

# Aplicações dos Agentes e Sistemas Multiagente nos Transportes Inteligentes

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Escola de Engenharia

<sup>2</sup> Mestrado em Engenharia Informática

**Abstract** Este trabalho consiste numa investigação de potenciais casos e experiências existentes na literatura científica para a aplicação das tecnologias de agentes e sistemas multiagente no setor dos transportes inteligentes. O documento inicia com uma breve introdução ao tema que vai ser investigado seguida de uma explicação de conceitos essenciais abordados neste trabalho, nomeadamente os conceitos de agente e sistemas multiagente e os pontos centrais que caracterizam os transportes inteligentes. Posteriormente, apresentamos uma breve descrição da estratégia metodológica utilizada para a obtenção e análise dos conteúdos que deram origem a este trabalho. De seguida, apresentamos um conjunto de casos de estudo existentes na literatura científica que abordam a aplicação de tecnologias de sistemas multiagente nos transportes (controlo de tráfego, gestão de estacionamento, entregas e logística e condução autónoma). Para finalizar, apresentamos alguns desafios que estes tipos de sistemas podem apresentar, a partir dos artigos e estudos revistos neste documento.

**Keywords:** Agentes · Inteligência Artificial · Sistemas multiagente · Transportes inteligentes

## 1 Introdução

Nos últimos anos, a rápida evolução da tecnologia tem desempenhado um papel fundamental na transformação de diversos setores, e o campo de Agentes e Sistemas Multiagente (MAS) emergiu como uma abordagem inovadora para lidar com a complexidade e a dinâmica de sistemas distribuídos [9]. Neste contexto, os Transportes Inteligentes destacam-se como uma área de pesquisa crucial, impulsionada pela necessidade de otimizar a eficiência, segurança e sustentabilidade dos sistemas de transporte modernos.

Este artigo visa realizar uma análise abrangente das soluções existentes no estado da arte no domínio de Agentes e Sistemas Multiagente, com um foco específico na sua aplicação na área de Transportes Inteligentes. O objetivo principal é investigar como as abordagens baseadas em agentes têm sido empregues para enfrentar os desafios complexos inerentes aos sistemas de transporte, promovendo uma gestão mais eficiente, adaptativa e integrada.

## 2 Definição e Caracterização

Esta secção tem como objetivo apresentar as definições e características de todos os conceitos teóricos utilizados ao longo da elaboração deste documento.

### 2.1 Agentes e Sistemas multiagente

Tal como mencionado por Russell et al. [15], um agente representa uma entidade com a capacidade de perceber o ambiente por meio de sensores e interagir com o mesmo através de atuadores. Já para M. Wooldridge [18], um agente é um sistema de computador capaz de agir de forma independente em nome do seu utilizador ou proprietário, podendo descobrir por si mesmo o que precisa de fazer para satisfazer os seus objetivos, em vez de ter que ser informado explicitamente sobre o que fazer num determinado momento.

Segundo Ivamoto et al. [17], os sistemas multiagente são compostos por múltiplos agentes que colaboram entre si e possuem uma existência própria, independente dos outros agentes. Cada agente detém um conjunto de habilidades comportamentais que influenciam a sua competência, objetivos e autonomia. Enquanto que individualmente os agentes podem ter propósitos específicos, em conjunto podem cooperar e colaborar para otimizar o desempenho do sistema. De acordo com Leitão et al. [13], os sistemas multiagente são fundamentados no controlo distribuído, com agentes cooperativos e autónomos que trabalham de forma coordenada para realizar uma tarefa específica.

### 2.2 Transportes inteligentes

Os transportes inteligentes representam uma revolução na forma como concebemos e implementamos sistemas de locomoção. No cerne deste paradigma emergente, destaca-se a interseção dinâmica entre a inteligência artificial e os agentes autónomos.

Os transportes inteligentes referem-se a um conjunto de sistemas de transporte que integram tecnologias avançadas para otimizar a eficiência, segurança e sustentabilidade. No âmbito dos agentes, essa definição expande-se para incluir a capacidade dos sistemas de interagirem autonomamente, percecionando o ambiente à sua volta e agir em conformidade. Os agentes, neste contexto, podem referir-se a entidades autónomas, como veículos autónomos, semáforos inteligentes, e sistemas de gestão de tráfego baseados em algoritmos, entre outros.

Alguns dos princípios fundamentais que caracterizam os transportes inteligentes no contexto de agentes incluem:

1. **Autonomia e Tomada de Decisão:** Os transportes inteligentes baseados em agentes destacam-se pela capacidade dos veículos e infraestrutura de tomar decisões autónomas. Algoritmos de aprendizagem e inteligência artificial capacitam esses agentes a avaliar rapidamente situações e tomar decisões contextualmente apropriadas, contribuindo para a eficiência e segurança do sistema.

2. **Comunicação Interativa:** A caracterização dos transportes inteligentes incorpora a comunicação dinâmica entre os agentes. Veículos e infraestrutura partilham informações em tempo real, permitindo uma coordenação eficiente para evitar congestionamentos, acidentes e otimizar o fluxo de tráfego.
3. **Sensores e Percepção Ambiental:** Agentes em transportes inteligentes são equipados com uma variedade de sensores, como câmaras, radares e lidars, que permitem uma percepção detalhada do ambiente. Essa característica é fundamental para a segurança e tomada de decisões precisas, especialmente em ambientes urbanos complexos.
4. **Sustentabilidade e Eficiência Energética:** A caracterização dos transportes inteligentes inclui a procura pela sustentabilidade ambiental e eficiência energética. Agentes são projetados para otimizar rotas, reduzir o consumo de combustível e minimizar as emissões, contribuindo para um sistema de transporte mais sustentável.
5. **Adaptação Dinâmica:** Transportes inteligentes baseados em agentes são capazes de se adaptar dinamicamente a mudanças nas condições de tráfego, condições climáticas e eventos inesperados. Essa capacidade de adaptação é crucial para a manutenção da eficiência e segurança em ambientes em constante evolução.

Em resumo, a definição de transportes inteligentes baseados em agentes destaca um novo ecossistema que procura transformar a forma como nos movemos, enfatizando autonomia, comunicação eficaz e sustentabilidade. Essa abordagem promissora indica um futuro onde a tecnologia melhora não apenas a eficiência, mas também a segurança e a qualidade de vida nas estradas e além.

### 3 Estratégia Metodológica

Este trabalho tem como objetivo elaborar uma investigação de potenciais casos ou experiências existentes na literatura no âmbito da aplicação das tecnologias de agentes e sistemas multiagente nos transportes inteligentes.

Para cumprir esse objetivo, procedemos à recolha de estudos relacionados com o tema a investigar e sintetizamos a informação que consideramos ser relevante de cada um deles.

Assim, a estratégia metodológica utilizada para a elaboração deste trabalho foi a seguinte:

1. **Definição do tema:** A partir conjunto de domínios fornecidos no enunciado, o grupo optou por investigar a aplicação de agentes e sistemas multiagente nos transportes.
2. **Definição das bases de dados bibliográficas:** Recorremos maioritariamente às bases de dados mais reconhecidas e com recursos confiáveis, tais como: IEEE Xplore, Science Direct, Springer, Scopus, Google Scholar e Web of Science.
3. **Definição das palavras chave e termos:** Nas diversas ferramentas mencionadas, utilizamos as seguintes palavras chave para encontrar os conteúdos

pretendidos: “Agents”, “multi-agent systems”, “agent-based systems”, “artificial intelligence”, “intelligent transportation”.

4. **Método de selecção dos conteúdos:** O critério de selecção dos conteúdos baseou-se nalguns atributos como: o título, *abstract*, introdução, resultados obtidos, conclusões e a língua (português ou inglês). Estes atributos serviram para determinar a compatibilidade dos conteúdos em relação ao tema a ser estudado.

## 4 Potenciais aplicações dos agentes nos transportes

Os agentes e sistemas multiagente têm uma ampla gama de aplicações no sector de transportes, proporcionando soluções inovadoras para diversos problemas enfrentados nas infraestruturas rodoviárias e de transporte público. Estas tecnologias inteligentes são fundamentais para otimizar o fluxo de tráfego, aumentar a segurança rodoviária e reduzir os impactos ambientais negativos. Abaixo, apresenta-se uma visão geral das áreas de aplicação e alguns artigos existentes na literatura que exploraram os temas.

### 4.1 Controlo de Tráfego

Agentes de controlo de semáforos podem adaptar os tempos de luz verde, amarela e vermelha com base na densidade do tráfego em tempo real. Sistemas multiagente podem utilizar agentes deste tipo para coordenar a comunicação entre semáforos para otimizar o fluxo de tráfego em redes de vias interligadas e assim alcançar uma optimização o mais abrangente possível nas condições de tráfego.

Um exemplo de utilização de agentes neste sector é um estudo de Belbachir, A. et al. [5], em que foi utilizado numa simulação um mecanismo auto-adaptativo para regulação do tráfego baseado em agentes cooperativos, empregues em semáforos, que usa comunicação entre elementos de infraestrutura (I2I) para mitigar o congestionamento nos cruzamentos/intersecções.

Os autores propõem três tipos de agentes: agentes de visão, agentes de semáforo e agentes de intersecção, que são responsáveis por contar carros, controlar a duração das luzes e ajustar a duração de acordo com o fluxo de tráfego, respetivamente. É usada uma técnica chamada *Adaptive Value Tracking* (AVT) para calcular os ajustes de duração, e comparam dois comportamentos possíveis dos agentes de intersecção: egoísta (não colaborativo) e colaborativo (levando em conta os vizinhos).

Foram utilizadas as ferramentas SUMO e JADE para simular e validar o mecanismo proposto em diferentes cenários, e os resultados mostram-se melhores do que no sistema padrão em que a periodicidade dos semáforos é fixa, especialmente quando os agentes de intersecção são colaborativos. No entanto, o artigo limita-se a demonstrar resultados de simulações com apenas duas intersecções, sem explorar cenários mais complexos e mais realistas.

Num artigo de Wu, T. et al. [19] é abordado o desafio de coordenar os semáforos em múltiplas intersecções urbanas usando aprendizagem por reforço profunda.

O objetivo é reduzir o congestionamento de tráfego e melhorar a eficiência do fluxo de veículos.

Os autores consideram o tempo total de espera dos peões que atravessam a estrada, uma vez que existe um grande número de peões em zonas urbanas ou comerciais e por vezes os semáforos que apenas têm em consideração os veículos, causam longos tempos de espera e incómodos aos peões. Este fator não é considerado frequentemente em sistemas descritos noutros artigos da área, sobressaindo esta característica pela positiva.

Para além disso, é salientado o facto de que transportes públicos, como autocarros, devem ter um tratamento diferente dos veículos privados, dado que o número de passageiros de um autocarro é maior do que nos restantes veículos, o que justifica a atribuição de uma prioridade maior aos autocarros para passarem.

O artigo propõe o algoritmo MARDDPG (*Multi-Agent Recurrent Deep Deterministic Policy Gradient*) para controlar semáforos em redes de veículos, combinando aprendizagem profunda, políticas determinísticas e memória recorrente (LSTM) para melhorar o desempenho em cenários complexos e dinâmicos, como é o caso do cenário do controlo de tráfego. Estende o algoritmo *Deep Deterministic Policy Agent* a um algoritmo de gradiente de política multiagente em que os agentes descentralizados aprendem uma crítica centralizada com base nas observações e ações de todos os agentes. Embora a aprendizagem seja centralizada, a execução é descentralizada. Isto significa que, depois dos agentes terem aprendido com a informação centralizada, podem tomar decisões de forma independente durante a operação em tempo real.

Os resultados experimentais obtidos no artigo demonstram um desempenho estável em diversos e variados cenários de coordenação de interseções, sendo geralmente bem sucedido no objetivo de reduzir congestionamento de veículos e peões.

Num outro artigo de Yang, J. et al. [20], é proposta a construção de uma *Software Defined Internet of Things* (SD-IoT) com um esquema de controlo de tráfego que não só tem em conta os semáforos para a gestão do tráfego, mas também os veículos.

No artigo, é apresentado um ambiente simulado, baseado em SD-IoT, que inclui várias interseções com o objetivo de aproximar-se o máximo possível de um contexto real capaz de abranger uma perspetiva global para uma solução ótima que alivie o congestionamento de tráfego através da modificação de ações de veículos e semáforos de forma sincronizada. Este ambiente inclui semáforos controlados por algoritmos DRL (*Deep Reinforcement Learning*), veículos controlados por algoritmos DRL e outros veículos controlados por regras fixas que representam veículos sem funcionalidades inteligentes. Os algoritmos DRL orientam os agentes, mais concretamente, semáforos e veículos controlados por algoritmos DRL a encontrar uma política adequada para cooperar com outros no sistema de rede inteligente multiagente e consequentemente, aumenta a velocidade média de todos os veículos e atenua-se o problema do congestionamento do tráfego neste ambiente.

Este artigo [20] destaca-se pela positiva, pela importância dada à integração dos veículos como agente capaz de atuar na solução multiagente proposta, tirando partido de muito mais possibilidades ao contrário de artigos que apenas consideram semáforos como entidades nas quais atuar. Para além disso, destaca-se o esforço por representar uma simulação próxima da realidade, através da representação de várias interseções com vários veículos na simulação.

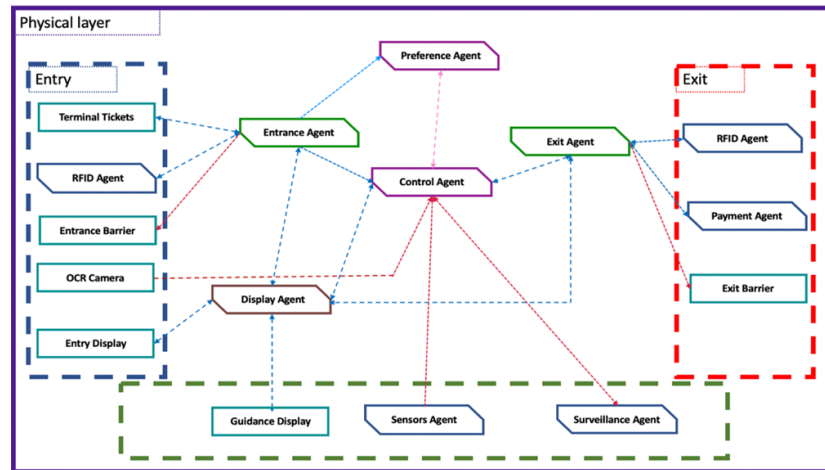
### Análise crítica

Os três artigos da área de controlo de tráfego fornecem simulações com resultados promissores, mostrando uma notória eficácia na redução do congestionamento de tráfego em interseções e cruzamentos. Os artigos [5] e [19] fornecem uma proposta similar no sentido em que apenas se coordena a ação dos semáforos para o objetivo de reduzir congestionamento, ao contrário do artigo [20] que para além dos semáforos, explora ações de certos veículos autónomos como meio de auxiliar a gestão do tráfego e consequente aumento médio do fluxo dos automóveis. Certos artigos como o [19] e [20] assumem um sistema em que os carros possuem equipamento capaz de transmitir informações como velocidade e localização a outros intervenientes, o que levanta questões acerca da aplicabilidade destes modelos num mundo real em que nem todos os carros são modernos, para não falar das preocupações de privacidade com a captura e distribuição de informações que podem surgir com esta questão. Outro aspeto que merece destaque na proposta do artigo [20], é a integração dos peões e favorecimento de transportes públicos, sendo fatores muitas vezes ignorados por outros artigos que abordam controlo de tráfego, e cuja inclusão contribui para um sistema mais sofisticado e aprimorado.

## 4.2 Gestão de Estacionamento

Os agentes podem ser utilizados para monitorizar a ocupação dos lugares de estacionamento em tempo real, permitindo usar sistemas multiagente para coordenar o acesso e a procura por parques de estacionamento, contribuindo para a redução dos congestionamentos, devido ao *cruise-parking* [16], com impactos positivos no ambiente derivado à redução do consumo de energia/combustível.

No artigo de Sofia Belkhala et al. [6] é feita a conceção de uma arquitetura de um sistema multiagente cujo objetivo é automatizar o processo de estacionamento de automóveis, permitindo aos condutores obter informação em tempo real de lugares de estacionamento vagos e guiá-los até esses mesmos lugares (podendo também reservá-los antecipadamente). O sistema proposto é composto por três camadas principais, sendo elas a camada física, a camada aplicacional e a *knowledge base*. Cada camada possui diferentes tipos de agentes que comunicam entre si e executam diferentes tipos de tarefas.

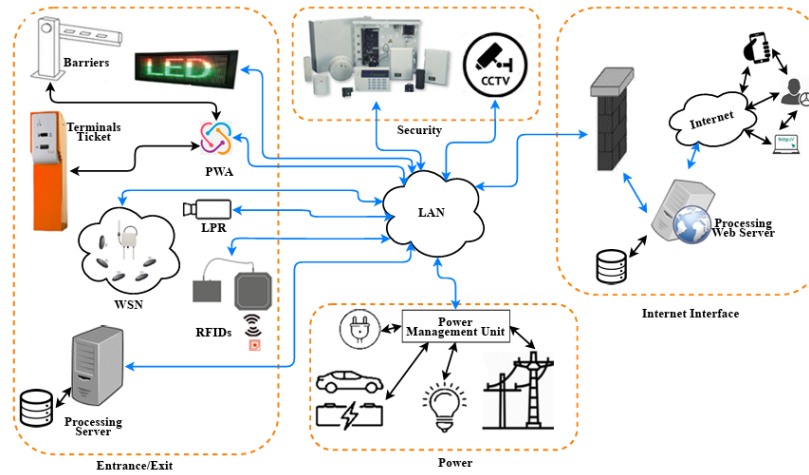


**Figura 1.** Arquitetura da camada física [6]

Alguns dos agentes do sistema incluem: o *sensor agent* que é responsável por detectar o estado das vagas de estacionamento, o *payment agent* que é responsável por identificar a forma e o valor do pagamento, o *guidance agent* que é responsável por calcular o caminho ideal para a vaga de estacionamento, entre outros. O sistema também utiliza aprendizagem por reforço para melhorar o comportamento e o desempenho dos agentes.

Um artigo de Coulibaly, M. et al. [7] apresenta uma arquitetura global, desde equipamento até software, de um sistema de estacionamento inteligente baseado em agentes, com o objetivo de melhorar o processo de procura de estacionamento, fornecer segurança e respeitar o ambiente no que toca a consumo de energia sustentável. O artigo faz uma revisão bastante exhaustiva de artigos relacionados a sistemas de estacionamento em que, de forma resumida, conclui que a grande maioria integram principalmente as funcionalidades do estacionamento e os agentes de equipamento de estacionamento são completamente ignorados. Com este artigo, os autores procuram abordar essa questão.

Esta arquitetura inclui todos os equipamentos envolvidos no desenho do parque de estacionamento e pode ser dividida em quatro módulos interligados através de uma rede local (LAN). Estes quatro módulos são agrupados da seguinte forma:



**Figura 2.** Módulos da arquitetura [7]

O artigo suporta a arquitetura com uma série de fluxogramas que descrevem o funcionamento dos sistemas RFID, terminais de bilhetes, rede de sensores IoT e serviço de reserva. A integração de todos estes componentes permite uma gestão eficiente do estacionamento, com suporte para identificação de veículos, reservas, monitorização de status de estacionamento e orientação de utilizadores.

A gestão do estacionamento é feita por servidores de processamento (PS) e pelo servidor web de estacionamento (PWS), que se comunicam entre si. Os servidores têm vários agentes para lidar com a identificação de veículos, gestão de reservas, gestão de sensores IoT e gestão de cobranças. Sensores *wireless* são usados para monitorar o estado dos lugares de estacionamento, e o sistema de bilhetes é usado para identificar veículos não inscritos. Além disso, o sistema de automatização web de estacionamento controla os acessos físicos e as comunicações com os servidores de processamento. O sistema oferece serviços de reserva, orientação, cobrança e gestão de utilizadores abrangendo de forma completa vários aspetos inerentes à gestão de estacionamento.

### Análise Crítica

Os dois artigos estudados no tema dos estacionamentos são relativamente semelhantes na medida em que ambos têm como finalidade a proposta de sistemas multiagente que melhoram a eficácia na descoberta de lugares vagos, permitindo poupar combustível no decurso da procura e evitar o *cruise-parking*. Ambos apresentam um nível de cobertura bastante completo, em que detalham aspetos relativos aos equipamentos concretos bem como as funcionalidades dos agentes para a gestão de estacionamento.

O primeiro artigo [6] apresenta um nível de detalhe bem mais reduzido do comportamento dos agentes envolvidos, enquanto que no artigo [7] é feita uma



análise bem mais detalhada relativamente a trabalhos similares e são explorados em mais detalhe os seus componentes com a apresentação de fluxogramas.

No entanto, ambos os trabalhos não apresentam uma validação mais prática das suas propostas sem demonstrarem provas concretas relativas às melhorias no tráfego. A acrescentar, a implementação concreta destes sistemas seria bastante complexa, dada a exigência de vários equipamentos de monitorização do estado dos parques de estacionamento e a complexidade de manutenção necessária a todos estes sistemas.

### 4.3 Entregas e Logística

Problemas de planeamento de logística de transportes apresentam características que estão alinhadas com as capacidades específicas dos sistemas multiagente. Mais concretamente, estes sistemas são capazes de lidar com configurações de planeamento inter-organizacionais e orientadas a eventos, cumprindo assim os requisitos recorrentes no planeamento e execução da logística de entregas [12].

Neste tipo de sistema, algoritmos de *machine learning* podem ser usados para analisar dados históricos e fazer previsões sobre eventos futuros, como condições do tráfego ou tempos de entrega, sendo capazes de adaptar o planeamento consoante a ocorrência de possíveis imprevistos.

Estes sistemas podem ter um impacto significativo na redução das emissões de gases de efeito estufa, pois a ineficiência de percursos no transporte de passageiros e de carga é responsável por grande parte das emissões de gases de efeito estufa [3]. Portanto, a otimização de rotas é um componente crítico para alcançar a sustentabilidade no setor de transporte.

Vários artigos apontam para os benefícios da implementação de tecnologias relativas a sistemas multiagente como estratégia para alcançar melhores tomadas de decisão no ramo da logística e entregas.

No artigo de Khayyat, M.M. [11] é apresentado um modelo baseado em agentes inteligentes para sistemas de logística colaborativa que visa facilitar o processo de distribuição de produtos. O modelo envolve seis agentes autónomos: *RFIDG Agent*, *Retailer Agent*, *Supplier Agent*, *Carrier Agent*, *Network Agent*, *City Administrator Agent*. Estes agentes assimilam a informação do ambiente em que estão inseridos, comunicando-a entre si para que a logística de entrega de produtos seja mais simplificada ao humano e ao mesmo tempo otimizada.

O modelo proposto utiliza a Teoria de Jogos para analisar e otimizar os cenários de colaboração entre fornecedores e transportadores, considerando os seus custos, preços, qualidades e quantidades. O seu objetivo final é maximizar os lucros dos fornecedores ao satisfazer os pedidos de compra dos *retailers*. Nesta arquitetura, os agentes possuem uma estrutura organizada que lhes permite analisar, deliberar e tomar decisões com base em informações disponíveis e nas metas a alcançar encaixando-se numa arquitetura deliberativa.

O artigo conclui com que a colaboração entre as diversas entidades logísticas pode trazer vários benefícios no que toca a otimização de rotas e maximização de lucros, com a integração de agentes que gerem todo o processo de colaboração.

No artigo de Zhang, K. et al. [21] é apresentado um novo modelo de aprendizagem por reforço com o objetivo de resolver o problema de roteamento de múltiplos veículos numa janela temporal flexível. Este tipo de problema caracteriza-se pela necessidade de gerir uma frota de veículos para servir vários clientes, dentro de um espaço temporal específico, mas que permite que esta janela temporal não seja estritamente obedecida havendo penalizações quando isso acontece, daí a designação de janela temporal flexível. Neste modelo os vários veículos da frota são os agentes do sistema que percebem o estado do ambiente uns dos outros. Com base no conhecimento obtido através desta percepção decidem um conjunto de ações sequenciais que tem efeitos no ambiente e, conseqüentemente, altera o estado em que o agente se encontra. Cada agente do sistema DRL tem um estado objetivo de maximizar essas recompensas a longo prazo, aprendendo uma boa política, que é um mapeamento dos estados percebidos para as ações. Os agentes seguem assim uma arquitetura deliberativa na qual o agente faz escolhas informadas e planeadas para atingir metas específicas e ponderando as consequências das suas decisões.

Existem vários algoritmos propostos para resolver estes problemas, mas estas soluções sofrem de problemas de escalabilidade na resolução dos problemas num curto período de tempo ou não apresentam uma boa estrutura para lidar com as janelas temporais flexíveis. Para ultrapassar estes problemas, os autores visam incorporar um modelo de *Deep Reinforcement Learning* chamado *Multi-Agent Attention Model* (MAAM), que é essencialmente uma estrutura *attention-based encoder-decoder* e que trata soluções como uma sequência de decisões.

O desempenho do MAAM foi avaliado em quatro cenários de teste com diferentes escalas e compara-o com dois algoritmos heurísticos clássicos e o Google OR-Tools. Os resultados mostram que o MAAM supera consistentemente os métodos de referência em termos de qualidade da solução e eficiência computacional, e também demonstra robustez a variações no número de clientes e na capacidade dos veículos.

## Análise Crítica

Apesar do artigo de Khayyat, M.M. [11] sugerir uma arquitetura interessante para sistemas modernos de logística, não apresenta em grande detalhe a performance do *Network Agent*, que estaria encarregue de planejar rotas, em circunstâncias mais detalhadas e variadas, sendo um elemento crucial no funcionamento do sistema como um todo, uma vez que trata de indicar ao *Carrier* a rota a prosseguir. Também o papel do *City Administrator Agent* parece vago sem grandes demonstrações da sua performance.

O artigo baseia-se num modelo conceptual de agentes, mas não apresenta uma implementação prática do sistema proposto, sem também considerar as possíveis restrições operacionais, regulatórias ou contratuais que podem afetar a colaboração entre as entidades logísticas num contexto de implementação da proposta na realidade.

O artigo de Zhang, K. et al. [21] complementa o artigo anterior no sentido em que dá uma perspetiva mais detalhada na parte do roteamento de veícu-

los, demonstrando atenção a detalhes como as *soft-windows*. Mas tal como o artigo anterior, este carece de uma validação mais prática, pois o *setting* das experiências realizadas é relativamente simples sendo apenas testado num plano euclidiano, não explorando contextos mais complexos e consequentemente, mais próximos da realidade.

#### 4.4 Veículos Autónomos

Os veículos autónomos são veículos capazes de executar tarefas anteriormente atribuídas aos humanos de forma independente. Ao utilizarem tecnologias como sensores, câmaras e inteligência artificial, estes veículos podem detetar o ambiente ao seu redor e tomar decisões em tempo real para navegar com segurança. A sua utilidade reside na potencial redução de acidentes de trânsito devido à eliminação de erros humanos, na otimização do uso de espaço nas estradas, na maior eficiência energética e na acessibilidade para pessoas com mobilidade reduzida.

No tópico de condução autónoma existem 6 níveis que distinguem o tipo de automatização que os sistemas apresentam definidos pela organização SAE International [1].

Esses níveis são os seguintes:

- **Nível 0 : No Driving Automation**
- **Nível 1 : Driver Assistance** - Os veículos conseguem controlar certos aspetos como a velocidade e a direção (*cruise control*) ou manter uma distância segura com o carro da frente. No entanto o condutor ainda precisa de monitorizar outros detalhes.
- **Nível 2 : Partial Driving Automation** - Os veículos conseguem controlar o acelerador, o travão e o volante para chegar a um destino predeterminado no entanto o condutor ainda pode tomar o controlo do veículo se for necessário.
- **Nível 3 : Conditional Driving Automation** - Os veículos conseguem detetar o ambiente à sua volta e tomar decisões informadas, como ultrapassar veículos. No entanto este sistema ainda necessita que o condutor consiga intervir se considerar que é necessário.
- **Nível 4 : High Driving Automation** - Os veículos neste nível conseguem ser autossuficientes em casos inesperados ou falhas do sistema e com isso não necessitam de qualquer intervenção humana. Neste nível os veículos ainda permitem que o humano assuma o controlo.
- **Nível 5 : Full Driving Automation** - Os veículos neste nível não possuem pedais ou volante e a interação entre o veículo e os passageiros é eliminada.

Para conseguirmos perceber melhor como os sistemas de condução autónoma funciona recorreremos a um estudo feito em 2020 [14] que fala sobre o estado da arte e os desafios destes sistemas.

Este artigo toca em vários pontos sobre o desenvolvimento e funcionamento dos sistemas de condução autónoma, desde dos dispositivos capazes de captar o ambiente como câmaras, radar, lidar, sensores ultrassónicos e sistemas de navegação como GPS e formas de comunicação entre veículos para a criação de

uma rede multiagente como 5G, DSRC (*Dedicated short-range communications*) e C-V2x.

Com a leitura deste artigo somos capazes de ter uma noção melhor do funcionamento desta aplicação dos sistemas agentes e será de grande utilidade para o desenvolvimento de qualquer projeto nesta área.

Passando para o mundo real, um dos sistemas de condução autónoma mais reconhecidos em todo o mundo é o da Tesla pela sua capacidade de transportar passageiros de um ponto A ao ponto B sem intervenção humana. O sistema da Tesla é considerado nível 2 segundo os níveis definidos pela SAE porque o veículo necessita que o condutor esteja sempre atento e pronto a tomar controlo do veículo se for necessário.

O nível mais avançado que está neste momento a ser utilizado no mundo é o nível 4. A empresa Waymo possui veículos que transportam passageiros por algumas cidades dos Estados Unidos e não necessitam de um condutor para fazer a viagem.

A grande diferença entre a Waymo e a Tesla é os diferentes aparelhos de sensorização que os veículos Waymo possuem. Enquanto que a Tesla apenas recorre às câmaras montadas à volta do veículo, a Waymo possui mais sistemas como o *Lidar* que através de lasers conseguem detetar objetos em situações de escuridão total, *Radar* que consegue detetar melhor os objetos em situações de chuva, névoa ou neve, e também sensores sonoros que conseguem detetar as sirenes dos veículos de emergência. Todos estes sensores permitem que o veículo da Waymo possa tomar decisões mais informadas em relação ao ambiente à sua volta.

Para além dos veículos autónomos terrestres, está também a haver um grande investimento no desenvolvimento de sistemas autónomos na área dos transportes aéreos de passageiros sobre curtas distâncias. Vários estudos foram conduzidos para analisar a viabilidade destes modos de transporte. Um desses estudos foi o estudo feito na Universidade de São Paulo em 2021 [10], onde foi utilizado um modelo multiagente para avaliar a eficácia dos veículos aéreos enquanto deslocam-se por áreas urbanas densas. Estes modelos foram estudados com vários parâmetros que permitiam modificar a capacidade, a velocidade mínima e máxima das aeronaves e as condições climatéricas.

Os resultados desta experiência foram calculados a partir do número de viagem completas, do número de colisões entre aeronaves, dos conflitos entre as naves, que ocorrem quando as aeronaves ficam demasiado perto umas das outras, e o número de vezes que uma aeronave bloqueou outra. Estes valores foram comparados em diferentes execuções dos modelos com os mesmos parâmetros para descobrir os melhores. No entanto o estudo chegou à conclusão que a criação destes modelos que simulam a vida real é algo bastante complicado e devido à falta de casos reais deste tipo de transporte o que torna difícil validar os resultados obtidos.

Passando para o mundo real vemos que existem avanços significativos neste modo de transporte. A empresa EHang situada na China produz aeronaves capazes de voar sem um piloto a bordo e a sua aeronave EH216-S AAV foi a primeira

a receber um certificado “airworthiness” que permite a sua utilização [2]. Este veículo consegue transportar até 2 passageiros e necessitando apenas de manter contacto com um centro de controlo para garantir a segurança dos passageiros.

Segundo a Flying [8] o EH216-S já está nas mãos da empresa Eton que planeia começar a operar estes veículos em 3 cidades da China.

### Análise crítica

O estudo feito em 2020 sobre condução autónoma [14] apresenta bem as bases das tecnologias envolvidas no desenvolvimento dos sistemas de condução autónoma e contém bastante informação sobre o que está a ser utilizado atualmente no mercado. Os desafios que apresenta como custos, segurança e privacidade também estão bem detalhados com exemplos reais.

O artigo feito na Universidade de São Paulo [10] apresenta uma abordagem interessante para descobrir a viabilidade deste modo de transporte. A utilização de parâmetros modificáveis permite a modelação de diferentes casos, no entanto não é o suficiente para criar uma representação do mundo real e ter uma validação confiável dos resultados.

## 5 Desafios

Os agentes e sistemas multiagente têm amplas gamas de aplicação no que diz respeito aos transportes inteligentes. No entanto, não estão isentos de desafios que colocam problemas na sua aplicabilidade neste sector. Eis alguns exemplos:

- **Exigência computacional:** Um dos desafios enfrentados na utilização de agentes consiste na simulação de sistemas de transporte em larga escala, dada a crescente complexidade do ambiente dos modelos. Com o aumento do número de agentes e a combinação de diferentes componentes, como escolha do modo de transporte ou escolha da rota, pode haver uma exigência cada vez maior por recursos computacionais que pode causar um aumento significativo tempo de execução das simulações.
- **Sistemas de transportes complexos:** Este desafio está relacionado à crescente complexidade dos sistemas de transporte devido à introdução de vários modos de transporte emergentes e esquemas de mobilidade, referido no artigo [4]. Essa complexidade torna difícil capturar as interações dentro do sistema de transporte quando se utilizam modelos convencionais. Além disso, é referida a necessidade de investigar o impacto desses sistemas complexos nos ambientes de transporte existentes, incluindo a avaliação das interações entre os modos de transporte emergentes e os modos existentes.
- **Falhas técnicas e problemas de segurança:** O controlo dos sistemas multiagente é frequentemente coordenado por meio da interação e troca de informação entre os agentes, que é um dos fatores mais importantes que afetam o desempenho e o funcionamento do sistema. Falhas físicas inesperadas

e ataques cibernéticos a um único agente podem espalhar-se muito rapidamente para outros agentes através da troca de informações e, dessa forma, levar à grave degradação do desempenho de todo o sistema ou até à sua destruição.

- **Custos financeiros:** A implementação de sistemas multiagente em cenários reais pode ser dispendiosa, o que pode representar um desafio sério na adoção destas tecnologias. Os custos envolvidos podem incluir o desenvolvimento e instalação dos vários agentes, mas também a manutenção, atualização, bem como os equipamentos (sensores, por exemplo) que os agentes podem utilizar.

## 6 Conclusões

Na literatura científica existente, é notável a predominância de simulações e projetos de software baseados em agentes na investigação sobre os transportes. Embora essas simulações e ferramentas de software sejam úteis para entender o comportamento dos sistemas de transporte e testar hipóteses teóricas, a falta de exemplos reais de implementação pode limitar a aplicabilidade prática desses estudos. Isso pode levantar questões sobre a validade e relevância dos resultados obtidos em ambientes simulados em comparação com situações reais.

Contudo, a falta de exemplos concretos de aplicação pode indicar uma oportunidade para pesquisas futuras focadas em casos de estudo reais e avaliações de impacto em ambientes do mundo real. Esses estudos poderiam ajudar a preencher a lacuna entre teoria e prática ao fornecer entendimentos sobre os benefícios e desafios da implementação de sistemas baseados em agentes no setor dos transportes.

Portanto, enquanto que a literatura existente oferece uma base sólida para o entendimento teórico e a exploração de potenciais aplicações de agentes e sistemas multiagente nos transportes, há uma clara necessidade de uma abordagem mais orientada para a prática e uma maior ênfase em exemplos reais de implementação e impacto no mundo real.

## Referências

1. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (4 2021), [https://www.sae.org/standards/content/j3016\\_202104/](https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/)
2. EHang EH216-S (production model) (10 2023), <https://evtol.news/ehang-216/>
3. Delivery Route Optimization Using Machine Learning in the Logistics Sector | AI Insights | Omdena (1 2024), <https://www.omena.com/blog/optimizing-delivery-routes-using-ml-and-graph-theory>
4. Bastarionto, F.F., Hancock, T.O., Choudhury, C.F., Manley, E.: Agent-based models in urban transportation: review, challenges, and opportunities. *European Transport Research Review* **15**(1) (6 2023). <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00590-5>
5. Belbachir, A., El Fallah-Seghrouchni, A., Casals, A., Pasin, M.: Smart mobility using multi-agent system. *Procedia Computer Science* **151**, 447–454 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.061>

6. Belkhala, S., Benhadou, S., Boukhdar, K., Medromi, H.: Smart parking architecture based on multi agent system. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* **10**(3) (2019). <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100349>
7. Coulibaly, M., Errami, A., Belkhala, S., Medromi, H.: A live smart parking demonstrator: architecture, data flows, and deployment. *Energies* **14**(7), 1827 (3 2021). <https://doi.org/10.3390/en14071827>, <https://doi.org/10.3390/en14071827>
8. Daleo, J.: EHang Begins Delivering Air Taxi to Customers Following Airworthiness Certification (12 2023), <https://tinyurl.com/2x8vk59a>
9. Falco, M., Robiolo, G.: A systematic literature review in multi-agent systems: Patterns and trends. In: 2019 XLV Latin American Computing Conference (CLEI). pp. 1–10 (2019). <https://doi.org/10.1109/CLEI47609.2019.235098>
10. Ferrare, F.D., Moreira Baum, D., de Almeida Júnior, J.R., Camargo Júnior, J.B., Cugnasca, P.S.: Scenarios for the use of evtols using multiagent systems with netlogo: comparison of parameters and the impact on uam. In: 2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC). pp. 1–7 (2021). <https://doi.org/10.1109/DASC52595.2021.9594507>
11. Khayyat, M.M., Awasthi, A.: An intelligent multi-agent based model for collaborative logistics systems. *Transportation Research Procedia* **12**, 325–338 (1 2016). <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.069>
12. Lang, N., Moonen, H., Srouf, F.J., Zuidwijk, R.: Multi Agent Systems in Logistics: A literature and State-of-the-art review. ERIM report series research in management Erasmus Research Institute of Management (7 2008), <https://repub.eur.nl/pub/12902/ERS-2008-043-LIS.pdf>
13. Leitao, P., Mendes, J.M., Colombo, A.W.: Decision support system in a service-oriented control architecture for industrial automation. In: 2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. pp. 1228–1235 (2008). <https://doi.org/10.1109/ETFA.2008.4638558>
14. Liu, L., Lu, S., Zhong, R., Wu, B., Yao, Y., Zhang, Q., Shi, W.: Computing systems for autonomous driving: State of the art and challenges. *IEEE Internet of Things Journal* **8**(8), 6469–6486 (2021). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3043716>
15. Russell, S.J., Norvig, P., Davis, E.: Artificial Intelligence. Prentice Hall (2010)
16. Shoup, D.: Cruising for parking. *Transport Policy* **13**(6), 479–486 (11 2006). <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.05.005>
17. Teles, R., Teles, M., Graciano Neto, V.: Sistemas multi-agentes (03 2009), [https://www.researchgate.net/publication/267953588\\_Sistemas\\_multi-agentes](https://www.researchgate.net/publication/267953588_Sistemas_multi-agentes)
18. Wooldridge, M.: An Introduction to MultiAgent Systems. John Wiley & Sons (2002)
19. Wu, T., Zhou, P., Liu, K., Yuan, Y., Wang, X., Huang, H., Wu, D.O.: Multi-agent deep reinforcement learning for urban traffic light control in vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **69**(8), 8243–8256 (2020). <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2997896>
20. Yang, J., Zhang, J., Wang, H.: Urban traffic control in software defined internet of things via a multi-agent deep reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* **22**(6), 3742–3754 (2020). <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3023788>
21. Zhang, K., He, F., Zhang, Z., Lin, X., Li, M.: Multi-vehicle routing problems with soft time windows: A multi-agent reinforcement learning approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **121**, 102861 (12 2020). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102861>, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102861>