SISTEMAS MULTIAGENTES NA GESTÃO DE PROJETOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: REVISÃO SISTEMÁTICA

Multi-Agent Systems in Construction Project Management: A Literature Review

Breno Peixoto Cortez
Universidade de Brasília | Brasília, Distrito Federal | brenorn@hotmail.com

Paulo A. S. Santos
Universidade de Brasília | Brasília, Distrito Federal | pauloengcsantos@gmail.com

Michele Tereza Marques Carvalho
Universidade de Brasília | Brasília, Distrito Federal | micheletereza@unb.br

RESUMO

A gestão de projetos na construção civil brasileira confronta desafios em coordenação, otimização e decisão, com limitada adoção de Sistemas Multiagentes (MAS) em contraste ao cenário internacional. Este estudo compara benefícios e barreiras da implementação de MAS no setor, abordando contextos brasileiro e internacional. Uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) analisou 22 artigos (2014-2025), utilizando IA para triagem e extração de dados. Resultados indicam que a integração de MAS otimiza decisões, coordena equipes e modela processos, aprimorando eficiência, qualidade e sustentabilidade. Barreiras internacionais incluem segurança, resiliência e escalabilidade. No Brasil, desafios como autonomia de agentes, resistência cultural à tecnologia e limitações de Pequenas e Médias Empresas (PMEs) prevalecem. O trabalho mapeia os benefícios funcionais e expõe lacunas temáticas e barreiras contextuais, fornecendo base para estratégias de implementação no Brasil.

Palavras-chave: Sistemas Multiagentes; Gestão de Projetos; Construção Civil; Otimização; Barreiras.

ABSTRACT

Project management in the Brazilian civil construction industry faces challenges in coordination, optimization, and decision-making, with limited adoption of Multi-Agent Systems (MAS) compared to the international scenario. This study compares the benefits and barriers of implementing MAS in the sector, addressing both Brazilian and international contexts. A Systematic Literature Review (SLR) analyzed 22 articles (2014-2025), using AI for screening and data extraction. The results indicate that the integration of MAS optimizes decisions, coordinates teams, and models processes, enhancing efficiency, quality, and sustainability. International barriers include security, resilience, and scalability. In Brazil, challenges such as agent autonomy, cultural resistance to technology, and the limitations of Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) prevail. This work maps the functional benefits and exposes thematic gaps and contextual barriers, providing a foundation for implementation strategies in Brazil.

Keywords: Multi-Agent Systems; Project Management; Civil Construction; Optimization; Barriers.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de projetos na construção civil caracteriza-se pela complexidade inerente, dinamismo ambiental e múltiplos *stakeholders*, demandando coordenação e otimização contínuas para assegurar eficiência, qualidade e sustentabilidade (Doostmohammadian et al., 2025). Decisões descentralizadas e informações limitadas marcam este cenário, tornando colaboração e adaptação elementos cruciais para o sucesso dos empreendimentos.

Neste contexto, Sistemas Multiagentes (MAS) emergem como solução promissora. MAS consistem em coleções de agentes autônomos e interativos que colaboram para atingir objetivos compartilhados ou individuais (Bignold *et al.*, 2023). Sua capacidade de operar em ambientes distribuídos, otimizar a alocação de recursos e coordenar ações em tempo real demonstra potencial em planejamento e controle de produção (Panzer; Bender; Gronau, 2022), controle cooperativo de sistemas robóticos heterogêneos (Chen; Sewlia; Dimarogonas, 2024; Garg *et al.*, 2024) e alocação de recursos em redes inteligentes e sistemas de transporte (Doostmohammadian *et al.*, 2025; Paccagnan; Chandan; Marden, 2022). Estas aplicações ilustram a aptidão dos MAS para gerenciar a complexidade e a dinâmica do setor da construção civil.

Apesar do potencial, a aplicação prática de MAS na gestão de projetos da construção civil, especialmente no Brasil, permanece incipiente. A literatura nacional sobre MAS concentra-se em energia, teoria de controle e logística (Boissier *et al.*, 2019; De Assis Santos; Marques, 2022; Ferreira *et al.*, 2022; Santos, 2024), resultando em uma lacuna na análise comparativa de benefícios e barreiras entre o contexto brasileiro e o internacional para este setor. Barreiras gerais, como escalabilidade, privacidade e validação, são reconhecidas internacionalmente (Cardoso; Ferrando, 2021; Liang *et al.*, 2025; Manieri; Falsone; Prandini, 2023), mas sua manifestação e desafios específicos variam entre contextos geográficos e econômicos.

Este estudo investiga como Sistemas Multiagentes podem apoiar a tomada de decisão na gestão da construção civil brasileira. O objetivo principal consiste em identificar e comparar os benefícios e as barreiras da implementação de MAS neste setor, contrastando os contextos brasileiro e internacional. As questões específicas abordadas são: 1) Quais benefícios os MAS oferecem na gestão de projetos de construção civil? 2) Quais barreiras impedem a implementação de MAS no setor, nacional e internacionalmente? 3) Quais lacunas existem entre os contextos brasileiro e internacional na aplicação de MAS na construção civil? A revisão visa estabelecer diretrizes para pesquisadores e profissionais, destacando o potencial dos MAS na digitalização do setor construtivo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS MULTIAGENTES (MAS)

Sistemas Sistemas Multiagentes (MAS) configuram-se como sistemas distribuídos que englobam entidades inteligentes e autônomas, denominadas agentes que percebem o ambiente e tomam decisões para atingir tarefas e objetivos específicos (Li; Zhao; Zhu, 2022). Com raízes na Inteligência Artificial Distribuída (DAI) desde a década de 1980, a pesquisa em MAS é hoje amplamente reconhecida como uma ferramenta poderosa para resolver problemas complexos ao subdividi-los em tarefas menores e mais gerenciáveis, recebendo grande atenção em diversas disciplinas (Aguado *et al.*, 2020; Rihan; S. Alahmari, 2025; Storey *et al.*, 2016). A pesquisa em MAS fomenta o desenvolvimento de modelos, linguagens e tecnologias para a programação de agentes individuais, bem como para a gestão de suas interações, o ambiente de aplicação e a organização na qual participam (Boissier *et al.*, 2019).

A arquitetura de um MAS envolve mais do que programar agentes individuais, incluindo abstrações sobre ambiente, interação e organização, o que caracteriza a Programação Orientada a Multiagentes (MAOP) que abrange três dimensões integradas: agentes autônomos, ambientes compartilhados com artefatos em workspaces, e organizações que regulam as relações entre agentes e o ambiente (Boissier *et al.*, 2019). Características como autonomia, sociabilidade, reatividade, proatividade e tomada de decisão descentralizada são cruciais para a eficácia dos MAS, que podem ser modelados usando a teoria dos grafos (Doostmohammadian *et al.*, 2025; Ferreira *et al.*, 2022).

A flexibilidade dos MAS os torna aplicáveis em vasta gama de domínios, desde redes inteligentes e micro-redes (Ferreira *et al.*, 2022; Howell *et al.*, 2017; Pal *et al.*, 2021) até equipes de busca e resgate (Garg *et al.*, 2024), computação de borda (Wang; Ke, 2024), redes de comunicação sem fio (Lizzio; Capello; Guglieri, 2022), entrega de pacotes, controle de tráfego urbano (Noaeen *et al.*, 2022). No controle de sistemas multiagentes, uma tendência crescente é considerar especificações de tarefas de alto nível, levando em conta

a heterogeneidade das capacidades de cada agente (Chen; Sewlia; Dimarogonas, 2024; Verginis, 2022). Apesar de seus benefícios, o design e a análise de controladores de MAS enfrentam desafios únicos, como escalabilidade, verificação e robustez a fatores como problemas de comunicação e a presença de agentes adversários ou não cooperativos (Garg *et al*., 2024; Ishii; Wang; Feng, 2022). A capacidade de coordenar agentes para induzir um comportamento desejável no sistema é um objetivo comum e um desafio contínuo (Paccagnan; Chandan; Marden, 2022).

2.2 APLICAÇÕES DE MAS EM DOMÍNIOS ANÁLOGOS À CONSTRUÇÃO CIVIL

Sistemas Multiagentes (MAS) oferecem ferramentas para otimização e alocação eficiente de recursos em sistemas complexos, similar à gestão de recursos em grandes projetos de construção civil.

Otimização e Alocação de Recursos

No setor de energia, MAS empregam-se no gerenciamento de recursos energéticos distribuídos em *smart grids* e *microgrids*, otimizando geração e consumo (Ferreira *et al*., 2022). A descentralização via MAS melhora a escalabilidade e tolerância a falhas com aplicações no gerenciamento de tráfego e alocação de tarefas em *data centers* (Doostmohammadian *et al*., 2025). Pesquisas utilizam aprendizado por reforço multiagente para otimizar sinais de tráfego (Noaeen *et al*., 2022). Algoritmos de alocação de tarefas para frotas de drones (UAVs) fundamentam logística e inspeção (Rinaldi *et al*., 2024). No planejamento e controle de produção, MAS são adotados para lidar com customização em massa, flutuações na demanda e processamento de grandes volumes de dados em tempo real para otimizar processos (Panzer; Bender; Gronau, 2022).

Sistemas Robóticos e Automação

O uso de MAS em controle cooperativo de sistemas robóticos heterogêneos e manipulação de objetos apresenta relevância para automação e robótica em canteiros de obras. A pesquisa em controle multiagente considera especificações de tarefas de alto nível e a heterogeneidade das capacidades do agente em atuação, sensoriamento, comunicação e computação (Chen; Sewlia; Dimarogonas, 2024). Isso abrange o controle sob restrições espaciais e temporais, como evitar colisões (Chen; Sewlia; Dimarogonas, 2024; Verginis, 2022). A manipulação cooperativa de objetos foca na coordenação de múltiplos robôs para mover ou manipular (Verginis, 2022). A alocação de tarefas em sistemas Multi-UAV fundamenta atribuição eficiente de tarefas a frotas de drones (Rinaldi *et al*., 2024).

Gerenciamento de Redes e Dados

MAS são cruciais no gerenciamento de redes e dados em infraestruturas críticas como *smart grids*, exigindo alta segurança, resiliência e gestão eficiente de grandes volumes de informações. Em *Smart Grids* e *Microgrids*, MAS monitoram o fluxo de energia e mantêm a estabilidade da rede (Ferreira *et al*., 2022; Pal *et al*., 2021). A segurança e resiliência das redes contra ataques cibernéticos são abordadas por MAS (Garg *et al*., 2024; Howell *et al*., 2017). A Análise de *Big Data* (BDA) e MAS gerenciam grandes volumes de dados em tempo real, apoiando a gestão de riscos na cadeia de suprimentos (De Assis Santos; Marques, 2022).

Dinâmicas Sociais e Colaboração

A modelagem e análise de dinâmicas de opinião e comportamento em redes sociais com MAS oferecem *insights* para a gestão de equipes e a adoção de inovações, compreendendo a difusão de informações e a tomada de decisões em grupos (Li; Lee, 2025; Proskurnikov; Tempo, 2017). O Aprendizado Multiagente (MAL) equipa MAS com inteligência distribuída para responder a incertezas e interrupções, promovendo aprendizagem e adaptação em equipes (Li; Zhao; Zhu, 2022).

Controle e Resiliência de Sistemas

A discussão sobre controle seguro para sistemas multiagentes robóticos e o estudo de consenso sob ataques adversariais garantem a confiabilidade e robustez de sistemas complexos. A pesquisa foca no projeto de controle seguro para sistemas multiagente robóticos, enfatizando métodos baseados em aprendizado e segurança (Garg *et al*., 2024). O problema de consenso resiliente em ambientes hostis garante a capacidade de tomada de decisão, mesmo sob ataques (Doostmohammadian *et al*., 2025; Ishii; Wang; Feng, 2022)

3 METODOLOGIA

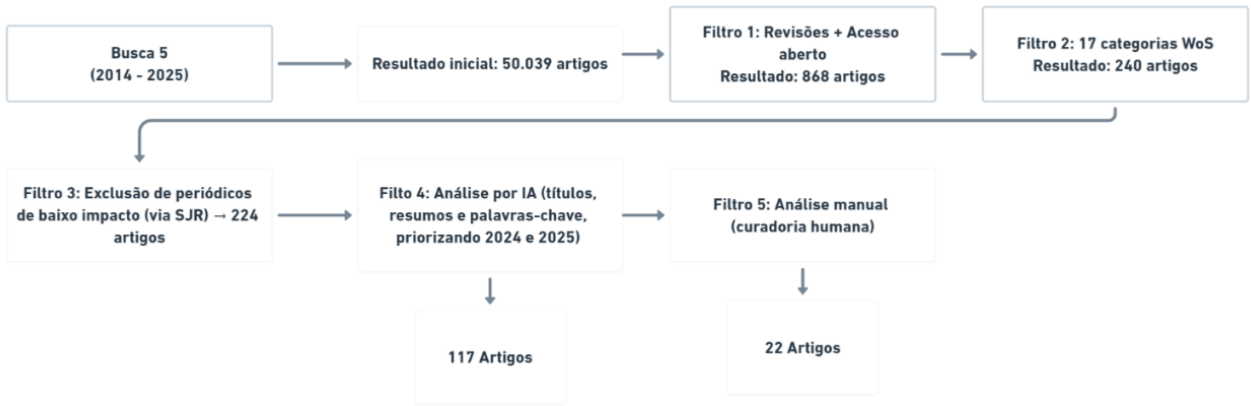
Este estudo empregou uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) assistida por Inteligência Artificial para mapear o estado da arte sobre a aplicação de Sistemas Multiagentes (MAS) na gestão de projetos de construção civil. A abordagem metodológica visa garantir sistematicidade, reprodutibilidade e eficiência, elementos cruciais para a validade da pesquisa.

3.1 PROCEDIMENTOS DA RSL E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

A busca por artigos científicos concentrou-se na base de dados Web of Science (WoS) em **23 de Março de 2023**, cobrindo o período de 2014 a 2025. As *strings* de busca completas utilizadas foram: *"artificial intelligence" (All Fields) AND multiagent (All Fields) OR "Multi Agent Systems" (All Fields) AND 2014 OR 2015 OR 2016 OR 2017 OR 2018 OR 2019 OR 2020 OR 2021 OR 2022 OR 2023 OR 2024 OR 2025 (Final Publication Year) AND "Review Article" (Document Types) AND "Open Access" AND "Energy Fuels" OR "Materials Science Multidisciplinary" OR "Computer Science Artificial Intelligence" OR "Computer Science Information Systems" OR "Automation Control Systems" OR "Environmental Sciences" OR "Green Sustainable Science Technology" OR "Engineering Multidisciplinary" OR "Computer Science Interdisciplinary Applications" OR "Business" OR "Management" OR "Engineering Civil" OR "Engineering Manufacturing" OR "Construction Building Technology" OR "Engineering Industrial" OR "Engineering Environmental" OR "Operations Research Management Science" (Web of Science Categories).*

O processo de seleção dos estudos seguiu um fluxo rigoroso de filtros sequenciais, conforme ilustrado na Figura 1. Uma busca inicial retornou 50.039 artigos. Progressivamente, filtros foram aplicados, incluindo tipo de documento *Review Article* e acesso *Open Access* (reduzindo para 868 referências), categorias temáticas relevantes na WoS (resultando em 240 artigos) e fator de impacto (SJR), que levou a 224 artigos. Em seguida, uma triagem assistida por Inteligência Artificial (CrewAI) refinou a seleção para 76 artigos, com foco na relevância por título, resumo e palavras-chave, priorizando publicações recentes. Finalmente, uma curadoria humana aprofundada, assistida por LLM para análise de conclusões e trabalhos futuros, selecionou os 22 artigos de alta relevância que compuseram o corpus final desta revisão.

Figura 1: Fluxo do processo de seleção dos artigos



Fonte: Os autores (2025)

3.2 ABORDAGEM ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Como um diferencial metodológico e inovador, esta RSL utilizou um *pipeline* computacional automatizado, desenvolvido em Python, integrando modelos de linguagem de grande escala (LLMs). Esse sistema operou em fases distintas para otimizar o processo. A Triagem Inicial e Coleta de Dados empregou um sistema multiagente preliminar (CrewAI) para assistir na triagem inicial dos artigos, enquanto *scripts* foram utilizados para a coleta automatizada de metadados e sua estruturação padronizada. Na fase de Extração e Análise Preliminar, textos completos de artigos selecionados foram extraídos e segmentados em blocos lógicos, com um LLM realizando análise preliminar baseada no Princípio de Pareto (80/20) para sumarizar seções relevantes. Subsequentemente, a Filtragem por Relevância e Consolidação consolidou os dados em um *corpus* final com base na análise do LLM. Por fim, a Síntese Cumulativa e Relatório Final envolveu um LLM processando os artigos do *corpus* final de forma iterativa e cronológica, construindo uma narrativa coesa e gerando um relatório detalhado. A estrutura tecnológica, desenvolvida em Python 3 com bibliotecas como pathlib e langchain, garante a portabilidade e a reprodutibilidade integral do estudo.

3.3 ANÁLISE E SÍNTESE DOS DADOS

A análise e síntese dos dados combinou abordagens quantitativas e qualitativas. Na análise bibliométrica: Utilização do VOSviewer e de um framework customizado para mapear a estrutura intelectual do campo, identificar tendências de publicação, autoria proeminente, distribuição geográfica e temas de pesquisa predominantes (através da análise de palavras-chave). Na síntese qualitativa: Realizada a partir dos dados extraídos via LLM, focando na categorização das contribuições, desafios e perspectivas futuras identificadas na literatura selecionada, com especial atenção à comparação entre os contextos brasileiro e internacional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados do processo de busca e seleção da literatura, bem como os achados da análise bibliométrica e da extração de conteúdo dos artigos incluídos nesta revisão sistemática.

4.1 SELEÇÃO DOS ESTUDOS

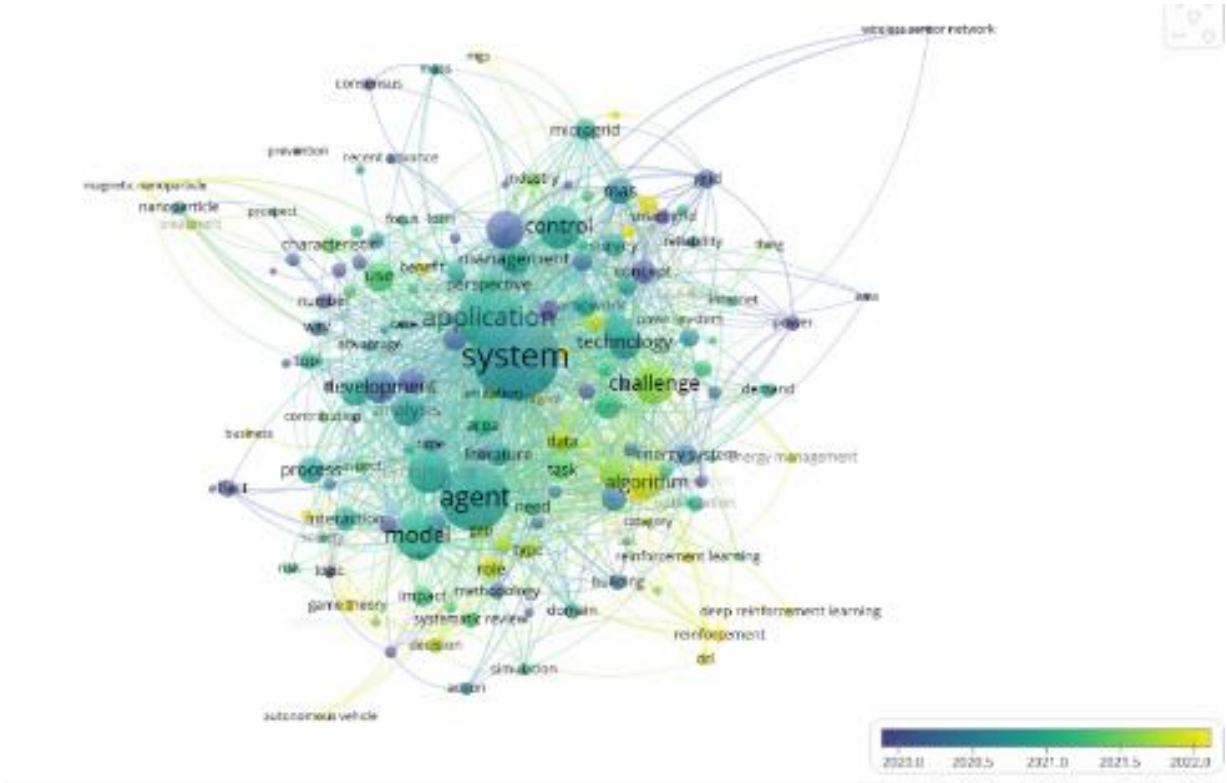
Conforme detalhado na Seção 3.1 (Procedimentos da RSL e Critérios de Seleção), o processo de busca e filtragem rigorosa resultou na seleção de um corpus final de 22 artigos de alta relevância, que foram submetidos à análise aprofundada para esta revisão sistemática.

4.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA (CORPUS AMPLO DE 240 ARTIGOS)

A análise bibliométrica foi realizada sobre o corpus de 240 artigos, que representa o panorama geral das publicações sobre Sistemas Multiagentes *na Web of Science* entre 2014 e 2025. Essa visão ampla do campo contextualiza a pesquisa, antes de se aprofundar na análise específica para a construção civil.

A rede de co-ocorrência de termos-chave, ilustrada na Figura 2, revela um núcleo temático proeminente com os termos *application, system, agent, model, management e control*. Termos como *challenge, decision, optimization, simulation e integration* também se mostraram relevantes e conectados a esse núcleo. A análise temporal indicou que *reinforcement learning e integration* representam focos de pesquisa mais recentes no período.

Figura 2: Nuvem de clusters temáticos



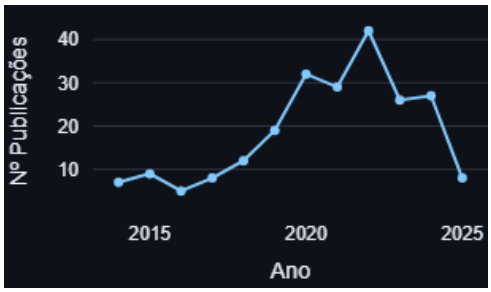
Fonte: VOSviewer (2025)

A produção científica sobre Sistemas Multiagentes acumulou 12.848 citações, com uma média de 57 citações por artigo, evidenciando o impacto da pesquisa na área. Observou-se uma tendência crescente na produção anual de publicações, com expansão de 7 publicações em 2014 para um pico de 42 em 2022. Houve um crescimento acentuado em 2020 (n=32) e o ápice em 2022 (n=42), com leve retração em 2021 (n=29). Contudo, uma desaceleração manifestou-se em 2023 (n=26) e 2024 (n=27), com dados parciais para 2025 (n=8 até abril) indicando retração. A Figura 3 ilustra a publicação por ano.

A análise de autoria identificou Liang et al. (2025), Proskurnikov e Tempo (2017) e Sierla, Ihasalo, e Vyatkin (2022) como os autores mais prolíficos (3 publicações cada). No Brasil, Bazzan, ALC e Da Silva, BC (UFRGS) foram os mais frequentes na amostra (1 publicação cada), focados em *reinforcement learning* para tráfego.

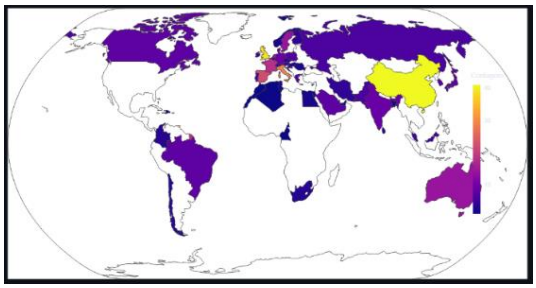
A distribuição geográfica das publicações (Figura 4) revela a liderança da China (41 publicações) e Inglaterra (34), seguidas por países europeus como Itália (29), Espanha (22) e França (18). O Brasil contribuiu com 8 publicações na amostra analisada, indicando uma oportunidade para maior inserção nacional.

Figura 3: Publicação por ano



Fonte: Dados WoS e gráfico desenvolvido pelo autor (2025)

Figura 4: Produção por Pais (Autores)



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2025)

As palavras-chave mais frequentes (Figura 5) foram *systems* (238 menções) e *control* (141 menções), refletindo a centralidade desses conceitos. *Multi-agent* (107) e *control distributed* (64) são paradigmas principais. A aplicação mais visível de MAS é em sistemas de energia, com termos como energia (84), gestão (81), *smart grid* e *microgrid* (19) predominando.

Figura 5: Nuvens de palavras chaves



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2025)

4.3 ANÁLISE QUALITATIVA DETALHADA DOS 22 ARTIGOS SELECIONADOS

A análise qualitativa aprofundada dos 22 artigos de alta relevância buscou compreender suas contribuições, contextos de aplicação de Sistemas Multiagentes (MAS), benefícios potenciais, barreiras de implementação e lacunas para a gestão de projetos na construção civil. Um achado desta revisão é que a maioria dos artigos aborda o MAS em ambientes complexos e dinâmicos com características semelhantes à construção civil, mas poucos fornecem evidências diretas de aplicação ou discussão focada exclusivamente neste setor. A ausência desse foco explícito na literatura indica uma lacuna de pesquisa.

4.3.1 CONTEXTOS DE APLICAÇÃO E POTENCIAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os artigos analisados demonstram o emprego de Sistemas Multiagentes em diversos setores que, por sua natureza complexa e dinâmica, apresentam características análogas aos desafios da gestão de projetos na construção civil. A transposição dos princípios e achados desses contextos para o ambiente construído revela um potencial promissor, respondendo à primeira questão de pesquisa (Q1).

A otimização e coordenação em redes e sistemas distribuídos são demonstradas pelo uso de MAS e algoritmos distribuídos para otimizar a alocação de recursos, o consenso e o fluxo de trabalho em sistemas complexos. Alocação de recursos em redes (Doostmohammadian *et al*., 2025) e problemas de consenso em coordenação multiagente (Wang *et al*., 2014) oferecem insights para a gestão de mão de obra e equipamentos, agendamento de atividades e otimização da cadeia de suprimentos na construção. A otimização de fluxo em ambientes dinâmicos de tráfego (Noaeen *et al*., 2022) espelha a necessidade de gerenciar o trânsito interno de veículos e materiais em canteiros. (Paccagnan; Chandan; Marden, 2022) exploram o design de utilidades e mecanismos que coordenam agentes com informações limitadas, análogo à gestão de stakeholders com objetivos potencialmente conflitantes em projetos de construção.

A segurança, robustez e confiabilidade dos sistemas multiagentes contra falhas, ataques cibernéticos e incertezas constituem um tema central. A revisão apresenta o controle seguro para sistemas multiagentes robóticos, com implicações diretas para a segurança operacional de máquinas autônomas em canteiros de obras (Garg *et al*., 2024). A cibersegurança de sistemas de controle multiagentes e o consenso sob ataques adversariais (Ishii; Wang; Feng, 2022; Zhu; Ishii, 2022), fornecem fundamentos para proteger dados e operações automatizadas na construção contra informações falsas ou interrupções. A segurança de dados e a resiliência em Smart Grids, análogas às redes de sensores e sistemas IoT em canteiros, também são discutidas (Pal *et al*., 2021).

A robótica colaborativa e manipulação, como a coordenação de múltiplos robôs e sistemas com manipuladores para tarefas complexas sob restrições espaciais e temporais (Chen; Sewlia; Dimarogonas, 2024; Verginis, 2022) possui relevância direta para a automação de processos físicos na construção, como a manipulação de componentes pesados por múltiplos robôs e o controle preciso de posicionamento em ambientes restritos.

A modelagem de comportamento social e redes dinâmicas, com a análise de dinâmicas de opinião e comportamento em redes sociais (Proskurnikov; Tempo, 2017) , oferece insights para a gestão de equipes, a formação de consenso e a adoção de inovações na construção civil, onde a interação humana e a evolução de opiniões são cruciais.

A gestão de dados e cadeia de suprimentos, com a aplicação de Big Data Analytics (BDA) e MAS para gerenciar riscos e otimizar processos na cadeia de suprimentos (De Assis Santos; Marques, 2022) , é diretamente relevante para a logística, rastreabilidade de materiais e gestão de riscos em projetos de construção, setores que lidam com vastos volumes de dados e complexas interações.

A digitalização e estrutura de programação MAS, incluindo a construção de software MAS e a exploração das dimensões de agente, ambiente e organização (Boissier *et al*., 2019) são fundamentais para o desenvolvimento de plataformas digitais e a formalização de processos colaborativos na construção, permitindo a gestão dinâmica do canteiro e a integração de automação.

A capacidade de otimizar operações e alocação de recursos, demonstrada em planejamento de produção (Panzer; Bender; Gronau, 2022), gestão de redes inteligentes (Pal *et al*., 2021) e cadeias de suprimentos (De Assis Santos; Marques, 2022; Doostmohammadian et al., 2025), sugere potencial para a redução de custos e tempos de projeto. Mecanismos de consenso e coordenação, aprimoram a tomada de decisão e o alinhamento de objetivos (Paccagnan; Chandan; Marden, 2022; Wang; Ke, 2024), podem aprimorar a tomada de decisão e o alinhamento de objetivos entre equipes multidisciplinares e subcontratados na construção civil. A flexibilidade dos MAS para se adaptar a mudanças e escalar em ambientes complexos, (Noaeen *et al*., 2022) (Howell *et al*., 2017) permitindo que projetos de construção se ajustem rapidamente a imprevistos, redistribuindo tarefas e recursos. O desenvolvimento de métodos de controle seguro (Garg *et al*., 2024), resiliência a ataques (Zhu; Ishii, 2022) e garantia de integridade de dados (Pal *et al*., 2021) em MAS com implicações diretas para a segurança operacional em canteiros com automação e robótica, incluindo prevenção de colisões e proteção de dados. A capacidade dos MAS de fornecer *insights* em tempo real e lidar com informações parciais (Manieri; Falsone; Prandini, 2023) ou estratégicas (Li; Zhao; Zhu, 2022), aliada à modelagem de formação de opinião (Proskurnikov; Tempo, 2017), pode aprimorar a tomada de decisão em cenários de incerteza e facilitar a resolução proativa de conflitos entre *stakeholders*.

A força das evidências diretas para a aplicação desses benefícios na prática da construção civil é considerada fraca nos artigos revisados, o que destaca uma lacuna significativa que demanda investigações futuras focadas no setor.

4.3.2 PRINCIPAIS BARREIRAS À IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS MULTIAGENTES

A implementação de Sistemas Multiagentes (MAS) em domínios complexos, como a gestão da construção civil, enfrenta diversas barreiras e desafios. Estes podem ser categorizados em aspectos técnicos e algorítmicos, questões de dados e validação, segurança e resiliência, lacunas entre teoria e prática, e aspectos organizacionais e culturais. A Tabela 1 sintetiza as principais distinções encontradas na literatura internacional e sua contextualização.

Tabela 1: Barreiras em Sistemas Multiagentes: principais distinções encontradas na literatura internacional e sua contextualização.

AUTOR	BARREIRAS INTERNACIONAIS
Verginis, 2022	Soluções ontológicas pouco adotadas devido à complexidade e custos elevados.
Wang; Ke, 2024	Escalabilidade em redes sociais demanda metodologias robustas para grandes volumes de dados.
Aguado *et al*., 2020	Algoritmos resilientes são cruciais contra ameaças mal-intencionadas.
Rihan; S. Alahmari, 2025	Ameaças à segurança abrangem ataques internos, falhas de comunicação e vulnerabilidades sistêmicas.
Paccagnan; Chandan; Marden, 2022	Otimização em sistemas multiagentes permanece intratável, mesmo com controle centralizado.
Pal *et al*., 2021	Navegação simultânea de agentes sob restrições temporais e anticolisão é um problema em aberto.
Zhu; Ishii, 2022	Heterogeneidade dos agentes limita algoritmos que partem de premissas homogêneas.
Manieri; Falsone; Prandini, 2023	Restrições de privacidade aumentam a necessidade de dados e alteram o equilíbrio entre eficiência e proteção.
Garg *et al*., 2024	Garantias teóricas de segurança raramente se confirmam na prática, exigindo abordagens mais realistas.
Chen; Sewlia; Dimarogonas, 2024	Soluções distribuídas para controle sob restrições espaço-temporais são pouco efetivas e limitadas.
Storey *et al*., 2016	Falta de dados reais e bancadas de teste (testbeds).
Howell *et al*., 2017	Volume e segurança de dados, custos de implementação/manutenção, mão de obra qualificada, aceitação pública.
Boissier *et al*., 2019	Inconsistência entre design e abstrações, limitações de plataformas, interoperabilidade.
De Assis Santos; Marques, 2022	Resistência ao compartilhamento de informações, modelos de gestão de risco obsoletos.
Ferreira *et al*., 2022	Atrasos de comunicação e mudanças de topologia, complexidade da dinâmica do sistema.

Fonte: WoS (2025) adaptada pelo autor.

A análise internacional revela barreiras para Sistemas Multiagentes (MAS) agrupadas em complexidade técnica e algorítmica, incluindo a intratabilidade da otimização (Paccagnan; Chandan; Marden, 2022), a complexidade da modelagem em ambientes dinâmicos (Verginis, 2022), os desafios da escalabilidade em grandes redes(Proskurnikov; Tempo, 2017) e a necessidade de lidar com a heterogeneidade dos agentes (Li; Zhao; Zhu, 2022). Em dados e modelagem, aborda-se o volume e a segurança tempo real (Pal *et al*., 2021), a necessidade de dados reais e *testbeds* para validação (Noaeen *et al.*, 2022), e as restrições de privacidade que impactam a eficiência (Manieri; Falsone; Prandini, 2023). A inconsistência entre conceitos de design e abstrações de programação também é um desafio (Boissier *et al.*, 2019). A segurança e resiliência focam em ataques mal-intencionados, ameaças internas e falhas de comunicação (Zhu; Ishii, 2022). A transferibilidade e validação prática evidenciam o descompasso entre garantias teóricas e a confirmação prática (Chen; Sewlia; Dimarogonas, 2024), muitas vezes devido a suposições simplificadas em simulações. Aspectos organizacionais e de colaboração incluem resistência ao compartilhamento de informações (De Assis Santos; Marques, 2022) e a necessidade de mão de obra qualificada (Pal *et al*., 2021).

Em contrapartida, a literatura brasileira (representada pelos 8 artigos incluídos no corpus final) aponta para um estágio diferente de desafios, mais centrado em barreiras sociotécnicas e estruturais. A resistência cultural à adoção de novas tecnologias (Boissier *et al*., 2019) e as barreiras específicas enfrentadas por Pequenas e Médias Empresas (PMEs) (De Assis Santos; Marques, 2022) são preocupações mais salientes no Brasil. Além disso, aspectos como a gestão da autonomia dos agentes (Boissier *et al*., 2019), a falta de dados reais e *testbeds* para validação (Noaeen *et al*., 2022) e a necessidade de lidar com os altos custos de implementação e manutenção (Pal *et al*., 2021) são frequentemente citados como entraves. A discussão sobre segurança e privacidade na comunicação entre agentes, embora crucial internacionalmente (Wang; Ke, 2024; Zhu; Ishii, 2022), não encontra paralelo similar na literatura brasileira analisada, o que pode indicar que o Brasil ainda está enfrentando obstáculos mais fundamentais antes de avançar para essas questões mais sofisticadas. Essa análise comparativa responde à segunda e terceira questões de pesquisa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo, uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) assistida por Inteligência Artificial, buscou identificar como os Sistemas Multiagentes (MAS) podem apoiar a tomada de decisão na gestão da construção civil brasileira, em comparação com o contexto internacional. Os resultados confirmam o potencial transformador dos MAS para o setor, revelando uma dicotomia nas prioridades de pesquisa e implementação entre os cenários internacional e brasileiro.

Um novo conhecimento relevante é a ausência de evidências diretas e específicas de aplicação e benefícios práticos de MAS na gestão de projetos de construção civil nos 22 artigos revisados. Isso contrasta com a riqueza de aplicações em setores análogos, onde os MAS comprovadamente otimizam processos, aprimoram coordenação, aumentam escalabilidade, segurança e suporte à decisão (Chen; Sewlia; Dimarogonas, 2024; Doostmohammadian *et al.*, 2025; Garg *et al.*, 2024; Paccagnan; Chandan; Marden, 2022; Panzer; Bender; Gronau, 2022). Essa lacuna na literatura de construção civil demanda futuras investigações direcionadas.

Em relação às barreiras, a literatura internacional foca em desafios técnicos sofisticados como resiliência a ataques (Aguado *et al.*, 2020; Rihan; S. Alahmari, 2025), complexidade ontológica (Verginis, 2022), escalabilidade (Wang et al., 2014) e privacidade (Manieri; Falsone; Prandini, 2023). Em contrapartida, o contexto brasileiro (Boissier *et al.*, 2019), Santos, (2024) prioriza barreiras sociotécnicas e estruturais, como resistência cultural e limitações de PMEs. A ausência de discussão sobre segurança e privacidade na comunicação entre agentes na literatura brasileira, proeminente internacionalmente (Li; Zhao; Zhu, 2022; Rihan; S. Alahmari, 2025), acentua essa disparidade.

A principal contribuição deste trabalho é mapear os benefícios potenciais dos MAS para a gestão de projetos de construção civil, baseados em analogias, e expor as lacunas temáticas e barreiras contextuais que modulam a viabilidade prática da implementação no Brasil. A aplicabilidade de modelos MAS complexos internacionalmente pode ser limitada no Brasil sem a superação de obstáculos fundamentais. O potencial da IA, via MAS, requer pragmatismo local.

Diante dos conhecimentos alcançados, desenvolvimentos futuros devem priorizar pesquisas empíricas diretas em projetos reais de construção civil no Brasil, por meio de estudos de caso e projetos-piloto, para validar benefícios e documentar desafios in loco. A superação de barreiras sociotécnicas e estruturais demanda estratégias para mitigar resistência cultural, programas de capacitação profissional e políticas públicas de incentivo à inovação para PMEs. É crucial aprofundar a pesquisa contextualizada em segurança e privacidade, buscando soluções para MAS adaptadas à realidade brasileira. Abordagens para interoperabilidade são necessárias, visando desenvolver soluções que promovam a integração entre sistemas e tecnologias (BIM, IoT, robótica) e tratem os entraves à adoção ampla dos MAS, evitando a replicação acrítica de tendências externas. Estas diretrizes visam fortalecer a pesquisa nacional em MAS na construção civil e catalisar a transformação digital do setor no país.

REFERÊNCIAS

AGUADO, Guillem *et al.* A Review on MAS-Based Sentiment and Stress Analysis User-Guiding and Risk-Prevention Systems in Social Network Analysis. **Applied Sciences**, v. 10, n. 19, p. 6746, 26 set. 2020.

BIGNOLD, Adam *et al.* A conceptual framework for externally-influenced agents: an assisted reinforcement learning review. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, v. 14, n. 4, p. 3621–3644, abr. 2023.

BOISSIER, Olivier *et al.* Dimensions in programming multi-agent systems. **The Knowledge Engineering Review**, v. 34, p. e2, 2019.

CARDOSO, Rafael C.; FERRANDO, Angelo. A Review of Agent-Based Programming for Multi-Agent Systems. **Computers**, v. 10, n. 2, p. 16, 27 jan. 2021.

CHEN, Fei; SEWLIA, Mayank; DIMAROGONAS, Dimos V. Cooperative control of heterogeneous multi-agent systems under spatiotemporal constraints. **Annual Reviews in Control**, v. 57, p. 100946, 2024.

DE ASSIS SANTOS, Leonardo; MARQUES, Leonardo. Big data analytics for supply chain risk management: research opportunities at process crossroads. **Business Process Management Journal**, v. 28, n. 4, p. 1117–1145, 22 ago. 2022.

DOOSTMOHAMMADIAN, Mohammadreza *et al.* Survey of distributed algorithms for resource allocation over multi-agent systems. **Annual Reviews in Control**, v. 59, p. 100983, 2025.

FERREIRA, Daniele *et al.* Overview of Consensus Protocol and Its Application to Microgrid Control. **Energies**, v. 15, n. 22, p. 8536, 15 nov. 2022.

GARG, Kunal *et al.* Learning safe control for multi-robot systems: Methods, verification, and open challenges. **Annual Reviews in Control**, v. 57, p. 100948, 2024.

HOWELL, Shaun *et al.* Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 193–214, set. 2017.

ISHII, Hideaki; WANG, Yuan; FENG, Shuai. An overview on multi-agent consensus under adversarial attacks. **Annual Reviews in Control**, v. 53, p. 252–272, 2022.

LI, Tao; ZHAO, Yuhan; ZHU, Quanyan. The role of information structures in game-theoretic multi-agent learning. **Annual Reviews in Control**, v. 53, p. 296–314, 2022.

LI, Yu; LEE, Soyeun Olivia. Navigating the generative AI travel landscape: the influence of ChatGPT on the evolution from new users to loyal adopters. **International Journal of Contemporary Hospitality Management**, v. 37, n. 4, p. 1421–1447, 1 abr. 2025.

LIANG, Jiaxin *et al.* A Review of Multi-Agent Reinforcement Learning Algorithms. **Electronics**, v. 14, n. 4, p. 820, 19 fev. 2025.

LIZZIO, Fausto Francesco; CAPELLO, Elisa; GUGLIERI, Giorgio. A Review of Consensus-based Multi-agent UAV Implementations. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 106, n. 2, p. 43, out. 2022.

MANIERI, Lucrezia; FALSONE, Alessandro; PRANDINI, Maria. Probabilistic feasibility in data-driven multi-agent non-convex optimization. **Annual Reviews in Control**, v. 56, p. 100925, 2023.

NOAEEN, Mohammad *et al.* Reinforcement learning in urban network traffic signal control: A systematic literature review. **Expert Systems with Applications**, v. 199, p. 116830, ago. 2022.

PACCAGNAN, Dario; CHANDAN, Rahul; MARDEN, Jason R. Utility and mechanism design in multi-agent systems: An overview. **Annual Reviews in Control**, v. 53, p. 315–328, 2022.

PAL, Rohan *et al.* A comprehensive review on IoT-based infrastructure for smart grid applications. **IET Renewable Power Generation**, v. 15, n. 16, p. 3761–3776, dez. 2021.

PANZER, Marcel; BENDER, Benedict; GRONAU, Norbert. Neural agent-based production planning and control: An architectural review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 65, p. 743–766, out. 2022.

PROSKURNIKOV, Anton V.; TEMPO, Roberto. A tutorial on modeling and analysis of dynamic social networks. Part I. **Annual Reviews in Control**, v. 43, p. 65–79, 2017.

RIHAN, Mohammed Ali M.; S. ALAHMARI, Turki. Review of Recent Development Regarding Strength, Durability, and Microstructure Properties of Geopolymer Concrete Containing Rice Husk Ash. **Advances in Civil Engineering**, v. 2025, n. 1, p. 7211661, jan. 2025.

RINALDI, Marco *et al.* Application of Task Allocation Algorithms in Multi-UAV Intelligent Transportation Systems: A Critical Review. **Big Data and Cognitive Computing**, v. 8, n. 12, p. 177, 2 dez. 2024.

SANTOS, Marcília Miranda Teixeira Dos. A IoT – Internet of Things -no setor de compras e suprimentos numa empresa de logística: controle de entradas e saídas de suprimentos em almoxarifado. **RCMOS - Revista Científica Multidisciplinar O Saber**, v. 3, n. 1, p. 1–13, 22 jan. 2024.

STOREY, Chris *et al.* Success Factors for Service Innovation: A Meta-Analysis. **Journal of Product Innovation Management**, v. 33, n. 5, p. 527–548, set. 2016.

VERGINIS, Christos K. Control of cooperative manipulator-endowed systems under high-level tasks and uncertain dynamics. **Annual Reviews in Control**, 2022.

WANG, Guangbin; KE, Jiawen. Literature Review on the Structural Health Monitoring (SHM) of Sustainable Civil Infrastructure: An Analysis of Influencing Factors in the Implementation. **Buildings**, v. 14, n. 2, p. 402, 1 fev. 2024.

WANG, Qingling *et al.* An overview of consensus problems in constrained multi-agent coordination. **Systems Science & Control Engineering**, v. 2, n. 1, p. 275–284, dez. 2014.

ZHU, Quanyan; ISHII, Hideaki. Introduction to the special section on learning and security for multi-agent systems. **Annual Reviews in Control**, v. 53, p. 249–251, 2022.