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.v21i1.8580

Utilização do gêmeo digital aplicado à operação de sistemas prediais: uma revisão sistemática da literatura

The use of digital twin in building systems operations: a systematic literature review

Dary Ferreira da Silva Neto
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | daryferreira@discente.ufg.br
Ricardo Prado Abreu Reis
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | ricardo_reis@ufg.br

Resumo

O uso da tecnologia do gêmeo digital no ambiente construído tem se destacado como uma ferramenta para aprimorar a gestão do ciclo de vida de edificações. Logo, esta revisão sistemática da literatura analisa a aplicação do gêmeo digital associado aos sistemas prediais em edificações residenciais, comerciais e institucionais. A metodologia contempla a definição da questão de pesquisa, a elaboração da estratégia de busca e triagem de artigos científicos para a avaliação do estado da arte, considerando a aplicação de critérios de inclusão e exclusão e a análise qualitativa dos estudos. Foram mapeados inicialmente 1.870 documentos nas bases de dados selecionadas, resultando em 39 artigos aderentes após refinamento. Os resultados mostram predominância do gêmeo digital em sistemas prediais de climatização e elétricos, com finalidades orientadas sobretudo ao subsídio técnico para a tomada de decisões e ao monitoramento de desempenho das edificações, destacando-se a predominância de aplicação da tecnologia em edificações educacionais. Verificou-se que a aplicação do gêmeo digital em sistemas prediais hidráulico-sanitários representa uma lacuna relevante, abrindo oportunidades para pesquisas futuras que aprofundem seu potencial técnico e operacional.

Palavras-chave: Gêmeo digital. Sistemas prediais hidráulicos e sanitários. Edificações. Tomada de decisão. Simulação.

Abstract

The use of digital twin technology in the built environment has emerged as a tool for improving building life cycle management. Therefore, this systematic literature review analyzes the application of digital twins in association with building systems in residential, commercial, and institutional buildings. The methodology includes defining the research question, developing a search strategy, and screening scientific articles to assess the state of the art, taking into account the application of inclusion and exclusion criteria and the qualitative analysis of the studies. Initially, 1,870 documents were identified in the selected databases, resulting in 39 eligible articles after refinement. The results show a predominance of digital twins in HVAC and electrical building systems, with purposes primarily oriented toward providing technical support for decision-making and monitoring building performance, notably highlighting the prevalence of the technology's application in educational buildings. It was found that the application of digital twins in plumbing systems represents a significant gap, opening opportunities for future research to further explore their technical and operational potential.

Keywords: Digital twin. Plumbing systems. Buildings. Decision making. Simulation.

Como citar:
SILVA NETO, D.F da.; REIS, R.P.A. Utilização do gêmeo digital aplicado à operação de sistemas prediais: uma revisão sistemática da literatura. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8580

INTRODUÇÃO

O conceito de gêmeo digital vincula-se fortemente às inovações tecnológicas surgidas juntamente com a indústria 4.0. Para Grieves [1] o gêmeo digital é definido como uma solução composta essencialmente por três elementos: o objeto ou sistema físico, sua modelagem virtual espelhada e a troca de dados automatizada entre essas entidades. Pärn *et al.* [2] destacam que uma das grandes potencialidades de uso do gêmeo digital consiste em associá-lo à gestão de operação do ambiente construído de edificações.

Mediante a dinamicidade do fluxo de informações entre os agentes físico e digital, a tecnologia do gêmeo digital permite que os profissionais responsáveis pelo gerenciamento dos espaços edificados atuem de forma mais eficiente, exemplificada pelas melhorias de monitoramento e uso das instalações e sistemas construídos. Nesse contexto, os profissionais encontram embasamento técnico nos dados gerados, em volume e robustez, pela integração bidirecional do gêmeo digital, tornando mais eficientes e assertivas as demandas de gestão do ciclo de vida das edificações.

Diante do exposto, a proposta dessa revisão sistemática de literatura pautou-se em avaliar o estado da arte referente à incorporação da tecnologia do gêmeo digital aos sistemas prediais de edificações residenciais, comerciais e institucionais, analisando de que forma essa tecnologia atua na melhoria dos processos de gerenciamento e gestão do ciclo de vida das edificações. Adicionalmente, foram incluídas conclusões sobre as análises realizadas e o apontamento de algumas lacunas de pesquisa que podem fomentar trabalhos futuros.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da revisão sistemática de literatura, optou-se pelo sequenciamento de etapas conforme preconizado por Higgins [3]. Segundo os autores supracitados, o processo de revisão pode ser fracionado nas fases descritas nos tópicos apresentados a seguir.

DEFINIÇÃO DA QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa foi determinada mediante associação com o objetivo da revisão sistemática da literatura proposta. Dado o interesse em avaliar o estado da arte referente à aplicação da tecnologia do gêmeo digital vinculado ao funcionamento de sistemas prediais. Assim, a questão de pesquisa foi formulada como:

- Em edificações residenciais, comerciais e institucionais, de que forma o uso do gêmeo digital otimiza os processos de monitoramento e operação de sistemas prediais (hidrossanitários, elétricos, prevenção e combate a incêndio, gás e climatização), em comparação ao uso de outros recursos tecnológicos?

ELABORAÇÃO DO PADRÃO PICO

Para Higgins [3], a delimitação da questão de pesquisa, a rigor, pressupõe a presença, em sua formulação, de elementos-chave. O acrônimo PICO (do inglês *Populations, Interventions, Comparisons and Outcomes)* permite identificar cada um dos

componentes fundamentais para a adequabilidade da questão de pesquisa. A presença dos elementos de população, intervenção, comparação e resultados, aplicada à questão de pesquisa formulada anteriormente, é evidenciada no **Error! Reference source not found.**.

Quadro 1: Elementos PICO utilizados na definição da questão de pesquisa

Elemento	Correspondência
População	Edificações residenciais, comerciais ou institucionais
Intervenção	Aplicação da tecnologia do gêmeo digital na gestão de sistemas prediais
Comparação	Demais tecnologias para operação de sistemas prediais
Resultados	Otimização da gestão (operação, uso e manutenção) dos sistemas prediais em regime de funcionamento

Fonte: Autoria própria (2026).

PESQUISA EM BASES DE DADOS

Visando a identificação preliminar de documentos com potencial de aderência ao objetivo da revisão sistemática, foi criada uma *string* de busca para aplicação nas bases de dados definidas para mapeamento. A leitura preliminar de documentos e periódicos pertinentes à temática da revisão sistemática proposta permitiu a definição prévia de algumas palavras-chave. Estas foram utilizadas posteriormente para otimizar a triagem e seleção dos documentos aderentes.

Considerando o intento, nessa etapa, de localizar a maior quantidade possível de publicações, que posteriormente foram filtradas por intermédio dos critérios de inclusão e exclusão, a *string* de busca foi redigida como:

- "*digital twins*" AND *building*

O uso de uma *string* simples, com poucas palavras-chave e operadores booleanos, pautou-se no interesse preliminar em não criar restrições à seleção, permitindo incluir, nesta etapa, o maior número possível de documentos associados à questão de pesquisa. Sequencialmente, foram selecionadas as bases de dados nas quais seria submetida a *string* de busca. *Engineering Village*, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science* foram as bases científicas escolhidas, definidas por conterem volume representativo de periódicos com qualidade reconhecida no meio científico. O Quadro 2 indica a trilha de busca de documentos em cada uma das plataformas científicas citadas anteriormente, considerando as particularidades inerentes a cada base de dados, e a quantidade de arquivos aderentes aos filtros de pesquisa. Nesta etapa não foram utilizadas restrições temporais associadas ao ano de publicação dos documentos pesquisados.

Quadro 2: Parâmetros de pesquisa aplicados nas bases de dados

Base de dados	Categorias de pesquisa	Filtros	Quantidade de documentos
Engineering Village	Assunto, título e resumo	Artigo de periódico [tipo de documento] + inglês [idioma] + acesso totalmente aberto [acesso aberto]	340
Science Direct	Título, resumo ou palavras-chave especificadas pelo autor	Artigos de pesquisa [tipo de arquivo] + acesso e arquivo abertos [tipo de acesso]	166
Scopus	Título do artigo, resumo e palavras-chave	Artigo [tipo de documento] + inglês [idioma] + acesso totalmente aberto [acesso aberto]	512
Web of Science	Título, resumo, palavras-chave e palavras-chave do autor	Artigo [tipo de documento] + inglês [idioma] + acesso totalmente aberto [acesso aberto]	852

Fonte: Autoria própria (2026).

Em cada uma das bases de dados, os artigos mapeados foram exportados e inseridos na plataforma *Parsifal*, caracterizada como uma ferramenta online e gratuita que auxilia pesquisadores na condução de revisões sistemáticas de literatura, possuindo recursos de apoio nas etapas de planejamento, condução e geração de relatórios analíticos.

DELIMITAÇÃO DE CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Durante a segunda etapa de triagem dos artigos científicos, procedeu-se com a leitura do título e resumo de cada um dos documentos, visando refinar a pesquisa e restringir o número de documentos aderentes. Para essa fase de afunilamento da revisão sistemática, foram elaborados critérios de inclusão e exclusão, definidos mediante incorporação de novos elementos provenientes do objetivo e da questão de pesquisa. O Quadro 3 apresenta os critérios de inclusão e exclusão aplicados no processo de seleção dos documentos.

Quadro 3: Critérios de inclusão e exclusão

Critério de inclusão
Utilização do gêmeo digital em sistemas prediais (hidrossanitário, elétrico, HVAC, automação, monitoramento, CFTV, etc.)
Critérios de exclusão
Não há utilização do gêmeo digital
Utilização do gêmeo digital em contexto alheio à gestão de edificações em operação
Utilização do gêmeo digital em edificações que não sejam residenciais, comerciais ou institucionais

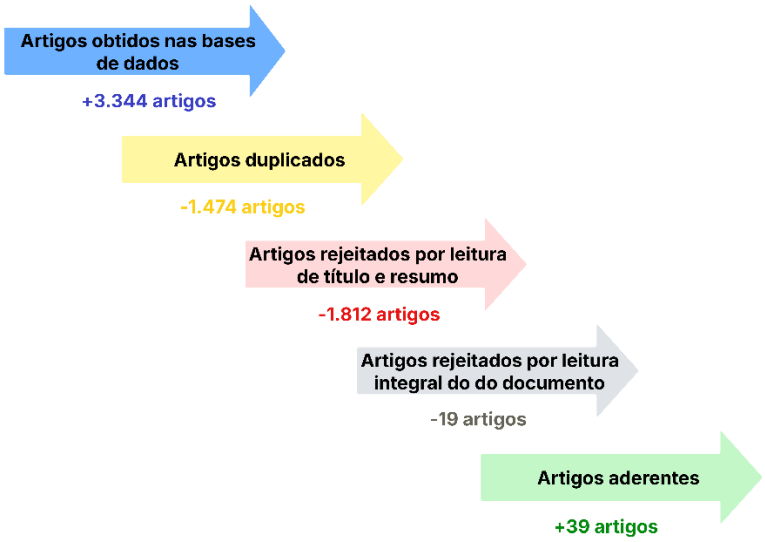
Fonte: Autoria própria (2026).

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8580

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A consulta às bases de dados científicas para mapeamento preliminar dos documentos, baseada na *string* de busca, foi iniciada e concluída em 29 de setembro de 2025. Conforme indicado no Quadro 2, foram obtidos inicialmente 1.870 documentos, considerando apenas os filtros nativos aplicados em cada plataforma de busca. A Figura 1 indica a trilha de refinamento dos artigos, que possibilitou a obtenção dos 39 artigos classificados como aderentes quanto aos objetivos dessa revisão sistemática.

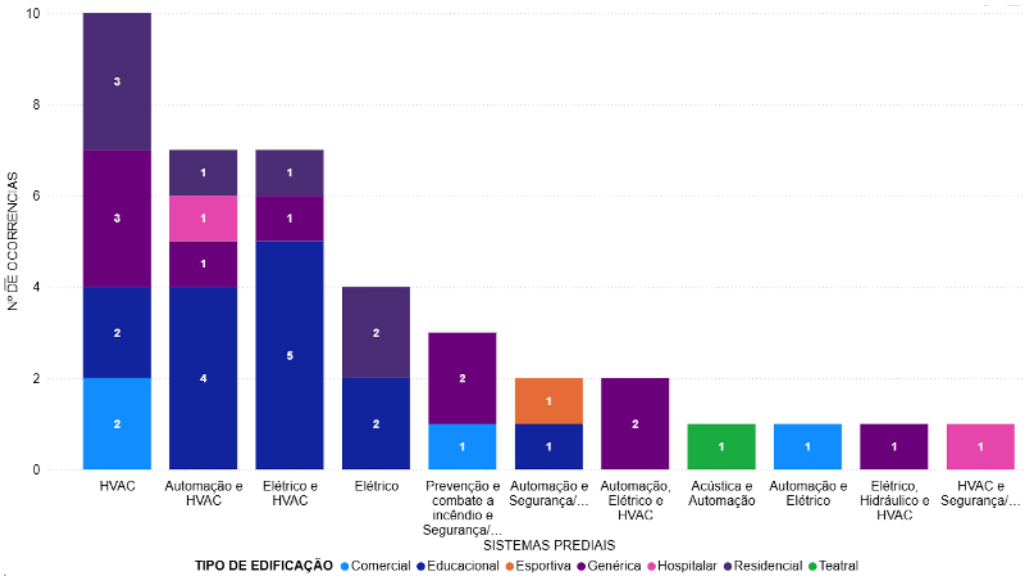
Figura 1: Sequência de refinamento dos artigos científicos



Fonte: Autoria própria (2026).

O gráfico apresentado na Figura 2 ilustra, para os artigos selecionados por meio do critério de inclusão utilizado, a correlação estabelecida entre as tipologias de edificação analisadas e os sistemas prediais cujo funcionamento (uso, operação ou manutenção) foi integrado à tecnologia do gêmeo digital.

Figura 2: Artigos referentes aos sistemas prediais associados ao gêmeo digital por tipo de edificação selecionados pelo critério de inclusão



Fonte: Autoria própria (2026).

A denominação “Genérica” utilizada na categorização das edificações estudadas foi adotada para os estudos em que a integração do gêmeo digital com um ativo físico não indica explicitamente a finalidade de uso da edificação. Essa denominação foi usada na categorização dos estudos de Shen, Ding e Wang [4], Bjørnskov e Jradi [5], Khajavi *et al.* [6], Spudys *et al.* [7], Yoon [8], Kim *et al.* [9], Lam *et al.* [10], Liu, Li e Ji [11], Ma *et al.* [12] e Sayed *et al.* [13]. Nesses cenários, as abordagens são orientadas sobretudo a dois cenários principais: remetem ao desenvolvimento de um gêmeo digital simulado para diferentes edificações, de modo que as especificações funcionais da edificação não são parâmetros cruciais para o estudo, ou associam a aplicação do gêmeo digital à operação de uma *smart building*, definida por Buckman, Mayfield e Beck [14] como uma edificação com elevado nível de integração entre informações multidisciplinares, tornando-a adaptável a mudanças e permitindo melhoria contínua de parâmetros como desempenho energético, satisfação dos usuários e longevidade de seus sistemas.

Sob a perspectiva da tipologia da edificação, a categoria “educacional”, abrangendo universidades, instituições de pesquisa e escolas, apresentou o maior número de ocorrências relacionadas à associação com o gêmeo digital, sendo a tipologia tratada em catorze estudos. A utilização do ambiente educacional como espaço potencial para implementação de gêmeos digitais, ou o protótipo destes em fase de validação e testes, é reiterada por Opoku *et al.* [15]. Segundo os autores, as universidades possuem a configuração de um ambiente com elevada dinamicidade, sendo dotadas de variados recursos que potencializam o desenvolvimento de tecnologias emergentes, com destaque para protótipos, *living labs* e modelos consolidados com atuação destacada no suporte à tomada de decisão na gestão de edificações.

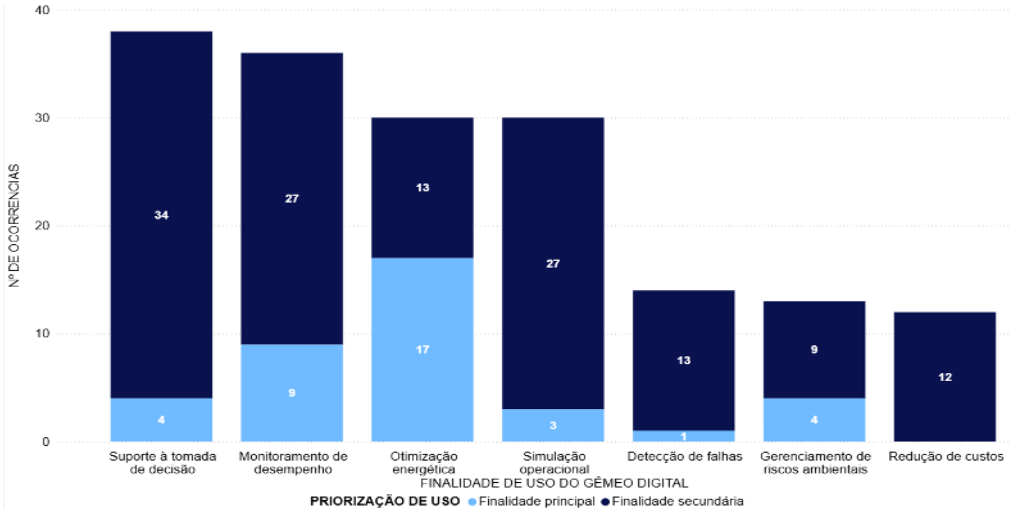
O sistema predial de climatização (*Heating, Ventilation and Air Conditioning* – HVAC) apresentou o maior número de integrações com o gêmeo digital, independentemente

da tipologia da edificação. Em dez estudos o sistema de HVAC foi tratado de modo individualizado, embora atrelado à integração com o gêmeo digital, enquanto em outras dezessete pesquisas o sistema de HVAC foi abordado em conjunto com outros sistemas e infraestruturas prediais. Enquanto sistema predial analisado isoladamente, a infraestrutura de climatização obteve maior representatividade em edificações residenciais, considerando aquelas com função social definida, nos trabalhos desenvolvidos por Hosamo *et al.* [16], Djebko *et al.* [17], Rutkowski *et al.* [18] e Abtahi *et al.* [19]. Associada ao sistema predial de climatização, a temática de controle e melhoria de desempenho do conforto térmico interno dos ambientes apresentou destaque de abordagem, sendo tratada nas pesquisas de Clausen *et al.* [20] – focadas em edificações comerciais e públicas – Edtmayer *et al.* [21] e Norouzi, Maalej e Mora [22] – direcionadas para edificações educacionais em ambientes de teste – e Agouzoul, Simeu e Tabaa [23], baseada na avaliação proposta para uma edificação multifamiliar.

Por sua vez, os sistemas elétricos e de energia foram tratados em quinze pesquisas, nas quais em quatro destas a disciplina foi analisada individualmente, e nos onze trabalhos restantes foi estudado de modo conjunto com outros sistemas prediais. Dado o interesse crescente em tecnologias capazes de contribuir com o aumento da eficiência no consumo energético no contexto do ciclo de vida das edificações, os trabalhos de Agouzolul *et al.* [24], Seo e Yun [25], El-Gohary, El-Abed e Omar [26] e Han *et al.* [27] subsidiaram o destaque desse tema. Sob a perspectiva de junção do sistema predial elétrico com outras especialidades, o maior número de estudos refletiu-se na combinação deste com o sistema de HVAC, totalizando sete estudos. Destes sete estudos, cinco tomaram como ambiente de implementação edificações educacionais, conforme evidenciado nos trabalhos de Opoku *et al.* [15], Tagliabue *et al.* [28], Fialho, Codinhoto e Fabrício [29], Bäcklund, Lundqvist e Molinari [30] e Pierce *et al.* [31].

Dada a multiplicidade de combinações envolvendo tipologias de edificação e sistemas prediais apoiados pelo uso do gêmeo digital, observou-se que essa tecnologia atua orientada a diferentes objetivos. Pärn *et al.* [2] afirmam que o desenvolvimento de um gêmeo digital está atrelado a quatro objetivos tecnológicos fundamentais: representação, medição, controle e simulação. Embora aplicado fundamentalmente para contribuir no gerenciamento do ciclo de vida da edificação, em suas diferentes etapas, o gêmeo digital pode ser concebido e implementado para atuar em demandas específicas no ambiente construído. O gráfico ilustrado na Figura 3 evidencia as finalidades principal e secundárias do gêmeo digital mencionados em cada um dos artigos contemplados nessa pesquisa. Tais aplicações foram divididas em sete categorias principais.

Figura 3: Número de artigos correlacionando as finalidades de aplicação dos gêmeos digitais associados à categorização de uso



Fonte: Autoria própria (2026).

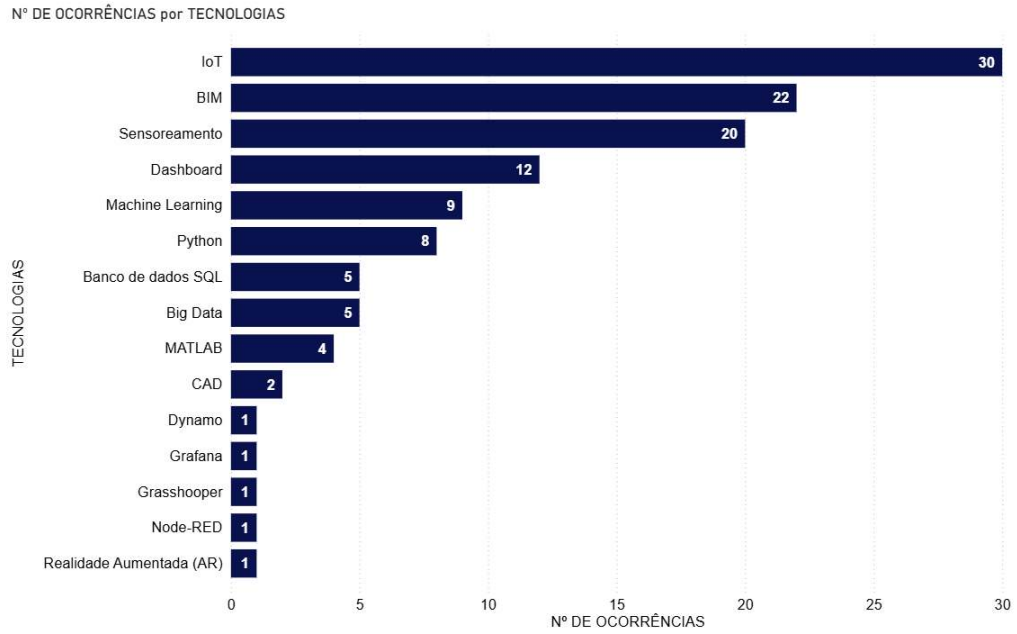
Dos 39 artigos aderentes à pesquisa, apenas no trabalho de Mahamedi, Suliman e Wonders [32] a aplicação do gêmeo digital para suportar a tomada de decisões não foi mencionada como finalidade principal ou secundária da tecnologia. Embora tenha apresentado elevado número de menções, o objetivo de subsidiar a tomada de decisão foi apenas o terceiro no ranking de finalidades principais, considerado a meta primordial do gêmeo digital em cada uma das pesquisas. Citada trinta vezes, a finalidade de otimização energética foi elencada como objetivo principal das aplicações em dezessete estudos, superando as menções como objetivos complementares ou secundários. Esse resultado está em consonância com os dados apresentados na Figura 2, visto que a melhoria do desempenho energético (redução de consumo e aumento de eficiência dos sistemas) se vincula diretamente ao funcionamento de sistemas elétricos e de HVAC, cujo parâmetro de energia possui elevada representatividade.

Embora não destacada como finalidade mais recorrente, o gerenciamento de riscos ambientais foi identificado como objetivo principal em pesquisas essencialmente orientadas a sistemas de prevenção e combate a incêndio e segurança e monitoramento. Exemplificado pela capacidade de atuar na avaliação de segurança dos ocupantes, condições inseguras e comportamentos inconsistentes nas edificações, esse papel é aplicado como função principal nas pesquisas de Khajavi *et al.* [6], Kim *et al.* [9] e Tan *et al.* [33], focadas essencialmente na determinação de rotas de fuga otimizadas concomitantemente a eventos de incêndio e na detecção precoce de focos de incêndio (para os dois últimos trabalhos), respectivamente. No trabalho conduzido Liu, Zhang e Wang [34], a gestão de riscos ambientais foi vinculada a um gêmeo digital implementado para realizar a leitura, mediante sensoriamento, e interpretação de parâmetros de temperatura interna, abertura e fechamento de portas e janelas e medição de concentrações de fumaça, oxigênio e monóxido de carbono.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8580

De modo complementar, a Figura 4 aborda, para os artigos inseridos nesta revisão, as principais tecnologias utilizadas juntamente com o recurso do gêmeo digital, permitindo o cumprimento dos objetivos indicados na Figura 3.

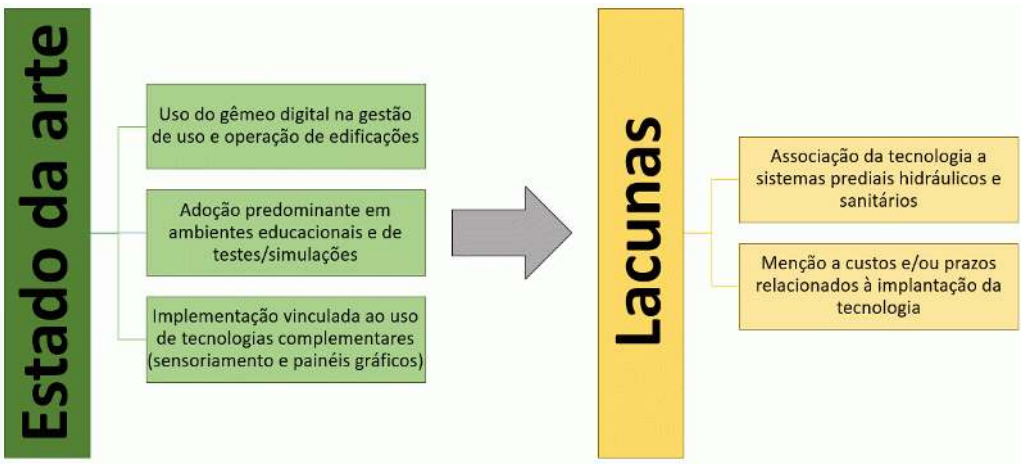
Figura 4: Tecnologias complementares ao gêmeo digital na gestão do ciclo de vida das edificações.



Fonte: Autoria própria (2026).

A Figura 5 ilustra, resumidamente, o estado da arte mapeado mediante a condução da revisão de literatura, apontando ainda algumas lacunas de pesquisa mapeadas no decorrer da avaliação dos documentos que integraram a condução do trabalho.

Figura 5: Estado da arte e lacunas encontrados no desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2026).

CONCLUSÃO

Sob a perspectiva da diversidade de sistemas prediais integrados à dinâmica do gêmeo digital, foi avaliado o estado da arte, via revisão da literatura, referente à integração entre esses elementos associados ao ciclo de vida de uso e operação das edificações. Mediante a inclusão, neste mapeamento, de artigos científicos indexados em plataformas científicas consolidadas, considerando o nicho das edificações selecionadas para esta análise (residenciais, comerciais e institucionais), notou-se a prevalência das pesquisas associadas a instalações elétricas e de climatização, voltadas preponderantemente à otimização do desempenho energético, ao monitoramento de desempenho dos sistemas e ao subsídio técnico para tomadas de decisão. No que tange às tipologias de edificações consideradas nos estudos abrangidos por esta revisão, as pesquisas demonstraram a maior recorrência das edificações educacionais e institucionais aponta para uma incorporação do gêmeo digital vinculado aos sistemas prediais ainda predominante em ambientes de testes, associados a pesquisas para estudos e validações de modelos, protótipos e frameworks antes que estes se tornem soluções disponibilizadas ao mercado do gerenciamento do ciclo de vida das edificações.

Dada a multiplicidade de fins de aplicação do gêmeo digital no contexto operacional do ciclo de vida das edificações, a avaliação foi pautada fundamentalmente no uso do gêmeo digital durante o estágio de uso e operação das edificações. Entretanto, é relevante considerar, em estudos futuros, a integração do gêmeo digital com soluções de tecnologia inerentes às etapas de desenvolvimento de projeto e construção das edificações.

Considerando que o Sistema Predial Hidráulico-Sanitário existe em todas as edificações pertencentes ao grupo analisado, possuindo recorrência similar a dos sistemas prediais elétricos, percebeu-se ainda uma baixa associação ao recurso do gêmeo digital. Logo, esta é uma lacuna mapeada na pesquisa, e que pode subsidiar o desenvolvimento de trabalhos futuros, com abordagem direcionada à junção da tecnologia do gêmeo digital ao Sistema Predial Hidráulico-Sanitário.

DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] GRIEVES, M. **Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication**. White paper, 1:1–7. 2014.

[2] PÄRN, E.; SACKS, R.; BRILAKIS, I.; SOIBELMAN, L.; ENZER, M. **Twin Systems: Digital Twins of Built Environment**. Self published. ISBN: 978-2-0074-4788-0. 2024.

[3] HIGGINS, J. P. T., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M. J., & Welch, V. A. (editors). **Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions version 6.3** (updated February 2022). Cochrane, 2022.

[4] SHEN, K.; DING, L.; WANG, C. Development of a Framework to Support Whole-Life-Cycle Net-Zero-Carbon Buildings through Integration of Building Information Modelling and Digital Twins. **Buildings**, v. 12, n. 10, p. 1747, 20 out. 2022.

[5] BJØRNSKOV, J.; JRADI, M. An ontology-based innovative energy modeling framework for scalable and adaptable building digital twins. **Energy and Buildings**, v. 292, p. 113146, ago. 2023.

[6] KHAJAVI, S. H.; TETIK, M.; LIU, Z.; KORHONEN, P.; HOLMSTRÖM, J. **Digital Twin for Safety and Security: Perspectives on Building Lifecycle**. IEEE Access, v. 11, p. 52339–52356, 2023.

[7] SPUDYS, P.; AFXENTIOU, N.; GEORGALI, P.HZ.; KLUMBYTE, E.; JURELIONIS, A.; FOKAIDES, P. Classifying the operational energy performance of buildings with the use of digital twins. **Energy and Buildings**, v. 290, p. 113106, jul. 2023.

[8] YOON, S. Building digital twinning: Data, information, and models. **Journal of Building Engineering**, v. 76, p. 107021, out. 2023.

[9] KIM, H. C.; LAM, H. K.; LEE, S.H.; OK, S. Y. Early Fire Detection System by Using Automatic Synthetic Dataset Generation Model Based on Digital Twins. **Applied Sciences**, v. 14, n. 5, p. 1801, 22 fev. 2024.

[10] LAM, H.-K.; LAM, P.-D.; OK, S.-Y.; LEE, S.-H. Digital Twin Smart City Visualization with MoE-Based Personal Thermal Comfort Analysis. **Sensors**, v. 25, n. 3, p. 705, 24 jan. 2025.

[11] 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**, v. 328, p. 115170, fev. 2025.

[12] MA, J.; PANIC, D.; YUS, R.; BOULOUKAKIS, G. A customizable benchmarking tool for evaluating personalized thermal comfort provisioning in smart spaces using Digital Twins. **Pervasive and Mobile Computing**, v. 112, p. 102076, ago. 2025.

[13] SAYED, A. N.; BENSAALI, F.; HIMEUR, Y.; DIMITRAKOPOULOS, G.; VARLAMIS, I. Enhancing building sustainability: A Digital Twin approach to energy efficiency and occupancy monitoring. **Energy and Buildings**, v. 328, p. 115151, fev. 2025.

[14] BUCKMAN, A.; MAYFIELD, M.; BECK, S. What Is a Smart Building? **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 2, p. 92-109, 2014.

[15] OPOKU, D.-G. J.; PERERA, S.; KYEI, R. O.; RASHIDI, M.; BAMDAD, K.; FAMAKINWA, T. Digital twin for indoor condition monitoring in living labs: University library case study. **Automation in Construction**, v. 157, p. 105188, jan. 2024.

[16] HOSAMO, H.; HOSAMO, M. H.; NIELSEN, H. K.; SVENNEVIG, P. R.; SVIDT, K. Digital Twin of HVAC system (HVACDT) for multiobjective optimization of energy consumption and thermal comfort based on BIM framework with ANN-MOGA. **Advances in Building Energy Research**, v. 17, n. 2, p. 125–171, 4 mar. 2023.

[17] DJEBKO, K.; WEIDNER, D.; WALESKA, M.; KREY, T.; RAUSCH, S.; SEIPEL, D.; PUPPE, F. Integrated Simulation and Calibration Framework for Heating System Optimization. **Sensors**, v. 24, n. 3, p. 886, 29 jan. 2024.

[18] RUTKOWSKI, R.; RACZYNSKI, M.; IWANKOWICZ, R.; NOWAK, R.. Digital Twin in the Design and Dynamic Assessment of Energy Performance of Multi-Family Buildings. **Energies**, v. 17, n. 23, p. 6150, 6 dez. 2024.

[19] ABTAHI, M.; RUEDA, L.; DELCROIX, B.; ATHIENITIS, A. Semantic Digital Twinning for Cost-Optimal HVAC Operation: Real-Time Application to a House with Smart Thermostats and PV/Battery under a Time-of-Use Tariff. **Energy and Buildings**, v. 343, p. 115938, set. 2025.

[20] CLAUSEN, A.; ARENDT, K.; JOHANSEN, A.; SANGOGBOYE, F. C.; KJAERGAARD, M. B.; VEJE, C. T.; JØRGENSEN, B. N. A digital twin framework for improving energy efficiency and

occupant comfort in public and commercial buildings. **Energy Informatics**, v. 4, n. S2, p. 40, set. 2021.

[21] EDTMAYER, H.; BRANDL, D.; MACH, T.; SCHLAGER, E.; GURSCH, H.; LUGMAIR, M.; HOCHENAUER, C. Modelling virtual sensors for real-time indoor comfort control. **Journal of Building Engineering**, v. 67, p. 106040, maio 2023.

[22] NOROUZI, P.; MAALEJ, S.; MORA, R. Applicability of Deep Learning Algorithms for Predicting Indoor Temperatures: Towards the Development of Digital Twin HVAC Systems. **Buildings**, v. 13, n. 6, p. 1542, 16 jun. 2023.

[23] AGOUZOUL, A.; SIMEU, E.; TABAA, M. Advancing Sustainable Building Practices: Intelligent Methods for Enhancing Heating and Cooling Energy Efficiency. **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2879, 29 mar. 2024.

[24] AGOUZOUL, A.; TABAA, M.; CHEGARI, B.; SIMEU, E.; DANDACHE, A.; ALAMI, K. Towards a Digital Twin model for Building Energy Management: Case of Morocco. **Procedia Computer Science**, v. 184, p. 404–410, 2021.

[25] SEO, H.; YUN, W.-S. Digital Twin-Based Assessment Framework for Energy Savings in University Classroom Lighting. Buildings, v. 12, n. 5, p. 544, 25 abr. 2022.

[26] EL-GOHARY, M.; EL-ABED, R.; OMAR, O. Prediction of an Efficient Energy-Consumption Model for Existing Residential Buildings in Lebanon Using an Artificial Neural Network as a Digital Twin in the Era of Climate Change. **Buildings**, v. 13, n. 12, p. 3074, 10 dez. 2023.

[27] HAN, F.; DU, F.; JIAO, S.; ZOU, K. Predictive Analysis of a Building's Power Consumption Based on Digital Twin Platforms. **Energies**, v. 17, n. 15, p. 3692, 26 jul. 2024.

[28] TAGLIABUE, L. C.; CECCONI, F. R.; MALTESE, S.; RINALDI, S.; CIRIBINI, A. L. C.; FLAMMINI, A. Leveraging Digital Twin for Sustainability Assessment of an Educational Building. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 480, 6 jan. 2021.

[29] FIALHO, B. C.; CODINHOTO, R.; FABRICIO, M. M. Statistical critical reactive maintenance characterisation for digital twin implementation in universities. **Facilities**, v. 42, n. 3/4, p. 245–273, 26 fev. 2024.

[30] BÄCKLUND, K.; LUNDQVIST, P.; MOLINARI, M. Showcasing a digital twin for higher educational buildings: developing the concept toward human centricity. **Frontiers in Built Environment**, v. 10, p. 1347451, 20 fev. 2024.

[31] PIERCE, S.; PALOLETTO, F.; DE DONATIS, L.; DE ROSA, M. District energy modelling for decarbonisation strategies development—The case of a University campus. **Energy Reports**, v. 11, p. 1256–1267, jun. 2024.

[32] MAHAMEDI, E.; SULIMAN, A.; WONDERS, M. A Cloud-Based Framework for Creating Scalable Machine Learning Models Predicting Building Energy Consumption from Digital Twin Data. **Architecture**, v. 5, n. 2, p. 29, 23 abr. 2025.

[33] TAN, J. K. N.; ZHANG, S.; LAW, A. W.-K.; CHEUNG, S. H. Digital-twin enabled evacuation to improve individual and community resilience of building occupants against indoor Fires: Framework and route-finding algorithm. **Developments in the Built Environment**, v. 22, p. 100672, abr. 2025.

[34] LIU, Z.; ZHANG, A.; WANG, W. A Framework for an Indoor Safety Management System Based on Digital Twin. **Sensors**, v. 20, n. 20, p. 5771, 12 out. 2020.