

Transportes Inteligentes com Agentes e Sistemas Multiagentes

Universidade do Minho, Rua da Universidade, 4710-057, Braga, Portugal

Abstract. Este trabalho explora a integração de Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) com Sistemas Multiagente (MAS) para otimizar o tráfego, melhorar a segurança rodoviária e promover a sustentabilidade. A análise abrange cenários urbanos e rurais, destacando as infraestruturas necessárias e comparando abordagens centralizadas e descentralizadas em MAS. O estudo também avalia tecnologias de comunicação como V2X, LoRaWAN e 5G, discutindo casos de sucesso e falhas anteriores. A utilização de simulações multiagente é apresentada como ferramenta para testar soluções antes da implementação real, alinhando as tecnologias às necessidades específicas de cada ambiente.

Keywords: Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS), Sistemas Multiagente (MAS), Mobilidade Urbana, Veículos Autónomos, Internet das Coisas (IoT), Redes Veiculares (V2X), Inteligência Artificial (IA), Cidades Inteligentes.

1 Introdução

O objetivo principal deste estudo é explorar o impacto da integração de Sistemas Multiagente (MAS) com Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS), focando na melhoria da mobilidade urbana e rural, segurança rodoviária e sustentabilidade.

De acordo com a pesquisa [1], os erros humanos causam 90% dos acidentes rodoviários, enquanto apenas 2% resultam de falhas mecânicas, o que equivale a cerca de 1,3 milhões de fatalidades segundo a OMS [14]. Veículos inteligentes surgem como solução, mas a interconectividade expõe-nos a desafios, como segurança na comunicação, interoperabilidade e resposta em tempo real. Além disso, o congestionamento urbano tem impactos graves na economia e no ambiente, o que resulta numa considerável perda de produtividade, aumento dos custos de transporte e emissões de CO₂. Estudos indicam que Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) podem reduzir essas emissões em até 80%, tornando o tráfego mais eficiente e sustentável [6].

Os Sistemas Multiagente (MAS) oferecem uma abordagem descentralizada, permitindo que veículos, infraestruturas e serviços de tráfego operem de forma cooperativa e adaptável. A integração de Internet of Things (IoT) e Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) permite comunicação em tempo real, o que se revela essencial para otimizar tráfego e segurança. No entanto, desafios, como ataques cibernéticos e falhas na coordenação entre agentes, exigem soluções robustas e eficientes. VANETs (Redes Veiculares Ad Hoc) são redes sem fios dinâmicas que

permitem a comunicação direta entre veículos e entre veículos e a infraestrutura rodoviária e Internet das Coisas (IoT) refere-se à interligação de dispositivos físicos através da internet, permitindo-lhes recolher e trocar dados.

Este trabalho explora o papel dos MAS nos ITS, analisando como agentes autónomos podem melhorar a eficiência, segurança e resiliência do tráfego urbano.

Desta forma, este trabalho pretende contribuir para a compreensão do papel dos MAS na modernização dos transportes urbanos, explorando as suas potencialidades e limitações na construção de cidades mais conectadas, seguras e sustentáveis.

2 Sistemas de Transporte Inteligentes e o Papel dos Agentes e Sistemas Multiagente

Os Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS - Intelligent Transportation Systems) representam uma evolução significativa na forma como o tráfego e a mobilidade urbana são geridos, oferecendo, para tal, soluções inovadoras capazes de resolver problemas críticos como o congestionamento, segurança rodoviária e sustentabilidade ambiental. Através da utilização de tecnologias avançadas, como sensores, inteligência artificial (IA) e comunicação em tempo real, os ITS permitem ainda uma gestão mais eficiente e proativa das infraestruturas rodoviárias, resultando em cidades mais conectadas e adaptáveis.

A implementação de ITS envolve a integração de múltiplas componentes, desde Veículos Conectados e Autónomos (CAV - Connected and Autonomous Vehicles) até Sistemas de Semáforos Inteligentes e Redes Veiculares (V2X - Vehicle-to-Everything). No entanto, a verdadeira eficácia destes sistemas advém da utilização de Sistemas Multiagente (MAS - Multi-Agent Systems), que permitem uma abordagem descentralizada e cooperativa na gestão do tráfego e na coordenação de serviços urbanos.

2.1 O Papel dos Agentes e Sistemas Multiagente (MAS) em ITS

Os MAS são formados por vários agentes autónomos que operam de forma independente, mas colaborativa, com o objetivo de alcançar objetivos comuns. No contexto dos ITS, cada agente pode representar diferentes elementos do sistema viário, como veículos, semáforos, sensores de tráfego e até mesmo infraestruturas inteligentes. Estes agentes são capazes de:

- **Perceber o ambiente** através de sensores e dados externos.
- **Tomar decisões autónomas**, muitas vezes suportadas por IA e aprendido por reforço.
- **Atuar no ambiente**, ajustando rotas, controlando semáforos e comunicando-se com outros agentes.
- **Colaborar e negociar com outros agentes** para otimizar o fluxo de tráfego e garantir a segurança rodoviária.

Pelo que é referido no *paper* [1], os veículos inteligentes, que funcionam como agentes autônomos, têm a capacidade de se comunicar entre si e com a infraestrutura rodoviária, permitindo o aumento da segurança e a redução da probabilidade de acidentes provocados por erro humano, que representam cerca de 90% dos acidentes rodoviários.

2.2 Tendências Futuras e Inovações nos Sistemas de Transporte Inteligentes com MAS

O futuro dos Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) integrados com Sistemas Multiagente (MAS) aponta para a criação de ecossistemas urbanos cada vez mais autônomos e proativos. O uso de algoritmos avançados de Inteligência Artificial (IA), como o Deep Learning e o Reinforcement Learning, permitirá que os agentes reajam, não apenas ao ambiente, mas também aprendam e se adaptem de forma contínua e eficiente.

Uma das principais tendências é a utilização de Veículos Autônomos como agentes móveis dentro das redes de transporte. Estes veículos serão capazes de comunicar em tempo real com infraestruturas rodoviárias, partilhando informações sobre o tráfego, condições meteorológicas e potenciais riscos de segurança. De acordo com o *paper* [8], a aplicação de modelos de larga escala em ITS pode otimizar o fluxo de tráfego e melhorar a segurança rodoviária, uma vez que permite que veículos e infraestruturas partilhem informações de forma colaborativa.

Outro desenvolvimento promissor é a integração com a Internet of Things (IoT), onde sensores inteligentes e dispositivos conectados atuam como agentes autônomos, monitorizando o tráfego e ajustando automaticamente os semáforos e sinalizações. Esta comunicação em tempo real possibilita uma resposta mais rápida a emergências, possibilitando, por exemplo, que as rotas de veículos de emergência sejam automaticamente desimpedidas através da coordenação dos agentes de tráfego e veículos comuns.

A cibersegurança também é uma área crítica para o desenvolvimento dos ITS baseados em MAS. Com o aumento da conectividade, surge a necessidade de proteger as comunicações entre agentes contra ataques maliciosos, bem como assegurar que apenas agentes autenticados possam interagir com o sistema. O *paper* [1] destaca que soluções baseadas em Machine Learning podem ser utilizadas para detectar comportamentos anômalos na rede, prevenindo potenciais ataques cibernéticos.

Além disso, o uso de Simulações de Tráfego com MAS para testar cenários complexos em ambientes urbanos está em expansão. Estas simulações permitem que os investigadores analisem o impacto de novas políticas de mobilidade, como a implementação de faixas exclusivas para autocarros ou a adaptação dinâmica de limites de velocidade. Ao simular o comportamento de milhares de agentes, os sistemas podem prever e mitigar problemas antes mesmo da sua ocorrência em cenários reais.

Por fim, a criação de Cidades Inteligentes totalmente integradas com ITS baseados em MAS surge como um objetivo a longo prazo. Neste contexto, não só os veículos e semáforos, mas também edifícios, serviços públicos e até mesmo os

próprios peões poderiam atuar como agentes inteligentes, trocando informações para otimizar a eficiência urbana em todos os aspectos, desde o transporte até o consumo de energia.

Estas inovações reforçam o potencial dos Sistemas Multiagente em criar um ambiente rodoviário mais seguro, eficiente e sustentável, contribuindo diretamente para a qualidade de vida nas áreas urbanas e promovendo o desenvolvimento de cidades mais inteligentes e conectadas.

3 Análise do Estado da Arte e Definição do Domínio de Investigação

Os Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) integrados com Sistemas Multiagente (MAS) têm emergido como soluções inovadoras para enfrentar os desafios da mobilidade urbana e rural, proporcionando avanços significativos na otimização do tráfego, segurança rodoviária e sustentabilidade ambiental. O domínio de investigação atual foca-se na exploração das potencialidades de tecnologias emergentes, como Machine Learning (ML), redes veiculares (V2X), Inteligência Artificial (IA) e Sistemas Multiagente, para a construção de sistemas de transporte mais eficientes e resilientes.

3.1 Oportunidades Oferecidas pelas Tecnologias Emergentes e pelos Sistemas Multiagente

A integração de Machine Learning (ML), Redes Veiculares (V2X) e Sistemas Multiagente (MAS) cria novas oportunidades para otimizar a mobilidade, melhorar a eficiência operacional e reduzir os impactos ambientais. A seguir, são apresentados alguns avanços e soluções existentes, que refletem o potencial transformador destas tecnologias nos ITS.

Inteligência Artificial e Aprendizagem Automática em ITS

A Inteligência Artificial e a Aprendizagem Automática têm um papel fundamental na gestão do tráfego, permitindo a antecipação de padrões e a tomada de decisões em tempo real. Algoritmos de deep learning, por exemplo, são utilizados para analisar padrões de trânsito e otimizar a gestão das infraestruturas.

- **Previsão e adaptação do tráfego:** Algoritmos de deep learning analisam padrões de trânsito, ajustando semáforos e otimizando rotas.
- **Gestão de congestionamentos:** Modelos de previsão identificam fluxos de veículos e ajustam a infraestrutura para minimizar atrasos.
- **Tomada de decisão autónoma:** Veículos conectados aprendem e ajustam a sua condução para otimizar o consumo energético e o tempo de deslocação [8].

Redes Veiculares (V2X) e Conectividade

As redes veiculares (V2X) são fundamentais para melhorar a coordenação e segurança no trânsito. Essas redes incluem várias formas de comunicação, como V2I, V2V e V2N, que permitem uma gestão mais eficiente do tráfego e maior segurança rodoviária.

- **V2I (Vehicle-to-Infrastructure):** Semáforos inteligentes adaptam-se em tempo real, priorizando veículos de emergência e reduzindo esperas desnecessárias.
- **V2V (Vehicle-to-Vehicle):** Veículos trocam dados sobre velocidade e trajetória, evitando colisões e permitindo a formação de platoons que reduzem o consumo de combustível.
- **V2N (Vehicle-to-Network):** A conexão com servidores em nuvem melhora a análise e resposta a eventos imprevistos [8].

Em Singapura, a implementação de um sistema V2X tem permitido uma gestão mais eficiente do tráfego e uma redução significativa dos acidentes rodoviários. Este estudo oferece um modelo que pode ser replicado em cidades com características semelhantes, mostrando como a comunicação entre veículos e infraestruturas pode melhorar a segurança e a fluidez do tráfego.

Sistemas Multiagente na Coordenação do Tráfego

Os Sistemas Multiagente (MAS) desempenham um papel crucial na coordenação descentralizada do tráfego, permitindo uma gestão mais resiliente e eficiente. A gestão descentralizada possibilita que os agentes (veículos, semáforos e centros de controlo) atuem de forma autónoma e cooperativa, sem depender de um controlo central.

- **Tomada de decisão distribuída:** Veículos e infraestruturas atuam de forma autónoma e cooperativa, sem a necessidade de um controlo central.
- **Otimização dinâmica:** Os agentes ajustam as decisões em tempo real conforme as condições do tráfego.
- **Integração de múltiplos agentes:** Coordenação entre carros, semáforos e centros de controlo para evitar congestionamentos e acidentes.

3.2 Análise do Estado da Arte

Diversos estudos têm explorado a aplicação de sistemas multiagente em ITS, com soluções inovadoras que aumentam a eficiência da gestão de tráfego e a segurança rodoviária. A seguir, são apresentados alguns exemplos notáveis que ilustram o impacto positivo da integração de MAS em ITS.

Icarte-Ahumada et al. (2025) propuseram um sistema multiagente para a alocação de estacionamento, onde os agentes inteligentes representam veículos e otimizam a alocação de vagas, reduzindo o congestionamento urbano [10].

Outro estudo interessante de Ullah et al. (2025) utilizou aprendizagem por reforço multiagente para a alocação de tarefas em veículos inteligentes, melhorando a eficiência da distribuição de tarefas em cenários de tráfego dinâmico [18].

Zhang et al. (2025) introduziram um framework multiagente em redes veiculares, permitindo a troca de informações em tempo real entre veículos e infraestruturas. Esta abordagem melhora a resposta a congestionamentos e otimiza a gestão do tráfego [21].

Xu et al. (2025) exploraram a mitigação do "bus bunching" através do reinforcement learning, propondo um sistema onde os autocarros ajustam as suas rotas dinamicamente para manter intervalos regulares entre os veículos [19].

No contexto de emergências, Su (2025) desenvolveu uma solução multiagente para priorizar a passagem de veículos de emergência, adaptando automaticamente os semáforos e coordenando o tráfego para reduzir os tempos de resposta [16].

Zhao et al. (2025) investigaram a percepção cooperativa em redes veiculares, permitindo que veículos conectados troquem dados dos seus sensores para aumentar a segurança e a eficiência do tráfego [22].

Finalmente, Yang et al. (2025) apresentaram o modelo IDM-GPT, que usa IA e um modelo de linguagem multiagente para analisar a mobilidade e adaptar a gestão do tráfego em tempo real [20].

Estes estudos demonstram o grande potencial dos sistemas multiagente para criar ITS mais eficientes, seguros e resilientes, destacando a importância da integração dessas tecnologias no futuro da mobilidade urbana.

4 Benefícios e Desafios dos Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) e Sistemas Multiagente (MAS)

Os Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) integrados com Sistemas Multiagente (MAS) representam uma abordagem inovadora para a modernização da mobilidade urbana, na medida em que se revelam capazes de garantir benefícios significativos, mas também de enfrentar desafios complexos. A seguir, detalhamos os principais benefícios e desafios associados a estas tecnologias, baseando-nos em diversas fontes académicas e estudos recentes.

4.1 Benefícios

Os benefícios dos ITS suportados por MAS são amplos e abrangem várias dimensões da mobilidade urbana e da eficiência operacional das cidades:

Melhoria da Segurança Rodoviária

Um dos principais benefícios dos ITS é o aumento da segurança nas estradas. No *paper* [1] destaca-se que os veículos inteligentes, que operam como agentes autônomos, conseguem reduzir drasticamente os acidentes causados pelos erros humanos, que representam cerca de 90% das ocorrências rodoviárias. Estes veículos utilizam sensores e comunicação em tempo real para evitar colisões, adaptar a velocidade e responder de forma proativa a situações perigosas.

Além disso, o estudo [14] sobre a gestão de veículos de emergência demonstra como os MAS podem priorizar automaticamente estes veículos em cenários de tráfego intenso, através da otimização dos semáforos e das rotas, de forma a garantir uma resposta rápida e segura.

Eficiência na Gestão do Tráfego

A capacidade dos MAS de coordenar semáforos, veículos e infraestruturas inteligentes proporciona uma gestão mais eficiente do tráfego. No estudo [10] salienta-se a forma de como um sistema multiagente, para alocação de estacionamento, pode reduzir o tempo de procura de vagas, diminuir o congestionamento e ainda melhorar o fluxo viário em áreas urbanas. Esta eficiência é alcançada pela comunicação contínua entre os agentes, que monitorizam a disponibilidade de vagas e orientam os motoristas em tempo real.

Outro exemplo significativo é a utilização de aprendizagem por reforço para mitigar o "bus bunching" no transporte público, conforme proposto no estudo [19]. O sistema permite que os autocarros ajustem dinamicamente as suas rotas e tempos de paragem, garantindo intervalos regulares entre veículos e melhorando a experiência dos passageiros.

Sustentabilidade e Redução de Emissões

Os ITS também contribuem para a sustentabilidade ambiental. O *paper* [6] indica que a aplicação de ITS pode reduzir as emissões de CO₂ até 80%, otimizando o fluxo de tráfego e minimizando o tempo de inatividade dos veículos. Agentes autônomos podem calcular as rotas mais eficientes, evitando áreas congestionadas e reduzindo o consumo de combustível.

Para além disso, o uso de modelos de larga escala em ITS, como explorado no caso [8], permite uma análise mais aprofundada dos padrões de tráfego, o que proporciona o planeamento de intervenções que favorecem o uso de transportes públicos e os modos de transporte mais ecológicos, como bicicletas e veículos elétricos.

Resposta Proativa a Emergências

A integração de MAS em ITS permite uma resposta mais eficaz em situações de emergência. No estudo [16] desenvolveu-se um sistema que cria rotas prioritárias para veículos de emergência, através do ajuste de semáforos e da coordenação do tráfego, de modo a permitir uma passagem rápida e segura. Esta capacidade de adaptação em tempo real é crucial para reduzir os tempos de resposta e aumentar a eficácia das operações de resgate e serviços de emergência.

4.2 Desafios

Interoperabilidade e Padrões Tecnológicos

Um dos principais desafios é garantir a interoperabilidade entre diferentes agentes e sistemas. No *paper* [5] salienta-se que a diversidade dos fabricantes e a falta de padronização tecnológica dificultam a comunicação eficiente entre veículos, semáforos e outros elementos da infraestrutura urbana. Para superar este desafio, é necessário desenvolver padrões abertos e protocolos universais que permitam a integração de diferentes sistemas e dispositivos.

A interoperabilidade também é crítica em cenários internacionais, onde veículos de diferentes países podem necessitar de comunicar com infraestruturas locais. A criação de normas globais pode facilitar a adoção e a escalabilidade dos ITS em diferentes contextos urbanos.

Segurança Cibernética e Privacidade

Com o aumento da conectividade nos ITS, surgem preocupações com a segurança cibernética. No estudo [1] apontam que os sistemas de comunicação em veículos inteligentes são suscetíveis a ataques cibernéticos, o que poderia comprometer a segurança rodoviária e a privacidade dos dados dos utilizadores. A proteção contra estes riscos exige o desenvolvimento de sistemas de autenticação robustos e o uso de algoritmos de IA para identificar comportamentos anómalos.

Além disso, o tratamento de dados sensíveis, como a localização em tempo real dos veículos, levanta questões sobre privacidade. É então essencial implementar mecanismos que permitam o anonimato e a proteção dos dados pessoais, especialmente em cenários onde a partilha de informações é necessária para o funcionamento eficiente dos sistemas.

Coordenação e Escalabilidade

Outro desafio significativo é a coordenação eficaz entre milhares de agentes autónomos em cenários complexos e em larga escala. À medida que o número de agentes aumenta, a complexidade das interações também cresce, tornando-se difícil garantir que o sistema permaneça eficiente e responsivo. O estudo [21] propõe o uso de um framework colaborativo baseado em cloud e edge computing para distribuir o processamento e manter a eficiência mesmo em cenários de alta densidade de tráfego.

A escalabilidade é particularmente desafiante em Cidades Inteligentes, onde os ITS precisam lidar com milhões de dispositivos conectados, desde veículos até sensores de infraestrutura. O desenvolvimento de algoritmos de coordenação mais eficientes e a utilização de simulações baseadas em MAS podem ajudar a testar diferentes cenários e a identificar soluções antes da sua implementação real.

Custos de Implementação e Manutenção

Os custos associados à instalação e manutenção de ITS baseados em MAS podem ser elevados, especialmente em infraestruturas urbanas já existentes. A adaptação dos *legacy systems* e a necessidade de atualizar regularmente os componentes tecnológicos para manter a compatibilidade e a segurança representam um desafio financeiro considerável. Além disso, os custos de manutenção contínua e a necessidade de formação especializada para operadores e gestores de sistemas também devem ser considerados.

5 Cenários de Implementação e Desenvolvimento em ITS e MAS

Os *Sistemas de Transporte Inteligentes* (ITS) integrados com *Sistemas Multiagente* (MAS) têm o potencial de transformar tanto ambientes urbanos como rurais, otimizando o tráfego, melhorando a segurança rodoviária e promovendo a sustentabilidade. No entanto, os cenários de implementação variam consideravelmente dependendo do contexto, o que consequentemente exige diferentes abordagens tecnológicas e estratégicas.

5.1 Cenários Urbanos vs. Rurais

Em áreas urbanas, os ITS baseados em MAS são frequentemente utilizados para gerir o tráfego intenso, otimizar o uso de infraestruturas existentes e aumentar a eficiência do transporte público. Cidades inteligentes beneficiam de soluções como semáforos inteligentes, veículos autónomos e monitorização em tempo real, permitindo que os agentes (veículos, semáforos, sensores) colaborem para reduzir congestionamentos e/ou melhorar a mobilidade urbana. O estudo de Balbo et al. (2024) [2] destaca o uso de simulações multiagente para prever o comportamento do tráfego e testar políticas de mobilidade em cenários urbanos complexos.

Por outro lado, em áreas rurais, os ITS enfrentam desafios diferentes, como a menor densidade populacional, infraestruturas menos desenvolvidas e maiores distâncias entre os principais pontos de interesse. Neste contexto, os sistemas multiagente podem ser utilizados para otimizar rotas de transporte público, coordenar serviços de emergência e até mesmo monitorar estradas rurais para segurança e manutenção. Song et al. (2022) [15] exploraram o modo como a modelagem multiagente pode avaliar o impacto de políticas de urbanização em áreas rurais, melhorando a infraestrutura e os serviços públicos.

5.2 Infraestruturas Necessárias

A implementação de MAS em ITS requer uma infraestrutura robusta e adaptável. Em cenários urbanos, é necessário integrar sensores *IoT*, sistemas de comunicação *V2X* (*Vehicle-to-Everything*) e plataformas de processamento de dados em tempo real. As redes veiculares desempenham um papel crucial, permitindo que os veículos comuniquem entre si e com a infraestrutura urbana, como semáforos e sinais inteligentes. O trabalho de Creß et al. (2023) [4] mostra como a utilização de infraestruturas rodoviárias inteligentes pode ampliar a capacidade de resposta dos sistemas de transporte em cenários urbanos densos.

Nas áreas rurais, a infraestrutura necessária foca-se na conectividade de longa distância e na resiliência dos sistemas. Redes de baixa potência e longa distância (*LoRaWAN*) e soluções baseadas em satélites são frequentemente usadas para conectar agentes espalhados por grandes áreas. *LoRaWAN* (Long Range Wide Area Network) é uma tecnologia de rede de longo alcance, que permite a comunicação abaixo consumo de energia entre dispositivos a grandes distâncias. Além disso, a integração de sensores autossuficientes, que utilizam energia solar, por exemplo, pode ser essencial para garantir a manutenção mínima e a operação contínua em regiões remotas.

5.3 Desenvolvimento de Simulações

As simulações baseadas em sistemas multiagente são uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento e teste de ITS antes da sua implementação em cenários reais. Ferramentas como o *MATSim* (*Multi-Agent Transport Simulation*) permitem criar cenários virtuais complexos, onde o comportamento dos agentes pode ser analisado sob diferentes condições de tráfego. Segundo Chow et al. (2020) [3], a utilização do *MATSim-NYC* proporcionou uma plataforma virtual capaz de testar soluções de transporte numa cidade altamente populosa como Nova Iorque, reduzindo custos e riscos associados à experimentação em ambientes reais.

Além disso, as simulações permitem a análise de políticas de mobilidade e o teste de novas tecnologias em segurança rodoviária e gestão de tráfego. No contexto rural, estas simulações ajudam a prever o impacto de novas estradas ou alterações nos serviços de transporte público, oferecendo uma abordagem proativa na gestão do desenvolvimento urbano e rural.

5.4 Conclusão

A adaptação de ITS e MAS a diferentes cenários de implementação requer uma compreensão profunda das necessidades locais e das capacidades tecnológicas disponíveis. Cidades densas podem beneficiar de sistemas complexos e altamente integrados, enquanto áreas rurais necessitam de soluções mais simplificadas e resilientes. O uso de simulações multiagente oferece uma forma segura e eficiente de testar novas soluções, garantindo que os sistemas implementados ofereçam o máximo benefício possível tanto em áreas urbanas como rurais.

6 Avaliação Crítica das Soluções Existentes

6.1 Abordagem Centralizada vs. Descentralizada

A escolha entre sistemas centralizados e descentralizados em Sistemas Multiagente (MAS) para Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) depende das necessidades específicas do ambiente urbano e das metas operacionais. Nos sistemas centralizados, uma entidade central controla e coordena todos os agentes, o que facilita a tomada de decisões globais e a monitorização em tempo real. No entanto, essa abordagem pode levar a pontos únicos de falha e limitações de escalabilidade, especialmente no que concerne cenários complexos de trânsito urbano [12].

Por outro lado, os sistemas descentralizados permitem que os agentes atuem de forma autónoma e colaborativa, adaptando-se dinamicamente às mudanças do ambiente. Esta abordagem aumenta a resiliência e a escalabilidade, sendo ideal para cidades inteligentes e cenários de alta densidade veicular [17]. No entanto, desafios como a coordenação entre agentes e a consistência de dados permanecem críticos, o que leva a que se exija o desenvolvimento de algoritmos avançados para a comunicação e consenso distribuído.

6.2 Comparação de Tecnologias de Comunicação

A comunicação eficiente entre os agentes é fundamental para o sucesso dos MAS em ITS. Diferentes tecnologias de comunicação oferecem vantagens e desvantagens dependendo do contexto:

- **V2X (Vehicle-to-Everything):** Permite a comunicação direta entre veículos e infraestruturas, sendo altamente eficiente em cenários urbanos densos. A baixa latência do V2X é uma vantagem significativa para sistemas críticos de segurança rodoviária [13].

- **LoRaWAN (Long Range Wide Area Network):** Ideal para cenários de baixa largura de banda e longa distância, como áreas rurais ou infraestruturas remotas. No entanto, a sua baixa taxa de transferência de dados limita aplicações que exigem comunicação em tempo real [7].

- **5G:** Oferece alta velocidade e baixa latência, sendo ideal para ITS complexos em ambientes urbanos. A integração do 5G com MAS permite a transmissão rápida de grandes volumes de dados, essencial para a coordenação de veículos autónomos. [9]. No entanto, o custo elevado de implementação e a cobertura limitada ainda representam desafios que devem ser superados.

6.3 Casos de Sucesso e Falhas

Implementações bem-sucedidas de ITS baseados em MAS incluem o uso de redes V2X em cidades como Singapura e Amsterdão, onde a comunicação eficiente

entre veículos e infraestruturas melhorou significativamente o fluxo de tráfego e reduziu os acidentes [23]. Em contraste, falhas em projetos anteriores revelam os riscos de abordagens centralizadas em ITS. Por exemplo, numa cidade europeia, uma falha no sistema centralizado de semáforos inteligentes causou um congestionamento massivo, demonstrando a importância da resiliência e da redundância oferecidas por sistemas descentralizados [11].

A comparação crítica dessas abordagens destaca a importância de selecionar a tecnologia e a arquitetura corretas com base no cenário de aplicação. Para cidades inteligentes, uma combinação de comunicação 5G e sistemas descentralizados parece ser a solução mais promissora, enquanto áreas rurais podem beneficiar mais de soluções baseadas em LoRaWAN e abordagens híbridas de controle.

7 Conclusão

Este estudo demonstrou que a integração dos Sistemas de Transporte Inteligentes com Sistemas Multiagente oferece uma solução promissora para os desafios de mobilidade urbana e rural. A análise revelou que, ao aplicar MAS em ITS, é possível otimizar a gestão do tráfego, melhorar a segurança rodoviária e promover a sustentabilidade, especialmente em ambientes urbanos densos e em áreas rurais. A utilização de agentes autônomos, como veículos e infraestruturas inteligentes, permite uma gestão descentralizada e adaptável, melhorando a eficiência operacional dos sistemas de transporte.

Entre as principais contribuições deste trabalho, destacam-se:

- **A exploração de tecnologias emergentes**, como o 5G, IoT e a Inteligência Artificial, e como essas inovações possibilitam a criação de sistemas de transporte mais conectados, seguros e eficientes.
- **A análise detalhada das abordagens centralizadas e descentralizadas** em MAS, identificando os benefícios e as limitações de cada uma, o que fornece uma base sólida para escolhas tecnológicas em diferentes contextos urbanos e rurais.
- **A contribuição para a compreensão da importância das simulações multiagente**, uma ferramenta valiosa para testar políticas de mobilidade e prever o impacto de novas tecnologias antes de sua implementação no mundo real.

Embora os benefícios dos ITS baseados em MAS sejam evidentes, ainda existem desafios significativos a superar, como a interoperabilidade entre sistemas distintos, questões de segurança cibernética e a necessidade de padronização tecnológica. Além disso, a implementação de soluções em grande escala exige considerações sobre custos e escalabilidade.

Futuras pesquisas devem explorar o impacto da adoção em larga escala de MAS em diferentes tipos de cidades, analisando como esses sistemas podem ser escalados de maneira eficaz. A adoção de soluções baseadas em IA, juntamente com a integração de tecnologias de comunicação como o 5G e LoRaWAN, deverá

ser uma área chave de desenvolvimento, permitindo a construção de cidades inteligentes mais adaptáveis e resilientes.

Por fim, este estudo reforça a importância de uma abordagem centrada no utilizador, onde as soluções tecnológicas se alinham com as necessidades específicas de cada ambiente, promovendo não apenas a eficiência dos sistemas de transporte, mas também a melhoria da qualidade de vida nas comunidades urbanas e rurais.

References

1. Usman Ahmad, Mu Han, Alireza Jolfaei, Sohail Jabbar, Muhammad Ibrar, Aiman Erbad, Houbing Herbert Song, and Yazeed Alkhrijah. A comprehensive survey and tutorial on smart vehicles: Emerging technologies, security issues, and solutions using machine learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(11):15314–15341, Nov 2024.
2. F. Balbo, R. Mandiau, and M. Zargayouna. Extended review of multi-agent solutions to advanced public transportation systems challenges. *Public Transport*, 2024.
3. J.Y.J. Chow, K. Ozbay, Y. He, J. Zhou, M. Lee, and D. Wang. Multi-agent simulation-based virtual test bed ecosystem: Matsim-nyc. *MATSim-NYC Report*, 2020.
4. C. Creß, Z. Bing, and A.C. Knoll. Intelligent transportation systems using roadside infrastructure: A literature survey. *IEEE Intelligent Transportation Systems*, 2023.
5. Mohamed Elassy, Mohammed Al-Hattab, Maen Takruri, and Sufian Badawi. Intelligent transportation systems for sustainable smart cities. *Transportation Engineering*, 16:100252, 2024.
6. Hamdy B. Faheem, Amira M. El Shorbagy, and Mohamed Elsayed Gabr. Impact of traffic congestion on transportation system: Challenges and remediations - a review. *Mansoura Engineering Journal*, 49(2):Article 18, Mar 2024.
7. A Farhad and JY Pyun. Lorawan meets ml: A survey on enhancing performance with machine learning. *Sensors*, 23(15):6851, 2023.
8. Lu Gan, Wenbo Chu, Guofa Li, Xiaolin Tang, and Keqiang Li. Large models for intelligent transportation systems and autonomous vehicles: A survey. *Advanced Engineering Informatics*, 62:102786, 2024.
9. MS Hassan and A Abdelfatah. Enhancing route guidance with integrated v2x communication and transportation systems: A review. *Smart Cities*, 8(1):24, 2025.
10. G. Icarte-Ahumada, Z. He, V. Godoy, and F. García. A multi-agent system for parking allocation: An approach to allocate parking spaces. *Electronics*, 14(5):840, 2025.
11. M Minea, CM Dumitrescu, and VL Minea. Designing intelligent agents for the management of complex data communication networks in smart cities. *IEEE Artificial Intelligence Systems*, 2021.
12. A. Mostaani. Indirect task-oriented communication design for control and decision making in multi-agent systems. *orbilu.uni.lu*, 2023.
13. AA Musa, A Hussaini, C Qian, Y Guo, and W Yu. Open radio access networks for smart iot systems: State of art and future directions. *Future Internet*, 15(12):380, 2023.
14. Mritunjay Shall Peelam, Naren, Mehul Gera, Vinay Chamola, and Sherali Zeadally. A review on emergency vehicle management for intelligent transportation systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(11):15229–15245, Nov 2024.
15. H. Song, L. Zhao, L. Li, Z. Tan, and Q. He. Evaluating the impact of urbanization policies in rural areas using multi-agent simulation. *IEEE Internet of Things*, 2022.
16. H. Su. Facilitating emergency vehicle passage in congested urban areas using multi-agent deep reinforcement learning. *ProQuest Dissertations*, page Article ID 5006736, 2025.
17. VSR Tappeta, B Appasani, S Patnaik, and TS Ustun. A review on emerging communication and computational technologies for increased use of plug-in electric vehicles. *Energies*, 15(18):6580, 2022.

18. I. Ullah, S.K. Singh, D. Adhikari, H. Khan, and W. Jiang. Multi-agent reinforcement learning for task allocation in the internet of vehicles: Exploring benefits and paving the future. *Swarm and Evolutionary Computing*, page Article ID 5000367, 2025.
19. Z. Xu, C. Wang, M. Shen, and C. Li. Reinforcement learning for bus bunching mitigation: A systematic evaluation of configurations and performances. *IEEE Intelligent Transportation Systems*, page Article ID 10909364, 2025.
20. F. Yang, X.C. Liu, L. Lu, and B. Wang. Independent mobility gpt (idm-gpt): A self-supervised multi-agent large language model framework for customized traffic mobility analysis. *arXiv*, page arXiv:2502.18652, 2025.
21. P. Zhang, E. Wang, L. Tan, N. Kumar, and J. Wang. Enhancing task offloading in vehicular networks: A multi-agent cloud-edge-device framework. *Vehicular Communications*, page Article ID 5000257, 2025.
22. L. Zhao, L. Li, Z. Tan, A. Hawbani, and Q. He. Multi-agent deep reinforcement learning-based cooperative perception and computation in vec. *IEEE Internet of Things*, page Article ID 10908617, 2025.
23. Y Zou, L Yang, G Jing, R Zhang, Z Xie, and H Li. A survey of fault tolerant consensus in wireless networks. *High-Confidence Software Technologies*, 2024.