XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8845

Aplicações de Gêmeos Digitais na Gestão da Manutenção: Uma revisão sistemática da literatura

Digital Twins applications in Facility Management: A systematic literature review

Alisson Souza Silva
Universidade Federal da Bahia | Salvador| Brasil | so_alisson@hotmail.com
Daniel Paes
Massey University | Auckland| Nova Zelândia | D.Paes@massey.ac.nz
Dayana Bastos Costa
Universidade Federal da Bahia | Salvador| Brasil | dayanabcosta@ufba.br

Resumo

O uso de Gêmeos Digitais (GDs) tem se destacado como uma abordagem promissora para apoiar a Gestão da Manutenção (GM) das construções. Apesar do crescimento recente, muitas discussões sobre GD na GM permanecem no âmbito conceitual. Assim, este estudo busca analisar, por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura, como os GDs têm sido aplicados nesse contexto. Analisaram-se 32 artigos, com análise bibliométrica e qualitativa. Os resultados indicam um crescimento recente das publicações, com predominância de estudos sobre edificações. Nesse domínio, os GDs são utilizados para monitoramento em tempo real, manutenção preditiva, otimização energética e suporte à decisão, integrando diversas tecnologias digitais. Na infraestrutura, destacam-se aplicações voltadas ao monitoramento da saúde estrutural, à gestão de ativos e à previsão do ciclo de vida. Como próximas etapas, a pesquisa buscará explorar: (i) os aspectos tecnológicos empregados; (ii) o tempo de resposta operacional dos GDs na gestão da manutenção; (iii) os requisitos de uso para os operadores finais, como habilidades e treinamento; e (iv) os principais benefícios, limitações e gargalos do uso de GDs na gestão da manutenção.

Palavras-chave: Gêmeos Digitais. Gestão da manutenção. Gestão das construções. Tecnologias digitais.

Abstract

The use of Digital Twins (DTs) has emerged as a promising approach to support Maintenance Management (MM) in the built environment. Despite recent growth, much of the discussion about DTs in MM remains at a conceptual level. Therefore, this study aims to analyze how DTs have been applied in this context through a Systematic Literature Review. A total of 32 articles were examined using both bibliometric and qualitative analyses. The results indicate a recent increase in publications, with a predominance of studies focused on buildings. In this domain, DTs are primarily used for real-time monitoring, predictive maintenance, energy optimization, and decision support, often integrating multiple digital technologies. In the infrastructure sector, prominent applications include structural health monitoring, asset management, and lifecycle prediction. As next steps, the research will explore: (i) the technologies employed; (ii) the operational response time of DTs in maintenance management; (iii) user requirements for end operators, such as skills and training; and (iv) the main benefits, limitations, and bottlenecks associated with the use of DTs in maintenance management.

Keywords: Digital Twins. Facility Management. Construction Management. Digital Technologies.

Como citar:
SILVA, A. S., PAES, D., COSTA, D. B. Aplicações de Gêmeos Digitais na Gestão da Manutenção: Uma revisão sistemática da literatura. ENTAC 2026. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8845

INTRODUÇÃO

O setor da construção civil, de modo geral, ainda é marcado por baixa produtividade, fragmentação, falta de interoperabilidade e de padronização, além da dependência de processos manuais, de fluxos de informação ineficientes e de “ilhas de dados”, que comprometem a integração e a eficiência operacional [1; 2; 3]. Apesar de várias iniciativas visando minimizar essas limitações, elas persistem em todas as fases do ciclo de vida das edificações [4].

A fase de Operação e Manutenção (O&M) é reconhecida como a etapa mais longa e onerosa do ciclo de vida de uma edificação [5]. Segundo Salzano et al. [6], essa fase concentra as atividades que mais geram gastos ao longo do ciclo de vida do edifício. Segundo Abdelaim et al. [2], estima-se que este período responda por cerca de 80% do consumo total de energia e pela maior parte dos recursos consumidos na construção civil. Apesar desse percentual, a Gestão da Manutenção (GM) ainda enfrenta limitações severas, caracterizando-se por abordagens corretivas e por uma gestão de informações fragmentada e ineficiente [1; 7]. A dependência de registros manuais e a falta de integração de dados dificultam a tomada de decisões precisas [8].

Diante dessas limitações, estudos têm incorporado tecnologias digitais para aprimorar os processos gerenciais no setor. Destacam-se o uso de drones no apoio à gestão da segurança e da produção [9; 10] e a Internet das Coisas para rastreamento de recursos [12]. Algoritmos de Inteligência Artificial foram utilizados no suporte à gestão da qualidade [12] e para automatizar inspeções de telhados e fachadas [13; 4], além do uso do BIM para inserir informações sobre a edificação durante a O&M [14]. Contudo, o uso ainda fragmentado dessas tecnologias limita seu potencial de impacto na prática.

Como forma de superar essa fragmentação, diversas abordagens têm sido propostas na literatura. Nesse contexto, o desenvolvimento de Gêmeos Digitais (GD) destaca-se por integrar essas e outras tecnologias, manter a conexão entre o mundo real e o virtual e permitir a geração e o armazenamento contínuos de dados sobre o ativo construído [15]. Um GD é definido como uma réplica virtual dinâmica de um ativo físico que reflete, em tempo real, seu estado e comportamento [16]. Essa integração entre o ambiente físico e o modelo digital proporciona uma base de informações confiável, o que melhora a tomada de decisão ao longo do ciclo de vida das edificações [17]. Assim, viabiliza-se a transição de uma manutenção reativa para uma abordagem preditiva baseada em dados reais [18].

Apesar do crescente número de estudos sobre GDs na GM de construções, a literatura ainda é predominantemente conceitual, com foco em modelos e frameworks e com pouca atenção aos desafios de implementação prática [20]. Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de investigações que avaliem aplicações em contextos reais e práticos. Assim, este estudo tem como objetivo analisar, na literatura, como os GDs têm sido utilizados na gestão da manutenção durante a fase de O&M.

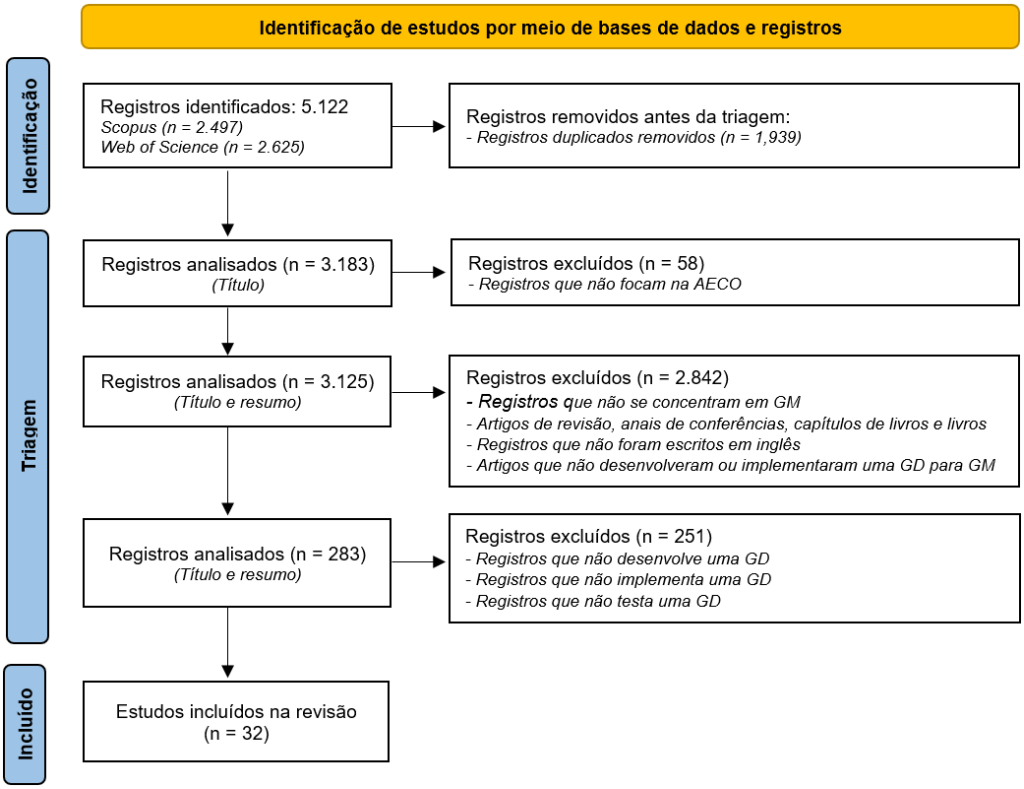
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8845

MÉTODO DE PESQUISA

Esta pesquisa apresenta uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), caracterizada pela formulação e revisão de uma pergunta, utilizando métodos sistemáticos para selecionar, identificar e analisar pesquisas sobre determinado assunto [21]. Assim, este estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: "Como os GDs têm sido utilizados na GM das construções durante a fase de O&M?". Para responder a essa pesquisa, adotaram-se as diretrizes "*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*" (PRISMA) para a condução do estudo [21]. O PRISMA é amplamente empregado em RSL, pois descreve de forma clara a justificativa e os procedimentos para a identificação, seleção, exclusão e inclusão de estudos, garantindo a precisão desse processo [21].

A Figura 1 apresenta o delineamento da RSL com base na seguinte combinação de termos de busca: *("Digital Twin*") AND ("Facilit*" OR "Asset*" OR "Building*" OR "Infrastructure*" OR "Propert*") AND ("Management" OR "Maintenance" OR "Operation").* Os operadores booleanos e o uso do caractere * foram empregados para ampliar o alcance da busca, permitindo capturar variações terminológicas e aumentar a sensibilidade sem comprometer a aderência ao escopo. Além disso, esses termos foram aplicados às bases de dados Scopus e Web of Science, selecionadas por sua ampla cobertura e relevância [22].

Figura 1: Delineamento da RSL



A busca inicial resultou em 7.075 registros na Scopus e 4.419 na WoS, totalizando 11.494 registros. Nos sites das bases de dados, foram selecionados apenas artigos técnicos e originais, escritos em inglês, e foram removidos 6.372 registros, resultando

em uma amostra inicial de 5.122 estudos. Destes, 1.939 eram duplicados e foram removidos na fase de identificação do PRISMA.

Na triagem, a seleção considerou os estudos que contiveram os termos de busca definidos no título. Nessa etapa, todos os estudos irrelevantes para o desenvolvimento de um GD na indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) foram excluídos. Exemplos de estudos excluídos incluem aqueles que utilizam os termos “construção”, “edificação” ou “arquitetura” para descrever o desenvolvimento de um GD em outras áreas, sem relação direta com a indústria da construção civil.

Além disso, foram analisados os títulos de 3.183 registros, e 58 estudos foram excluídos por não abrangerem a AECO. Em seguida, foram analisados os títulos e resumos de 3.125 registros, aplicando-se critérios de exclusão relacionados a estudos que não se concentravam na GM, artigos de revisão, anais de conferências, capítulos de livros e livros, estudos não escritos em inglês e estudos que não desenvolveram ou implementaram um GD para GM. A checagem para excluir artigos de revisão e estudos não escritos em inglês foi incluída novamente, pois alguns registros não foram filtrados e excluídos diretamente nos sites das bases de dados. Como resultado, 2.842 registros foram excluídos, restando 283 estudos para a fase de elegibilidade.

Na etapa de elegibilidade, os 283 estudos remanescentes foram analisados com maior rigor, verificando-se sua aderência ao objetivo central da pesquisa, isto é, ao desenvolvimento e à implementação de GDs na GM. Assim, foram excluídos 251 estudos que não desenvolveram, implementaram ou testaram um GD em contexto de GM, resultando em uma amostra final de 32 estudos incluídos na revisão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados da pesquisa, divididos em dois subtópicos: (i) análise bibliométrica e (ii) análise descritiva da amostra.

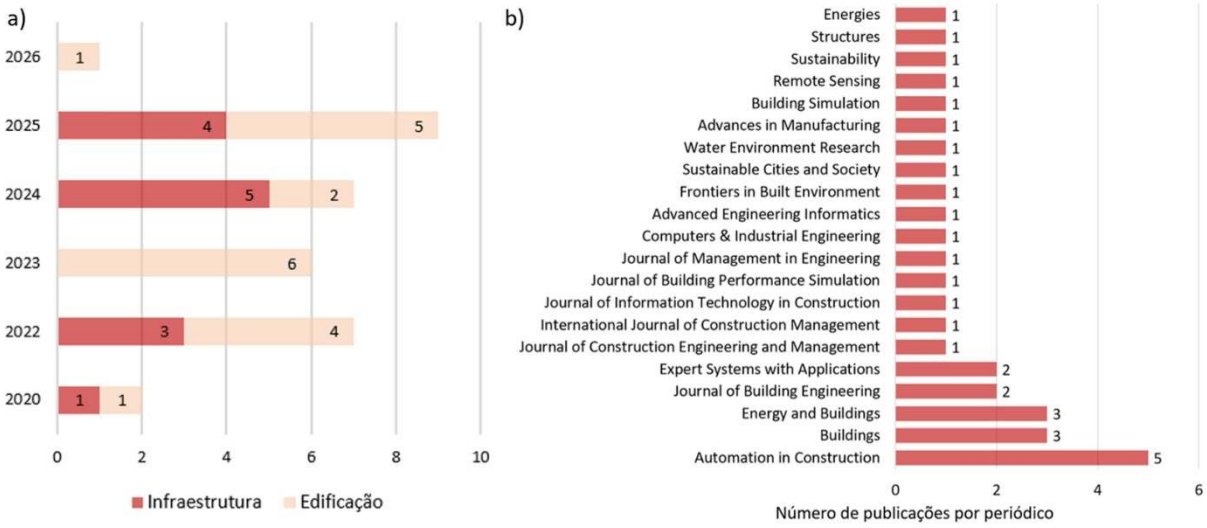
ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Os 32 artigos selecionados na amostra estão distribuídos ao longo de 7 anos e foram publicados em 22 periódicos (Figura 2). As aplicações concentram-se principalmente em dois domínios: infraestrutura e edificações. Em geral, há um número maior de estudos focados em edificações nesse período, o que indica maior maturidade ou interesse do meio acadêmico nesse campo. Além disso, observa-se um aumento gradual no número de publicações a partir de 2022, atingindo um pico em 2025, o que sugere uma intensificação recente de pesquisas que aplicam GD à GM (Figura 2a).

A Figura 2b apresenta a distribuição dos artigos por periódico científico. Observa-se que a *Automation in Construction* concentra o maior número de publicações (n = 5), destacando-se como o principal veículo de disseminação desse tema. Em seguida, os periódicos *Energy and Buildings* e *Buildings* apresentam três publicações cada. Os periódicos *Expert Systems with Applications* e *Journal of Building Engineering* publicaram duas vezes, enquanto os demais periódicos listados publicaram apenas uma vez. Esses resultados indicam uma dispersão moderada das pesquisas, com

concentração em periódicos voltados às áreas de construção, energia e aplicações de inteligência artificial.

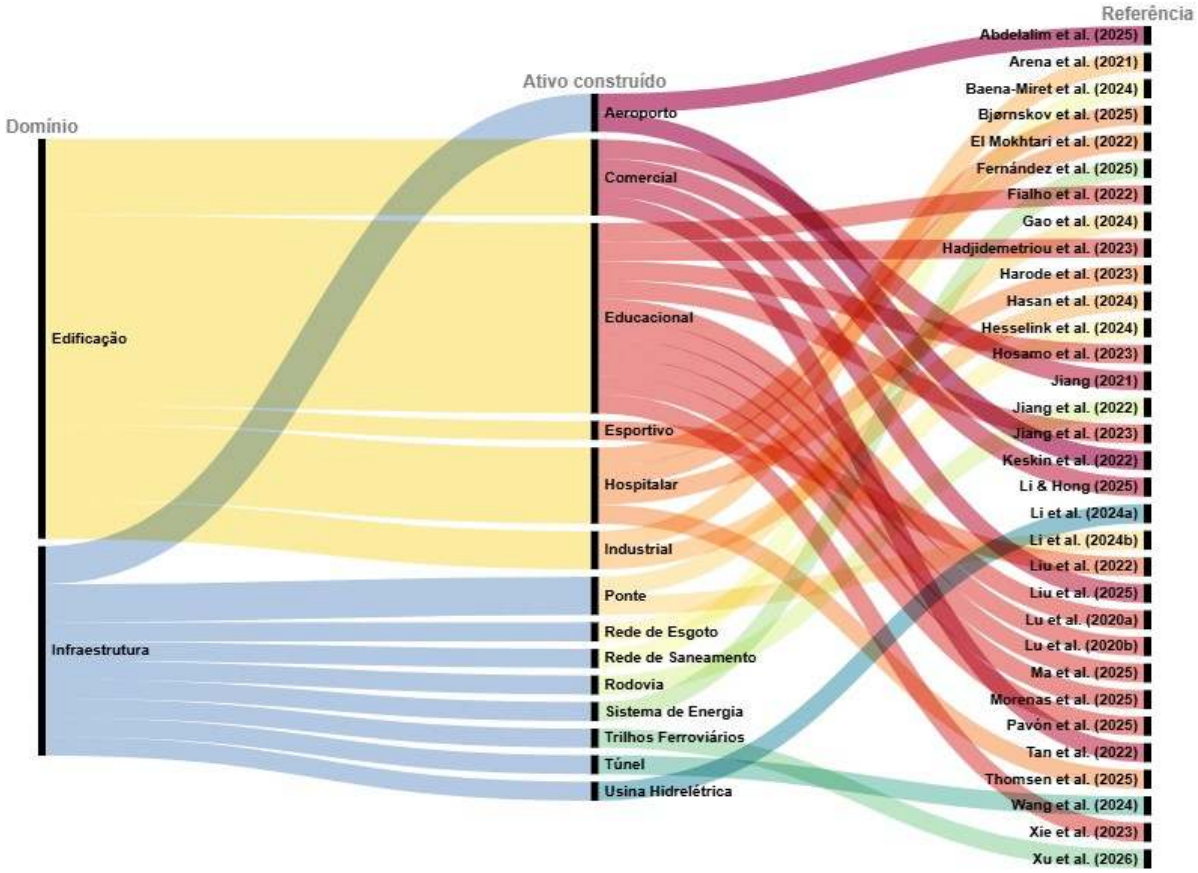
Figura 2: Distribuição das publicações: (a) por ano e tipo de construção; e (b) por periódicos



ANÁLISE DESCRITIVA

A amostra é composta por 32 estudos, dos quais 19 estão voltados à aplicação em edificações e 13 em infraestrutura (Figura 3).

Figura 3: Diagrama com a classificação da amostra



Aplicação de GD na GM de edificações

Os estudos voltados a edificações demonstram que os GDs são amplamente utilizados como plataformas integradoras para a operação e a manutenção inteligentes, combinando BIM, IoT e modelos analíticos para monitoramento e controle em tempo real. Diversos trabalhos evidenciam aplicações voltadas à visualização 3D, ao monitoramento ambiental e à integração de sistemas prediais, permitindo a gestão unificada de ativos e operações [23; 5; 24]. Além disso, GDs são empregados para integrar dados de sensores e modelos digitais, promovendo uma representação dinâmica do desempenho do edifício ao longo do tempo [25; 3].

Outro eixo relevante refere-se à manutenção preditiva e à detecção de falhas, com uso intensivo de inteligência artificial e de análise de dados. Estudos mostram que os GDs permitem identificar anomalias em sistemas críticos, como HVAC e iluminação, antes que impactem o desempenho operacional ou o conforto dos usuários [18; 26; 16]. Além disso, soluções baseadas em GD viabilizam diagnósticos automáticos e suporte à tomada de decisão, reduzindo o tempo de resposta e os custos de manutenção [27;28].

No campo da eficiência energética e do conforto dos ocupantes, os GDs são utilizados para simular cenários operacionais e otimizar o desempenho energético dos edifícios. Aplicações incluem a previsão de consumo, o controle adaptativo de sistemas e a avaliação do conforto térmico e da qualidade do ar [29; 30; 31]. Também se destacam abordagens que utilizam modelos probabilísticos e o aprendizado de máquina para equilibrar a eficiência energética e o bem-estar dos usuários [18; 16].

Observa-se também que os GDs desempenham um papel estratégico na gestão integrada de instalações, atuando como plataformas para a simulação de cenários "*what-if*", o suporte à decisão e a automação de processos. Estudos demonstram sua aplicação no controle de sistemas de segurança, como a proteção contra incêndios, e na gestão centralizada de operações prediais [32; 33]. Além disso, soluções mais recentes exploram conceitos avançados, como o metaverso industrial e a integração com sistemas digitais distribuídos, ampliando o potencial dos GDs na gestão do ciclo de vida dos ativos [34; 2].

Apesar dos avanços no uso de GDs em edificações, a literatura ainda se concentra em aplicações pontuais e em sistemas internos, geralmente em ambientes controlados e em casos isolados, com investigações voltadas à eficiência energética e ao conforto, enquanto aspectos mais aplicados à prática, como a integração com a manutenção, a interoperabilidade entre sistemas e a escalabilidade, ainda são pouco explorados. Nesse contexto, não foram identificadas aplicações específicas de GDs na GM da envoltória das edificações, o que evidencia uma lacuna relevante. Também há uma lacuna na avaliação de impactos de longo prazo, como os custos de ciclo de vida e o desempenho da GM.

Aplicação de GD na GM de infraestrutura

No domínio da infraestrutura, os GDs são predominantemente aplicados ao monitoramento da saúde estrutural e à gestão de ativos em larga escala,

especialmente em sistemas complexos, como pontes, rodovias, redes de água e estruturas industriais. Esses sistemas utilizam dados em tempo real para avaliar parâmetros estruturais, como deformações, tensões e vibrações, permitindo uma visão contínua do estado dos ativos [35; 36; 37]. Além disso, GDs são empregados para consolidar dados heterogêneos em indicadores de desempenho e de risco, apoiando a tomada de decisão estratégica.

Outro aspecto refere-se à manutenção preditiva e à otimização do ciclo de vida dos ativos, com foco na previsão da vida útil remanescente e na redução de falhas. Estudos demonstram que GDs possibilitam simulações avançadas e testes de cenários operacionais, permitindo antecipar problemas e planejar intervenções de forma mais eficiente [38; 39]. Esse uso é particularmente relevante em ambientes industriais e em infraestruturas críticas, onde a indisponibilidade de ativos pode acarretar impactos significativos.

Os GDs também são amplamente utilizados no suporte à operação e à gestão de sistemas distribuídos, como redes de transporte, sistemas subterrâneos e redes de abastecimento. Nessas aplicações, os GDs permitem integrar dados espaciais e operacionais, facilitando o planejamento, a alocação de recursos e a resposta a eventos críticos [40; 41; 42]. Além disso, a integração com tecnologias como GIS e sensores IoT amplia a capacidade de análise e de controle desses sistemas.

Destaca-se, ainda, o uso dos GDs na gestão de riscos, da segurança e da resiliência operacional, especialmente em cenários que exigem alta confiabilidade. Aplicações incluem sistemas de alerta precoce, simulações de emergências e planejamento de contingências, o que permite uma abordagem proativa na gestão da infraestrutura [36; 39]. De modo geral, os GDs atuam como plataformas digitais estratégicas que possibilitam a transição de modelos reativos para abordagens preditivas e orientadas por dados, aumentando a eficiência, a segurança e a sustentabilidade dos sistemas de infraestrutura.

Embora esses estudos demonstrem maior maturidade no uso de GDs para monitoramento e manutenção preditiva, ainda se concentram principalmente em componentes específicos ou em sistemas isolados, com pouca integração entre diferentes tipos de infraestrutura. Além disso, há poucos estudos que abordem da interoperabilidade entre plataformas, a padronização de dados e a integração com sistemas de gestão existentes, principalmente em contextos reais de operação. Outro ponto a ser melhor estudado é a adoção em larga escala e a validação contínua em ambientes reais, já que muitos trabalhos ainda se baseiam em protótipos ou em ambientes experimentais. Há também oportunidades de expandir o uso de GDs na gestão integrada de múltiplos ativos e na tomada de decisão sistêmica em infraestruturas urbanas complexas.

CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo analisar, na literatura, como os GDs têm sido utilizados na GM na fase de O&M, com ênfase em aplicações em contextos reais e práticos. A

análise bibliométrica evidenciou um crescimento recente das publicações, especialmente a partir de 2022, o que indica maior interesse pelo tema.

No que se refere às aplicações, os resultados indicam que, em edificações, os GDs são majoritariamente utilizados como plataformas integradoras para monitoramento em tempo real, manutenção preditiva, otimização energética e suporte à tomada de decisão, com forte integração entre BIM, IoT e IA. Já no contexto de infraestrutura, os GDs são aplicados principalmente ao monitoramento da saúde estrutural, à gestão de ativos e à previsão do ciclo de vida, com foco em sistemas complexos e de larga escala, como pontes, rodovias e redes de utilidades.

Apesar dos resultados desta pesquisa, algumas limitações devem ser consideradas. A amostra analisada, embora representativa, limita-se aos estudos selecionados na RSL e pode não refletir toda a produção científica sobre o tema. Além disso, o estudo respondeu apenas a uma questão de pesquisa, o que permite ampliar a análise com a mesma base de dados. Como próximos passos, a pesquisa pretende explorar: (i) os aspectos tecnológicos empregados; (ii) o tempo de resposta operacional dos GDs na gestão da manutenção; (iii) os requisitos de uso para operadores finais, como habilidades e treinamentos; e (iv) os principais benefícios, limitações e desafios do uso de GDs na gestão da manutenção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq, por meio do número 443942/2024-2, pelo suporte financeiro à pesquisa.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, os autores utilizaram o Grammarly para revisar o manuscrito e melhorar da coesão do texto. Após o uso dessa ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] HESSELINK, L. et al. *Usability analysis of virtual-reality-enabled digital twin for the inspection of sewage pumping stations*. *International Journal of Construction Management*, 24(13), 1419–1430, 2024. https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2219941

[2] ABDELAIM, A. M. et al. *Optimizing Facilities Management Through Artificial Intelligence and Digital Twin Technology in Mega-Facilities*. *Sustainability*, 17(5), 1826, 2025. https://doi.org/10.3390/su17051826

[3] PAVÓN, R. M. et al. *BIM-based Digital Twin development for university Campus management. Case study ETSICCP*. *Expert Systems with Applications*, 262, 125696, 2025. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125696

[4] SANTANA, K. S. et al. *Enhancing façade condition assessment through CNN-based crack detection using UAS imagery*. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 11(2), 112, 2026. https://doi.org/10.1007/s41024-026-00780-3

[5] LIU, Z.; LI, M.; JI, W. *Development and application of a digital twin model for Net zero energy building operation and maintenance utilizing BIM-IoT integration*. *Energy and Buildings*, 328, 115170, 2025. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115170

[6] SALZANO, A. et al. *Existing assets maintenance management: Optimizing maintenance procedures and costs through BIM tools*. *Automation in Construction*, 149, 104788, 2023. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104788

[7] SENA, R. O. et al. *Proposal for integrating drone images and BIM in educational public buildings to support maintenance management*. *Revista Ingeniería de Construcción*, 39(3), 2024. https://doi.org/10.7764/RIC.00115.21

[8] SILVA, A. S. et al. *Method for quality inspection during the execution of facades based on UAS images and Machine Learning algorithms*. *International Journal of Construction Management*, 26(2), 277–294, 2026. https://doi.org/10.1080/15623599.2025.2520376

[9] PEINADO, H. S. et al. *Detecção de guarda-corpo e rodapés em canteiro de obras utilizando drones e visão computacional*. *Ambiente Construído*, 25, e137986, 2025. https://doi.org/10.1590/S1678-86212025000100942

[10] COSTA, R. P. et al. *Modelagem 3D de edificação gerada por fotogrametria com uso de VANT*. *Ambiente Construído*, 24, e131377, 2024. https://doi.org/10.1590/s1678-86212024000100737

[11] ARAÚJO, C. S.; FERREIRA, E. A. M.; COSTA, D. B. *System for tracking and managing metallic formworks adopted in cast-in-place concrete wall systems by integrating IoT and BIM*. *Construction Innovation*, 25(4), 1315–1341, 2025. https://doi.org/10.1108/CI-06-2023-0127

[12] SILVA, A. S. et al. *CNN-based model for automated anomaly recognition in facade execution to support Quality Management*. *Ambiente Construído*, 25, e143288, 2025. https://doi.org/10.1590/S1678-86212025000100867

[13] SILVA, A. S. et al. *CNN-Based YOLOv12 for Damage Assessment in Residential Roofs*. *IEEE Access*, 13, 193311–193322, 2025. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3629630

[14] MOURA, M. R. et al. *Gestão da manutenção de edifício público inacabado apoiado por BIM*. *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, 20, 1–14, 2024. https://doi.org/10.46421/entac.v20i1.6319

[15] SILVA, A. S.; PAES, D.; COSTA, D. B. *A Digital Twin-Based Method for Building Envelope Maintenance Management*. *Proceedings of the 48th AUBEA Conference*, 2025.

[16] MORENAS, J. et al. *Designing an AI-driven digital twin architecture for building energy prediction*. *Journal of Building Engineering*, 113, 113966, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113966

[17] BJØRNSKOV, J. et al. *Development and demonstration of a digital twin platform leveraging ontologies and data-driven simulation models*. *Journal of Building Performance Simulation*, 2025. https://doi.org/10.1080/19401493.2025.2504005

[18] HOSAMO, H. H. et al. *Improving building occupant comfort through a digital twin approach*. *Energy and Buildings*, 288, 112992, 2023. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112992

[19] HARODE, A. et al. *A tool-based system architecture for a digital twin: A case study in a healthcare facility*. *Journal of Information Technology in Construction*, 28, 107–137, 2023. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2023.006

[20] THOMSEN, A. M. S. et al. *Ontology-based Digital Twins for informed decision-making*. *Journal of Building Engineering*, 112, 113594, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113594

[21] MOHER, D. et al. *Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement*. *Physical Therapy*, 89(9), 873–880, 2009. https://doi.org/10.1093/ptj/89.9.873

[22] NHAMAGE, I. A. et al. *Strategies for Maximising the Value of Digital Twins for Bridge Management and Structural Monitoring*. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32(7), 4555–4586, 2025. https://doi.org/10.1007/s11831-025-10280-1

[23] MA, T. et al. *Digital twin for 3D interactive building operations*. *Automation in Construction*, 176, 106277, 2025. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106277

[24] JIANG, Y. *Intelligent Building Construction Management Based on BIM Digital Twin*. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021, 4979249, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/4979249

[25] LU, Q. et al. *Developing a Digital Twin at Building and City Levels*. *Journal of Management in Engineering*, 36(3), 05020004, 2020. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000765

[26] XIE, X. et al. *Digital twin enabled fault detection and diagnosis process for building HVAC systems*. *Automation in Construction*, 146, 104695, 2023. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104695

[27] FIALHO, B. C. et al. *Development of a BIM and IoT-Based Smart Lighting Maintenance System Prototype*. *Buildings*, 12(2), 99, 2022. https://doi.org/10.3390/buildings12020099

[28] LI, X. et al. *Structural health monitoring system based on digital twins*. *Structures*, 70, 107739, 2024. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107739

[29] LI, H.; HONG, T. *A digital twin platform for building performance monitoring and optimization*. *Building Simulation*, 18(6), 1561–1579, 2025. https://doi.org/10.1007/s12273-025-1290-2

[30] TAN, Y. et al. *Digital Twin-driven approach to improving energy efficiency of indoor lighting*. *Energy and Buildings*, 270, 112271, 2022. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112271

[31] HADJIDEMETRIOU, L. et al. *A digital twin architecture for real-time analysis in smart buildings*. *Sustainable Cities and Society*, 98, 104795, 2023. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104795

[32] JIANG, L. et al. *Intelligent control of building fire protection system using digital twins*. *Automation in Construction*, 147, 104728, 2023. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104728

[33] EL MOKHTARI, K. et al. *Development of a Cognitive Digital Twin for Building Management and Operations*. *Frontiers in Built Environment*, 8, 856873, 2022. https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.856873

[34] HASAN, H. R. et al. *NFTs for digital twins in the industrial metaverse*. *Computers & Industrial Engineering*, 193, 110315, 2024. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110315

[35] GAO, Y. et al. *Bridge Digital Twin integrating GIS and BIM*. *Buildings*, 14(12), 3731, 2024. https://doi.org/10.3390/buildings14123731

[36] LI, H. et al. *Digital twin-driven intelligent operation and maintenance platform*. *Advanced Engineering Informatics*, 62, 102661, 2024. https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102661

[37] GÓMEZ FERNÁNDEZ, J. F. et al. *A Structured Data Model for Asset Health Index Integration in Digital Twins*. *Energies*, 18(12), 3148, 2025. https://doi.org/10.3390/en18123148

[38] ARENA, M. et al. *A maintenance driven scheduling cockpit*. *Advances in Manufacturing*, 10(2), 205–219, 2022. https://doi.org/10.1007/s40436-021-00381-2

[39] XU, Y. et al. *A WebGIS-based digital twin platform for rail transit infrastructure*. *Expert Systems with Applications*, 296, 129180, 2026. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.129180

[40] JIANG, F. et al. *Building digital twins of existing highways using map data*. *Automation in Construction*, 134, 104081, 2022. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104081

[41] WANG, H. et al. *Digital-Twin-Based O&M Management for Underground Spaces*. *Buildings*, 14(8), 2577, 2024. https://doi.org/10.3390/buildings14082577

[42] BAENA-MIRET, S. et al. *Enhancing efficiency and quality control: Digital Twins in drinking water networks*. *Water Environment Research*, 96(10), e11139, 2024. https://doi.org/10.1002/wer.11139