

# Futuro dos Veículos Autónomos enquanto Sistemas Multiagente

Universidade do Minho, Departamento de Informática, 4710-057 Braga, Portugal

**Abstract.** O presente artigo aborda a definição e caracterização de Veículos Autónomos, incluindo sua taxonomia. Também são discutidos os Sistemas de Condução Autónoma, incluindo os sistemas *ego-only*, modulares, *end-to-end* e conectados. Neste contexto, analisam-se casos de uso específicos, como o *Vehicle Platooning* e vários cenários de interseção, e avalia-se a aplicação de Sistemas Multiagente em tais contextos. Além disso, são apresentados desafios relacionados à implementação de veículos autónomos, incluindo a padronização da questão de segurança, a inviabilidade do treino escalável, a proteção contra ciberataques, a deteção de falhas e diagnósticos, bem como o aproveitamento de uma infraestrutura inteligente. Por fim, examina-se a implementação de Sistemas de Condução Autónoma no mundo real e discute-se a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento nessa área em constante evolução.

**Keywords:** Condução Autónoma · Sistemas Multiagente · Inteligência Artificial · Sistemas Conectados · Sistemas *ego-only* · Sistemas Modulares · *Vehicle Platooning* · Cenários de Interseção · *Machine Learning* · IoV

## 1 Introdução

O avanço das tecnologias de Inteligência Artificial (IA) é um tópico que tem chamado uma atenção especial, principalmente na área de Agentes e Sistemas Multiagente (ASM), onde se tem assistido a um crescente interesse na aplicação deste tipo de tecnologias a veículos que proporcionem uma condução autónoma [1]. A principal motivação para a utilização destes agentes inteligentes é a sua capacidade para melhorar a segurança, eficiência e automatização dos vários sistemas de transporte, contribuindo assim para que estes veículos interajam de forma autónoma, cooperativa e adaptativa com o ambiente circundante [2].

Neste contexto, o presente artigo procura incluir todos os aspetos relevantes da investigação, apresentando uma análise crítica do estado da arte, as principais funcionalidades, arquiteturas e a aplicabilidade dos ASM no domínio de Veículos e Condução Autónoma (VCA), com foco na condução deste tipo de veículos. Além disso, discutem-se os principais desafios e obstáculos a enfrentar no desenvolvimento destas tecnologias. Assim sendo, espera-se fornecer uma visão geral elucidativa das atuais soluções e refletir sobre sua viabilidade, concluindo sobre a relevância destas tecnologias para o futuro da condução autónoma conectada.

## 2 Metodologia

A metodologia utilizada na pesquisa de referências bibliográficas em vários bancos de dados envolveu uma busca sistemática por artigos científicos, livros e estudos relevantes relacionados com o tema de investigação em questão. Então, Utilizaram-se vários bancos de dados como *Google Scholar*, *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *Scopus*, MDPI, bem como outras fontes relevantes.

Para a pesquisa, foram selecionadas palavras-chave relacionadas ao tema em questão e combinadas com operadores booleanos (AND e OR), para refinar os resultados da busca. Foram considerados apenas artigos publicados há menos de 6 anos. Além disso, foram analisadas as referências bibliográficas dos artigos selecionados para identificar outras fontes relevantes que poderiam ter sido perdidas nas buscas iniciais. Todos os artigos foram avaliados de acordo com critérios pré-estabelecidos, como relevância, atualidade e integridade das fontes.

O caráter descritivo e exploratório da metodologia sugere que o presente artigo procurará descrever e explorar conceitos, ideias e teorias relacionadas com tema de estudo, com uma breve análise das contribuições práticas dos artigos analisados.

### 3 Definição e Caracterização

#### 3.1 Veículos autônomos

A definição de Veículos Autônomos (VAs) tem vindo a sofrer algumas alterações, ganhando cada vez mais suporte, dada a existência de várias fontes com ideias ligeiramente diferentes para uma mesma definição [3]. VAs são veículos capazes de sentir e perceber o ambiente onde se incluem, movendo-se sem a necessidade de intervenção de um condutor humano. Estes veículos são também muitas vezes designados por veículos *driverless*, *self-driving*, *unmanned* ou *robotic* [3]. Dissecando esta definição, compreende-se que estes veículos “sentem” o ambiente circundante, por meio de equipamentos específicos, como sensores, extraindo dados e informações sobre este. Estes veículos incluem processadores de dados que lhes permitem interpretar os dados recolhidos, conseguindo, posteriormente, tomar decisões em relação ao seu movimento (a nível de direção, velocidade, sinalização, etc.) [4]. A referência a “intervenção humana” apresentada na Introdução gera algumas questões, nomeadamente, o tipo de intervenção: direta/indireta ou parcial. Embora a maioria das definições se concentre na ideia de que os veículos são capazes de operar sem intervenção humana direta, existem variações nesta definição, o que pode causar alguma ambiguidade. Algumas definições reforçam a ideia de que o veículo deve ser totalmente autônomo em todas as situações, já outras permitem alguma forma de intervenção humana ou controlo remoto em circunstâncias específicas.

É de notar a relevância da distinção entre veículo “autônomo” e “automático”. Ambos os termos têm em comum a capacidade de um sistema de realizar tarefas sem intervenção humana, todavia, o primeiro funciona completamente de forma independente, sem necessidade de intervenção humana, enquanto o segundo pode funcionar automaticamente, mas ainda requer alguma forma de controlo humano (grau de dependência de controlo) - um veículo que estaciona sozinho, mas que está dependente do humano na condução, é automático, por exemplo [3].

**Taxonomia** A existência destas variações na definição dos VAs pode afetar a forma como os mesmos são regulamentados ou vistos pela sociedade em geral, sendo assim importante a clareza e precisão nestas definições, como forma de garantir a eficácia e segurança dos veículos. Perante isto, a Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE) Internacional fez uma revisão a toda a terminologia e atribuiu a cada tipo de veículo um nível em função do seu grau de automatização. Esta definição aglomera 6 níveis (de 0 a 5), relacionando-se com o papel do condutor e do veículo no processo de condução [3]:

- **Nível 0:** sem automação. O veículo é controlado inteiramente pelo condutor humano;

- **Nível 1:** automação de assistência ao condutor. O veículo possui recursos como controle de cruzeiro adaptativo (ACC) e assistência de frenagem (se o motorista não reagir, o sistema pode adverti-lo executando uma redução de velocidade [5]), mas o condutor ainda é responsável pela maioria das funções de direção;
- **Nível 2:** automação parcial. O veículo possui recursos como direção automatizada e assistência ao estacionamento, mas o condutor ainda é responsável por monitorizar o ambiente e tomar decisões. O veículo pode (des)acelerar automaticamente em situações de trânsito congestionado, mas o motorista ainda precisa de manter as mãos no volante e estar pronto para assumir o controle do veículo a qualquer momento;
- **Nível 3:** automação condicional. O veículo é capaz de controlar a maioria das funções de direção, mas o condutor deve estar pronto para assumir o controle em caso de emergência. O veículo é capaz de assumir a condução em estradas de alta velocidade, permitindo que o motorista relaxe e realize outras tarefas (o motorista ainda é necessário, ainda que em menor grau);
- **Nível 4:** automação alta. O veículo é capaz de operar em determinadas condições e ambientes sem a intervenção humana, mas ainda possui limitações;
- **Nível 5:** automação total. O veículo é capaz de operar em todas as condições e ambientes sem a intervenção humana.

Então, até ao nível 2, é o condutor que possui o papel principal na controle da condução, enquanto a partir deste nível é o veículo o principal responsável pela condução. Para além disso, cada nível possui um conjunto de requisitos de capacidade mínimos que o veículo deve verificar para ser incluído nesse nível, nomeadamente, relativas ao/à:

- **Nível de controlo:** controlo que o motorista humano tem sobre o veículo;
- **Monitorização do ambiente:** capacidade do veículo de monitorizar o seu ambiente e detetar objetos (a sua velocidade e trajetória) e condições ao seu redor;
- **Avaliação e tomada de decisão:** capacidade do veículo de avaliar as informações coletadas pelos sensores e tomar decisões baseadas nessas informações;
- **Performance de *fall-back* de condução dinâmica:** capacidade do veículo de responder adequadamente em caso de falha no sistema, avisando o motorista para retomar o controle do veículo. Capacidade de manter o veículo numa condição segura até que o controle seja retomado;
- **Gestão de diferentes modos de condução:** capacidade do veículo de conduzir em diferentes estradas e ambientes, em condições de tráfego intenso e/ou em diferentes condições climáticas e da própria via.

Nível	Descrição	Ajuste de direção e (des)aceleração	Monitorização do ambiente	Fall-back performance	Modos de condução
0	Sem automação	Condutor humano	Condutor humano	Condutor humano	N/A
1	Automação de assistência ao condutor	Condutor humano e Sistema	Condutor humano	Condutor humano	Alguns
2	Automação parcial	Sistema	Condutor humano	Condutor humano	Alguns
3	Automação condicional	Sistema	Sistema	Condutor humano	Alguns
4	Automação alta	Sistema	Sistema	Sistema	Alguns
5	Automação total	Sistema	Sistema	Sistema	Todos

Table 1: Níveis de automação segundo a SAE. [6]

### 3.2 Sistemas de Condução Autónoma

Os veículos designados autónomos são, na verdade, o produto da interação e comunicação entre diferentes componentes, cada um deles com uma função específica e essencial para a concretização da automação, tornando possível a execução de tarefas complexas em ambientes dinâmicos e incertos. Ora, o resultado da integração destes componentes resulta num “Sistema de Condução Autónoma” (SCA). Neste sentido, existem diferentes tipos de SCA, tendo estes um modelo arquitetural de alto nível classificado tendo em conta dois critérios essenciais: conectividade (*standalone*, *ego-only* ou *connected multi-agent*) e construção algorítmica (*modular* ou *end-to-end driving*) [7]:

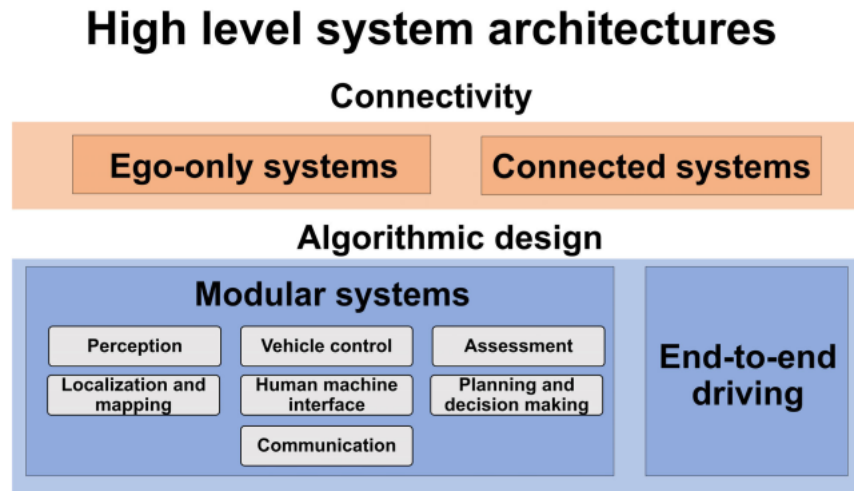


Fig. 1: Classificação de alto nível de um SCA. [7]

**Ego-only** Neste tipo de sistemas, o veículo carrega todas as operações de condução autónoma, sendo autossuficiente, em qualquer momento. É o tipo de veículo abordado mais comumente em relação ao estado da arte, dada a sua praticidade e tendo em conta os grandes desafios no desenvolvimento de sistemas conectados.

**Modular** São sistemas que estão estruturados segundo um *pipeline* (sequência de processos ou etapas que são executadas por uma ordem específica para transformar dados ou realizar tarefas [7]) de diferentes componentes [8], onde o *input* é um conjunto de sensores e o *output* é um conjunto de atuadores. As principais funções de um sistema modular pode ser resumidas a: localização e mapeamento, perceção, avaliação, planeamento e toma de decisão, controlo do veículo, e interface máquina-pessoa [9].

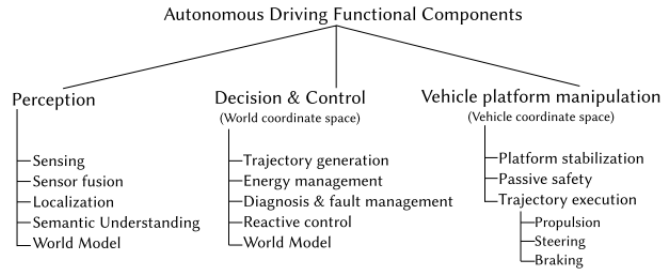


Fig. 2: Componentes funcionais de um SCA modular. [8]

Os *pipelines* típicos começam por alimentar sensores com dados brutos relevantes para o módulo localização (detecção de objetos), de seguida, é realizada a avaliação, tomando uma decisão que é passada a um controlador que origina um conjunto de comandos compreendidos pelo atuador. Esta divisão modular não só torna mais fácil todo o processo de condução autónoma, como também a transferência do estudo, a compreensão e construção de cada módulo para as várias áreas (robótica, computação e dinâmica dos veículos) relevantes neste contexto. Para além disso, os algoritmos podem ser integrados uns sobre os outros: uma restrição de segurança pode ser implementada sobre um módulo de planeamento sofisticado para forçar novas regras de emergência sem modificar o funcionamento interno deste. Dessa forma, são projetados sistemas que apesar de redundantes, são mais confiáveis.

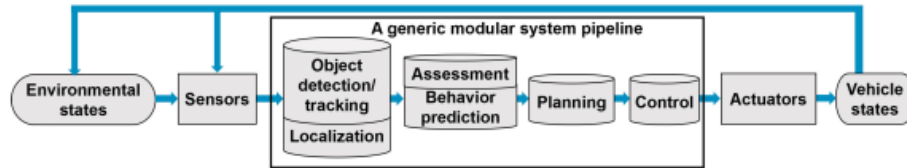


Fig. 3: Constituição genérica de um sistema modular [7].

**End-to-end** Sistemas também designados de “percepção direta”, geram movimento diretamente a partir dos *inputs* do sensor. Para conceber este tipo de sistemas, normalmente recorre-se a *supervised deep learning* direto, *neuroevolution* e mais recentemente a *deep reinforcement learning* [7]. Normalmente, é a condução humana que é tida em conta como forma de validação no processo de supervisão, sendo que a rede neuronal profunda recebe um conjunto de dados (imagens) e toma uma decisão. A abordagem que tem sido mais utilizada é aprendizagem por reforço, onde se utiliza uma rede neuronal, cujo objetivo é selecionar um conjunto de ações que maximizam uma recompensa futura. Em contra partida, a estratégia de neuroevolução, onde se utilizam algoritmos evolucionários para treinar a rede, não é tão popular. Estes algoritmos combinam técnicas de evolução biológica com redes neuronais artificiais. Estas redes são submetidas a operadores genéticos, como mutação e cruzamento, para gerar novas redes que são potencialmente melhores adaptadas à tarefa em questão.

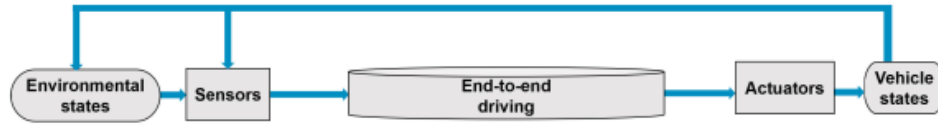


Fig. 4: Constituição genérica de um sistema *end-to-end*[7].

**Connected** Neste tipo de sistemas, as operações envolvidas na condução são distribuídas entre vários agentes, entidades autônomas que possuem capacidade de percepção, raciocínio e ação, podendo interagir com o ambiente que os rodeia e com outros agentes. Estes sistemas são vulgarmente conhecidos como *vehicle to everything* (V2X) e permitem comunicação inter-VAs, com a infraestrutura rodoviária (semáforos, sinais de trânsito, pontes e túneis) e mesmo peões (via dispositivos móveis, por exemplo) [1]. A comunicação é feita por meio de redes sem fio, como Wi-Fi e tecnologia de comunicação de curto alcance, como a *Dedicated Short Range Communication* (DSRC), permitindo que os veículos troquem informações em tempo real, como a velocidade, a posição e a direção.

## 4 Sistemas Conectados enquanto Agentes e Sistemas Multiagente

A aplicação do conceito de agente surge no tipo de SCA conectado apresentado anteriormente. Neste contexto, surgem também os Sistemas Multiagente, que são compostos por um conjunto de agentes que interagem entre si para alcançar um objetivo comum, mesmo que os agentes possam ter objetivos próprios [2]. Assim sendo, é a integração destes agentes nos veículos que lhes confere maior autonomia e capacidade de interagir de acordo com o ambiente onde se incluem. Analogamente, pode interpretar-se esse ambiente como um composto das várias entidades anteriormente referidas.

### 4.1 Casos de Uso

Os VAs conectados são considerados mitigadores de erros a nível de várias áreas, como: congestão de tráfego, segurança rodoviária, consumo de combustível e emissão de poluentes, muito presentes nos veículos atuais [10]. Estes veículos conectados socorrem-se de sistemas de comunicação para a deteção e manobra cooperativas. Deste modo, analisam-se os benefícios e limitações destes veículos através dos vários casos de uso seguintes, muito conhecidos entre a comunidade científica.

**Vehicle Platooning** Um pelotão é um conjunto de dois ou mais VAs consecutivos, numa mesma faixa e com uma certa distância inter-veicular, a uma certa velocidade [10]. Tem sido utilizada uma política de espaçamento para definir essa distância, enquanto a velocidade alvo é decidida pelo veículo líder (o primeiro veículo na fila que pode ser um veículo autónomo ou conduzido por um humano) ou, se possível, pela infraestrutura da estrada que atua como líder virtual. Existem vários benefícios em organizar os veículos num pelotão:

- **Aumento do fluxo de tráfego:** reduzindo as ondas de choque de tráfego e os congestionamentos nas estradas. O fluxo de tráfego pode aumentar em até quatro vezes, alcançando um valor de até 8000 veículos/hora/faixa para rodovias automatizadas;

- **Redução do consumo de combustível e emissões de poluentes:** através da redução da força de atrito aerodinâmico na faixa. A redução média no consumo de combustível esperada é de cerca de 20% para uma distância inter-veicular de 1 metro;
- **Melhoria da segurança rodoviária:** controle exigente da distância inter-veicular e velocidade, reduzindo o risco de colisões;
- **Melhoria do conforto dos motoristas:** os quais se podem concentrar em outras atividades durante a viagem e gerar variações suaves na velocidade (existência de menos solavancos).

Em contrapartida, tem-se [11]:

- **Capacidade limitada para operar apenas com base na posição do veículo líder:** manter a estabilidade das *strings* (linhas trajetória dos veículos) torna-se difícil pois os veículos são forçados a estar muito perto uns aos outros e podem existir pequenos desvios no tempo de resposta ou nas ações de cada veículo, sendo ampliados ao longo da *string*;
- **Gama limitada de informações compartilhadas por veículos:** tecnologia limitada dos veículos não permite a redução da distância inter-veicular, com a manutenção razoável das condições de segurança necessárias.

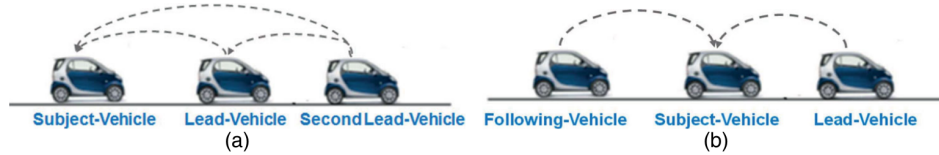


Fig. 5: Duas configurações (a) e (b) de um pelotão de 3 veículos e as respectivas *strings*. [10]

**Cenários de Interseção** A situação de uma interseção nas estradas tem-se tornado uma preocupação, já que é neste contexto que se verifica a maioria dos acidentes rodoviários, uma elevada congestão de tráfego, maior número de casos de *stress* dos condutores [12], e maior desperdício de combustível, gerando mais poluição [10]. Em contrapartida, entre os principais benefícios dos SCA em cenários de interseção, podemos citar:

- **Maior segurança:** comunicação rápida entre veículos e com a infraestrutura da estrada torna mais fácil a deteção de outros veículos e obstáculos na interseção;
- **Melhor gestão de tráfego:** através da redução do número de paradas e partidas, resultando também num menor tempo de viagem.

Em contrapartida, tem-se [1]:

- **Necessidade de infraestrutura:** para que a comunicação entre os veículos funcione corretamente, é necessário que haja uma infraestrutura adequada na interseção, o que pode ser um obstáculo para a implementação em larga escala;
- **Custos:** a instalação de uma infraestrutura adequada para a comunicação entre veículos pode ser cara, o que pode afetar o custo total do sistema de condução autónoma;

- **Interoperabilidade:** para que os sistemas de diferentes fabricantes possam comunicar corretamente, é necessário que haja padrões e protocolos de comunicação comuns, o que pode ser um desafio num mercado fragmentado.

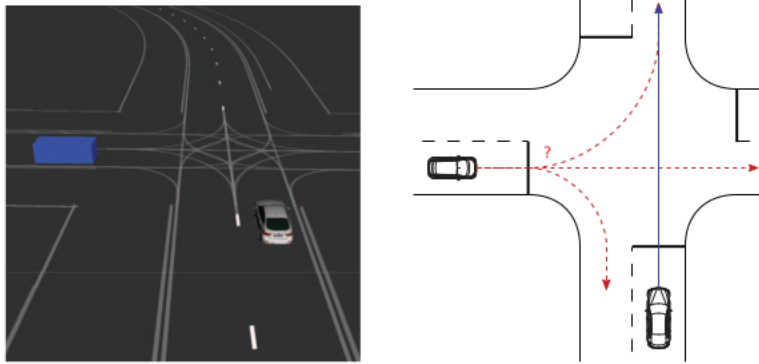


Fig. 6: Situação típica onde um veículo azul tem de efetuar uma decisão de movimento, tendo em conta a incerteza associada à direção tomada pelo veículo vermelho [13].

#### 4.2 Uma análise da aplicação de Sistemas Multiagente em cenários de interseção

Como forma de aplicar de forma prática um dos casos de uso anteriores, segue-se uma proposta interessante sobre a implementação de um sistema multiagente autónomo e descentralizado para a coordenação em cenários de interseção. Na continuação da abordagem mais comum do estado da arte [14], pode recorrer-se a aprendizagem por reforço, como forma de eliminar possíveis colisões, reduzir a congestão e providenciar uma experiência de transporte rápida e segura.

Não é propriamente fácil gerir estes cenários, sendo que as abordagens mais comuns centram-se na otimização da infraestrutura circundante (otimização de sinais de trânsito), na transferência da autonomia para o condutor em casos de congestão, na criação de horários de passagem de cada veículo (usando várias técnicas diferentes, como *First In First Out* ou caminho mais curto), ou mesmo seguindo uma abordagem onde cada veículo reserva determinada rota [15].

A arquitetura de um possível SMA para este caso, seria a existência de dois agentes, um que seria integrado no veículo autónomo (agente-veículo) e outro com um algoritmo de IA (agente-interseção), integrado em cada interseção [16]. Desta forma, as responsabilidades de cada agente estariam bem definidas:

- **Agente-veículo:** enviaria e receberia mensagens para/do agente da interseção. A comunicação poderia utilizar sinais de rádio, wifi, etc., sendo a aproximação à zona de interseção detetada pelo veículo através de sensores ou GPS. O próprio agente da interseção também pode enviar informações sobre as condições na interseção ao agente-veículo;
- **Agente-interseção:** passaria por um processo de treino, de forma a receber informações de um agente-veículo, respondendo com informações sobre como o veículo deveria proceder em termos de aceleração, travagem, direção, etc. Seria relevante inserir casos de veículos prioritários (ambulâncias, bombeiros, etc.)



Naturalmente, muitos outros cenários relevantes podem ser considerados [14], de forma a aproximar a simulação a um cenário mais próximo da realidade. Em contrapartida, uma maior aproximação traria uma maior complexidade, sendo necessário fazer uma gestão razoável, consoante o tempo disponível para desenvolvimento.

Além disso, seriam necessárias tecnologias de simulação como *Car Learning to Act* (CARLA), que oferece aos usuários uma grande variedade de recursos, incluindo modelos realistas de veículos, cenários urbanos e rurais, sensores virtuais (como câmaras e radares) e ambientes climáticos dinâmicos. A plataforma pode ser utilizada para testar diferentes algoritmos de condução autónoma.

Como forma de elucidar os agentes envolvidos e o seu comportamento, segue-se um esquema que sintetiza o fluxo de mensagens trocadas e uma representação espacial do cenário.

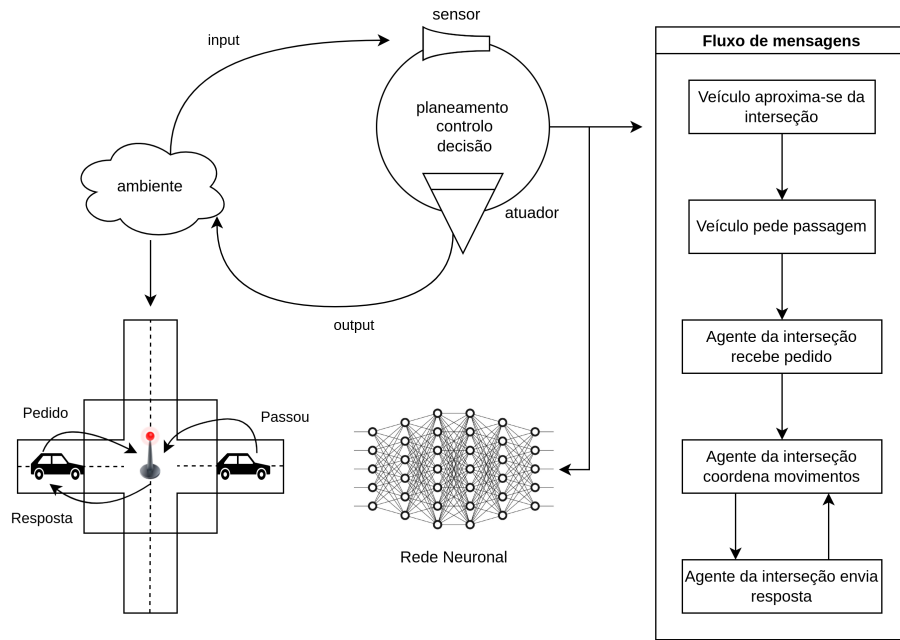


Fig. 7: Esquema que sintetiza os aspetos importantes desta proposta de aplicação prática do tema, num contexto de SMA.

## 5 Desafios e Oportunidades

### 5.1 Inteligência Artificial em Veículos Autónomos

A maioria dos serviços dos VAs referidos anteriormente, como a perceção, o planeamento do caminho e assim por diante são conseguidos através de abordagens de IA. Como o foco da Indústria Automóvel é a produção em série, o principal desafio é saber como aplicar estes algoritmos de *machine learning* à produção em massa de VAs para aplicações no mundo real [1].

**Padronização da questão de segurança:** os algoritmos de *machine learning* são instáveis em termos de desempenho, bastando uma alteração simples na imagem, seja em termos de luz ou corte, para que o sistema de deteção dos objetos destes

veículos falhe. As normas de padronização de segurança automóvel foram definidas sem ter em conta o *deep learning*, já que o *boom* da IA se deu antes da utilização desta abordagem nos sistemas de deteção.

**Inviabilidade do treino escalável** Para alcançar um alto desempenho, os modelos de *machine learning* usados nestes veículos precisam de ser treinados em conjuntos de dados representativos em todos os cenários de aplicação, o que representa um desafio [1] para o caso de modelos sensíveis ao tempo, baseados em *pentabytes* de dados. Analisar uma grande quantidade de dados reais de peões, outros veículos, trajetórias, etc. torna-se um enorme *bottleneck*.

## 5.2 Proteção a Ciberataques

É sabido que não existe um sistema que seja 100% seguro, os novos veículos conectados enfrentam vários desafios a nível de segurança, como a capacidade de responder a ataques onde se simula a chave eletrónica do veículo ou ataques ao controlo do veículo, fazendo com que este se desvie do seu caminho. Além disso, com o aumento da integração de mais sensores, tecnologias, infraestruturas e aplicações, aumenta também a exposição a ataques. Recentemente, o método de ataque mais comum tem sido a utilização de uma foto, por parte dos atacantes, do dono do veículo, levando a que os algoritmos de reconhecimento facial falhem. Espera-se, em contrapartida, que um desenvolvimento da criptografia pós-quântica [1] venha resolver muitos destes problemas. Neste sentido, um aspeto importante é garantir a segurança das mensagens trocadas pelos vários agentes veiculares, um tópico que é também alvo de investigação por pesquisadores de criptografia.

## 5.3 Deteção de Falhas e Diagnósticos

É verdade que o aumento da integração de mais tecnologias nos novos veículos permite ter uma maior noção do ambiente circundante, todavia, continuam por resolver alguns problemas a nível de deteção de falhas [1]. Não existem muitos estudos realizados no âmbito da compreensão das falhas de sensores, o que pode ser extremamente perigoso, já que, como se verificou nas várias arquiteturas mencionadas, a maioria das aplicações da condução autónoma socorrem-se dos dados captados por estes sensores. Para além disso, mesmo que estes sensores não falhem, são estes que produzem os dados e esses dados captados podem não refletir as condições reais do próprio cenário, gerando informação incorreta. Tem-se o exemplo de uma câmara bloqueada por um objeto desconhecido como folhas ou lama, ou mesmo quando o radar se desvia da sua posição devido à força do vento.

## 5.4 Padronização dos sistemas e protocolos de comunicação

As principais referências do estado da arte [1] [11], abordam o desafio de desenvolver um sistema operacional (SO) para VAs, que abstrai os recursos de *hardware*. A dificuldade prende-se com a compatibilidade do SO com veículo, o qual pode ter até 70 Unidades de Controlo Eletrónico instaladas, que comunicam através de um protocolo específico denominado *Controller Area Network* (CAN). A iniciativa *Automotive Open System Architecture* (AUTOSAR), que padroniza sistemas de software para veículos, tem potencial para ajudar a diminuir esta lacuna, mas a maioria das empresas da área ainda não tornou os seus SOs de código aberto, o que restringe a disponibilidade do AUTOSAR para a comunidade de pesquisa e de educação, dificultando o desenvolvimento de um SO unificado. A integração com

ASMa torna-se um desafio já que estes agentes podem ter diferentes plataformas, linguagens de programação e requisitos de hardware, sendo necessário garantir que todos os componentes possam funcionar juntos e de forma eficaz.

### 5.5 Viabilidade de aplicação destas tecnologias

O artigo [1] discute alguns desafios enfrentados pelos VAs em situações normais que se tornam anormais, como condições climáticas adversas, manobras de emergência e zonas de obras. Em relação ao clima, destaca-se que os sensores do veículo podem ser afetados, reduzindo a performance, não havendo uma solução unificada para mitigar esse problema. Em situações de emergência, destaca-se que as manobras evasivas podem entrar em conflito com a estabilidade do veículo, causando acidentes. Algumas soluções de planejamento de trajetória são propostas para lidar com estes casos, nomeadamente, estratégias baseadas em algoritmos de ML, que permitem ao veículo adaptar sua trajetória em tempo real para evitar obstáculos e garantir maior segurança. Por fim, o reconhecimento de zonas de obras é outro desafio, já que estas zonas podem provocar mudanças repentinas no ambiente de direção do veículos, devido à presença de cones e barreiras na via, e na velocidade, o que pode também pôr em causa operários que se encontrem na via.

É importante destacar que os VAs são projetados para operar em conjunto com veículos tradicionais e humanos. Embora a remoção de todos os veículos sem automação possa teoricamente facilitar a implantação de VAs, isso não é realista na prática, pois a transição para uma frota totalmente autônoma terá de ser gradual e levará anos para ser concluída [17]. Contudo, a Universidade de Michigan está a trabalhar num projeto para desenvolver uma “rede inteligente de estradas” que possa comunicar com VAs, de modo a melhorar a eficiência e a segurança no tráfego [18]

### 5.6 Questões de Legislação e Éticas

A falta de regulamentação e diretrizes claras para VAs pode ser um desafio para a sua implementação. As leis e regulamentos existentes em muitos países não foram desenvolvidos para lidar com a tecnologia de veículos e podem precisar de ser atualizados ou revistos de forma a acomodar essa nova realidade. No entanto, muitos governos estão a trabalhar para criar uma legislação adequada, sendo que, até ao momento se destacam três abordagens principais:

- **Abordagens baseadas em regras:** programação de um conjunto de regras pré-definidas que orientam o comportamento do veículo em situações críticas. Essas regras geralmente são criadas com base em decisões humanas e éticas, podendo ser difícil implementar todos os casos. Neste contexto, os ASMa devem ser coordenados para garantir que o veículo funcione de maneira segura e eficiente, o que se torna complexo quando os agentes devem considerar imensos casos variáveis, perante os inúmeros cenários de trânsito que podem existir;
- **Abordagens baseadas em consequências:** procuram maximizar uma função de utilidade que quantifica a importância relativa de diferentes objetivos, como a segurança dos ocupantes do veículo e dos pedestres. A escolha da ação a ser tomada pelo veículo é baseada na maximização da função de utilidade.

**Beneficiar de uma infraestrutura inteligente** Como se referiu anteriormente, os veículos conectados já possuem tecnologia V2X, sendo esperado que

usufruam de uma estrutura inteligente, principalmente em relação aos três aspetos: Provedor de Serviço, partilha de informações de trânsito e redução de tarefas [1].

Em relação ao Provedor, ainda é desafiante para os veículos encontrar um estacionamento, algo que rapidamente se contornaria através da integração de sensores na própria estrutura do parque, permitindo aos veículos saber de imediato que lugares estão vazios. Neste caso, o próprio parque seria o provedor do serviço para os VAs, estando integrado com a infraestrutura inteligente.

Em relação à partilha de informação, é fácil compreender que, com a contribuição da própria infraestrutura no fornecimento de dados sobre as condições circundantes, evita-se muito desperdício de tempo, congestão de trânsito provocada pela demora na obtenção de informação apenas por parte do veículo, e acidentes.

Finalmente, a redução de tarefas e, assim, da carga de trabalho do veículo é relevante. Vários algoritmos estão a ser executados no próprio veículo, pelo que lidar com toda esta carga em tempo real requer muito poder de computação, sendo inviável num veículo movido a bateria. Transferir esta carga de trabalho para a infraestrutura inteligente acaba por aliviar o próprio veículo, poupando energia. Este processo é conhecido como *offloading*, sendo um dos atuais desafios, já que o veículo deve requisitar este *offloading* à infraestrutura, garantindo simultaneamente o tempo de previsão necessário.

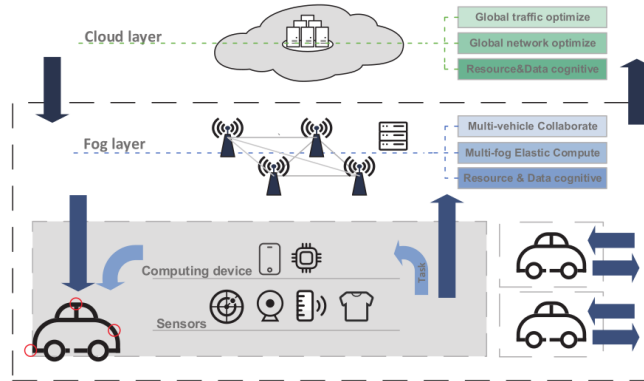


Fig. 8: Proposta da constituição de uma infraestrutura que permite a concretização do conceito de IoV. [19]

A Internet das Coisas (IoT) em VAs, ou seja, Internet dos Veículos (IoV) refere-se à interconectividade de vários sensores e sistemas dentro do veículo, bem como a comunicação entre o veículo e dispositivos externos e infraestrutura, sendo que estes sistemas trabalham juntos para fornecer dados em tempo real sobre o ambiente e desempenho do veículo. Neste sentido, otimizar a arquitetura desta estrutura significa otimizar também o serviço providenciado pelos VAs. Várias investigações analisam de que forma é possível alterar as várias camadas constituintes da infraestrutura inteligente de modo a tornar os SCA cada vez mais desenvolvidos [19].

## 6 Condução autónoma em faixa livre

Para além dos casos de estudo anteriores, muitos outros cenários são fonte de investigação experimental, nomeadamente, casos de mudança de via, gestão energética do veículo, ou mesmo estimação do atrito na estrada. É importante destacar alguns

destes experimentos, o que também contribui para o aumento do leque de casos apresentados.

### 6.1 Descrição

Os autores [20] abordam o problema da colaboração de ASMa na condução autónoma em cenários de faixa livre, ou seja, quando a estrada não tem vias definidas, ou marcas que o evidenciem, tornando ainda mais complexa a condução. É apresentada uma configuração inicial de veículos que serve de base ao estudo, assumindo-se que os veículos estão equipados com as tecnologias *Vehicle to Vehicle* (V2V) e *Vehicle to Infrastructure* (V2I), e que possuem as mesmas características de aceleração e direção. Cada veículo pretende manter uma certa aceleração.

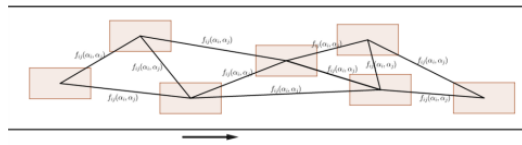


Fig. 9: Configuração Inicial dos veículos [20]

### 6.2 Procedimentos

Os autores socorrem-se de um modelo em grafo para a coordenação dos agentes. É um modelo atrativo, já que não há interação entre todos os agentes, reduzindo a complexidade em certa parte, o que torna mais fácil a maximização global do bem-estar geral na via. Cada agente-veículo é um nodo e cada aresta representa uma ação de um agente. Com o grafo obtido, é aplicado o algoritmo *max-plus*, um método de otimização utilizado em teoria de grafos e sistemas dinâmicos, que permite encontrar o caminho mais curto ou o menor tempo entre dois pontos de um grafo ponderado.

Este algoritmo é utilizado para permitir que os agentes tomem decisões em tempo real, calculando a sequência ideal de movimentos/ações: calcular o tempo o mais cedo possível para que cada veículo se mova com base nas condições de tráfego atuais e nos movimentos planejados dos outros veículos. Ao combinar o gráfico de coordenação e o *max-plus*, a estrutura pode calcular com eficiência a sequência ideal de movimentos para todos os veículos, minimizando o tempo total de viagem e evitando colisões.

### 6.3 Resultados

O artigo apresenta resultados de simulação com a plataforma *Simulation of Urban MObility* (SUMO), que mostram que a estrutura proposta pode efetivamente coordenar os movimentos de VAs num cenário sem faixas, e os autores sugerem que sua abordagem pode ser útil em aplicações do mundo real, como *vehicle platooning*, cenários de interseção e condução autónoma em ambientes urbanos, cenários que se abordaram anteriormente. É possível concluir que há uma relação linear entre a velocidade média e o número de veículos, sendo que o aumento do fluxo de veículos traz uma redução da velocidade média, mas esta redução é proporcional, sugerindo que o modelo proposto é robusto a perturbações.

## 7 Sistemas de Condução Autónoma no mundo real

Algumas empresas estão a desenvolver VAs conectados, destacando-se a *Volkswagen* e *Bosch*, a *Huawei* e a *Xiaomi*.

*Volkswagen* e *Bosch* estão a trabalhar juntas para desenvolver SCA destinados aos modelos da marca, desde o *Volkswagen Polo*, até aos modelos mais avançados [21]. Estas empresas estão a utilizar uma das maiores frotas de veículos conectados do mundo para reunir informações e desenvolver sistemas de condução autónoma mais avançados. A *Volkswagen* está a investir em mais projetos, como a *Car Software Organization*, que desenvolve funções de condução assistida e automatizada até ao nível 4 para o sector da mobilidade [21].

Por outro lado, a *Huawei* pretende desenvolver a sua tecnologia de condução autónoma até 2025, apesar de existirem já vários exemplos de insucesso relacionados com esta tecnologia [22].

A *Xiaomi* adquiriu a *startup* de condução autónoma *Deepmotion*, por cerca de 70 milhões de euros, como mais uma demonstração do interesse da empresa em entrar no mercado dos carros elétricos autónomos [23].

A Tesla, por outro lado, é conhecida pelos seus carros elétricos e sistemas de armazenamento de energia [24]. A empresa também está a trabalhar em tecnologia autónoma e é um dos concorrentes na corrida para desenvolver veículos 100% autónomos. Elon Musk, CEO da Tesla, anunciou que a empresa planeia disponibilizar o sistema de condução totalmente autónoma em regime de assinatura mensal [25]. A marca lançou uma versão beta da tecnologia de condução 100% autónoma, que já está a ser utilizada por alguns utilizadores. No entanto, no que diz respeito ao uso de sistemas conectados, ainda não se pronunciaram.



Fig.10: (1) *Bosch* - Test drive com veículo da Tesla. [26], (2016) *Volkswagen Autonomy* - Test drive em Hamburgo (2019) [27]

Torna-se relevante efetuar uma análise das perspetivas tecnológicas dos VAs, agora que o contexto real destes veículos está claro. A tabela seguinte apresenta uma previsão do intervalo anual para a implementação dos VAs, com base em alguns artigos estudados:

Fonte	Nível 4	Nível 5	Veículos Conectados
[17]	2030	2020-2040	2060-2080
[28]	2020	2030	2075 (?)
[29]	2021	2025-2030	N/A
[30]	2020	2028-2030	2040-2060
[31]	2020	2030	2025-2030
[32]	2018-2021	2018-2021	2040-2050
[33]	2018-2021	2023-2040	2045-2070

Table 2: Previsões para a concretização dos vários níveis da SAE, de acordo com os principais autores.

Com base na tabela apresentada, observa-se que há uma variedade de previsões para a concretização dos diferentes níveis de autonomia. Enquanto alguns autores preveem que o nível 4 será atingido em 2020, outros projetam que isso só ocorrerá em 2030. O mesmo se aplica ao nível 5 e aos Veículos Conectados. É importante lembrar que essas previsões são apenas estimativas baseadas nas tendências atuais de desenvolvimento de tecnologia e regulamentação do respectivo ano, todavia, vários fatores podem afetar a concretização destes níveis, como avanços tecnológicos, custo, aceitação do consumidor e regulamentação governamental.

## 8 Conclusões e trabalho futuro

Os VAs são uma tecnologia emergente que promete transformar a forma como nos movemos nas estradas [1]. A taxonomia dos VAs ajuda a classificar os diferentes níveis de autonomia que eles podem ter, tentando tornar esta classificação mais descritiva e não normativa, e de caráter mais técnico em vez de legal [6]. Para além disso, existem diferentes SCA, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens, sendo que os sistemas conectados apresentam muitos casos de uso promissores, onde os Sistemas Multiagente podem ajudar a melhorar a eficiência e a segurança do tráfego.

Apesar de existirem ainda muitos desafios a superar antes que estes veículos se possam tornar uma realidade viável e mais segura, o desenvolvimento de VAs continua a avançar rapidamente, esperando-se ver estes veículos conectados nas estradas de todo o mundo, enquanto membro contribuinte de uma IoV [19].

Os sistemas conectados parecem ser o tipo de arquitetura selecionada pelos investigadores para o desenvolvimento do campo, através da colaboração de agentes-veículos em cenários de interseção, faixa livre ou situações adversas, havendo, neste sentido, questões éticas, legislativas e governamentais envolvidas. Experimentalmente, como se observou através dos vários casos analisados, comprova-se que a integração de ASMa, mesmo em cenários complexos, torna os SCA mais seguros e eficazes, trazendo uma melhor gestão de tráfego, a qual, ao parecer do estado da arte, poderá ser completamente atingida através de uma adaptação da infraestrutura e estradas existentes.

O impacto socioeconómico é evidente. Em termos económicos, a adoção de VAs pode levar a uma redução significativa nos custos de transporte, uma vez que esses veículos podem operar de forma mais eficiente e sem a necessidade de um motorista humano, levando a um aumento na produtividade. Ora, tal pode ter um impacto negativo na indústria de transporte tradicional e em empregos relacionados. Os motoristas podem perder os seus empregos e empresas que dependem de transporte terrestre terão de se adaptar a novas tecnologias. Em termos sociais, os VAs podem ajudar a reduzir o número de acidentes de trânsito causados por erro humano e tornar as viagens mais seguras e acessíveis para as pessoas com deficiência ou mesmo idosos. No entanto, existem questões de privacidade e segurança cibernética a serem consideradas.

Em geral, é importante que a adoção de VAs seja gerida de forma cuidadosa e equilibrada, tendo em consideração não só benefícios como possíveis impactos negativos. A regulamentação adequada e o envolvimento de múltiplos setores são fundamentais para garantir uma transição suave e justa para essa nova era de transporte.

## Siglas, Acrónimos e Símbolos

- **IA** — Inteligência Artificial
- **ASMa** — Agentes e Sistemas Multiagente
- **VCA** — Veículos e Condução Autônoma
- **VAs** — Veículos Autônomos
- **SCA** — Sistema de Condução Autônoma
- **SAE** — Sociedade de Engenheiros Automotivos
- **CARLA** — *Car Learning to Act*
- **IoT** — *Internet of Things*
- **IoV** — *Internet of Vehicles*
- **SO** — Sistema Operacional
- **UCE** — Unidade de Controlo Eletrónico
- **AUTOSAR** — *Automotive Open System Architecture*
- **CAN** — *Controller Area Network*
- **N/A** — Não Aplicável
- **?** — Incerteza associada à previsão
- **SUMO** — *Simulation of Urban MObility*

## Referências

1. Liangkai Liu, Sidi Lu, Ren Zhong, Baofu Wu, Yongtao Yao, Qingyang Zhang, and Weisong Shi. “Computing Systems for Autonomous Driving: State of the Art and Challenges”. In: *IEEE Internet of Things Journal* 8 (8 Apr. 2021), 6469–6486. ISSN: 23274662.
2. Ali Dorri, Salil S. Kanhere, and Raja Jurdak. “Multi-Agent Systems: A Survey”. In: *IEEE Access* 6 (Apr. 2018), 28573–28593. ISSN: 21693536.
3. I. Barabás, A. Todoruț, N. Cordoș, and A. Molea. “Current challenges in autonomous driving”. In: vol. 252. Institute of Physics Publishing, Oct. 2017.
4. Jiadai Wang, Jiajia Liu, and Nei Kato. “Networking and Communications in Autonomous Driving: A Survey”. In: *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 21 (2 Apr. 2019), 1243–1274. ISSN: 1553877X.
5. *Mercedes-Benz GLS: assistente de frenagem ativo com função de cruzamento.*
6. *J3016\_202104: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles - SAE International.*
7. Ekim Yurtsever, Jacob Lambert, Alexander Carballo, and Kazuya Takeda. “A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies”. In: *IEEE Access* 8 (2020), 58443–58469. ISSN: 21693536.
8. Sagar Behere and Martin Törngren. “A functional architecture for autonomous driving”. In: *WASA 2015 - Proceedings of the 2015 ACM Workshop on Automotive Software Architecture, Part of CompArch 2015* (May 2015), 3–10.
9. Shaoshan Liu, Jie Tang, Zhe Zhang, and Jean-Luc Gaudiot. *COVER FEATURE COMPUTER DESIGN STARTS OVER Computer Architectures for Autonomous Driving.*
10. Umberto Montanaro, Shilp Dixit, Saber Fallah, Mehrdad Dianati, Alan Stevens, David Oxtoby, and Alexandros Mouzakitis. “Towards connected autonomous driving: review of use-cases”. In: *Vehicle System Dynamics* 57 (6 June 2019), 779–814. ISSN: 17445159.
11. Margarita Martínez-Díaz and Francesc Soriguera. “Autonomous vehicles: Theoretical and practical challenges”. In: vol. 33. Elsevier B.V., 2018, 275–282.
12. Renate Haeuslschmid, Max Von Buelow, Bastian Pfleging, and Andreas Butz. “Supporting trust in autonomous driving”. In: *International Conference on Intelligent User Interfaces, Proceedings IUI* (Mar. 2017), 319–329.



13. Constantin Hubmann, Marvin Becker, Daniel Althoff, David Lenz, and Christoph Stiller. “Decision making for autonomous driving considering interaction and uncertain prediction of surrounding vehicles”. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., July 2017, 1671–1678. ISBN: 9781509048045.
14. Lianzhen Wei, Zirui Li, Jianwei Gong, Cheng Gong, and Jiachen Li. “Autonomous Driving Strategies at Intersections: Scenarios, State-of-the-Art, and Future Outlooks”. In: vol. 2021-September. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sept. 2021, 44–51. ISBN: 9781728191423.
15. H S Behera, Reena Kumari Naik, and Suchilagna Parida. *Improved Multilevel Feedback Queue Scheduling Using Dynamic Time Quantum and Its Performance Analysis*.
16. IEEE Staff. *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*. IEEE, 2017. ISBN: 9781538605516.
17. Todd Alexander Litman and Todd Litman. “www.vtpi.org Info@vtpi.org Phone 250-508-5150 Autonomous Vehicle Implementation Predictions”. In: *Victoria Transport Policy Institute* (2023).
18. 2023.
19. Huimin Lu, Qiang Liu, Daxin Tian, Yujie Li, Hyoungeop Kim, and Seiichi Serikawa. “The Cognitive Internet of Vehicles for Autonomous Driving”. In: *IEEE Network* 33 (3 May 2019), 65–73. ISSN: 1558156X.
20. Dimitrios Troullos, Georgios Chalkiadakis, and Markos Papageorgiou. *Collaborative Multiagent Decision Making for Lane-Free Autonomous Driving*.
21. *Grupo Volkswagen e Bosch criam aliança para acelerar condução autónoma*.
22. *Huawei pretende desenvolver a sua tecnologia de condução autónoma até 2025 - Pplware*.
23. *Exame Informática — Xiaomi acquire startup de condução autónoma Deepmotion*.
24. *Acerca — Tesla*.
25. *Autopilot e Capacidade de condução autónoma total — Serviço de apoio da Tesla Portugal*.
26. *Self-driving car technology — Bosch Global*.
27. *Autonomous driving in Hamburg*.
28. Steven Shladover. “The Truth about “Self-Driving” Cars”. In: *Scientific American* 314 (May 2016), 52–57.
29. Johanna Zmud, Ginger Goodin, Maarit Moran, Nidhi Kalra, and Eric Thorn. “Strategies to Advance Automated and Connected Vehicles”. In: *Strategies to Advance Automated and Connected Vehicles* (Aug. 2017).
30. Bloomberg. “Taming the Autonomous Vehicle A Primer for Cities”. In: *The ASPEN INSTITUTE* (2017).
31. F. Kuhnert and C. Stürmer. “Five trends transforming the Automotive Industry”. In: *PricewaterhouseCoopers* (2018).
32. Steven Gehrke. “A Survey of Ride-Hailing Passengers”. In: *MAPC* (2018).
33. Authors Shaheen and Hannah Stocker. “UC Berkeley UCONNECT Title Future of Mobility White Paper Permalink <https://escholarship.org/uc/item/68g2h1qv>”. In: *UC Berkeley* (2018).