

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

NATHAN VIEIRA AZEVEDO

Inteligência Artificial em Veículos Autônomos: Perspectivas, Riscos e
Transformações no Futuro da Mobilidade

SÃO PAULO

2025

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

NATHAN VIEIRA AZEVEDO

Inteligência Artificial em Veículos Autônomos: Perspectivas, Riscos e
Transformações no Futuro da Mobilidade

Trabalho submetido como exigência parcial para
a obtenção do Grau de Tecnólogo em Análise e
Desenvolvimento de Sistemas

Orientadora: Professora Mestre Grace Anne
Pontes Borges

SÃO PAULO

2025

“When it comes to commitment, effort, dedication, there is no middle ground. Either you do something well or you don't do it at all.”

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem-feita ou não faz”

- Ayrton Senna

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria para enfrentar os desafios ao longo da caminhada.

Aos meus pais e à minha namorada, pelo amor, apoio constante e paciência durante todo o processo. [OBJ]

À minha orientadora, Prof.^a Grace, pela disponibilidade, orientação, observações e pela confiança no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da inteligência artificial no desenvolvimento e na consolidação dos veículos autônomos (VAs), explorando suas principais aplicações, benefícios, desafios e perspectivas futuras na mobilidade urbana. Foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente, que inicialmente apresenta um panorama histórico da automação veicular e das tecnologias embarcadas, como sensores, conectividade e sistemas de navegação. Em seguida, são detalhadas as principais técnicas de inteligência artificial utilizadas nos VAs, como aprendizado de máquina, visão computacional e redes neurais, evidenciando como cada uma contribui para a percepção do ambiente e a tomada de decisões em tempo real. O estudo também discute os principais benefícios da adoção dos VAs, como a redução de acidentes, inclusão social, eficiência logística e sustentabilidade ambiental, assim como os desafios enfrentados, como a falta de infraestrutura adequada, questões legais, segurança cibernética e dilemas éticos. Conclui-se que os avanços contínuos em IA, computação de borda e novos modelos de mobilidade, como o MaaS, moldarão significativamente o futuro dos VAs, trazendo impactos socioeconômicos de larga escala e exigindo atenção para os desafios persistentes.

Palavras-chave: Veículos Autônomos. Inteligência Artificial. Aprendizado de Máquina. Visão Computacional. Mobilidade Urbana.

ABSTRACT

This study aims to analyze the impact of artificial intelligence on the development and consolidation of autonomous vehicles (AVs), exploring their main applications, benefits, challenges, and future perspectives in urban mobility. To this end, a literature review was conducted, which initially presents a historical overview of vehicle automation and embedded technologies such as sensors, connectivity, and navigation systems. Subsequently, the main artificial intelligence techniques used in AVs, such as machine learning, computer vision, and neural networks, are detailed, highlighting how each contributes to environmental perception and real-time decision-making. The study also discusses the main benefits of AV adoption, including accident reduction, social inclusion, logistical efficiency, and environmental sustainability, as well as the challenges faced, such as inadequate infrastructure, legal issues, cybersecurity, and ethical dilemmas. It is concluded that continuous advancements in AI, edge computing, and new mobility models like MaaS will significantly shape the future of AVs, bringing large-scale socioeconomic impacts and demanding attention to persistent challenges.

Keywords: Autonomous Vehicles. Artificial Intelligence. Machine Learning. Computer Vision. Urban Mobility.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de automação SAE.....	27
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esboço da carroça autônoma de Da Vinci	17
Figura 2 - Carro movido a ondas de rádio de Houdina.....	18
Figura 3 - Shakey, o primeiro robô móvel com IA.....	19
Figura 4 - VaMoRs de Ernst Dickmanns.....	20
Figura 5 - Stanley, vencedor do DARPA Grand Challenge de 2005	21
Figura 6 - Navia, o primeiro VA comercializado, desenvolvido pela Induct	22
Figura 7 - Ultra, taxi-robô usado no Aeroporto de Londres	23
Figura 8 - Passeio dos fundadores da Google no Pribot.....	24
Figura 9 - Veículo autônomo da UFES	25
Figura 10 - Veículo autônomo da USP	26
Figura 12 - Protótipo da empresa Zoox.....	29
Figura 13 - Esquema de sensores dos VAs	31
Figura 14 - Exemplo do Scan via Radar utilizado pelo Waymo	32
Figura 15 - Exemplo de mapeamento LiDAR utilizado no Waymo	33
Figura 16 - Exemplo do uso de câmeras no Waymo.....	35
Figura 17 - Esquema do funcionamento do GPS	36
Figura 18 - Exemplo do computador de bordo embutido Waymo	37
Figura 19 - Último VA da Waymo.....	39
Figura 20 - Robobus da Baidu.....	40
Figura 21 - VA RT6 da Baidu.....	41
Figura 22 - Tesla Model S.....	42
Figura 23 - Carro bidirecional da Zoox	44
Figura 24 - Fluxo de trabalho Aprendizado de Máquina	45
Figura 25 - Modelo de Rede Neural Artificial com múltiplas camadas.....	48
Figura 26 - Exemplo de separação de dados pelo hiperplano	48
Figura 27 - Classificação de um objeto ainda não rotulado usando k-NN	49
Figura 28 - K-means com k=2	49
Figura 29 - Exemplo de detecção com o Faster R-CNN	51
Figura 30 - Exemplo da detecção do YOLO.....	52
Figura 31 - Exemplo de detecção com o SSD.....	53
Figura 32 - Exemplo de detecção com o RetinaNet.....	53

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CNN – Convolutional Neural Network

CPU – Central Processor Unit

DARPA - Defense Advanced Research Projects Agency

FIR – Far Infra-red

GPS – Global Positioning System

GPU – Graphics Processing Unit

IA – Inteligência Artificial

IMU – Inertial Measurement Unit

KAN – Kolmogorov–Arnold Networks

LiDAR - Light Detection and Ranging

LSTM – Long Short-Term Memory

MaaS – Mobility as a Service

MLP – Multi-Layer Perceptron

R-CNN - Region-based Convolutional Neural Network

RNA – Redes Neurais Artificiais

RNN – Redes Neurais Recorrentes

SAE - Society of Automotive Engineers

SRI – Stanford Research Institute

SSD - Single Shot MultiBox Detector

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

USP – Universidade de São Paulo

VA – Veículo Autônomo

VaaS – Vehicle as a Service

YOLO – You Only Look Once

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Hipóteses	14
1.2. Objetivos	14
1.3. Justificativa	14
1.4. Metodologia	14
2. VEÍCULOS AUTÔNOMOS	16
2.1. Breve Histórico dos Veículos Autônomos	17
2.2. Níveis de automação	26
2.3. Tecnologias presentes nos Veículos Autônomos	29
2.3.1. Sensores e Percepção do Ambiente	31
2.3.2. Navegação e Localização	35
2.3.3. Sistemas de computação embarcada e Inteligência Artificial	36
2.3.4. Conectividade Veicular (V2X)	37
2.4. Empresas envolvidas	38
2.4.1. Waymo	39
2.4.2. Baidu	40
2.4.3. Tesla	41
2.4.4. Aurora Innovation	42
2.4.5. Zoox (Amazon)	43
3. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	45
3.1. Aprendizado de Máquina	45
3.2. Visão Computacional	50
3.3. Redes Neurais	55
4. DESAFIOS E BENEFÍCIOS DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS	58
4.1. Benefícios	58
4.1.1. Redução dos Acidentes e aumento da segurança	58
4.1.2. Inclusão e acessibilidade	58

4.1.3.	Eficiência logística e redução de custos operacionais	59
4.1.4.	Sustentabilidade Ambiental.....	59
4.1.5.	Otimização de tempo e aumento de produtividade.....	59
4.2.	Desafios	60
4.2.1.	Infraestrutura urbana tecnológica	60
4.2.2.	Segurança cibernética	60
4.2.3.	Aceitação pública e confiança.....	61
4.2.4.	Aspectos legais e regulamentares	61
4.2.5.	Dilemas éticos e tomada de decisão	61
5.	O FUTURO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS	63
5.1.	Tendências tecnológicas futuras	63
5.2.	Modelos de mobilidade	64
5.3.	Aceitação dos VAs	64
5.4.	Impactos na sociedade e economia.....	65
	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

A evolução dos veículos autônomos (VAs) é uma das transformações mais promissoras e impactantes do setor automotivo e da mobilidade urbana. Impulsionados pela Inteligência Artificial, sensores de alta precisão, algoritmos de aprendizado de máquina e visão computacional, os VAs prometem aumentar a segurança do trânsito, reduzir acidentes e congestionamentos, além de otimizar o consumo de energia. No entanto, mesmo com grande potencial, sua implementação enfrenta alguns desafios que vão desde questões técnicas e regulatórias até dilemas éticos e riscos de segurança cibernética (De Abreu, et al., 2021).

A visão computacional desempenha um papel central na autonomia dos veículos, possibilitando a detecção de obstáculos, reconhecimento de sinais de trânsito e a interpretação do ambiente. Estudos indicam que a fusão de sensores, como câmeras, *LiDAR – Light Detection and Ranging (Detecção e alcance por luz)* e radares com algoritmos avançados de *deep learning*, melhoram significativamente a precisão na navegação e tomada de decisões. Um exemplo específico é o uso de visão computacional estéreo para estimativa de distâncias, técnica que utiliza mapas de disparidade para calcular profundidades e detectar objetos com alta precisão (Yu, 2024).

Mesmo com toda essa tecnologia citada impulsionando os VAs, eles ainda não são capazes de operar com total segurança em todas as situações de tráfego. Questões como segurança cibernética, falhas dos sensores e condições climáticas extremas representam um risco significativo para a adoção em larga escala. Além disso, desafios regulatórios e a aceitação pública da tecnologia também influenciam o ritmo de implementação e comercialização deles. (De Abreu, et al., 2021).

Dessa forma, este trabalho busca analisar como a inteligência artificial impacta o desenvolvimento, segurança e avanço dos veículos autônomos, avaliando tanto as oportunidades quanto os riscos envolvidos e analisando como será o futuro dos veículos autônomos conforme as inovações da inteligência artificial.

1.1. Hipóteses

A inteligência artificial é o principal fator propulsor no avanço tecnológico dos veículos autônomos, sendo responsável pela maior parte das inovações em navegação, tomada de decisão e segurança.

O funcionamento eficaz e seguro dos veículos autônomos depende fortemente da integração de sistemas baseados em IA, como aprendizado de máquina, visão computacional e redes neurais.

A evolução da inteligência artificial determinará o ritmo de adoção em larga escala dos veículos autônomos nas cidades.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar de que forma a inteligência artificial influencia no desenvolvimento, segurança e evolução dos veículos autônomos, avaliando sua importância na implementação dessa tecnologia e o impacto na mobilidade urbana.

1.3. Justificativa

O avanço dos veículos autônomos representa uma das maiores transformações na mobilidade urbana, apoiada pelo desenvolvimento da Inteligência Artificial e suas tecnologias, como aprendizado de máquina e visão computacional que proporcionam insumos significativos em segurança e eficiência deste meio de transporte. No entanto, a implementação dessa tecnologia enfrenta alguns desafios que precisam ser analisados para compreender sua viabilidade e impacto no futuro dessa tecnologia.

Diante desses fatos, ressalta-se a necessidade de investigar como a inteligência artificial influencia no desenvolvimento dos VAs e quais são os principais desafios para a adoção em larga escala. Ao avaliar as oportunidades e os desafios, busca-se fornecer uma visão crítica sobre o futuro dos VAs na mobilidade urbana, contribuindo para a compreensão dos impactos no setor automotivo e na sociedade.

1.4. Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho é a revisão bibliográfica. Assim é possível compreender as tecnologias e analisar, a partir dos artigos e obras relacionadas, como elas são abordadas, em qual ponto de avanço estão, quais são as oportunidades e

desafios enfrentados pelo setor automotivo e tecnológico que investem nos veículos autônomos.

2. VEÍCULOS AUTÔNOMOS

Esse segundo capítulo tem como objetivo apresentar o cenário atual e a história dos veículos autônomos na era atual, destacando sua evolução ao longo dos anos e explicando as tecnologias envolvidas em sua construção e destacando as empresas mais avançadas no mercado atual.

A indústria automobilística é um dos setores onde temos um maior nível de inovação e aplicação de tecnologia no mundo inteiro, atualmente a tecnologia está movimentando o setor está relacionada aos Veículos Autônomos, gerando diversos sistemas que auxiliam o condutor como assistência de direção, frenagem autônoma e outras assistências (Cantamessa, 2022).

É muito comum remeter a ideia de automação veicular à experimentos do século atual, porém essa inovação herda conceitos de séculos atrás como o esboço de Da Vinci para uma carroça autônoma e até mesmo veleiros com cordas que mantinham o curso de uma forma autônoma. Mesmo com toda essa herança, até alguns anos atrás não tínhamos tecnologias suficientes para desenvolver veículos com graus significativos de autonomia. Esse cenário começou a mudar com o avanço da computação e com a conectividades dessas tecnologias, permitindo que ideias e esboços de séculos atrás fossem se concretizar em décadas atuais (Revista Hsm Management, 2020) (Cantamessa, 2022).

Para compreender o grau de automação e os desafios envolvidos nessa evolução, é essencial recorrer à classificação proposta pela *SAE – Society of Automotive Engineers*, que define seis níveis de automação, variando desde o controle humano total (nível 0) até o veículo completamente autônomo (nível 5), que dispensa volante ou pedais (Sae International, 2019).

O funcionamento de um veículo autônomo depende da interação complexa entre diversas tecnologias embarcadas, como sensores *LiDAR*, radares, câmeras, *GPS*, sistemas de navegação inercial e, sobretudo, inteligência artificial. Esses elementos trabalham em conjunto para captar, interpretar e reagir ao ambiente em tempo real, permitindo decisões precisas durante o trajeto (Guizzo, 2011) (Zaparolli, 2022) (Telium Networks, 2025).

Atualmente, empresas como Waymo, Tesla, Uber e Baidu lideram os testes e aplicações comerciais dessa tecnologia, cada uma com estratégias diferentes. A Waymo, por exemplo, oferece um serviço de táxi autônomo em cidades dos Estados Unidos, como Phoenix e San Francisco, enquanto a Uber tem expandido seus testes com veículos autônomos no Texas utilizando seu próprio aplicativo (Waymo, 2019) (Skores, 2025).

Diante desse contexto, este capítulo tem como objetivo apresentar os principais aspectos relacionados aos veículos autônomos, dividindo-se nas seguintes seções: (2.1) a trajetória histórica da automação veicular; (2.2) os níveis de automação estabelecidos pela SAE; (2.3) as tecnologias envolvidas no funcionamento dos VAs; (2.4) os principais projetos e empresas que aquecem esse mercado.

2.1. Breve Histórico dos Veículos Autônomos

Podemos pensar que um carro ou veículo se deslocar sem interação humana seja algo recente, mas esse desejo vem de muito antes na história. Um dos primeiros registros de veículos autônomos é dedicado ao grande inventor Leonardo da Vinci, que em 1478, fez um esboço de carro ou carroça, (Fig. 1), movido por um sistema complexo de molas e engrenagens que, em teoria, permitia sua locomoção autônoma, ou seja, sem pessoas empurrando ou puxando. Esse projeto de Da Vinci não foi construído e testado por ele, só ficou no papel mesmo, mas é um dos primeiros incentivos aos veículos autônomos que temos registrado (Cantamessa, 2022).

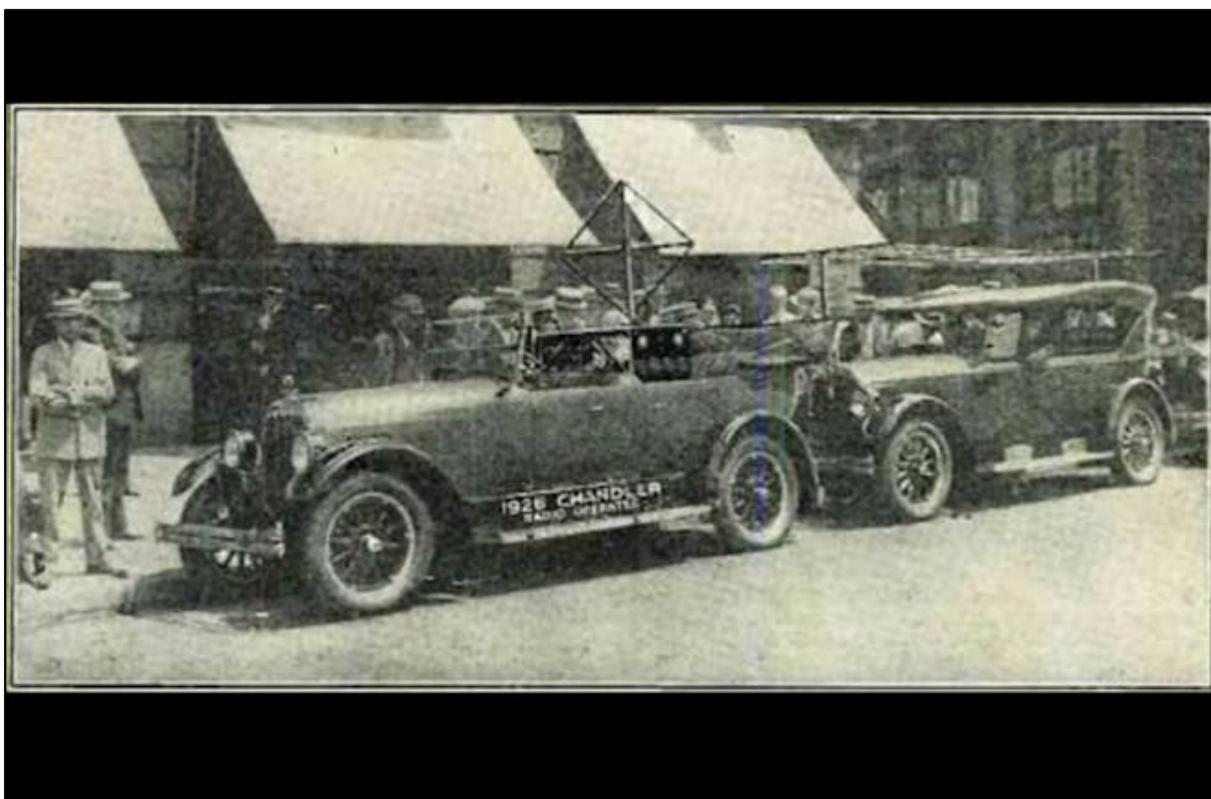
Figura 1 - Esboço da carroça autônoma de Da Vinci



Fonte: (Koifman, 2008)

Logo depois, em meados de 1926, um carro convencional percorreu a icônica *Broadway* sem motorista. O carro utilizado no experimento era um Chandler 1926 (Fig. 2) que estava equipado com uma antena transmissora e pequenos motores que controlavam a aceleração, frenagem, direção e buzina. O inventor Francis Houdina e sua equipe da *Houdina Radio Control* lideraram a exibição e eram os responsáveis pela pilotagem do veículo pelas ondas de rádio. O experimento foi bem-sucedido, porém acabou antes do previsto devido a uma colisão com um veículo de jornalistas que acompanhavam a demonstração (Weber, 2014) (Telium Networks, 2025).

Figura 2 - Carro movido a ondas de rádio de Houdina



Fonte: (Engelking, 2019)

Ainda no século XX, precisamente em 1939, durante a feira mundial de Nova Iorque, a General Motors apresentou um projeto chamado Futurama onde seu objetivo era criar rodovias inteligentes e veículos autônomos guiados por fios magnetizados nas rodovias (Weber, 2014). Assim como Da Vinci, esse projeto era uma proposta bem ambiciosa e inovadora, mas ela nunca saiu do papel devido aos custos de infraestrutura que exigia (Cantamessa, 2022).

No final da década de 1960, o robô chamado Shakey (Fig. 3) foi criado pela *SRI - Stanford Research Institute* - sendo considerado o primeiro robô móvel que utilizava técnicas de inteligência artificial e um conjunto de sensores para navegar pelo ambiente. Ele conseguia perceber e raciocinar o ambiente e era utilizado em tarefas de planejamento e localização de rotas e reorganização de objetos simples. Sua criação foi importante para dar um salto grande no “problema” do processamento de informação que era um grande desafio na época, desafio que foi parcialmente resolvido pela IA (Weber, 2014).

Figura 3 - Shakey, o primeiro robô móvel com IA



Fonte: (Sri, 2025)

O maior avanço visto entre a evolução dos veículos autônomos surgiu entre a década de 1980 e 1990, quando o professor Ernst Dickmanns conseguiu fazer uma van Mercedes (Fig. 4) ser conduzida de forma autônoma por vários quilômetros (Weber, 2014). Por esse motivo, Dickmanns é considerado o pai do veículo autônomo, devido a tecnologia e computação da época ele conseguiu realizar um feito extraordinário que serviu como pontapé inicial para outros pesquisadores realizarem modificações e aprimoramentos.

Figura 4 - VaMoRs de Ernst Dickmanns



Fonte: (Weber, 2014)

Em 2004, a *Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA* impulsionou a inovação dos veículos autônomos realizando três edições do *DARPA Grand Challenge*, uma competição que desafiava equipes desenvolver veículos 100% autônomos percorrerem trajetos complexos sem a intervenção humana. Na primeira edição não tivemos nenhum vencedor. No ano seguinte, o veículo Stanley, (Fig. 5), da universidade de Stanford, completou o percurso proposto e se destacou pela utilização de sensores e algoritmos avançados de tomada de decisão (Telium Networks, 2025). Já na terceira edição os veículos tiveram que realizar um percurso urbano, respeitando os sinais e regras de trânsito, nesta edição o campeão foi o veículo Boss da Universidade de *Carnegie Mellon* (Weber, 2014).

Figura 5 - Stanley, vencedor do DARPA Grand Challenge de 2005



Fonte: (Moura, 2018)

O primeiro veículo autônomo de uso comercial foi o Navia, (Fig. 6), projetado inicialmente para ambientes fechados com velocidade máxima de 30 km/h com capacidade para transportar oito passageiros (Weber, 2014) (Cantamessa, 2022). Foi amplamente utilizado em transporte em um campus de faculdade juntamente com o Ultra, (Fig. 7), um taxi-robô utilizado para transportar passageiros entre os terminais do aeroporto de *Heathrow* em Londres. Ambos utilizavam uma tecnologia de navegação baseada em sensores a laser e possuíam integração com dispositivos mobile como *smartphones* e *tablets* (Cantamessa, 2022).

Figura 6 - Navia, o primeiro VA comercializado, desenvolvido pela Induct



Fonte: (Weber, 2014)

Figura 7 - Ultra, taxi-robô usado no Aeroporto de Londres



Fonte: (Weber, 2014)

Em meados de 2008, um dos vencedores do *DARPA Grand Challenge*, Sebastian Thrun e outro integrante da equipe, Anthony Levandowski começaram a trabalhar em um projeto que eles chamavam de Pribot (Fig. 8). Esse projeto consistia em um Toyota Prius modificado que tinha que buscar pizza por conta própria. O sucesso do Pribot despertou o interesse da Google no campo tecnológico dos veículos autônomos, fazendo com que os criadores do Google desse um passeio com o Pribot e, posteriormente, implementassem essa tecnologia de veículos para mapear as ruas para usar no *Google Street View* (Weber, 2014) (Guizzo, 2011).

Figura 8 - Passeio dos fundadores da Google no Pribot



Fonte: (Weber, 2014)

Essa iniciativa foi um pontapé inicial para a Google criar seus veículos autônomos com um sistema de *LiDAR*, radares, câmeras e inteligência artificial, fazendo com que o carro da google fosse o primeiro a rodar legalmente em vias públicas nos Estados Unidos, marcando assim uma corrida tecnológica envolvendo a Tesla, Uber, Nvidia, Baidu e outras empresas.

A partir de 2015, a implementação dos veículos autônomos se intensificou muito em ambientes urbanos com testes de táxis autônomos feitos em cidades como *Phoenix* com a Uber, Pequim com a Baidu. Em 2023, a Waymo, empresa resultante na iniciativa da Google, lançou o *Waymo One*, um serviço de veículo autônomo por aplicativo, popularizando o conceito de *VaaS (Vehicle as a Service)*.

Apesar do Brasil não estar entre os países que lideram o desenvolvimento de veículos autônomos tivemos alguns avanços significativos que se originaram de projetos acadêmicos. Um dos marcos mais importantes ocorreu em 2017 com o projeto da Universidade Federal do Espírito Santo onde pesquisadores realizaram uma viagem de 74 km entre Vitória e Guarapari com um VA nacional (Fig. 9). O veículo era equipado com sensores, *GPS* e um sistema de visão computacional, percorrendo o percurso com supervisão humana, mas praticamente não foi necessário a intervenção humana (Machado, 2017).

Figura 9 - Veículo autônomo da UFES



Fonte: (Machado, 2017)

Além da UFES, outras instituições brasileiras vêm realizando pesquisas relacionadas à condução autônoma, como exemplo, podemos destacar o *Palio Weekend*, (Fig. 10), desenvolvido pela equipe da USP de São Carlos que andou pelas ruas da cidade.

Figura 10 - Veículo autônomo da USP



Fonte: (Oliveira, 2013)

2.2. Níveis de automação

Para entender o avanço dos VAs e o papel da inteligência artificial nesse processo, é fundamental compreendermos os níveis de automação que classificam o grau de independência dos sistemas de automação e o que o humano precisa fazer em cada nível. A padronização mais recente, (Fig. 11), aceita e disseminada é a *SAE J3016*, publicada pela Sociedade de Engenheiros Automotivos. Ela define que existem seis níveis de automação, indo do nível 0 até o nível 5, essa classificação é amplamente utilizada por montadoras, órgãos reguladores e centros de pesquisa por todo mundo.

Cada nível representa um estágio de automação que vai desde o controle total do humano, a níveis de assistência de condução até a autonomia total (Sae International, 2021).

Tabela 1 - Classificação de automação SAE

Nível SAE	Papel do condutor	Função do sistema	Funcionalidades
Nível 0 (Sem automação)	O condutor dirige o tempo todo, mesmo que existam alertas ou assistências momentâneas.	Apenas fornece alertas ou assistências limitadas.	Frenagem automática de emergência, alerta de ponto cego, aviso de saída de faixa.
Nível 1 (Assistência ao condutor)	O condutor supervisiona e deve estar pronto para reassumir o controle.	Auxilia uma função: direção ou aceleração/frenagem.	Centralização de faixa ou controle de cruzeiro adaptativo.
Nível 2 (Automação parcial)	O condutor ainda supervisiona e deve manter atenção constante.	Auxilia duas funções: direção e aceleração/frenagem.	Centralização de faixa e controle de cruzeiro adaptativo.
Nível 3 (Automação condicional)	O sistema dirige, mas o condutor deve assumir quando solicitado.	Executa todas as tarefas dentro de condições específicas.	Piloto automático para tráfego (em congestionamentos).
Nível 4 (Alta automação)	Nenhuma ação do condutor é necessária em áreas/condições definidas.	Dirige sozinho em regiões delimitadas.	Robotáxis em áreas urbanas específicas.
Nível 5 (Automação total)	Nenhum condutor necessário em nenhuma situação.	Totalmente autônomo, sem necessidade de volante ou pedais.	Opera em qualquer estrada, ambiente ou condição.

Fonte: (Sae International, 2021)

O nível 0 ou sem automação é um nível onde o humano tem total controle da direção, frenagem e aceleração, o sistema auxilia o condutor com avisos sonoros e visuais e, em alguns casos, um assistente de frenagem. Esse nível exige uma total atenção do condutor e a maioria dos carros em circulação tem alguma dessas funcionalidades como o Hyundai HB20 (Sae Brasil, 2019) (Sae International, 2021).

Já no próximo estágio de automação (nível 1) o carro pode realizar algumas funcionalidades sem o auxílio do condutor, como manutenção de aceleração, permanência de faixa etc. Porém o veículo só pode realizar uma funcionalidade por vez, um exemplo de veículo com essa funcionalidade é o Toyota Corolla com Controle de Cruzeiro Adaptativo, que é um sistema que verifica a velocidade do ambiente e regula a própria de acordo com o ritmo do ambiente (Sae Brasil, 2019) (Sae International, 2021).

No terceiro estágio de automação (nível 2) podemos considerar uma automação parcial onde o veículo pode controlar simultaneamente funcionalidades de aceleração, frenagem e direção, conseguindo se manter em faixas, frear e acelerar conforme necessário. Nesse estágio, o condutor ainda precisa supervisionar o sistema e ficar atento em caso de necessidade de assumir o controle novamente. Como exemplo de veículo, temos as funcionalidades dos veículos Tesla, com o *autopilot* e os veículos Volvo com o *Pilot Assist* (Sae Brasil, 2019) (Sae International, 2021).

No nível 3 temos um veículo que consegue assumir tarefas de direção e pode se guiar sozinho em congestionamentos e alguns contextos como clima bom e limpo, sem chuva ou neve por exemplo. Por esse motivo, o condutor tem que estar atento para assumir a direção em caso de necessidade. O primeiro veículo comercializado com essa funcionalidade foi o Honda Legend com o seu sistema de *Traffic Jam Pilot* (Sae Brasil, 2019) (Sae International, 2021).

Já no nível 4, o veículo é capaz de conduzir sem a necessidade do condutor em trechos específicos e pré-determinados, como rodovias etc. Nesse estágio, o veículo consegue solicitar o controle do usuário em caso de emergência, porém, caso o condutor não consiga atender, o veículo já tem a capacidade de reagir e tomar uma decisão por si mesmo. O primeiro modelo nível 4 foi desenvolvido na Alemanha pela Mercedes-Benz juntamente com o Bosch, o Waymo One da Google e o *Cruise Origin* da General Motors também conseguem realizar essas funcionalidades (Sae Brasil, 2019) (Sae International, 2021).

No nível 5, aqui sim teremos um carro 100% autônomo, onde dispensamos a necessidade do volante e pedais de aceleração e frenagem. O veículo é capaz de levar o usuário para qualquer lugar, virar esquinas, estacionar e funcionar em condições climáticas boas e ruins também. Atualmente não existe nenhum veículo comercial que seja 100% autônomo, porém empresas como a Zoox, (Fig. 12), Nuro, Uber possuem protótipos e realizam testes para aprimorar e chegar nesse nível de automação (Sae Brasil, 2019) (Sae International, 2021).

Figura 11 - Protótipo da empresa Zoox



Fonte: (Alexandre, 2018)

2.3. Tecnologias presentes nos Veículos Autônomos

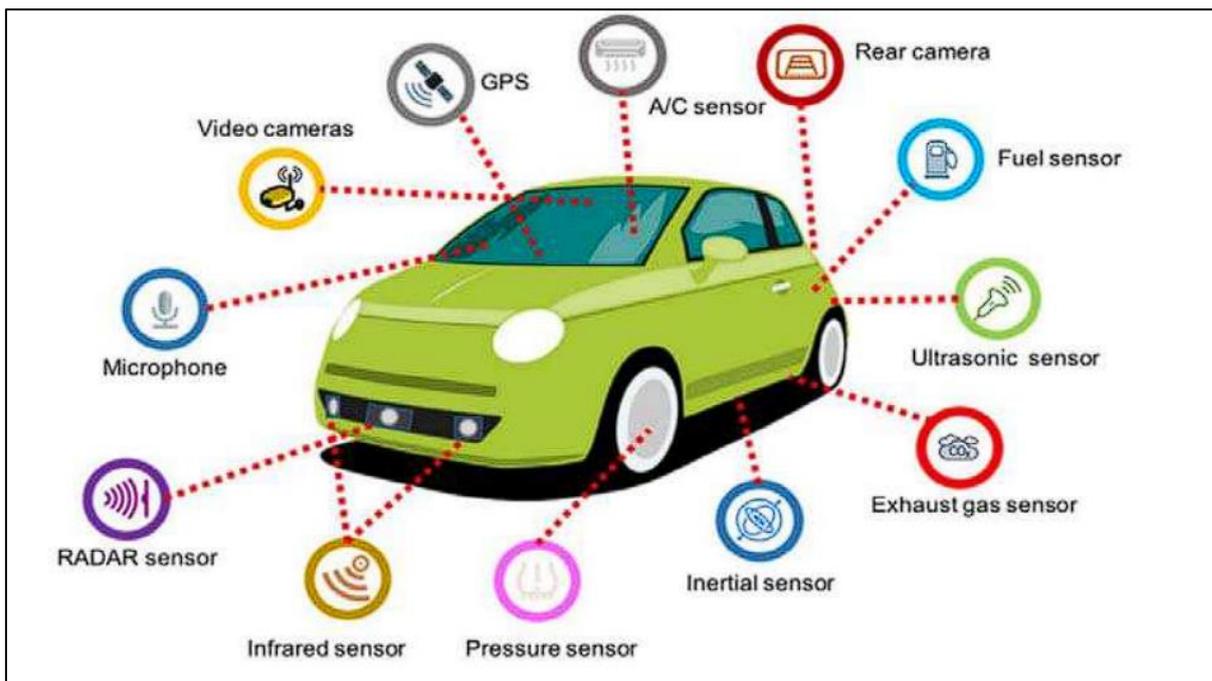
Um veículo autônomo só pode ser autônomo devido a integração de um complexo conjunto de tecnologias embarcadas que são responsáveis pelo processamento, percepção do ambiente, tomada de decisões e execução de ações em tempo real. A direção autônoma é composta por cinco sistemas funcionais que incluem: Localização, percepção, Planejamento, Controle e Gerenciamento do Sistema (Jo et al, 2014, apud Cantamessa, 2022).

O sistema de localização cuida e identifica qual a localização do veículo em coordenadas global, um *GPS* basicamente, enquanto o sistema de percepção vai analisar e ‘perceber’ o ambiente onde o VA está inserido, identificando pedestres, sinais de trânsito e outros elementos importantes. O sistema de planejamento usa os dados dos sistemas de percepção e de localização para traçar os caminhos de viagens e suas ações de direção, como mudança de faixa entre outros. O sistema de controle transforma o comportamento e as ações traçadas pelo sistema de planejamento em ações e comandos para manipulação do VA, já o sistema de gerenciamento do sistema irá monitorar todos os outros sistemas e fornecer relatórios e atualizações para o usuário via interface. Todos esses sistemas juntos têm a função de cooperar em conjunto para garantir a operação funcional totalmente autônoma (Kuuti et al, 2018, apud Cantamessa, 2022).

Geralmente, todos os sistemas robóticos funcionam com o design plano-ação. Por esse motivo, os VAs combinam vários tipos diferentes de sensores (Radar, *LiDAR*, câmeras) com navegação, processamento, conectividade para poder se locomover (Anderson et al., 2016 apud Cantamessa, 2022). A Waymo, por exemplo, utiliza essa combinação de sensores com inteligência artificial embarcada, conectividade em tempo real e alguns módulos de processamento redundante para garantir o funcionamento do seu VA em toda situação e ambiente (Waymo, 2019).

A arquitetura utilizada pela Waymo e outros VAs seguem o seguinte esquema (Fig. 13):

Figura 12 - Esquema de sensores dos VAs



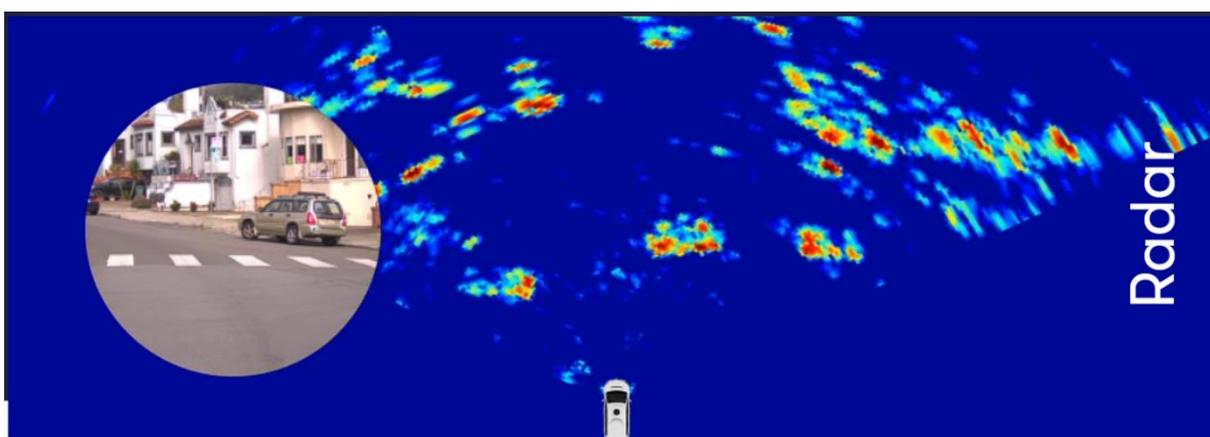
Fonte: (Ninkov; Cveticanin, 2022)

2.3.1. Sensores e Percepção do Ambiente

Os sensores e a percepção do ambiente são essenciais para os VAs, eles utilizam uma grande variedade de sensores que complementam uns aos outros. Eles são:

- **Radar:** é um dos sensores mais simples presente no VA. Sua função é localizar objetos como outros veículos e pedestres e determinar sua velocidade. Ele funciona com base nas ondas de rádio para realizar essas medições. Basicamente, tem um transmissor e um receptor. O transmissor envia as ondas que batem no objeto e voltam para o receptor, com essa ação podemos calcular a distância, velocidade e direção do objeto. Todos esses dados são úteis para os VAs acelerarem e frearem em resposta a mudanças no tráfego. Existem também três tipos de radares, os de longa distância que são usados para medir a distância de objetos e a velocidade dos outros veículos, os de média distância que servem para detectar objetos em um campo de visão mais amplo, como sistemas de alerta de tráfego cruzado e os de curta distância que são utilizados para a detecção de proximidade do veículo, por exemplo, em detecções de obstáculos ou em situações de estacionar o carro. Normalmente, os três tipos de radares estão presentes no VAs, os de curta distância para medir objetos entre 1 e 20 metros do veículo, os de média distância para objetos de 1 a 60 metros e os de longa distância para objetos a mais de 250 metros (Fig. 14) (Ninkov; Cveticanin, 2022).

Figura 13 - Exemplo do Scan via Radar utilizado pelo Waymo



Fonte: (Waymo, 2019)

- **LiDAR:** é o sensor mais recente desenvolvido e o mais crucial para os VAs. Ele que auxilia na detecção e para criar mapas 3D super detalhados (Fig. 15). Seu funcionamento se assemelha com o radar comum, porém utiliza pulsos de laser para fazer esse mapeamento. O *LiDAR* consiste em quatro elementos chave:
 - Um transmissor que solta pulsos de laser;
 - Um receptor que capta os ecos dos pulsos de laser
 - Um sistema de análise para processar os dados de entrada e computador/processador para criar uma visualização tridimensional ou bidimensional do ambiente em tempo real;

O transmissor emite os pulsos de laser e recebem eles pela reflexão com o objeto. Milhares de pulsos são transmitidos e enviados, fazendo com que o computador *onboard* grave todas essas interações e traduzindo isso em um mapeamento 3D preciso e em tempo real. O uso dessa tecnologia é essencial para os VAs, porém existem desvantagens como o encarecimento do produto, pois o *LiDAR* é uma tecnologia muito cara e ele não funciona corretamente em más condições climáticas (Ninkov; Cveticanin, 2022).

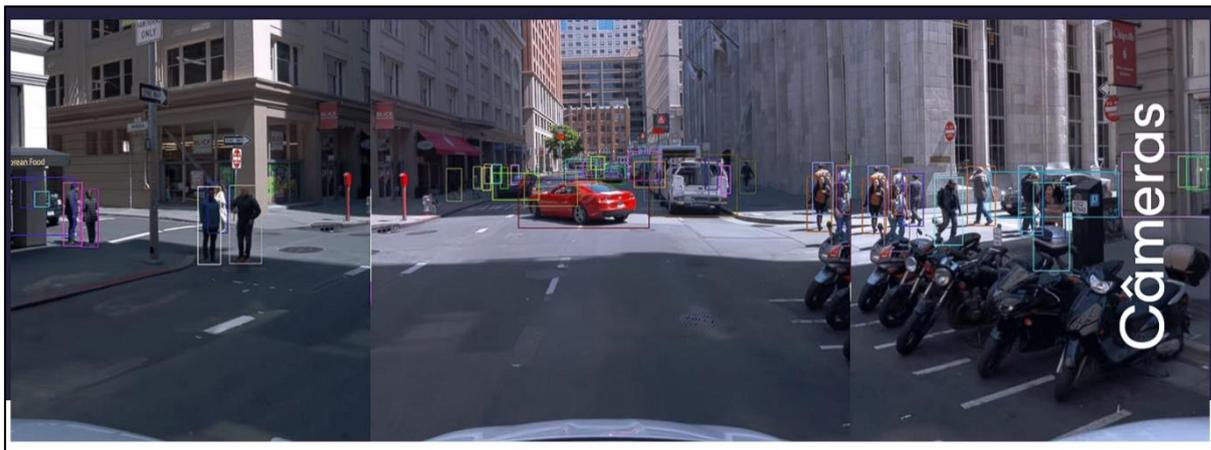
Figura 14 - Exemplo de mapeamento LiDAR utilizado no Waymo



Fonte: (Waymo, 2019)

- **Sensores Ultrassônicos:** são utilizados para a detecção de objetos próximos, ajudando os veículos a estacionarem, por exemplo. Esse sensor utiliza ondas curtas ultrassônicas que são refletidas com o impacto com o objeto, o sinal ecoado é recebido e processado. Ao contrário do *LiDAR*, os sensores ultrassônicos são capazes de funcionar em más condições climáticas, incluindo neblina e condições de pouca luz solar. Eles são mais baratos e algumas versões mais recentes têm resoluções e reconhecimento de objetos comparados ao *LiDAR*, porém eles não são capazes de identificar objetos pequenos ou muito rápidos, além de não poder ver cores (Ninkov; Cveticanin, 2022).
- **Câmeras:** os VAs são equipados com diversas câmeras, como câmeras de vídeo, térmicas e câmeras de infravermelho distante. As de vídeo são utilizadas na frente do veículo, que envia imagens e vídeos para a tela e para o processamento pela visão computacional (Fig. 16), as câmeras termais são aplicadas nas imagens para detectar e coletar o calor dos objetos e converte isso em vídeos para a análise das imagens por algoritmos de visão computacional para poder detectar e classificar os objetos. As câmeras *FIR* coletam sinais detectando a energia térmica emitida pelos objetos, obtendo um melhor desempenho do que outros sensores, uma vez que o comprimento da onda a ser detectada é maior do que a visibilidade da luz e, ao contrário dos outros sensores, as câmeras *FIR* não precisam da luz para detectar, segmentar e classificar os objetos e pedestres, fazendo que seu uso seja excelente em todas as condições climáticas (Ninkov; Cveticanin, 2022).

Figura 15 - Exemplo do uso de câmeras no Waymo

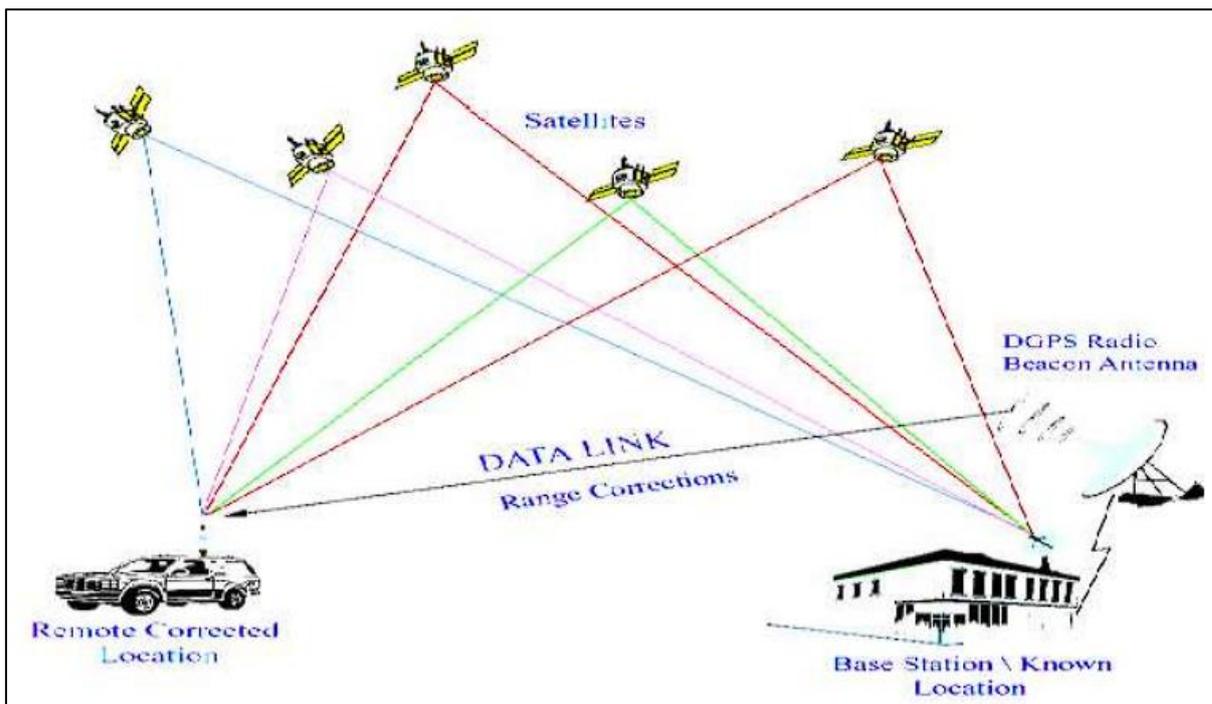


Fonte: (Waymo, 2019)

2.3.2. Navegação e Localização

- **GPS:** é um sistema de navegação via satélite que fornece a localização em qualquer ponto da terra independentemente de conexão via satélite ou via internet. Ele funciona a partir de, no mínimo, quatro sinais enviados via satélite, eles são recebidos via receptor e depois disso é calculada a sua própria posição e o horário local com base no tempo de propagação das ondas de rádio. Assim, cada satélite transmite dados sobre sua posição e tempo, fazendo com que o receptor estime a distância com base no atraso do sinal (Fig. 17). Entretanto, esse sistema depende de uma linha clara de traçado do transmissor e receptor, sem muitos obstáculos físicos, o que pode causar interferências em túneis e áreas com muitos edifícios ou montanhas (Ninkov; Cveticanin, 2022).

Figura 16 - Esquema do funcionamento do GPS



Fonte: (Ninkov; Cveticanin, 2022)

IMU: O *IMU* ou Unidade de Medição Inercial foi criada com o intuito de complementar as funcionalidades do *GPS* em situações em que houver falha no *GPS*. Ele funciona se baseando em sistemas micro eletromagnéticos que reúnem três sensores principais: o acelerômetro, giroscópio e magnetômetro. Esses componentes permitem que o veículo estime sua posição relativa, direção e aceleração com base em princípios da inércia e gravidade, independentemente do ambiente externo. O acelerômetro mede a aceleração em três eixos obtendo dados sobre a força exercida no veículo, o giroscópio detecta a taxa de rotação em três ângulos independentes no espaço e o magnetômetro funciona como uma bússola digital, dando orientação do veículo em relação ao campo magnético da Terra. Todos eles garantem a confiabilidade e continuidade da navegação em condições adversas, garantindo a estabilidade da condução autônoma do veículo (Ninkov; Cveticanin, 2022).

2.3.3. Sistemas de computação embarcada e Inteligência Artificial

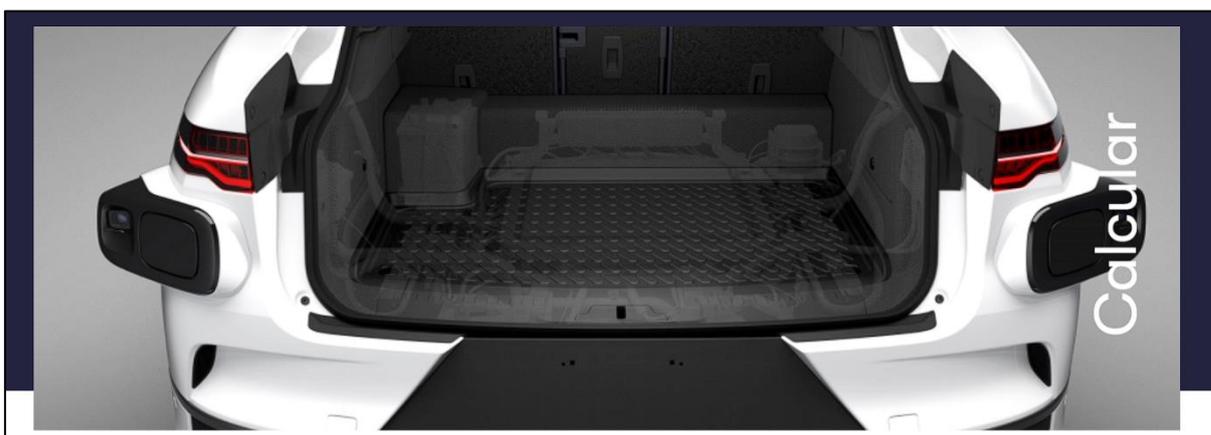
Basicamente, toda essa informação coletada é processada e interpretada pela IA embarcada nos VAs, elas são responsáveis por reconhecer objetos utilizando a visão computacional, previsão de comportamento dos objetos, planeja a rota e

toma as decisões durante a viagem, além das reações de emergência. Ela atua como o 'cérebro' do veículo (Cantamessa, 2022) (Waymo, 2019).

Um problema nos computadores de bordo dos VAs era seu tamanho, em testes antigos, como o da van Mercedes, o computador de bordo era enorme e tomava todo o espaço da van. Atualmente, com o advento de microcomputadores as empresas conseguiram reduzir o tamanho deixando-os praticamente minúsculos e o melhor, 'dentro' do veículo, porém sem utilizar espaço que o passageiro poderia utilizar, como o porta-malas (Fig. 18) (Weber, 2014).

Esse computador de bordo é a combinação de *CPUs* para realizar os cálculos e processamentos necessários e *GPUs* para o processamento de imagem, todos em níveis de servidores (Waymo, 2019).

Figura 17 - Exemplo do computador de bordo embutido Waymo



Fonte: (Waymo, 2019)

2.3.4. Conectividade Veicular (V2X)

Para perceber e processar o ambiente ao seu redor, os VAs precisam de recursos de conectividade com sistemas de comunicações internos e externos. Tendo isso em mente, a primeira etapa para o veículo autônomo deixar isso tudo pronto é estabelecer a comunicação *vehicle to everything (V2X)* ou seja, a conexão com os outros objetos do ambiente e a infraestrutura da estrada. A *V2X* é um tipo de conexão que utiliza a visão computacional, localização e técnicas de comunicação inteligente que consiste nestes componentes principais (Ninkov; Cveticanin, 2022):

- **Comunicação veículo para veículo (V2V):** O mais comum seria o Wi-Fi;

- **Comunicação veículo para Infraestrutura (V2I):** infraestrutura de tráfego, sinais da estrada, luzes de trânsito e linhas da pista;
- **Comunicação veículo para rede (V2N):** Comunicação usando sistemas móveis, tablets ou sistemas de navegação;
- **Comunicação veículo para grid (V2G):** usado para produzir energia elétrica para baterias de carro;
- **Comunicação veículo para pedestres (V2P):** Comunicação usando smartphones para poder receber avisos e enviar alertas para os pedestres sobre trânsito etc.
- **Comunicação veículo para dispositivos (V2D):** todas os outros tipos de comunicação;
- **Comunicação veículo para nuvem (V2C):** conexão com servidores na nuvem, que enviam atualizações de *software*, mapas e dados de tráfego em tempo real;

A interação entre esses componentes ativa e gera um controle inteligente do tráfego, estacionamento, logística, controle do veículo e contribui para o aprendizado e predição do ambiente, pois quanto mais dados consumidos e compartilhado pelo VA melhor será sua decisão e predição (Ninkov; Cveticanin, 2022).

2.4. Empresas envolvidas

O desenvolvimento de veículos autônomos teve uma grande ascensão nos últimos anos, deixando de ser uma iniciativa acadêmica e se consolidando como um campo de investimento tecnológico. Tendência essa que só cresce, com um mercado que pode ultrapassar seus US\$ 2,3 trilhões em 2030.

Nessa corrida temos diversas empresas que tentaram se aventurar e entrar nesse mercado, porém nem todas prosperaram, como é o caso da Cruise, adquirida pela GM. Ela começou a oferecer viagens comerciais ao público em São Francisco, mas após um acidente teve que encerrar suas operações em outubro de 2023. Em dezembro de 2024, a GM anunciou o encerramento de robotáxis da sua subsidiária, perdendo cerca de US\$ 10 bilhões. A mesma coisa aconteceu com a Ford, que fechou a Argo AI e com a Apple que abandonou a ideia de desenvolver o iCar (Roy, 2025).

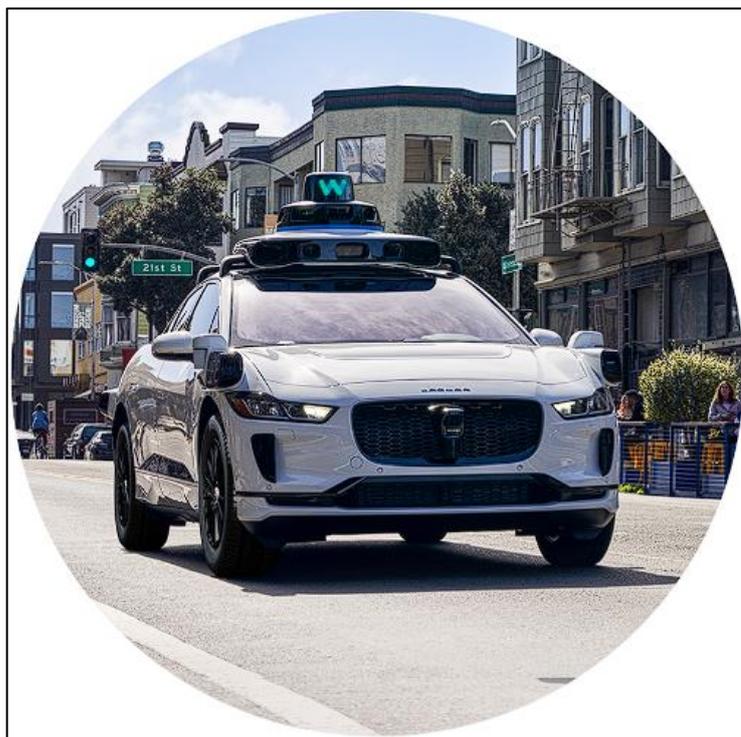
Apesar de todos esses fracassos, temos algumas empresas que estão com avanços promissores e bem impulsionados atualmente, elas disputam uma 'corrida tecnológica' para lançar um veículo autônomo de nível 5.

2.4.1. Waymo

Uma subsidiária da Alphabet (holding da Google inc.), é considerada a referência mundial no desenvolvimento de veículos autônomos. Iniciou em 2009, com os vencedores do *DARPA Grand Challenge*, Sebastian Thrun e Anthony Levandowski, a empresa se destacou pela abordagem robusta e o grande uso de *LiDAR*, câmeras e seu mapeamento 3D (Roy, 2025) (Waymo, 2019).

Atualmente, opera o serviço Waymo One (Fig. 19) que é considerado o primeiro serviço comercial de robotáxis de nível 4. Seus veículos já circulam de forma autônoma em cidades como Pheonix, São Francisco, Los Angeles e Austin, com expansão programada para Washington e Las Vegas (Waymo, 2019). Até o momento são mais de 4 milhões de viagens realizada pela Waymo, possibilitando seus robotáxis percorrerem mais de 1 milhão de milhas por semana, segundo o co-CEO da Waymo, Tekedra Mawakana (Roy, 2025).

Figura 18 - Último VA da Waymo



Fonte: (Waymo, 2019)

2.4.2. Baidu

A Baidu, gigante chinesa super conhecida pelo seu mecanismo de busca, é uma grande potência no desenvolvimento de veículos autônomos, principalmente na China e no Oriente. Ela opera os VAs de passageiros pelo seu serviço chamado Apollo Go, mas também alguns ônibus autônomos como o Apolong e Robobus (Fig. 20), atuando em cidades como Pequim, Wuhan, Chongqing (Roy, 2025) (Apollo, 2022).

Figura 19 - Robobus da Baidu



Fonte: (Apollo, 2022)

A empresa anunciou também o lançamento do seu táxi autônomo de sexta geração chamado RT6 (Fig. 21), modelo que traz inovações na base de direção, na segurança, com mais camadas de redundância e seu preço, girando em torno de US\$ 30 mil. Ela também recebeu uma licença para testar seu serviço de robotáxis em Hong Kong e planeja expandir suas atividades para Cingapura e Dubai (Roy, 2025) (Apollo, 2022).

Figura 20 - VA RT6 da Baidu



Fonte: (Susan, 2024)

Em um relatório de resultados financeiros do 4º trimestre de 2024, a Baidu apurou que o Apolo Go realizou cerca de mais de 1,1 milhão de viagens e chegando a 9 milhões em janeiro de 2025 (Roy, 2025).

2.4.3. Tesla

A Tesla, liderada por Elon Musk, produz veículos elétricos e sistemas de geração e armazenamento de energia e, em relação aos veículos autônomos, a empresa adota uma estratégia diferente das outras. Invés de usar *LiDAR*, seus sistemas são baseados exclusivamente em câmeras e redes neurais. A empresa vende uma versão parcialmente automatizada de seus carros (Fig. 22), uma tecnologia chamada *FSD*. Esse *software* utiliza IA, ciência de dados e visão computacional para operar os recursos de direção autônoma como troca de faixa automática, estacionamento automático etc. Seu sistema é classificado como nível 2 pela SAE (Roy, 2025) (Singh, 2025).

Musk e a Tesla estão se concentrando no aprimoramento do *FSD* para possibilitar a operação sem a supervisão de um humano e, também, o lançamento do *cybercab*, seu projeto de robotáxis. (Roy, 2025).

Figura 21 - Tesla Model S



Fonte: (Singh, 2025)

2.4.4. Aurora Innovation

A Aurora Innovation surgiu em 2007 e, após a aquisição da divisão autônoma da Uber passou a ser uma das principais empresas do setor. Ela tem um foco principal no *software* Aurora Driver que é destinado a transporte e logística, permitindo se adaptar a qualquer veículo para direção autônoma, inclusive caminhões, que é seu ponto forte (Roy, 2025) (Aurora, 2024).

A empresa visa enfrentar os desafios do setor de transporte rodoviário onde cada vez mais aumentam as rotas de transportes, volume das cargas e a escassez de motoristas. Em 2025, a Aurora fechou parcerias de testes com a Toyota e a FedEx e, neste ano marcará o lançamento comercial do seu *software* para a direção autônoma de caminhões nível 4 no Texas, visando expansão para aprimorar a tecnologia e permitir sua condução em trechos noturnos e chuvosos além de expandir as suas operações para as cidades de El Paso, Fort Worth e Pheonix (Roy, 2025).

2.4.5. Zoox (Amazon)

A Zoox, comprada pela Amazon em 2020, aposta em um visual mais ‘futurista’ em seus veículos, possuindo um design próprio, veículos bidirecionais (Fig. 23), ou seja, que andam para frente e para trás igualmente e sem pedais e volantes também (Zoox, 2025) (Roy, 2025).

Seu foco é operar em cidades para ser uma opção de transporte sob demanda. A empresa já iniciou seus testes de robotáxis na cidade de Los Angeles, São Francisco, Foster City e Las Vegas. Seu objetivo é buscar uma experiência confortável para o usuário, fazendo que o interior do veículo seja sua sala ou qualquer outro lugar que não seja um carro, além de não precisar de nenhuma intervenção humana em nenhuma situação (Cohen; Harter, 2025) (Roy, 2025). Ela segue fazendo testes para alcançar o nível 4 de automação e focando em logística urbana e serviços de mobilidade (MaaS) com apoio da grande empresa logística que é a Amazon.

Figura 22 - Carro bidirecional da Zoox



Fonte: (Zoox, 2025)

3. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

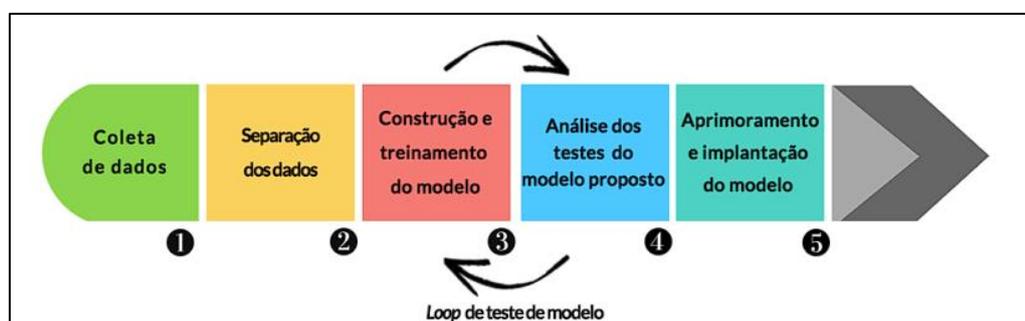
Neste capítulo, exploraremos as principais técnicas e subáreas da inteligência artificial empregadas nos veículos autônomos, compreendendo seus fundamentos e a forma como são utilizadas para interpretar os dados coletados pelos sensores do veículo. Serão abordadas tecnologias como aprendizado de máquina, visão computacional e redes neurais, destacando como cada uma contribui para a percepção do ambiente, a tomada de decisão e a condução segura e autônoma. Por fim, com base em estudos de caso e comparativos, analisaremos quais algoritmos e técnicas se mostram mais eficazes em cada subárea, avaliando seus desempenhos e identificando se há soluções mais adequadas para esse tipo de aplicação.

3.1. Aprendizado de Máquina

O aprendizado de máquina é uma subárea da inteligência artificial que tem como objetivo desenvolver métodos eficientes para reconhecer padrões ideais buscando resolver um problema de acordo com os dados disponíveis (Simeone, 2017 apud Arrigoni, 2019). Ao invés de seguir instruções rígidas e pré-programadas, esses sistemas ajustam seu comportamento com base em padrões identificados a partir de grandes volumes de informação. Isso é particularmente útil em ambientes complexos e imprevisíveis, como o trânsito urbano, onde inúmeras variáveis interagem simultaneamente (Arrigoni, 2019).

A Figura 24 mostra o fluxo de trabalho comum usado por projetos de aprendizado de máquina (Khalid, 2017 apud Arrigoni, 2019):

Figura 23 - Fluxo de trabalho Aprendizado de Máquina



Fonte: (Arrigoni, 2019)

- **Etapa 1:** Os dados são selecionados, coletados e identificados para o projeto de aprendizado de máquina.

- **Etapa 2:** Os dados são separados, limpos e adequados, além de uma parte ser separada para treinar o modelo e outra para testar o modelo.
- **Etapa 3:** Onde o modelo é construído e um algoritmo e/ou método é selecionado.
- **Etapa 4:** Onde os dados de teste são aplicados ao modelo, uma análise dos resultados é realizada e, caso os resultados sejam insatisfatórios, é necessário voltar a etapa de treinamento.
- **Etapa 5:** Essa etapa representa o modelo 'pronto', onde ele já foi testado, validado e aplicado.

Dentro do aprendizado de máquina temos diversos algoritmos e técnicas que podem ser classificadas e separadas em 3 classes principais: aprendizagem supervisionada, não-supervisionada ou por reforço (Arrigoni, 2019).

A aprendizagem supervisionada consiste em 'aprender' com dados rotulados, ou seja, dados que possuem suas entradas e saídas conhecidas, fazendo com que seja possível encontrar uma regra de associação entre esses parâmetros (Alpayin, 2004 apud Arrigoni, 2019). Esse modo de aprendizagem pode ser classificado de acordo com o tipo de dado analisado, sendo de regressão para os numéricos e classificação para categorias (Arrigoni, 2019).

A aprendizagem não-supervisionada tem somente as entradas fornecidas ao modelo, ou seja, não teremos dados rotulados aqui. Dessa forma, o modelo consegue classificar os dados identificando similaridades entre eles, incluindo os dados de entrada em grupos apropriados de acordo com sua característica em comum (Korbut, 2017 apud Arrigoni, 2019).

Já a aprendizagem por reforço não possui um conjunto de treinamento. Basicamente, ela se comporta por adaptação de *software*, funcionando por um estímulo externo, gerando uma ação e uma recompensa (Korbut, 2017 apud Arrigoni, 2019). Construindo uma sequência de ações, permitindo que o sistema fique mais 'esperto' e mais efetivo a cada momento (Alpayin, 2004 apud Arrigoni, 2019).

No contexto de veículos autônomos, o aprendizado de máquina possibilita que os VAs consigam interpretar informações do ambiente, prever comportamentos de outros agentes como pedestres ou veículos e reagir em tempo real com base em

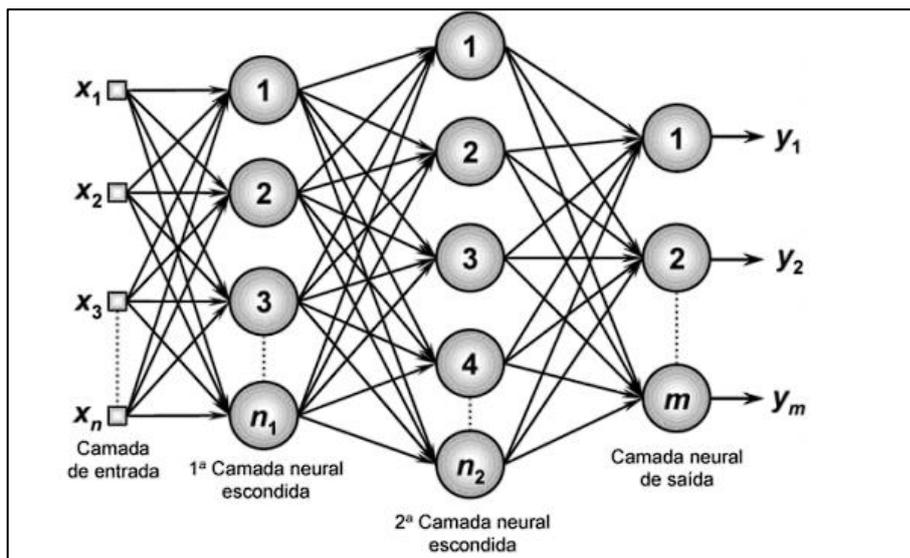
seu histórico de aprendizado. Para isso, são utilizadas técnicas como aprendizado supervisionado, não supervisionado e por reforço, cada uma aplicada conforme a necessidade da tarefa. Por exemplo, o aprendizado supervisionado é útil para classificar objetos em imagens capturadas pelas câmeras do veículo, enquanto o aprendizado por reforço é mais apropriado para a tomada de decisão em ambientes dinâmicos e com múltiplas possibilidades (de Almeida, 2023).

Um aspecto importante do aprendizado de máquina em VAs é sua integração em arquiteturas de controle "ponta a ponta", nas quais o algoritmo recebe os dados diretamente dos sensores e gera comandos de direção, acelerando ou freando o veículo. Essa abordagem tem se mostrado mais robusta que os sistemas modulares tradicionais, pois reduz a propagação de erros entre os módulos e permite otimizações conjuntas mais eficientes (de Almeida, 2023).

O aprendizado de máquina tem diversos algoritmos onde cada um possui seus pontos fortes e fracos, pensando na aplicação aos veículos autônomos, os mais utilizados são:

- **Redes Neurais Artificiais:** Inspiradas no funcionamento do cérebro humano, são compostas por camadas de "neurônios" artificiais que processam os dados de entrada e produzem saídas. No contexto dos VAs, são amplamente usadas para tarefas de visão computacional. As redes neurais profundas, como as redes do tipo MLP conforme figura 25, possuem múltiplas camadas ocultas e conseguem capturar padrões complexos em imagens e sinais (Arrigoni, 2019). Segundo de Almeida, 2023, a abordagem de aprendizagem profunda ficou mais popular do que o aprendizado de máquina comum, devido ao seu desempenho eficaz na classificação e detecção.

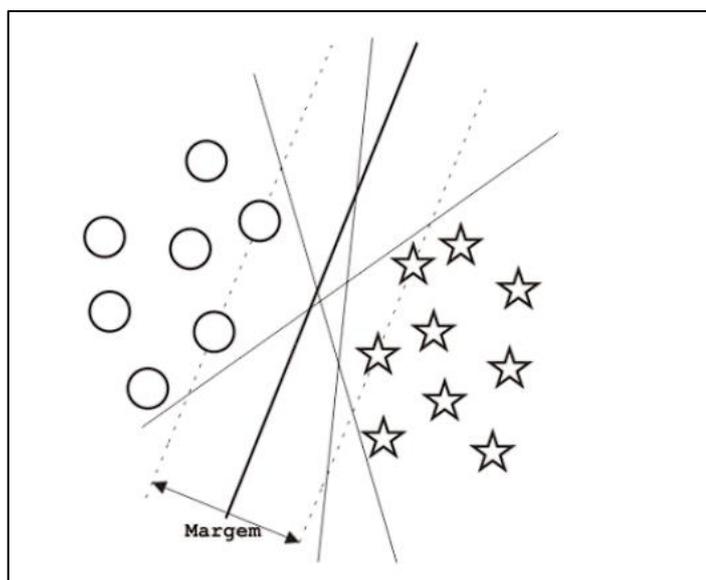
Figura 24 - Modelo de Rede Neural Artificial com múltiplas camadas



Fonte: (Batista, 2012 apud Arrigoni, 2019)

- **Máquinas de Vetores de Suporte:** São algoritmos supervisionados que classificam dados através da criação de hiperplanos que maximizam a margem entre as classes, vide Figura 26 (Lorena; Carvalho, 2007 apud Arrigoni, 2019). Apesar de não serem ideais para grandes volumes de dados, têm bom desempenho em tarefas de classificação binária, como detectar se um obstáculo é um pedestre ou um cone de trânsito (Arrigoni, 2019) (de Almeida, 2023).

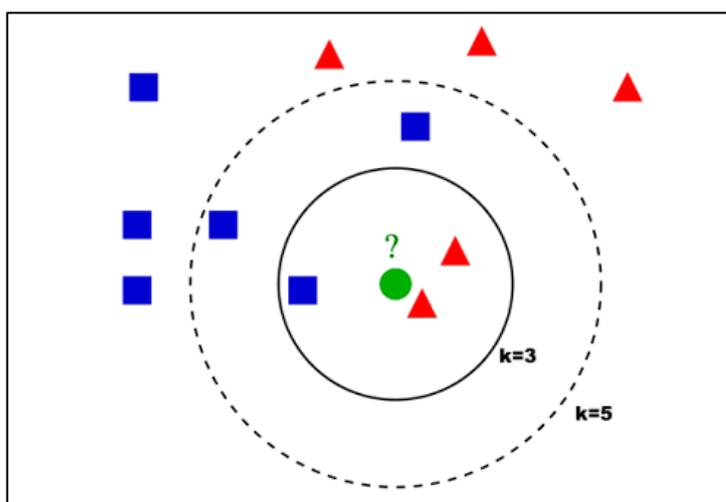
Figura 25 - Exemplo de separação de dados pelo hiperplano



Fonte: (Rufino et al., 2011 apud Arrigoni, 2019)

- ***k-Nearest Neighbors***: Seu princípio é definir uma classe a um dado representado por um ponto no plano, a partir de K pontos mais próximos a ele (Fig. 27), muito útil para reconhecer padrões de tráfego ou comportamento de outros veículos (Lantz, 2013 apud Arrigoni, 2019). No entanto, sua aplicação em tempo real é limitada devido ao alto custo computacional em grandes conjuntos de dados (Arrigoni, 2019) (de Almeida, 2023).

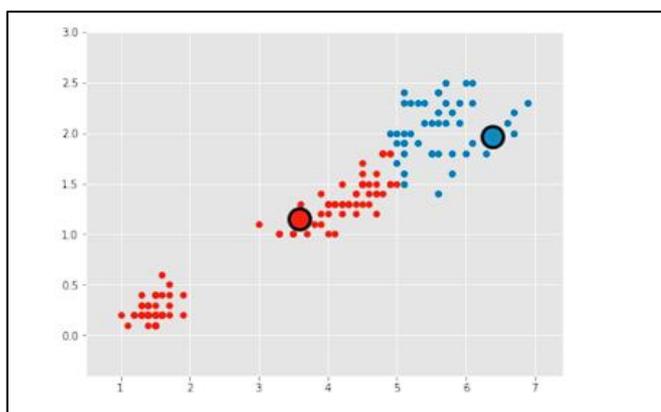
Figura 26 - Classificação de um objeto ainda não rotulado usando k -NN



Fonte: (Arrigoni, 2019)

- ***K-Means***: Algoritmo de agrupamento não supervisionado que tenta separar os dados em k grupos com características similares (Fig. 28). Pode ser usado, por exemplo, para detectar padrões anômalos no comportamento de direção, mas tem desempenho limitado em tarefas que exigem precisão e adaptação em tempo real (Arrigoni, 2019) (de Almeida, 2023).

Figura 27 - K-means com $k=2$



Fonte: (Arrigoni, 2019)

Um estudo realizado por Arrigoni (2019) comparou o desempenho de diferentes algoritmos de aprendizado de máquina aplicados à tarefa de reconhecimento de silhuetas de veículos. O objetivo era classificar corretamente imagens de automóveis em diferentes categorias como vans, carros de passeio e ônibus, de modo a melhorar o processo de percepção em veículos autônomos.

Os algoritmos avaliados foram Redes Neurais Artificiais, Máquinas de Vetores de Suporte, Árvore de Decisão, Floresta Aleatória, *k-Nearest Neighbors*, *Naive Bayes* e *K-means*. A base de dados foi submetida a validação cruzada chamada K-fold e os modelos foram avaliados por métricas como acurácia, sensibilidade e especificidade. O resultado mostrou que as Redes Neurais Artificiais superaram os demais modelos, apresentando maior acurácia e desempenho global, especialmente nas categorias mais difíceis como ônibus e vans. Já o algoritmo K-means obteve o pior desempenho, com baixa capacidade de separação entre as classes (Arrigoni, 2019).

Esse estudo mostra que, embora existam diversas técnicas de aprendizado de máquina aplicáveis aos veículos autônomos, a escolha do algoritmo mais adequado depende da natureza do problema. Quando o objetivo é reconhecer padrões visuais complexos como silhuetas de veículos sob diferentes condições de iluminação ou ângulo os modelos baseados em redes neurais são preferíveis. No entanto, em cenários que exigem maior explicabilidade, ou seja, o porquê o algoritmo chegou aquela decisão, algoritmos como árvores de decisão ou floresta aleatória ainda são relevantes (Arrigoni, 2019). Sem contar que essas técnicas são usadas em conjunto, dependendo do contexto, justamente para cada uma suprir as dificuldades das outras.

3.2. Visão Computacional

A visão computacional é uma área da inteligência artificial que tem como objetivo capacitar máquinas para interpretar e compreender informações visuais provenientes de imagens ou vídeos, simulando a percepção humana. Nos veículos autônomos, essa tecnologia é essencial para permitir que o carro enxergue e compreenda o ambiente ao seu redor, sendo aplicada em tarefas como reconhecimento de pistas, detecção de veículos, pedestres e placas de trânsito (Yu, 2024).

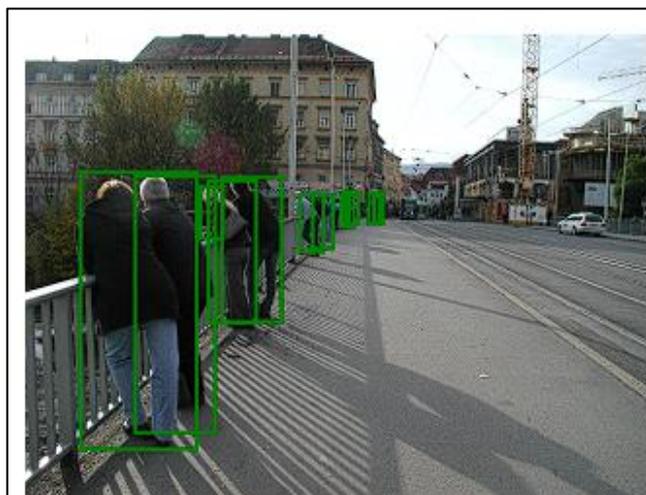
Essa capacidade é implementada por meio de algoritmos de processamento de imagens, redes neurais convolucionais e sensores como câmeras, *LiDAR* e radares, que alimentam o sistema com dados visuais tridimensionais do ambiente. A partir desses dados, os modelos realizam segmentação de objetos, classificação e rastreamento contínuo o que compõe a camada de percepção veicular (Reis et al., 2023).

O processo de visão computacional em VAs geralmente segue duas abordagens/técnicas principais: os modelos de uma etapa como *YOLO* e *SSD*, que são mais rápidos e adequados para aplicações em tempo real e os modelos de duas etapas como o *Faster R-CNN*, que priorizam maior acurácia ao custo de maior tempo de processamento (Yu, 2024).

Os algoritmos mais utilizados na visão computacional aplicada a veículos autônomos incluem:

- ***Faster R-CNN***: Modelo de duas etapas que extrai regiões de interesse, dividindo a imagem e realizando a classificação e regressão pela categorização das caixas delimitadoras por predição e, posteriormente, realizando a sobreposição as caixas preditas em delimitadores reais para validar o modelo, conforme a figura 29 (Tan and Le 2021 apud Reis et al., 2023). Possui alta acurácia e é usado para detecção refinada de pedestres e veículos (Reis et al., 2023).

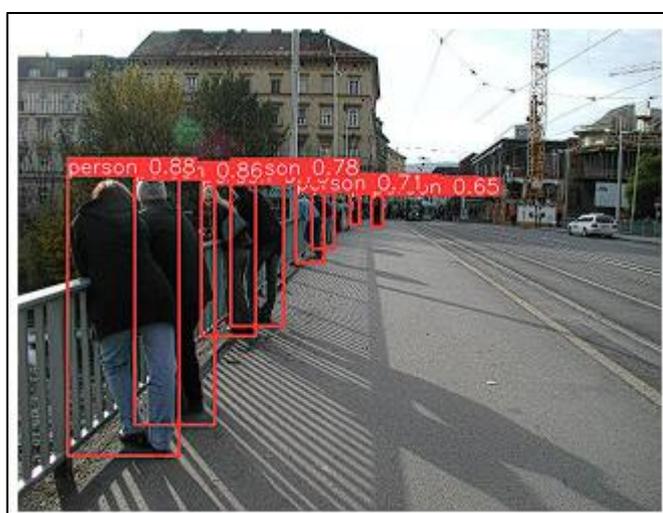
Figura 28 - Exemplo de detecção com o *Faster R-CNN*



Fonte: (Reis et al., 2023)

- **YOLO:** Uma *CNN* que processa toda a imagem de uma só vez e realiza múltiplas previsões simultaneamente. Essa técnica consiste em uma das camadas reconhece as bordas e contornos, enquanto outra aprende a reconhecer objetos com formatos complexos (Rahmad et al. 2020 apud Reis et al., 2023). É altamente eficiente para aplicações em tempo real, com boa precisão, velocidade e reconhecimento de objetos muito juntos ou que se movem, pois ele possui uma caixa delimitadora adaptativa que o auxilia nessa análise, conforme exemplo da figura 30 (Reis et al., 2023).

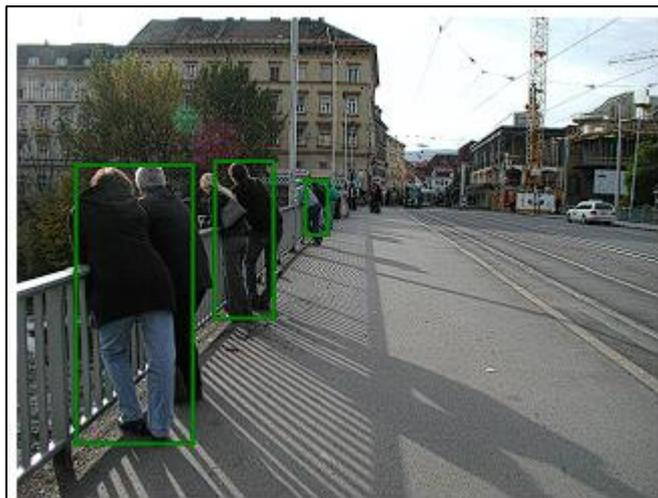
Figura 29 - Exemplo da detecção do YOLO



Fonte: (Reis et al., 2023)

- **SSD:** Consiste em uma *CNN* que faz um conjunto fixo de tamanho das caixas delimitadoras e pontuações para categorias presentes nessas classes delimitadas (Fig. 31) (Liu et al. 2016 apud Reis et al., 2023). Seu processo de detecção e otimização é similar ao *YOLO*, extraindo mais rapidamente as informações relevantes da imagem (Reis et al., 2023).

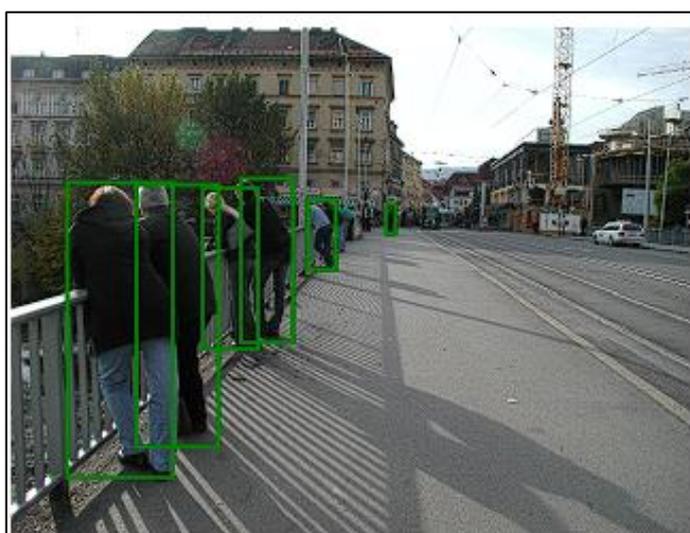
Figura 30 - Exemplo de detecção com o SSD



Fonte: (Reis et al., 2023)

- **RetinaNet:** É uma rede unificada composta por uma rede *backbone* e duas sub-redes para tarefas. O *backbone* fica responsável por processar a imagem com um mapa de recursos convolucionais sobre a imagem (Fig. 32). O RetinaNet é uma boa técnica de detecção que usa uma função de perda focal, o que torna essa técnica eficiente para detectar objetos menos frequentes (Lin et al. 2020 apud Reis et al., 2023).

Figura 31 - Exemplo de detecção com o RetinaNet



Fonte: (Reis et al., 2023).

A eficácia desses algoritmos depende das condições do ambiente e do tipo de objeto a ser detectado. Por exemplo, veículos em movimento rápido ou pedestres

parcialmente ocluídos representam um grande desafio para a acurácia dos modelos (Yu, 2024).

A visão computacional é aplicada em praticamente todas as funções críticas dos veículos autônomos. A começar pela detecção de pista e faixa, que é responsável por manter o carro dentro da via correta. Algoritmos de detecção de bordas são usados para identificar faixas pintadas na estrada (Yu, 2024).

Outro uso fundamental é a detecção de veículos e pedestres, essencial para prevenção de colisões e para o funcionamento de sistemas de frenagem automática. Isso é feito por redes como *YOLO* e *Faster R-CNN*, que classificam objetos com base em sua forma, cor e posição nas imagens (Xu et al. 2017 apud Reis et al., 2023).

Além disso, os sistemas de visão computacional também reconhecem sinais de trânsito e semáforos, orientando o veículo sobre regras de velocidade, paradas e preferências. Esses recursos são implementados por *CNNs* treinadas para interpretar símbolos e cores, operando com o suporte de câmeras de alta resolução (Yu, 2024).

Um estudo conduzido por Reis et al. (2023) avaliou o desempenho dos quatro principais algoritmos de detecção de objetos citados acima especificamente na tarefa de detecção de pedestres, utilizando um conjunto de dados chamado *Caltech Pedestrian*. O objetivo foi analisar não apenas a acurácia, mas também o tempo de resposta, considerando os requisitos em tempo real dos veículos autônomos.

Os resultados mostraram que o *YOLO* foi o algoritmo mais rápido, com tempo médio de 0,58 segundos por imagem, uma boa precisão de detecção e uma eficiência de 99,43%. Já o *Faster R-CNN* apresentou melhor desempenho em termos de acurácia, com 99,59%, sendo o segundo mais rápido no processamento, com 0,86 segundos por imagem. O *SSD* teve o maior tempo de processamento, 1.12 segundos por imagem e a menor precisão, com 80,27% de eficiência, enquanto o *RetinaNet* obteve desempenho intermediário com 1.04 segundos por imagem de processamento e uma eficiência de 99.23% (Reis et al., 2023).

Esses estudos indicam que, em ambientes onde a velocidade de resposta é prioritária, como vias urbanas densas, modelos como *YOLO* podem ser preferidos. Já em contextos em que a precisão da detecção é mais crítica, como em áreas escolares ou zonas com muitos pedestres, o uso do *Faster R-CNN* é mais apropriado (Reis et al., 2023).

Outro estudo complementar, de Yu (2024), enfatiza que a combinação de múltiplos sensores como câmeras, *LiDAR*, radar com visão computacional amplia significativamente a robustez da percepção, permitindo que o veículo reconheça não apenas a presença de pedestres, mas também sua trajetória e intenção de atravessar a via.

3.3. Redes Neurais

As Redes Neurais Artificiais são modelos computacionais inspirados no funcionamento dos neurônios biológicos. Elas são compostas por unidades interligadas, neurônios artificiais, organizadas em camadas, que processam informações por meio de conexões com pesos ajustáveis. O funcionamento básico envolve a passagem de dados da camada de entrada para a de saída, atravessando uma ou mais camadas ocultas que realizam transformações não lineares sobre os dados. Essa estrutura permite que as RNAs aprendam relações complexas entre variáveis, o que as torna especialmente úteis em contextos como reconhecimento de padrões, classificação e previsão (Almeida, 2023).

As redes neurais estão na base de muitas aplicações da inteligência artificial moderna, especialmente no aprendizado profundo, em que redes com muitas camadas são capazes de extrair características hierárquicas de dados como imagens e sinais de sensores. Nos veículos autônomos, as RNAs exercem papel central em sistemas de visão computacional, planejamento de trajetória e tomada de decisão, com modelos ajustados para operar em tempo real e com grande robustez a variações no ambiente (Reis et al., 2023; Yu, 2024).

Entre as arquiteturas mais utilizadas nos veículos autônomos, destacam-se:

- **MLP:** É uma rede densa tradicional com uma ou mais camadas ocultas, onde cada 'neurônio' das camadas estão ligados a todos da camada seguinte. Possui uma camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma de saída. Em seu aprendizado, os pesos das conexões são ajustados por um algoritmo

chamado *backpropagation*, que procura minimizar a diferença entre as saídas previstas e os valores reais (Arrigoni, 2019). É versátil e tem sido usada para tarefas de classificação e regressão, como a categorização de tipos de veículos com base em silhuetas, conforme observamos no estudo de Arrigoni (2019) que foi apresentado anteriormente.

- **CNN:** Projetadas para processar dados com estrutura espacial, como imagens, as *CNNs* são amplamente aplicadas nos sistemas de visão computacional dos VAs. Suas camadas têm filtros que varrem a imagem e extraem os padrões, como bordas, formas e texturas. Após isso, as características são combinadas e usadas para classificar os objetos (Fernandes, 2020). Elas são usadas para detectar pedestres, faixas, sinais de trânsito e outros veículos, realizando extração automática de características visuais relevantes em diferentes camadas (Reis et al., 2023) (Yu, 2024).
- **KAN (Kolmogorov–Arnold Networks):** Arquitetura mais recente comparadas as outras, possui um diferencial em relação as MLPs onde a KAN permite que sua função de ativação seja aprendida nas conexões, ampliando sua capacidade de generalização e eficiência em certos contextos, com potencial de resolver tarefas de maior complexidade não linear (Almeida, 2023).

As redes neurais desempenham funções essenciais nos veículos autônomos, principalmente na camada de percepção dos veículos, onde são responsáveis por identificar e classificar objetos com base em dados visuais. *CNNs*, por exemplo, são utilizadas em combinação com sensores como câmeras, *LiDAR* e radares para identificar a presença de pedestres e veículos em tempo real, com acurácia suficiente para acionar frenagens automáticas ou mudanças de rota (Reis et al., 2023) (Yu, 2024).

Além disso, redes neurais são aplicadas na detecção e reconhecimento de sinais de trânsito, onde precisam *LiDAR* com variações de iluminação, ângulo e desgaste das placas. Sua capacidade de generalização é essencial para manter a precisão em diferentes condições ambientais (Yu, 2024). Quando integradas com outros módulos, como os de aprendizado por reforço, as redes neurais permitem um controle mais adaptativo do veículo, ajustando velocidade, direção e comportamento com base nas condições do tráfego (Yu, 2024).

Analisando um comparativo entre as arquiteturas MLPs e as redes KAN apontando que as redes KAN são um pouco mais flexíveis durante seu treinamento, por esse motivo, ela se torna mais adaptável e com uma capacidade de generalização melhor do que as MLPs, podendo resolver e se adaptar a adversidade e problemas mais complexos (de Almeida, 2023).

Os comparativos e estudos apresentados nas seções de aprendizado de máquina e visão computacional também apresentam um desempenho mais elevado de algum tipo de arquitetura de rede neural. No estudo de caso feito pelo autor Arrigoni (2019), observamos que a MLP foi mais eficiente na classificação da silhueta de veículos, comparado a outras técnicas de aprendizado de máquina. Já no estudo dos autores Yu (2024) e Reis et al. (2023) vimos que o algoritmo YOLO foi o melhor para a detecção de objetos, especificamente pedestres e o YOLO utiliza Redes Neurais Convolucionais para otimizar seu desempenho.

4. DESAFIOS E BENEFÍCIOS DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS

Neste capítulo iremos analisar os principais benefícios da implementação dos veículos autônomos, considerando os impactos dessa tecnologia diante de várias perspectivas, explorando aspectos positivos que justificam o investimento e o interesse por essa inovação, como a redução de acidentes, inclusão social, ganhos logísticos, melhora na qualidade de vida e sustentabilidade ambiental. Em seguida, abordaremos os principais desafios enfrentados pela adoção plena dessa tecnologia, incluindo questões relacionadas à infraestrutura, regulamentação, aceitação pública entre outros pontos.

4.1. Benefícios

4.1.1. Redução dos Acidentes e aumento da segurança

Um dos benefícios mais apontados na adoção de veículos autônomos é o potencial para reduzir significativamente os acidentes de trânsito. A Organização Mundial da Saúde estima que mais de 1,3 milhão de pessoas morrem todos os anos em acidentes rodoviários, muitos dos quais são causados por falha humana, como excesso de velocidade, distrações e consumo de álcool. Os VAs, ao removerem o humano, reduzem drasticamente esses riscos ao seguir regras de trânsito de forma precisa e constante (Parekh et al., 2022).

Além disso, os sistemas embarcados, como sensores, câmeras, radares e algoritmos de detecção de obstáculos e pedestres, tornam os VAs capazes de prever e evitar situações de risco com mais agilidade do que motoristas humanos. Com isso, há uma expectativa global de queda no número de acidentes. (Bagloee et al., 2016).

4.1.2. Inclusão e acessibilidade

Veículos autônomos podem ser uma solução crucial para grupos historicamente excluídos do sistema de transporte tradicional, como idosos, pessoas com deficiência física e cidadãos com limitações cognitivas ou sensoriais. Ao não dependerem da capacidade física ou reflexos humanos, os VAs oferecem independência e autonomia a essas pessoas, promovendo inclusão social e melhorando sua qualidade de vida (Cantamessa, 2022).

Além disso, o transporte autônomo pode atender melhor áreas periféricas ou regiões com menor cobertura de transporte público, ampliando a mobilidade urbana e garantindo acesso facilitado aos centros urbanos, serviços de saúde, educação e trabalho (Pimenta, 2019).

4.1.3. Eficiência logística e redução de custos operacionais

A adoção de veículos autônomos em operações de transporte de carga e logística tem o potencial de otimizar rotas, reduzir o consumo de combustível e eliminar paradas desnecessárias. Esses fatores resultam em redução de custos operacionais, aumento da produtividade e menor impacto ambiental nas cadeias logísticas (Gonçalves, 2023).

Com a padronização do comportamento de condução e o uso de algoritmos de roteamento inteligente, é possível reduzir o tempo de deslocamento e minimizar o uso excessivo de freios e aceleração, prolongando a vida útil dos componentes e aumentando a previsibilidade das operações (Gonçalves, 2023). Isso beneficia não só grandes operadores logísticos, mas também o pequeno comércio e o transporte de última milha.

4.1.4. Sustentabilidade Ambiental

Os veículos autônomos são frequentemente desenvolvidos com motores elétricos ou híbridos, o que, aliado à otimização de rotas e ao comportamento de direção eficiente, contribui para a redução das emissões de gases poluentes e o uso mais racional de recursos energéticos. Essa mudança é especialmente relevante em centros urbanos, onde os níveis de poluição atmosférica são preocupantes (Cantamessa, 2022).

Além disso, espera-se uma redução da frota total de veículos em circulação, à medida que sistemas autônomos forem incorporados a modelos de transporte por demanda como carros compartilhados (MaaS). Isso tende a diminuir o congestionamento, a ocupação de espaços urbanos por estacionamentos e o impacto ambiental do setor de transportes (Bagloee et al., 2016).

4.1.5. Otimização de tempo e aumento de produtividade

Com a eliminação da necessidade de um condutor humano, os passageiros dos VAs poderão utilizar o tempo de deslocamento para atividades pessoais ou

profissionais, como estudar, trabalhar, descansar ou se entreter. Esse novo uso do tempo tem implicações positivas na produtividade individual e na qualidade de vida, especialmente em grandes centros urbanos com longas distâncias diárias (Parekh et al., 2022).

Além disso, a automação promete reduzir o estresse associado ao trânsito intenso, manobras complexas e busca por vagas de estacionamento, promovendo um ambiente mais saudável e mentalmente equilibrado para os usuários (Cantamessa, 2022).

4.2. Desafios

4.2.1. Infraestrutura urbana tecnológica

Um dos maiores entraves para a inserção plena dos veículos autônomos está na inadequação da infraestrutura urbana. Rodovias mal sinalizadas, falta de padronização na comunicação entre veículos e sistemas viários precários dificultam a leitura do ambiente por sensores e algoritmos embarcados. Além disso, a ausência de cobertura estável de internet e de redes V2X reduz a eficácia dos sistemas de navegação e comunicação dos VAs (Cantamessa, 2022).

Com isso, há o desafio de criar infraestruturas tecnológicas seguras e confiáveis que permitam o tráfego de veículos autônomos em tempo real, com respostas rápidas e coordenação entre diferentes agentes do sistema. Isso exige investimentos pesados em conectividade, sensores urbanos, semáforos inteligentes e redes de dados integradas (Parekh et al., 2022).

4.2.2. Segurança cibernética

Como os veículos autônomos dependem intensamente de sistemas conectados, sensores inteligentes e redes em nuvem, tornam-se alvos potenciais de ataques cibernéticos. A vulnerabilidade a invasões e manipulações externas representa um risco não apenas à integridade dos dados, mas também à segurança física dos passageiros e demais usuários das vias (Parekh et al., 2022).

Ataques maliciosos podem alterar rotas, desativar sistemas de frenagem ou interferir nos sensores de detecção de obstáculos. Portanto, é fundamental o desenvolvimento de protocolos robustos de cibersegurança veicular, incluindo

criptografia de dados, autenticação de dispositivos e monitoramento em tempo real (Bagloee et al., 2016).

4.2.3. Aceitação pública e confiança

Outro desafio significativo está relacionado à aceitação da população quanto à segurança e confiabilidade dos veículos autônomos. Muitos usuários demonstram resistência à ideia de delegar completamente o controle da direção a uma máquina, especialmente em situações críticas ou de risco iminente (Cantamessa, 2022).

Essa desconfiança é reforçada por incidentes envolvendo falhas em veículos autônomos em testes ou operações experimentais, que recebem ampla repercussão na mídia. Para superar essa barreira, é necessário investir em educação, transparência e testes públicos controlados, além de estratégias de comunicação que reforcem os aspectos positivos e comprovem a eficácia da tecnologia (Parekh et al., 2022).

4.2.4. Aspectos legais e regulamentares

A inexistência de regulamentações claras e harmonizadas para o uso de veículos autônomos é um dos maiores entraves jurídicos enfrentados atualmente. Em muitos países, não há legislação específica que trate de responsabilidade civil em caso de acidentes, validação de *software* de direção autônoma, uso de dados sensíveis ou fiscalização de sistemas autônomos (Bagloee et al., 2016).

Essa lacuna dificulta a homologação e comercialização dos VAs, além de criar insegurança jurídica para fabricantes, seguradoras e consumidores. A necessidade de um marco legal abrangente, que envolva múltiplas esferas do direito e do poder público, é urgente para viabilizar a introdução desses veículos no mercado de forma responsável (Pimenta, 2019).

4.2.5. Dilemas éticos e tomada de decisão

Os veículos autônomos também enfrentam dilemas éticos complexos, especialmente em situações de emergência. Decisões como desviar e colocar em risco os ocupantes para salvar um pedestre, ou vice-versa, desafiam os modelos tradicionais de programação algorítmica. Essas questões levantam debates sobre

como os veículos devem ser programados para tomar decisões morais em cenários imprevisíveis (Bagloee et al., 2016).

Além disso, há a discussão sobre quem será responsabilizado por falhas: o fabricante, o desenvolvedor do *software* ou o proprietário do veículo. A falta de consenso sobre essas questões reforça a necessidade de aprofundamento técnico, jurídico e filosófico sobre o comportamento ético das máquinas em ambientes sociais reais (Parekh et al., 2022).

5. O FUTURO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS

Neste capítulo, iremos analisar os principais aspectos relacionados ao futuro dos veículos autônomos, considerando as tendências tecnológicas, novos modelos de mobilidade que podem surgir, a aceitação dos usuários e os impactos esperados na sociedade e na economia.

5.1. Tendências tecnológicas futuras

As principais tecnologias que moldarão o futuro dos veículos autônomos estão diretamente ligadas ao avanço de áreas como inteligência artificial, conectividade 5G, computação de borda e no uso dos sensores de alta precisão. Onde é esperado que essas inovações permitam que os veículos autônomos alcancem níveis 4 e 5 de automação, nos quais a intervenção humana é mínima ou inexistente, aumentando a autonomia dos sistemas e sua aplicabilidade em ambientes complexos (Pisarov; Mester, 2021).

A conectividade entre veículos (V2V), com infraestrutura (V2I) e com pedestres (V2P) será essencial para garantir a integração dos veículos autônomos em ambientes urbanos dinâmicos (Mckinsey, 2024). Essa integração será viabilizada por redes 5G e sistemas de nuvem embarcada, possibilitando troca de dados em tempo real, antecipação de eventos e ações coordenadas entre múltiplos agentes de tráfego (Mckinsey, 2024). Simultaneamente, os avanços em sensores como *LiDAR* de alta resolução e câmeras multiespectrais também contribuirão para uma percepção mais precisa e segura do ambiente (Pisarov; Mester, 2021; Berger, 2025). Já a computação de borda, que consiste no processamento de dados localmente, sem depender da nuvem, irá impulsionar os VAs pois a latência será reduzida drasticamente, permitindo uma resposta rápida a situações críticas (Pisarov; Mester, 2021) (Noviati et al. 2024).

Há também uma expectativa de que sistemas autônomos evoluam para arquiteturas mais modulares e baseadas em aprendizado contínuo, permitindo atualizações frequentes, personalização e adaptação constante aos diferentes contextos urbanos e regionais. Esse tipo de arquitetura será fundamental para garantir escalabilidade e confiabilidade à medida que os veículos autônomos se popularizarem e integrar, de uma forma mais eficiente os dados gerados pelos sensores (Mckinsey, 2024) (Noviati et al. 2024).

5.2. Modelos de mobilidade

Com a popularização da tecnologia autônoma, é esperado que o modelo tradicional de posse de veículos seja gradualmente substituído por novos modelos de mobilidade, baseados no uso compartilhado e sob demanda. Um dos principais exemplos disso são os robotáxis veículos autônomos operando como serviço de transporte individual ou coletivo, acessados por aplicativos. Empresas como Waymo e Uber já testam esse modelo em regiões urbanas dos Estados Unidos, e estima-se que ele poderá reduzir custos de deslocamento em até 60%, tornando-se mais acessível do que a propriedade de um carro próprio (Berger, 2025).

Além dos robotáxis, espera-se o crescimento de serviços de compartilhamento de carro baseados em veículos autônomos, como a Zoox já vem apresentando essa proposta, especialmente em centros urbanos onde os custos de estacionamento, manutenção e trânsito dificultam a posse de um veículo próprio. Esse modelo promove uma utilização mais eficiente da frota e reduz a quantidade de veículos circulando nas ruas, com impacto positivo na fluidez do tráfego e na sustentabilidade urbana (Pisarov; Mester, 2021).

Essas soluções estão inseridas em um conceito mais amplo conhecido como Mobility as a Service, no qual diferentes modos de transporte públicos, privados e compartilhados são integrados em uma única plataforma digital. Nesse cenário, o usuário não precisa mais possuir um veículo, mas sim acessar um serviço de mobilidade adaptado às suas necessidades, em tempo real, por meio de uma interface simples e conectada. A visão de um sistema MaaS totalmente autônomo pode transformar o transporte urbano e reduzir significativamente a dependência do transporte individual motorizado (Mckinsey, 2024).

5.3. Aceitação dos VAs

Embora os avanços tecnológicos sejam notáveis, a adoção dos veículos autônomos depende fortemente da aceitação dos usuários, que ainda demonstram hesitação quanto à segurança e confiabilidade desses sistemas. Pesquisas indicam que, apesar de o público reconhecer os benefícios potenciais como a redução de acidentes e a praticidade no deslocamento, há resistência em entregar o controle total da direção a um sistema automatizado, especialmente em situações complexas ou imprevistas (Stoma et al., 2021).

Segundo o estudo de Stoma et al. (2021), usuários mais jovens e com maior familiaridade com tecnologia tendem a ser mais receptivos aos veículos autônomos, enquanto pessoas com mais idade ou menor acesso a informações tecnológicas demonstram maior desconfiança. Além disso, a disposição para utilizar esses veículos aumenta à medida que a tecnologia se torna mais visível, acessível e regulamentada. A confiança também depende da transparência dos fabricantes e da disponibilidade de informações claras sobre o funcionamento e a segurança dos sistemas autônomos (Stoma et al., 2021).

Outro aspecto relevante é que a adoção em larga escala deverá ocorrer de forma desigual entre regiões e países, com maior rapidez nos centros urbanos de países desenvolvidos e atraso em áreas rurais ou em países com infraestrutura limitada devido a questões como custo de implementação, conectividade, legislação e prioridades de investimento (Pisarov; Mester, 2021).

5.4. Impactos na sociedade e economia

A introdução dos veículos autônomos em larga escala trará transformações profundas no funcionamento das cidades e na dinâmica econômica. Um dos impactos mais relevantes será a redução significativa dos acidentes de trânsito, o que deverá aliviar os sistemas de saúde pública e reduzir os custos com atendimento emergencial, reabilitação e seguros. Com menos incidentes causados por erro humano, espera-se uma mobilidade urbana mais segura e fluida (Pisarov; Mester, 2021; Alves, 2018).

Outro impacto importante será na reestruturação do mercado de trabalho, especialmente em setores como transporte de passageiros, logística, táxis e entrega de mercadorias. Funções como motoristas de ônibus, caminhão e aplicativos tendem a ser gradualmente substituídas. Ao mesmo tempo, surgirão novas oportunidades em áreas como cibersegurança, manutenção de sistemas autônomos, análise de dados e afins (Mckinsey, 2024).

Os veículos autônomos também têm potencial para contribuir com a redução das emissões de carbono e da poluição atmosférica, sobretudo quando associados ao fato de os VAs serem elétricos e ao uso compartilhado. Isso pode gerar benefícios ambientais de longo prazo, especialmente em grandes centros urbanos. (Alves, 2018). [OB]

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar o impacto da inteligência artificial no desenvolvimento e avanço dos veículos autônomos, apresentando as principais técnicas de IA, como aprendizado de máquina, visão computacional e redes neurais, contribuem para a percepção do ambiente, a condução autônoma, tomada de decisão e a integração dos dados com os sensores externos, como radares, LiDARs etc. A partir dessa análise podemos compreender e perceber que a inteligência artificial não só impulsiona os avanços nesse setor tecnológico, mas impõe uma base essencial sobre a qual todos os veículos autônomos precisam ter para existir.

No decorrer deste trabalho, identificamos que a IA é um ponto crucial e de extrema importância para a evolução dos veículos autônomos, sendo responsável por inovações críticas em áreas de detecção de pedestres e obstáculos, interpretação de sinais de trânsito, controle de velocidade, troca de pista, desvio de rotas e aprendizado adaptativo de acordo com o ambiente. Inovações que permitem a adaptabilidade do VA e seu perfeito funcionamento em situações adversas, reforçando que esses sistemas baseados em IA são indispensáveis para que os veículos possam operar com total segurança, interpretem contextos complexos e tomem decisões com base nos dados fornecidos pelos sensores externos, mesmo com ambientes imprevisíveis.

Além dos aspectos tecnológicos, este trabalho também discutiu benefícios e desafios associados a implementação dos VAs, destacando a redução de acidentes como maior dos benefícios advindo deles e, outros como ganhos logísticos e de tempo produtivo, uma vez que não será mais necessário estar guiando o veículo. Abordamos também alguns entraves regulatórios relacionados a responsabilização das ações e decisões que o veículo possa tomar durante sua operação, desafios de infraestrutura adequada para a utilização dos veículos até a aceitação social que oscila entre as diversas faixas de idade da sociedade. Examinando tendências futuras, observou-se que a evolução da inteligência artificial será determinante para a adoção dessa tecnologia em larga escala nas cidades, juntamente com outras como a comunicação V2X, influenciando na criação de novos modelos de mobilidade urbana como o MaaS, robotáxis e compartilhamento de veículo (*Carsharing*).

Portanto, conclui-se que os veículos autônomos representam uma das aplicações mais complexas e promissoras da inteligência artificial moderna. No entanto, seu sucesso não dependerá somente da capacidade técnica dos sistemas e itens

tecnológicos, mas também da adaptação e aceitação da sociedade, da legislação e da infraestrutura urbana.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, Gabriel. **Zoox: táxi-robô 100% autônomo é previsto para 2020**. 2018. Disponível em: <https://carroeletrico.com.br/blog/zoox/>. Acesso em: 21 abr. 2025.
- ALVES, MARCELO AUGUSTO LEAL. **Veículos autônomos: qual o futuro deles?**. Revista CNT, 2018. Disponível em: <https://automotiva-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2018/05/Artigo-Marcelo-Alves-Revista-CNT-abril-de-2018.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.
- APOLLO. **Site oficial**. 2022. Disponível em: <https://www.apollo.auto/en/apollo-self-driving>. Acesso em: 21 abr. 2025.
- ARRIGONI, TAMARA RAMOS. **Reconhecimento de silhueta de automóveis para carros autônomos utilizando aprendizado de máquina**. 2019. Disponível em: https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/6/6f/TCC290_Tamara_Ramos_Arrigoni.pdf. Acesso em: 4 maio 2025.
- ASHTAGI, Rashmi; KATALE, Sanket; SABNIS, Soham. **Machine Learning in Self-Driving Cars**. 2023. Disponível em: <https://medium.com/@katalesanket90/machine-learning-in-self-driving-cars-8b5d1c685d3b>. Acesso em: 4 maio 2025.
- AURORA. **Aurora Driver — O núcleo tecnologia projetada para alimentar veículos autônomos**. 2024. Disponível em: <https://aurora.tech/aurora-driver>. Acesso em: 21 abr. 2025.
- BAGLOEE, Saeed Asadi; TAVANA, Madjid; ASADI, Mohsen; OLIVER, Tracey. **Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies**. J. Mod. Transport, 2016.
- BASHARAT, Arroj. **View of Artificial Intelligence and the Evolution of Autonomous Vehicles_ Exploring Challenges and Opportunities**. *Journal of Computing and Information Technology*, v. 3, p. 1-11, 5 jun. 2023.
- BERGER, Irving Wladawsky. **The Future of Self-Driving Cars and Robotaxis**. 2025. Disponível em: <https://blog.irvingwb.com/blog/2025/02/the-future-of-self-driving-cars-and-robotaxis.html>. Acesso em: 21 maio 2025.
- BLOG PECAHOJE. **O passado, presente e futuro dos carros autônomos**. 2019. Disponível em: <https://blog.pecahoje.com.br/carros-autonomos/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

CAMARGO, Vinicius Rodrigues. **Uso de Visão Computacional Estéreo para Estimativa da Distância em Veículos Autônomos**. 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/234220>. Acesso em: 4 mar. 2025.

CANTAMESSA, CLAUDIO. **OS DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS NO CENÁRIO BRASILEIRO**. 2022. Disponível em: <https://bibliotecatede.uninove.br/bitstream/tede/2980/2/Claudio%20Cantamessa.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2025.

COELHO, JOSÉ ITALO LEMOS. **LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM VEÍCULOS AUTÔNOMOS**. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/b2a9520f-516e-4844-b560-21c479e1f3da/content>. Acesso em: 4 mar. 2025.

COHEN, Caroline Petrow; HARTER, Clara. **O esforço do robotaxi da Amazon começará os testes em Los Angeles**. 2025. Disponível em: https://www.latimes.com/business/story/2025-04-15/zoox-explainer?utm_source=chatgpt.comhttps://www.latimes.com/business/story/2025-04-15/zoox-explainer?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 21 abr. 2025.

CVETICANIN, L.; NINKOV, Ivona. **Sensors in Self-Driving Car**. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/358337834_Sensors_in_Self-Driving_Car. Acesso em: 20 abr. 2025.

DE ALMEIDA, Renato França. Pesquisa bibliográfica sobre aprendizado de máquina aplicado à condução veicular autônoma: Uma revisão. **SEVEN Publicações Acadêmicas**, 2024.

ENGELKING, Carl. **The 'Driverless' Car Era Began More Than 90 Years ago**. 2019. Disponível em: <https://www.discovermagazine.com/technology/the-driverless-car-era-began-more-than-90-years-ago>. Acesso em: 21 abr. 2025.

FERNANDES, Victor Miranda. **Arquiteturas de redes neurais para condução de veículos autônomos terrestres em estradas brasileiras simuladas**. 2020. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Informática) - Universidade Federal da Paraíba, 2020.

GEARY, Timothy; DANKS, David. **Balancing the Benefits of Autonomous Vehicles**. AIES'19, 2019. DOI 10.1145/3306618.3314237. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3306618.3314237>. Acesso em: 13 maio 2025.

GONÇALVES, César Augusto de Camargo; FERREIRA, Helder Samuel Emiliano Pereira; DE OLIVEIRA, João Vitor Guilherme Silva; DOS SANTOS, José Vitor; PINTO, Lucas Elian Santos; RAMOS, Rebe Felipe dos Santos. **IMPLEMENTAÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS DE CARGA NO BRASIL**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Técnico em Logística) - ETEC João Gomes de Araújo, 2023. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/21954/2/logistica_2023_1_cesaraugustodecamargogoncalves_implementacaodeveiculosautonomosdecarga.pdf. Acesso em: 13 maio 2025.

GUIZZO, Eurico. **How Google's Self-Driving Car Works**. 2011. Disponível em: <https://spectrum.ieee.org/how-google-self-driving-car-works>. Acesso em: 13 abr. 2025.

IFOOD NEWS. **7 curiosidades sobre veículos autônomos**. 2022. Disponível em: <https://institucional.ifood.com.br/inovacao/7-curiosidades-sobre-veiculos-autonomos/#:~:text=Primeiro%20projeto%20de%20carro%20autônomo%20é%20do%20século%20XV,rudimentar%20programado%20por%20suas%20molas>. Acesso em: 18 abr. 2025.

KOIFMAN, Henrique. **15 de abril, Da Vinci e seu carro**. 2008. Disponível em: <https://blogs.oglobo.globo.com/rebimboca/post/15-de-abril-da-vinci-seu-carro-97374.html>. Acesso em: 21 abr. 2025.

LITMAN, Todd. **Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning**. Victoria Transport Policy Institute, 2023. Disponível em: <https://www.vtpi.org/avip.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2025.

MACHADO, Viviane. **Carro autônomo da Ufes faz viagem de 74 km entre Vitória a Guarapari; veja vídeo**. 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/espirito-santo/educacao/noticia/carro-autonomo-da-ufes-faz-viagem-de-74-km-entre-vitoria-a-guarapari-veja-video.ghtml>. Acesso em: 13 abr. 2025.

MCKINSEY & COMPANY. **Autonomous driving's future: Convenient and connected**. 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/autonomous-drivings-future-convenient-and-connected>.

Acesso em: 21 maio 2025.

MOURA, Marcelo. **A corrida maluca onde nasceu o carro autônomo**. 2018. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Tecnologia/noticia/2018/07/o-caminho-ate-o-carro-do-futuro.html>. Acesso em: 21 abr. 2025.

NAKAMURA, João. **Carros autônomos estão cada vez mais próximos de rodar nas ruas, conheça principais modelos em desenvolvimento**. 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/tecnologia/carros-autonomos-estao-cada-vez-mais-proximos-de-rodar-nas-ruas-conheca-principais-modelos-em-desenvolvimento/>.

Acesso em: 13 abr. 2025.

NAMATHERDHALA, Bharatwaja; MAZHER, Noman; SRIRAM, Gopala Krishna. **USES OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AUTONOMOUS**. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362053482_USES_OF_ARTIFICIAL_INTELLIGENCE_IN_AUTONOMOUS_DRIVING_AND_V2X_COMMUNICATION. Acesso em: 4 maio 2025.

NOVIATI, Nuraini Diah; PUTRA, Fengki Eka; SADAN; AHSANITAQWIM, Ridhuan; SEPTIANI, Nanda; NUKE. **Artificial Intelligence in Autonomous Vehicles: Current Innovations and Future Trends**. International Journal of Cyber and IT Service Management (IJCITSM), 2024. Disponível em: <https://iiast.iaic-publisher.org/ijcitsm/index.php/IJCITSM/article/view/161/93>. Acesso em: 21 maio 2025.

OLIVEIRA, Marcus de. **Carro sem motorista**. 2013. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/carro-sem-motorista/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

PAREKH, Darsh; PODDAR, Nishi; RAJPURKAR, Aakash; CHAHAL, Manisha; KUMAR, Neeraj; JOSHI, Gyanendra Prasad; CHO, Woong. **A Review on Autonomous Vehicles: Progress, Methods and Challenge**. Eletronics, 2022.

PIMENTA, Tatiana Gonzalez; TRAVASSOS, Ricardo Lima. **PRINCIPAIS DESAFIOS SOCIAIS ENFRENTADOS NO DESENVOLVIMENTO DOS VEÍCULOS AUTONOMOS**. 2019. Artigo (Especialização em Engenharia Automotiva) - SENAI CIMATEC, 2019. Disponível em: http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/bitstream/fieb/1656/1/ARTIGO_TATIANA%20GONZALEZ%20PIMENTA.pdf. Acesso em: 13 maio 2025.

PISAROV, Jelena; MESTER, Gyula. **The Future of Autonomous Vehicles**. Research Gate, 2020. DOI 10.5937/fme2101029P. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/346527331_The_Future_of_Autonomous_Vehicles. Acesso em: 21 maio 2025.

PRARTHANA, V; SUSHMA, Narayan Hegde; SUSHMITHA, T P; SAVITHRAMMA, R M; SUMATHI, R. A Comparative Study of Artificial Intelligence based Vehicle Classification Algorithms used to Provide Smart Mobility. **2022 4th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking**, 2022. DOI 10.1109/ICAC3N56670.2022.10074282. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/369589492_A_Comparative_Study_of_Artificial_Intelligence_based_Vehicle_Classification_Algorithms_used_to_Provide_Smart_Mobility. Acesso em: 10 maio 2025.

REIS, Gabriel; LOBATO, Wellington; ROSARIO, Denis; CERQUEIRA, Eduardo; VILLAS, Leandro A. **Avaliacao de Tecnicas de Deteccao de Pedestres para Veiculos Autonomos**, 2020.

REVISTA HSM MANAGEMENT. **A evolução dos veículos autônomos**. 2020. Disponível em: <https://revistahsm.com.br/a-evolucao-dos-veiculos-autonomos/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ROY, Guaray. **5 Líderes em Veículos Autônomos que Revolucionam o Transporte (2025)**. 2025. Disponível em: <https://www.securities.io/autonomous-vehicles-companies/>. Acesso em: 21 abr. 2025.

SAE BRASIL. **Carros autônomos: serão eles o novo “padrão” da indústria**. 2019. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/noticias/carros-autonomos/>. Acesso em: 19 abr. 2025.

SAE INTERNATIONAL. **SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update:** JENNIFER SHUTTLEWORTH, 2019. Disponível em: <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>.

Acesso em: 17 mar. 2025.

SINGH, Karan. **Tesla vehicles to drive themselves to customers by end of 2025.** 2025. Disponível em: <https://www.notateslaapp.com/news/2652/tesla-vehicles-to-drive-themselves-to-customers-by-end-of-2025-advantages-potential-issues>. Acesso em: 21 abr. 2025.

SKORES, Alexandra. **Driverless rides on Uber now challenging Elon Musk's Tesla in its backyard.** 2025. Disponível em: <https://edition.cnn.com/2025/03/04/business/self-driving-uber-waymo-texas/index.html>. Acesso em: 13 abr. 2025.

SRI. **Shakey the Robot.** 2025. Disponível em: <https://www.sri.com/hoi/shakey-the-robot/>. Acesso em: 21 abr. 2025.

STOMA, Monika; DUDZIAK, Agnieszka; CABAN, Jacek; DROZDZIEL, Paweł. **The Future of Autonomous Vehicles in the Opinion of Automotive Market Users.** Energies, 2021.

SUSAN. **Baidu Delivers Sixth-Generation Apollo RT6 Autonomous Vehicle, Priced at RMB 204,600.** 2024. Disponível em: <https://www.chinapev.com/baidu/baidu-delivers-sixth-generation-apollo-rt6-autonomous-vehicle-priced-at-rmb-204600/>. Acesso em: 21 abr. 2025.

TELIUM NETWORKS. **Carros autônomos – história, tecnologia e realidade.** 2025. Disponível em: <https://www.telium.com.br/blog/carros-autonomos-historia-tecnologia-e-realidade>. Acesso em: 13 abr. 2025.

TIAN, Yuchi; PEI, Kexin; RAY, Baishakhi; JANA, Suman. **DeepTest: Automated Testing of Deep-Neural-Network-driven Autonomous Cars.** 2018. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3180155.3180220>. Acesso em: 4 maio 2025.

WAYMO. **Waymo Driver** 2019. Disponível em: <https://waymo.com/waymo-driver/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

WEBER, Marc. **Where to? A History of Autonomous Vehicles**. 2014. Disponível em: <https://computerhistory.org/blog/where-to-a-history-of-autonomous-vehicles/>. Acesso em: 18 abr. 2025.

WHEELER, Kitty. **Como o Apollo Go da Baidu visa a expansão global dos robotáxis**. 2025. Disponível em: https://technologymagazine.com/articles/how-baidus-apollo-go-targets-global-robotaxi-expansion?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 21 abr. 2025.

YU, Pinyi. **Self-driving car implementation guided by computer vision for detection**. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/74/20240420>. Acesso em: 4 mar. 2025.

ZAPAROLLI, Domingos. **O futuro da mobilidade com carros autônomos**. 2022. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-futuro-da-mobilidade-com-carros-autonomos/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ZOOX. **Know your ride**. 2025. Disponível em: <https://zoox.com/know-your-ride/>. Acesso em: 21 abr. 2025.