} else {
    switch (step_number) {
        case 0: digitalWrite(STEPPER_PIN_1, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_2, LOW);
digitalWrite(STEPPER_PIN_3, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_4, HIGH); break;
        case 1: digitalWrite(STEPPER_PIN_1, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_2, LOW);
digitalWrite(STEPPER_PIN_3, HIGH); digitalWrite(STEPPER_PIN_4, LOW); break;
        case 2: digitalWrite(STEPPER_PIN_1, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_2, HIGH);
digitalWrite(STEPPER_PIN_3, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_4, LOW); break;
        case 3: digitalWrite(STEPPER_PIN_1, HIGH); digitalWrite(STEPPER_PIN_2, LOW);
digitalWrite(STEPPER_PIN_3, LOW); digitalWrite(STEPPER_PIN_4, LOW); break;
    }
}
step_number++;
if (step_number > 3) step_number = 0;
}

```

Fonte: Elaboração Própria (2026).

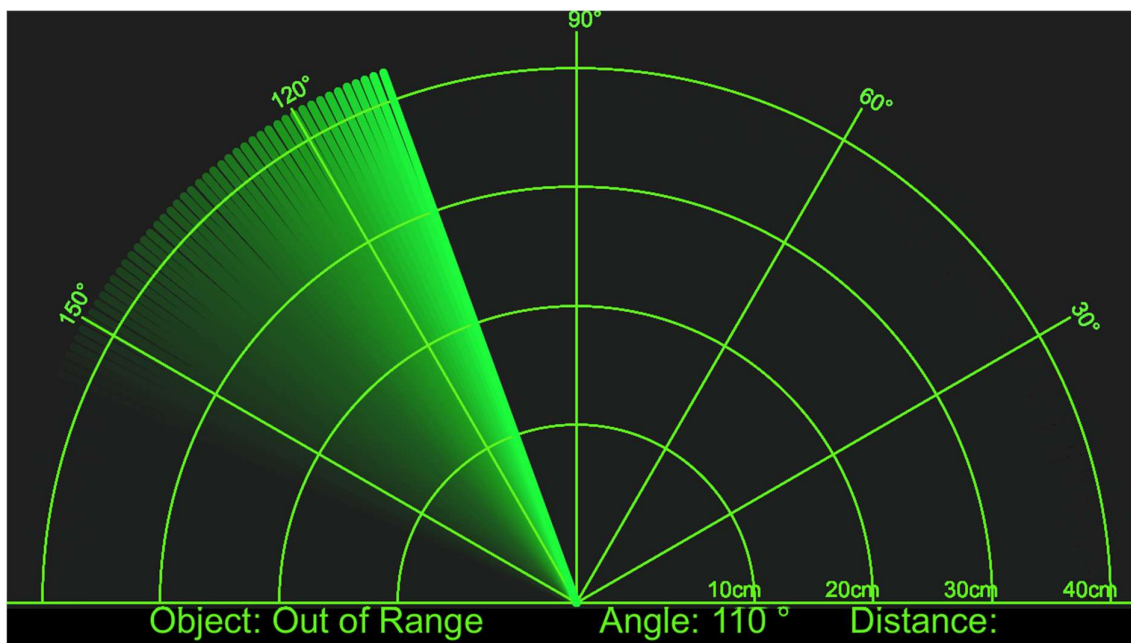
5.1.3 Interface Gráfica e Visualização de Dados (Processing)

Para decodificar as *strings* de dados brutas enviadas pelo Arduino e transformá-las em informação visual legível, foi utilizado o software *Processing*: uma linguagem de programação *open-source* e ambiente de desenvolvimento (IDE) focado em artes visuais e design.

O objetivo foi desenvolver uma rotina gráfica que mapeia os dados em coordenadas polares, renderizando na tela do usuário um vetor de varredura radial dinâmico composto por linhas de grade circulares calibradas (escaloadas em intervalos de 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm).

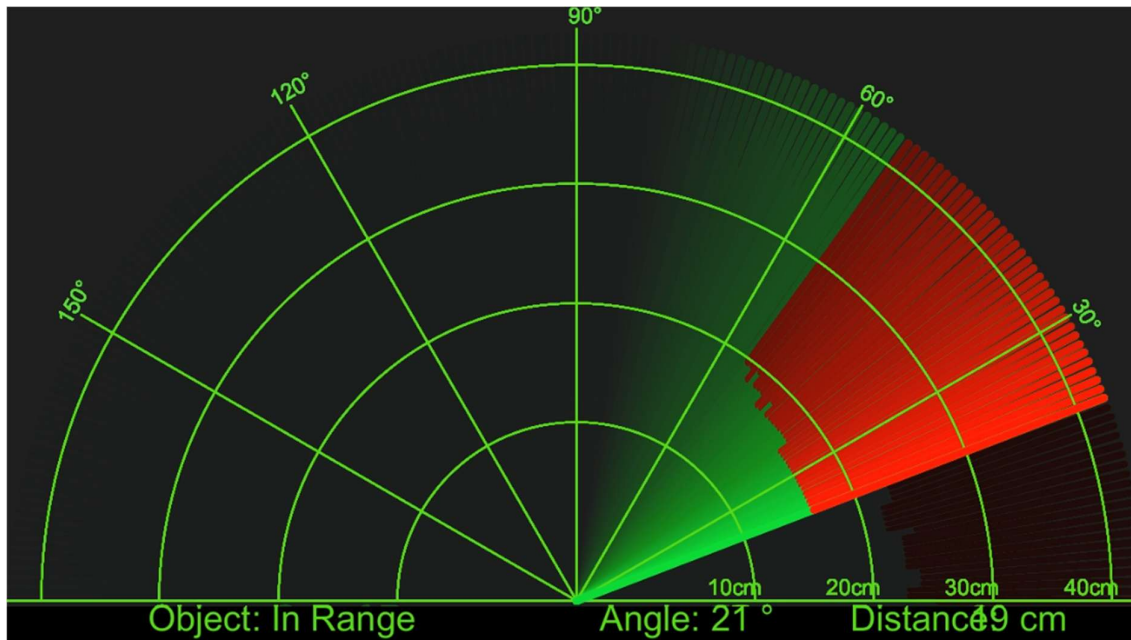
Quando o sensor detecta uma distância inferior a 40 cm, o software sinaliza visualmente a presença do obstáculo na coordenada angular correspondente por meio de linhas de varredura avermelhadas e exibe os valores numéricos de ângulo e distância na porção inferior da tela, simulando com fidelidade telas de radares de monitoramento aeronáutico e náutico, conforme demonstrado nas Figuras 27, 28 e 29.

Figura 27 - Radar em Operação no Processing



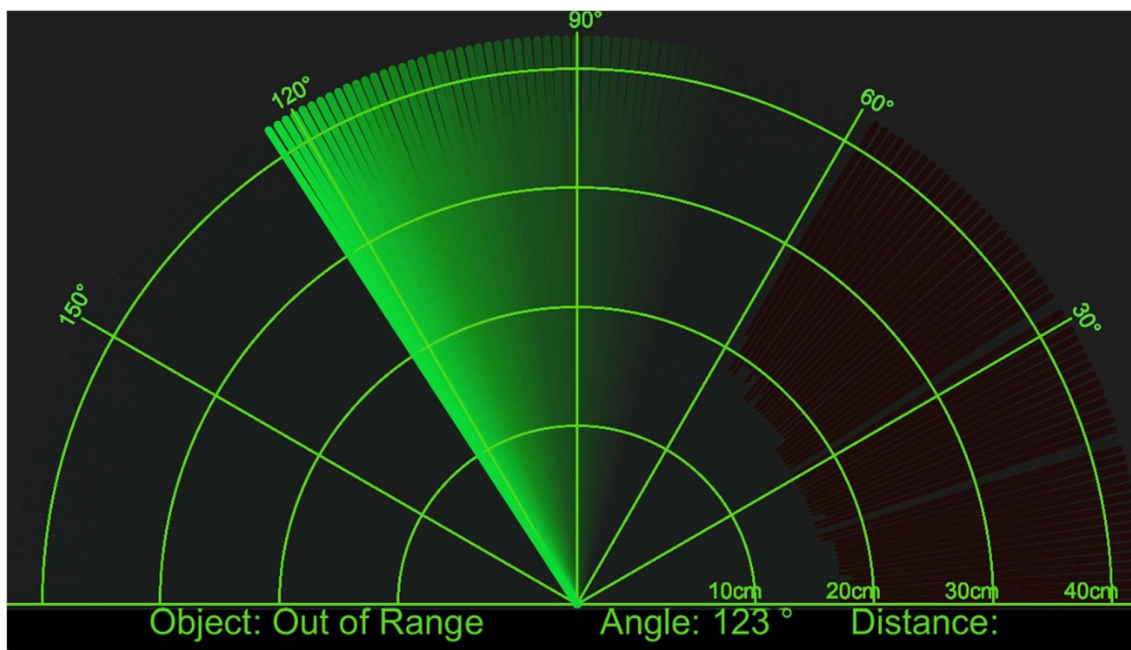
Fonte: Elaboração Própria (2026).

Figura 28 - Radar Detectando um Objeto a 19cm de Distância



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Figura 29 – Rastro do Objeto Detectado Recentemente



Fonte: Elaboração Própria (2026).

O algoritmo de renderização visual encontra-se documentado a seguir.

Algoritmo desenvolvido no Processing

```
import processing.serial.*; // Importa as bibliotecas para comunicação de Seriew
import java.awt.event.KeyEvent; // Importa as bibliotecas para ler a informação
da entrada de serie
import java.io.IOException;
Serial myPort; // define o objeto Serial
// define as variaveis
String angle="";
String distance="";
String data="";
String noObject;
float pixsDistance;
int iAngle, iDistance;
int index1=0;
int index2=0;
PFont orcFont;
void setup() {
  size (1280, 720); //
  smooth(); // [cite: 99]

  // Substitua as linhas originais por estas:
  // Em vez de loadFont, usamos createFont para usar uma fonte do Windows/Mac/Linux
  orcFont = createFont("Arial", 30);
  textFont(orcFont);

  myPort = new Serial(this, "COM3", 9600); // Verifique se sua porta é a COM3
  myPort.bufferUntil('.'); //
}
```

```

void draw() {

fill(98,245,31);
textFont(orcFont);
// Simula o movimento das linhas
noStroke();
fill(0,4);
rect(0, 0, width, height-height*0.065);

fill(98,245,31); // green color
// Chama as funções Radar, line, Object, Text
drawRadar();
drawLine();
drawObject();
drawText();
}

void serialEvent (Serial myPort) { // Começa a ler a informação de Serie
// lê a informação de Serie até ao caracter '.', esta informação é atribuída a
uma string chamada "data".
data = myPort.readStringUntil('.');
data = data.substring(0,data.length()-1);

index1 = data.indexOf(","); //
angle= data.substring(0, index1);
distance= data.substring(index1+1, data.length());

// Converte as variáveis string em Integer
iAngle = int(angle);
iDistance = int(distance);
}

void drawRadar() {
pushMatrix();
translate(width/2,height-height*0.074); // Move as coordenadas iniciais para outro
local
noFill();
strokeWeight(2);
stroke(98,245,31);
// Desenha os semicírculos
arc(0,0,(width-width*0.0625),(width-width*0.0625),PI,TWO_PI);
arc(0,0,(width-width*0.27),(width-width*0.27),PI,TWO_PI);
arc(0,0,(width-width*0.479),(width-width*0.479),PI,TWO_PI);
arc(0,0,(width-width*0.687),(width-width*0.687),PI,TWO_PI);
// Desenha as linhas dos ângulos
line(-width/2,0,width/2,0);
line(0,0,(-width/2)*cos(radians(30)),(-width/2)*sin(radians(30)));
line(0,0,(-width/2)*cos(radians(60)),(-width/2)*sin(radians(60)));
line(0,0,(-width/2)*cos(radians(90)),(-width/2)*sin(radians(90)));
line(0,0,(-width/2)*cos(radians(120)),(-width/2)*sin(radians(120)));
line(0,0,(-width/2)*cos(radians(150)),(-width/2)*sin(radians(150)));
line((-width/2)*cos(radians(30)),0,width/2,0);
popMatrix();
}

void drawObject() {
pushMatrix();
translate(width/2,height-height*0.074); // Move as coordenadas iniciais para outro
local
strokeWeight(9);
stroke(255,10,10); // red color

```

```

pixsDistance = iDistance*((height-height*0.1666)*0.025); // cobre a distancia
entre o sensor e o objeto
// limiting the range to 40 cms
if(iDistance<40){
// Desenha o objeto de acordo com a distancia e o angulo
line(pixsDistance*cos(radians(iAngle)), -
pixsDistance*sin(radians(iAngle)), (width-width*0.505)*cos(radians(iAngle)), -
(width-width*0.505)*sin(radians(iAngle)));
}
popMatrix();
}

void drawLine() {
pushMatrix();
strokeWeight(9);
stroke(30,250,60);
translate(width/2,height-height*0.074); // Move as coordenadas iniciais para outro
local
line(0,0,(height-height*0.12)*cos(radians(iAngle)),-(height-
height*0.12)*sin(radians(iAngle))); // Desenha a linha de acordo com o angulo
popMatrix();
}
void drawText() { // Escreve o texto no ecra

pushMatrix();
if(iDistance>40) {
noObject = "Out of Range";
}
else {
noObject = "In Range";
}
fill(0,0,0);
noStroke();
rect(0, height-height*0.0648, width, height);
fill(98,245,31);
textSize(25);

text("10cm",width-width*0.3854,height-height*0.0833);
text("20cm",width-width*0.281,height-height*0.0833);
text("30cm",width-width*0.177,height-height*0.0833);
text("40cm",width-width*0.0729,height-height*0.0833);
textSize(40);
text("Object: " + noObject, width-width*0.875, height-height*0.0277);
text("Angle: " + iAngle + " °", width-width*0.48, height-height*0.0277);
text("Distance: ", width-width*0.26, height-height*0.0277);
if(iDistance<40) {
text("      " + iDistance + " cm", width-width*0.225, height-height*0.0277);
}
textSize(25);
fill(98,245,60);
translate((width-width*0.4994)+width/2*cos(radians(30)),(height-height*0.0907)-
width/2*sin(radians(30)));
rotate(-radians(-60));
text("30°",0,0);
resetMatrix();
translate((width-width*0.503)+width/2*cos(radians(60)),(height-height*0.0888)-
width/2*sin(radians(60)));
rotate(-radians(-30));
text("60°",0,0);

```

```

resetMatrix();
translate((width-width*0.507)+width/2*cos(radians(90)),(height-height*0.0833)-
width/2*sin(radians(90)));
rotate(radians(0));
text("90°",0,0);
resetMatrix();
translate(width-width*0.513+width/2*cos(radians(120)),(height-height*0.07129)-
width/2*sin(radians(120)));
rotate(radians(-30));
text("120°",0,0);
resetMatrix();
translate((width-width*0.5104)+width/2*cos(radians(150)),(height-height*0.0574)-
width/2*sin(radians(150)));
rotate(radians(-60));
text("150°",0,0);
popMatrix();
}

```

Fonte: Arduino Portugal (2017).

5.2 Aplicação nos Veículos Autônomos

A principal aplicação do sensor ultrassônico nos veículos autônomos já vendidos comercialmente, é no comando de estacionamento automatizado. Devido ao seu baixo custo, boa eficiência em detectar obstáculos em curtas distâncias, quando são associados à microcontroladores e inteligência artificial, os sensores conseguem realizar medições rápidas de distância e detecção de obstáculos em tempo real.

A respeito da ampla utilização de sensores rígidos convencionais, os avanços na tecnologia de sistemas micro eletromecânicos (MEMS) abrem caminho para a flexibilização do design automotivo. Uma vertente promissora consiste no emprego de transdutores ultrassônicos piezelétricos micro achinados (pMUTs) montados sobre placas de circuito impresso flexíveis (FPCB). Essa abordagem permite que os dispositivos de sensoriamento sejam moldados e aplicados diretamente em superfícies curvas da carroceria sem sofrerem degradação no seu alcance volumétrico ou no campo amostral angular, otimizando a detecção perimetral em zonas complexas do veículo (Tong *et al.*, 2021).

Ademais, a transição para plataformas veiculares puramente elétricas impõe desafios severos no que tange à integridade dos sinais, dado o elevado índice de interferência eletromagnética (EMI) propagada pelos sistemas de propulsão de alta potência. Diante disso, foram propostos sistemas de sensoriamento ultrassônico

baseados em estruturas de fibra óptica com interferência multimodo (SMS), se mostrando uma alternativa viável, visto que sua natureza puramente óptica garante total imunidade eletromagnética. Além disso, essas arquiteturas baseadas em deslocamento de fase conseguem estender o limite operacional de leitura em ambiente aéreo para distâncias de até 7 metros com alta resolução, permitindo que a varredura de obstáculos atue de forma preditiva mesmo em cenários que demandem maior tempo de reação (Sun *et al.*, 2016).

5.3 Aplicações Práticas de Outros Sensores

5.3.1 Sensor de Proximidade

A aplicação mais comum dos sensores de proximidade de curto alcance na frota automotiva corrente, corresponde aos assistentes de estacionamento e manobra em marcha à ré. Conforme estruturado por Gowda *et al.* (2017), módulos de sensoriamento instalados estrategicamente nas extremidades dos para-choques realizam leituras contínuas da distância geométrica entre o veículo e obstáculos estáticos ou dinâmicos ao redor. Os dados coletados por esses transdutores periféricos são processados em tempo real pela eletrônica embarcada para alimentar interfaces gráficas internas e alertas acústicos de frequência variável, fornecendo ao condutor ou ao algoritmo de estacionamento autônomo o mapeamento de baliza seguro.

Para além das aplicações clássicas de monitoramento mecânico, os sensores de proximidade baseados em Magnetorresistência Anisotrópica (AMR) exercem papel estratégico nos sistemas de mitigação de colisões iminentes (*pre-crash detection*) e assistência de ponto cego. Como elucidam Taghvaeyan e Rajamani (2012), esses dispositivos operam medindo as perturbações locais causadas no campo magnético terrestre devido à aproximação da massa ferromagnética de outro automóvel. Em veículos comerciais equipados com Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor (ADAS), o cálculo matemático rápido dessa variação de proximidade espacial permite que a unidade de controle veicular estime a velocidade e posição relativa do obstáculo adjacente, acionando mecanismos de proteção ativa

(pré-carga do sistema de frenagem hidráulica), antes mesmo que ocorra o contato físico.

No que tange ao gerenciamento de tráfego no longo prazo e condução semiautônoma, os algoritmos de controle de formação interveicular dependem diretamente de medições cíclicas de proximidade. O princípio de controle descentralizado em malha fechada baseado em leituras intermitentes de sensores de proximidade (como ultrassom e visão) permite que uma cadeia de veículos seguidores ajuste dinamicamente suas velocidades e acelerações em relação a um veículo líder (Mwaffo et al., 2021). Essa metodologia matemática é a base operacional dos sistemas comerciais de Piloto Automático Adaptativo (ACC) com funcionalidade *Stop-and-Go*, nos quais o automóvel modula ativamente a distância de segurança em relação ao tráfego à frente sem demandar a intervenção do condutor, operando com estabilidade mesmo sob dados de leitura ruidosos.

5.3.2 Sensor Óptico

A utilização de sensores ópticos para a determinação da cinemática veicular é uma realidade consolidada na indústria automotiva por meio dos *encoders* ópticos de rotação. Como demonstrado por Lin et al. (2008), a fusão de dados entre receptores de posicionamento global (GPS) e *encoders* ópticos locais atua de forma complementar para mitigar ruídos de leitura e garantir o rastreamento posicional preciso do veículo. Em plataformas comerciais existentes, esse princípio é rotineiramente empregado na odometria de roda para subsidiar sistemas de segurança ativa, como o freio ABS e o controle eletrônico de estabilidade (ESP), além de garantir a continuidade da navegação por posicionamento estimado (*dead reckoning*) em cenários de severa atenuação ou perda do sinal de satélite.

Outra aplicação madura da tecnologia óptica no ecossistema automotivo reside no monitoramento ambiental e no controle de combustão *in-situ*. De acordo com Dooly et al. (2008), o emprego de sensores de fibra óptica operantes no espectro do infravermelho médio viabiliza a detecção quantitativa direta de dióxido de carbono no fluxo dinâmico de gases de escape de automóveis convencionais. Essa abordagem de espectroscopia óptica em tempo real substitui análises laboratoriais lentas e é convertida, nos veículos atuais, em ferramentas de diagnóstico a bordo

(OBD) que interagem com a unidade de gerenciamento eletrônico do motor para otimizar a mistura ar-combustível e mitigar a pegada de carbono do veículo.

Embora os sensores de fluxo óptico (*optical flow*) encontrem ampla validação no controle de posicionamento e estabilização de veículos aéreos não tripulados em ambientes fechados, o transplante dessa tecnologia para o plano terrestre oferece subsídios valiosos aos veículos autônomos. Em aplicações automotivas existentes, sensores de fluxo óptico instalados na parte inferior do chassi e direcionados ao pavimento realizam o rastreamento vetorial contínuo da textura do asfalto. Esse método permite calcular a velocidade linear e o deslocamento lateral real do veículo de forma independente, neutralizando as margens de erro decorrentes da patinação, do escorregamento dos pneus ou de deformações dinâmicas da banda de rodagem que comumente afetam os sensores mecânicos e magnéticos de rotação (Tsai *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2023).

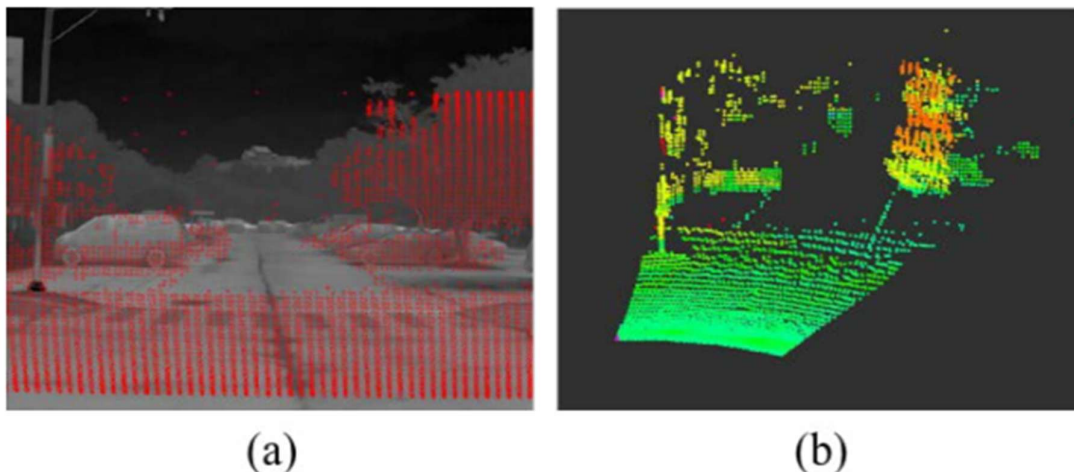
5.3.3 Câmera Térmica com LiDAR

Um dos maiores desafios dos veículos autônomos é a perda de visibilidade por fatores climáticos ou iluminação extrema. Por exemplo, a presença de neblina incapacita completamente a leitura de uma câmera comum e sensores ópticos, pois a luz dos faróis dos veículos reflete de volta com a neblina e ilumina o vidro, cegando até mesmo o condutor do veículo.

A integração de câmeras infravermelhas térmicas com sistemas LiDAR surge como uma solução para os limites de percepção de câmeras e sensores ópticos baseados em espectro visível (RGB). Conforme apontam Choi e Kim (2021), a aplicação de algoritmos de calibração extrínseca entre esses dois dispositivos permite a sobreposição precisa de dados tridimensionais e assinaturas térmicas, isso é demonstrado na Figura 30.

Esse arranjo de fusão de sensores confere ao veículo autônomo a capacidade de identificar alvos com alta confiabilidade sob condições ambientais adversas, tais como fumaça, neblina densa e episódios de ofuscamento por luz solar direta ou faróis em sentido contrário.

Figura 30 – (a) LiDAR Aplicado na Imagem de uma Câmera Térmica e (b) Reconstrução dos Pontos Térmicos.

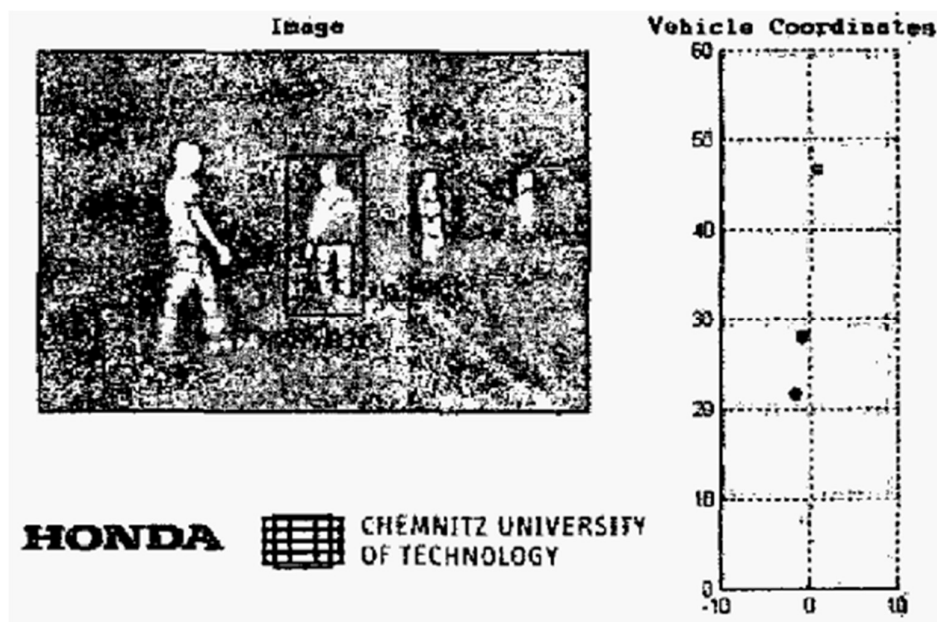


Fonte: Choi e Kim (2021).

Para além da simples detecção de barreiras físicas, o sensoramento no espectro do infravermelho distante (FIR) é muito eficaz na detecção de pedestres. Fardi *et al.* (2005) demonstram que o imageamento térmico, quando combinado a varredores a laser e processado por estruturas de filtros de Kalman em paralelo, viabiliza o rastreamento em tempo real da cinemática e silhueta de pedestres. Essa arquitetura multimodal garante uma resposta preditiva rápida do sistema de direção autônoma em áreas urbanas de alta densidade.

A Figura 31 elucida o resultado do projeto feito com cooperação da HONDA, chamado “*Multi sensor system for the detection and localization of pedestrians in a road environment*”.

Figura 31 - Resultado do Rastreamento de Pedestres



Fonte: Fardi et al. (2005).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do estudo e das pesquisas desenvolvidas ao longo deste trabalho, confirma-se que a evolução dos sistemas de direção automotiva está intrinsecamente atrelada à eletrificação, ao sensoriamento e à busca por eficiência energética.

O sistema de direção puramente elétrico (EPS) consolida-se como a tecnologia mais eficiente e promissora da atualidade, uma vez que elimina as perdas parasitas causadas pelas bombas mecânicas dos sistemas hidráulicos tradicionais, já que só se demanda potência da bateria apenas quando há esforço real de esterçamento.

Consequentemente, a tendência de mercado aponta para a migração massiva da frota global para arquiteturas elétricas. Contudo, sempre existirão cenários específicos de exceção onde a direção hidráulica ou eletro-hidráulica ainda se manifesta vantajosa, particularmente em veículos comerciais pesados ou utilitários de grande porte, nos quais a demanda por torque de esterçamento instantâneo e robustez mecânica severa são mais importantes do que a capacidade nominal de dissipação térmica e torque dos motores elétricos compactos atualmente disponíveis.

Paralelamente, a consolidação da direção autônoma exige um aparato de percepção perimetral cuja resposta técnica reside no equilíbrio do arranjo sensorial. Conforme verificado na pesquisa, cada tipologia de sensor possui virtudes, desvantagens e limitações físicas particulares quando operada de forma isolada; como a vulnerabilidade acústica do ultrassom em longas distâncias, a sensibilidade climática do infravermelho e os limites de amostragem discreta de sensores ópticos e de proximidade.

Diante disso, a técnica de fusão de sensores (*sensor fusion*) desponta como a abordagem ideal para que um veículo autônomo minimize falhas catastróficas, sobrepondo os pontos fortes de uma tecnologia para compensar as lacunas da outra. Em contrapartida, há de se ponderar que o emprego indiscriminado de múltiplos sensores pode redundar em um sistema computacional demasiado complexo, cujo processamento de dados em tempo real exige alta capacidade de hardware e internet, elevando não só o custo de manufatura como também a necessidade maior de infraestrutura local; inviabilizando a produção em massa voltada ao mercado consumidor de veículos comerciais populares.

Essa engenharia de sensoriamento e controle longitudinal e lateral é o que dita a transição progressiva entre os diferentes níveis de automação veicular preconizados pela norma SAE.

À medida que a indústria automotiva avança dos níveis iniciais de assistência ao condutor (Níveis 1 e 2), onde as tecnologias agem de forma puramente reativa e sob supervisão humana ininterrupta, em direção à automação condicional e total (Níveis 3, 4 e 5), a exigência por redundância de hardware e algoritmos preditivos torna-se mandatória.

Assim, os resultados deste estudo demonstram que alcançar os patamares elevados de autonomia não depende exclusivamente do refinamento mecânico dos automóveis elétricos, mas sim da maturidade e da velocidade de processamento das malhas digitais que interpretam o ambiente, delegando progressivamente a responsabilidade jurídica e operacional da condução ao sistema computacional de bordo.

Por fim, o experimento prático realizado com a plataforma Arduino UNO e a integração do sensor ultrassônico HC-SR04 ao motor de passo 28BYJ-48 cumpriu seu papel didático e analítico, simulando com fidelidade a lógica de varredura ativa e telemetria espacial de curto alcance empregada em sistemas de assistência de estacionamento automotivo existentes. Embora restrito às limitações inerentes de um protótipo de bancada, o ensaio prático e a interface gráfica desenvolvida em *Processing* permitiram validar fisicamente os conceitos de tempo de voo acústico e processamento serial de dados cartesianos. Esse exercício abre precedentes para o estudo de aplicações mais robustas de sensoriamento, evidenciando que os fundamentos de automação testados em escala reduzida formam a base técnica para a implementação das tecnologias de vanguarda que guiarão o futuro da mobilidade elétrica e autônoma.

Agradecimentos:

Este trabalho foi financiado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do projeto CELESC/IFSC - "Converte II: Inserção de veículos elétricos na frota pública através da conversão de veículos comerciais leves" - convênio nº PD-05697-0124/2024. O autor agradece o apoio do Programa de P&D da

ANEEL e da concessionária de energia CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina) pelo suporte ao projeto de pesquisa e desenvolvimento denominado Converte II, do qual participei como aluno/pesquisador.

7 REFERÊNCIAS

ALIEXPRESS. **Sensor de ângulo do volante, bobina Torque, acessórios do carro, BYD S6, M6.** Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/i/1005005105729348.html?gatewayAdapt=glo2bra>. Acesso em: 15 jul. 2024.

ALTAF, Muhammad Adeel *et al.* **Usage of IR Sensors in the HVAC Systems, Vehicle and Manufacturing Industries: A Review.** 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9754547>. Acesso em: 23 set. 2025.

ARDUINO PORTUGAL. **Como criar um Radar com o Arduino? [Video].** 2017. Disponível em: <https://www.arduinoportugal.pt/criar-um-radar-arduino-video/>. Acesso em: 10 mai. 2026.

AUTOMAISTV. Disponível em: <https://www.automaistv.com.br/>. Acesso em: 15 jul. 2026.

BACHANI, Mamta *et al.* **Performance Analysis of Proximity and Light Sensors for Smart Parking.** 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916302332>. Acesso em: 16 jul. 2024.

BALLUFF. Disponível em: <https://www.balluff.com>. Acesso em: 01 nov. 2025.

BARTNIK, Nikodem. **28BYJ-48 stepper motor and ULN2003 Arduino (Quick tutorial for beginners).** YouTube, 02 de junho de 2018. 4min28s. Disponível em: <https://youtu.be/avrdDZD7qEQ?si=VI8BTwc-HDiRdu3g>. Acesso em: 10 mai. 2026.

BASU, Aviru K. *et al.* **Overview of Electric Vehicles (EVs) and EV Sensors.** 2018. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-3290-6_7. Acesso em: 16 jul. 2024.

BRINO ROBÓTICA EDUCACIONAL. **O que é STEAM? | Metodologia Maker |.** YouTube, 06 de maio de 2021. 5min37s. Disponível em: <https://youtu.be/9IVxOTuRVBk?si=dLJAf8ZHhdMuud7c>. Acesso em: 21 ago. 2024.

BRUNNER, Sina. **Layout of Steering Systems.** Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-05449-0_8. Acesso em: 15 jul. 2024.

CARS. **Which Cars Have Head-Up Displays for 2021?.** Disponível em: <https://www.cars.com/articles/which-cars-have-head-up-displays-for-2021-451262/>. Acesso em: 09 set. 2025.

CHENG, Anyu *et al.* **A Review of Sensor Applications in Electric Vehicle Thermal Management Systems.** 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/372114326_A_Review_of_Sensor_Applications_in_Electric_Vehicle_Thermal_Management_Systems. Acesso em: 23 set. 2025.

CHOI, Ji Dong; KIM, Min Young. **A Sensor Fusion System with Thermal Infrared Camera and LiDAR for Autonomous Vehicles: Its Calibration and Application**. 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9528609>. Acesso em: 19 mai. 2026.

CUSICK, Stephen K. *et al.* **Commercial Aviation Safety, Sixth Edition**. 2005. Disponível em: <https://www.abul.org.br/biblioteca/79.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2024.

DING, Shengxuan *et al.* **Exploratory analysis of injury severity under different levels of 2 driving automation (SAE Levels 2 and 4) using multi-source data**. 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2303.17788>. Acesso em: 04 set. 2025.

DOOLY, Gerard *et al.* **In-situ monitoring of Carbon Dioxide Emissions from a Diesel Automobile using a Mid-Infrared Optical Fibre Based Point Sensor**. 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4547355>. Acesso em: 19 mai. 2026.

D S AUTO. **Hydraulic Power Steering: What it is and How it Works**. 2018. Disponível em: <https://dsauto.com.my/en/2018/11/27/hydraulic-power-steering-explained/>. Acesso em: 08 ago. 2024.

DUNN, Patrick F. **Fundamentals of Sensors for Engineering and Science**. Indiana: University of Notre Dame, 2011.

FARDI, Basel *et al.* **Shape and Motion -based Pedestrian Detection in Infrared Images: A Multi Sensor Approach**. 2005. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1505071>. Acesso em: 19 mai. 2026.

FAREJ, Ziyad; HAMID, Amal. **Sensor Fusion for Blind Cane Navigation: A Comparative Study of LiDAR and Ultrasonic Sensors in Obstacle Detection and Avoidance**. 2025. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11258119>. Acesso em: 19 mai. 2026.

GAEDKE, Alexander *et al.* **Electric Power Steering Systems**. Suíça: Springer International Publishing Switzerland, 2017.

GERBER, Mathias *et al.* **A human factors perspective on how to keep SAE Level 3 conditional automated driving safe**. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10111-023-00717-0>. Acesso em: 03 set. 2025.

GOMES, Eduardo. **Mechanical Stress Analysis Of A Baja Sae Steering System Tie Rod Using Strain Gages_ Bachelor Thesis In Portuguese**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320386294_MECHANICAL_STRESS_ANALYSIS_OF_A_BAJA_SAE_STEERING_SYSTEM_TIE_ROD_USING_STRAIN_GAGES_Bachelor_thesis_in_Portuguese/figures?lo=1. Acesso em: 06 maio. 2024.

GOWDA, Mallikarjuna *et al.* **Design and Implementation of Real Time Wireless System for Vehicle Safety and Vehicle to Vehicle Communication**. 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8284527>. Acesso em: 19 mai. 2026.

HOPKINS, Debbie; SCHWANEN, Tim. **Talking about automated vehicles: What do levels of automation do?**. 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X20312914>. Acesso em: 25 ago. 2025.

HOLT, Daniel J. **Electric Steering: A Revolution in Steering Technology**. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2002.

INAGAKI, Toshiyuki; SHERIDAN, Thomas B.. **A critique of the SAE conditional driving automation definition, and analyses of options for improvement**. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10111-018-0471-5>. Acesso em: 25 ago. 2025.

KNOOP, Victor L. *et al.* **Platoon of SAE Level-2 Automated Vehicles on Public Roads: Setup, Traffic Interactions, and Stability**. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332945012_Platoon_of_SAE_Level-2_Automated_Vehicles_on_Public_Roads_Setup_Traffic_Interactions_and_Stability. Acesso em: 25 ago. 2025.

LEE, Jang Hyun *et al.* **Analysis of driver's EEG given take-over alarm in SAE Level 3 automated driving**. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics9111790>. Acesso em: 03 set. 2025.

LEE, Sangwon *et al.* **Intelligent parking lot application using wireless sensor networks**. 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4543911>. Acesso em: 16 jul. 2024.

LESICS. **Understanding your Car's Steering & Power Steering !**. YouTube, 31 de outubro de 2018. 7min6s. Disponível em: <https://youtu.be/em1O8mz7sF0?si=hxbh69jWenmhDKN->. Acesso em: 06 maio. 2024.

LI, Xiang *et al.* **Unmanned Aerial Vehicle Position Estimation Augmentation Using Optical Flow Sensor**. 2023. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10132415>. Acesso em: 19 mai. 2026.

LIN, Hu *et al.* **Global Positioning of Off-Road Vehicles by Sensor Fusion for Precision Agriculture**. 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4594002>. Acesso em: 19 mai. 2026.

LOEWENSTEIN, George. **Hot-Cold Empathy Gap and Medical Decision Making**. 2005. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16045419/>. Acesso em: 11 abr. 2024.

MBUSA. **Drive Pilot**. 2025. Disponível em: <https://www.mbusa.com/en/owners/manuals/drive-pilot>. Acesso em: 03 set. 2025.

MERCEDES-BENZ. **Drive Pilot Support speed of up to 95 km/h on German motorways**. 2025. Disponível em: <https://group.mercedes-benz.com/innovations/product-innovation/autonomous-driving/drive-pilot-95-kmh.html>. Acesso em: 03 set. 2025.

MCGILL, Nigel. **Teslas Avoiding Accidents Compilation**. YouTube, 11 de junho de 2020. 6min40s. Disponível em: <https://youtu.be/KHvLFujWBeg?si=0fgBTMwIpjH8Rhp>. Acesso em: 30 ago. 2025.

MWAFFO, Violet *et al.* **Pause-and-Go Self-Balancing Formation Control of Autonomous Vehicles Using Vision and Ultrasound Sensors.** 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9269367>. Acesso em: 19 mai. 2026.

PALUSZCZYSZYN, Daniel *et al.* **Toward Development of Ecosystem for Connected Autonomous Vehicles: Challenges of Modeling and Testing Sensors.** 2024. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10414184>. Acesso em: 16 jan. 2025.

POP, Liviu-Vasile *et al.* **Electric Power Steering Systems: The now and the future.** 2023. Disponível em: <https://www.todaysoftmag.com/article/3539/electric-power-steering-systems-the-now-and-the-future>. Acesso em: 08 ago. 2024.

SAE INTERNATIONAL. **(R) Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.** 2021. Disponível em: https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/. Acesso em: 16 jan. 2025.

SEKADAKIS, Michail; YANNIS, George. **Systematic review and meta-analysis of take-over time from automated driving at SAE levels 2 and 3 to manual control.** 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847825001238>. Acesso em: 03 set. 2025.

SERVO MOTORS ADJUST. **What is a resolver and how does it work?.** Disponível em: <https://www.servomotorsadjust.com/en/resolver/#:~:text=A%20resolver%20is%20an%20anal,og,mounted%20on%20the%20motor%20shaft>. Acesso em: 15 jul. 2024.

SHIN, Seungin *et al.* **Improving efficiency of ultrasonic distance sensors using pulse interval modulation.** 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7808766>. Acesso em: 19 mai. 2026.

SOUDERS, Dustin; AGRAWAL, Rohan; PEETA, Sathya. **Communications and driver monitoring aids for SAE Level 3 automated driving systems. Center for Connected and Automated Transportation (CCAT) Report.** 2021. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/59142>. Acesso em: 03 set. 2025.

SUN, An *et al.* **Multimode Interference-Based Fiber-Optic Ultrasonic Sensor for Non-Contact Displacement Measurement.** 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7478020>. Acesso em: 19 mai. 2026.

TAGHVAEEYAN, Saber; RAJAMANI, Rajesh. **The Development of Vehicle Position Estimation Algorithms Based on the Use of AMR Sensors.** 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6280668>. Acesso em: 19 mai. 2026.

TEOH, Eric R. **What's in a name? Drivers' perceptions of the use of five SAE Level 2 driving automation systems.** 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022437519306577>. Acesso em: 25 ago. 2025.

THAKUR, Rajeev. **Infrared Sensors for Autonomous Vehicles.** 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.70577>. Acesso em: 23 set. 2025.

THE WHEEL NETWORK. **Expand 2021 Honda Legend EX – Honda SENSING Elite safety system demonstration**. YouTube, 04 de março de 2021. 2min39s. Disponível em: https://youtu.be/7eYYwU3ETnI?si=Uam0k4a33q_IkURh. Acesso em: 15 jul. 2026.

TICHÝ, Tomáš *et al.* **Thermal Feature Detection of Vehicle Categories in the Urban Area**. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6873>. Acesso em: 23 set. 2025.

TONG, Zhihao *et al.* **A Flexible Ultrasonic Sensor Based on Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers (pMUTs)**. 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9567942>. Acesso em: 19 mai. 2026.

TSAI, Shang-En *et al.* **Optical Flow Sensor Integrated Navigation System for Quadrotor in GPS-Denied Environment**. 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7738795>. Acesso em: 19 mai. 2026.

UOL. **Futuro sem motorista? 'Loucura' em carros autônomos alimenta a discussão**. 2026. Disponível em: <https://www.uol.com.br/carros/noticias/redacao/2026/05/06/futuro-sem-motorista-loucura-em-carros-autonomos-alimenta-a-discussao.ghml>. Acesso em: 15 jul. 2026.

USINAINFO. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/>. Acesso em: 26 mai. 2026.