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.v21i1.8686

Gêmeos Digitais para eficiência energética e desempenho térmico de edificações: Uma Revisão Sistemática de Literatura

Digital Twins for energy efficiency and thermal performance of buildings: A Systematic Literature Review

Stífany Knop
PROGRAU - UFPEL | Pelotas | Brasil | stifany.knop@ucpel.edu.br
Juliana Al Alam Pouey
PROGRAU - UFPEL | Pelotas | Brasil | julianapouey@hotmail.com
Maicon dos Santos Machado
PROGRAU - UFPEL | Pelotas | Brasil | maiconarquitetura@gmail.com
Fábio Kellermann Schramm
PROGRAU - UFPEL | Pelotas | Brasil | fabioks@ufpel.edu.br

Resumo

Este estudo tem como objetivo analisar o potencial dos Gêmeos Digitais para otimização da eficiência energética e do desempenho térmico em edificações, visando reduzir a lacuna de desempenho observada em simulações estáticas tradicionais. O método adotado consistiu em uma Revisão Sistemática da Literatura, conduzida com apoio das ferramentas Parsif.al e NotebookLM, abrangendo 58 artigos indexados na base Periódicos CAPES entre 2017 e 2026. Os resultados demonstram que a integração de sensores IoT e técnicas de Inteligência Artificial possibilita gestão energética em tempo real, com potencial de economia de energia entre 10% e 40% e redução de erros preditivos térmicos para até 0,4 °C. Apesar de limitações relacionadas ao custo de implementação e à modelagem do comportamento dos usuários, conclui-se que os Gêmeos Digitais apresentam elevado potencial para a viabilização de edifícios de baixo ou quase zero consumo energético e melhoria do conforto ambiental.

Palavras-chave: Gêmeos digitais. Eficiência energética. Desempenho térmico. Dados IoT. Revisão sistemática de literatura.

Abstract

The objective of this study is to analyze the potential of Digital Twins for optimizing energy efficiency and thermal performance in buildings, aiming to reduce the performance gap observed in traditional static simulations. The method adopted consisted of a Systematic Literature Review, conducted with the support of the Parsif.al and NotebookLM tools, covering 58 articles indexed in the CAPES Journals database between 2017 and 2026. The results demonstrate that the integration of IoT sensors and Artificial Intelligence techniques enables real-time energy management, with the potential for energy savings between 10% and 40% and a reduction in thermal predictive errors to up to 0.4 °C. Despite limitations related to implementation costs and user behavior modeling, it is concluded that Digital Twins have high potential for granting low or near-zero energy consumption buildings and improving environmental comfort.

Keywords: Digital Twins. Energy Efficiency. Thermal Performance. IoT data. Systematic Literature Review.

Como citar:
KNOP, S.; POUEY, J. A.; MACHADO, M. S.; SCHRAMM, F. K. Gêmeos Digitais para eficiência energética e desempenho térmico de edificações: Uma Revisão Sistemática de 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.v21i1.8686

INTRODUÇÃO

Entre outros, o setor de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) enfrenta o desafio crítico de mitigar impactos ambientais mediante a eficiência energética e o incremento do desempenho térmico edilício.

Tradicionalmente, a predição do comportamento térmico fundamenta-se em simulações computacionais que permitem prever situações futuras de uso dos ambientes. Já a Modelagem da Informação da Construção (BIM) consolidou-se como uma metodologia essencial para a inserção de propriedades termofísicas detalhadas nos componentes construtivos, auxiliando no processo de simulação [1]. Contudo, simulações convencionais frequentemente apresentam uma "lacuna de desempenho" (*performance gap*), na qual o consumo real diverge do projetado devido à natureza estática dos modelos frente à dinâmica variável de uso e clima [2].

Recentemente, o conceito de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*) emergiu como uma evolução do BIM, propondo uma representação virtual conectada ao ativo físico por fluxos de dados em tempo real [3]. Ao integrar sensores (IoT) e algoritmos de aprendizado de máquina, o Gêmeo Digital transcende a manutenção preditiva, viabilizando a gestão ativa do desempenho energético e do conforto térmico em tempo real [4].

Apesar do potencial tecnológico, a literatura ainda apresenta lacunas sobre a integração sistemática entre fluxos de dados dinâmicos e estratégias térmicas em diferentes tipologias das edificações. Diante disso, o presente trabalho busca investigar o estado da arte e avançar na compreensão de como os Gêmeos Digitais estão sendo aplicados para otimização termoenergética. O objetivo geral é identificar as principais utilizações dos Gêmeos Digitais com foco no desempenho térmico e eficiência energética por meio de uma revisão sistemática de literatura (RSL).

MÉTODO

A revisão sistemática de literatura foi escolhida por ser um método que auxilia na compreensão ampla de um assunto e foi desenvolvida seguindo o método proposto por Okoli [5] e de acordo com as diretrizes do protocolo PRISMA [6]. O processo foi estruturado em quatro etapas principais:

a) Protocolo e Planejamento**:** o protocolo da RSL é apresentado no Quadro 1, e foi estruturado na plataforma Parsif.al e aplicado à base de dados Periódicos CAPES em novembro de 2025;
b) Coleta e Triagem: foram identificados 133 artigos (2017-2026). Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão (Quadro 1), 58 foram selecionados para análise detalhada;
c) Avaliação de Qualidade: com suporte de IA para conferência de metadados (arquivos .bib) e aplicação dos critérios de qualidade PRISMA. Foram selecionados para a síntese final apenas artigos com escore de qualidade superior a 60%;
d) Extração e Síntese de Dados: o suporte analítico foi realizado com NotebookLM, ferramenta de IA que faz análises circunscritas apenas às fontes fornecidas. Os 58

artigos foram processados para responder as questões de pesquisa e estão referenciados a partir da seção seguinte.

Quadro 1 – Protocolo da RSL

1 Objetivo	
Identificar como os gêmeos digitais têm sido utilizados com foco no desempenho térmico e eficiência energética.	
2 Questões de pesquisa	
• Qual é o conceito de gêmeos digitais utilizado pelos estudos? • Quais são aplicações dos gêmeos digitais quanto ao desempenho térmico em edificações? • Quais são aplicações dos gêmeos digitais quanto à eficiência energética em edificações? • Quais dados (sensoriais, climáticos, simulações) são utilizados para calibrar e validar esses modelos? • A simulação termoenergética pode se integrar aos gêmeos digitais? • Quais os tipos de edificações alvo dos estudos (habitacionais, comerciais, públicas, privadas etc.)? • Em quais países os estudos foram conduzidos? • Quais as vantagens mensuradas pelos estudos? • Quais são os principais entraves para a implementação de gêmeos digitais para a eficiência energética em edifícios existentes? • Quais são os principais entraves para a implementação de gêmeos digitais o desempenho térmico em edifícios existentes? • Quais lacunas e direções futuras de pesquisa são apontadas na literatura?	
3 Palavras-chave	**4 Sinônimos**
• building • digital twin • energy efficiency • thermal comfort	• edifício(s), edificação(ões), construção(ões) • gêmeo digital, gêmeos digitais • energy consumption, eficiência energética • conforto térmico, desempenho térmico
5 Bases de artigos	
Periódicos CAPES	https://www.periodicos.capes.gov.br/
6 String de busca	
“digital twin” AND “building” AND ("Energy efficiency" OR "Thermal Comfort")	
7 Critérios de inclusão	**8 Critérios de Exclusão**
• Área de Pesquisa: Arquitetura ou Construção • Idioma: Inglês, português ou Espanhol • Ano de Publicação: 2017 a 2026 • Tipo de publicação: artigos científicos • Revisado por pares • Disponibilidade: texto completo	• Não ser da área de Arquitetura ou Construção • Não está escrito nos idiomas selecionados • Não ter sido publicado no período selecionado • Não ser artigo científico • Texto completo não encontrado • Não tratar do tema gêmeos digitais

Fonte: os autores.

GÊMEOS DIGITAIS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DESEMPENHO TÉRMICO

Os resultados obtidos revelam que os Gêmeos Digitais (DT) se consolidam como ferramentas disruptivas na gestão de edifícios, transpondo as limitações de modelos estáticos para réplicas virtuais dinâmicas capazes de realizar predição, otimização e monitoramento em tempo real [7][8][9][10].

A literatura evidencia três eixos principais de aplicação que convergem para metas de sustentabilidade integrada [7][11][12][13][14][15]: (a) desempenho e conforto térmico, (b) estratégias de eficiência energética, e (c) escalabilidade e integração tecnológica.

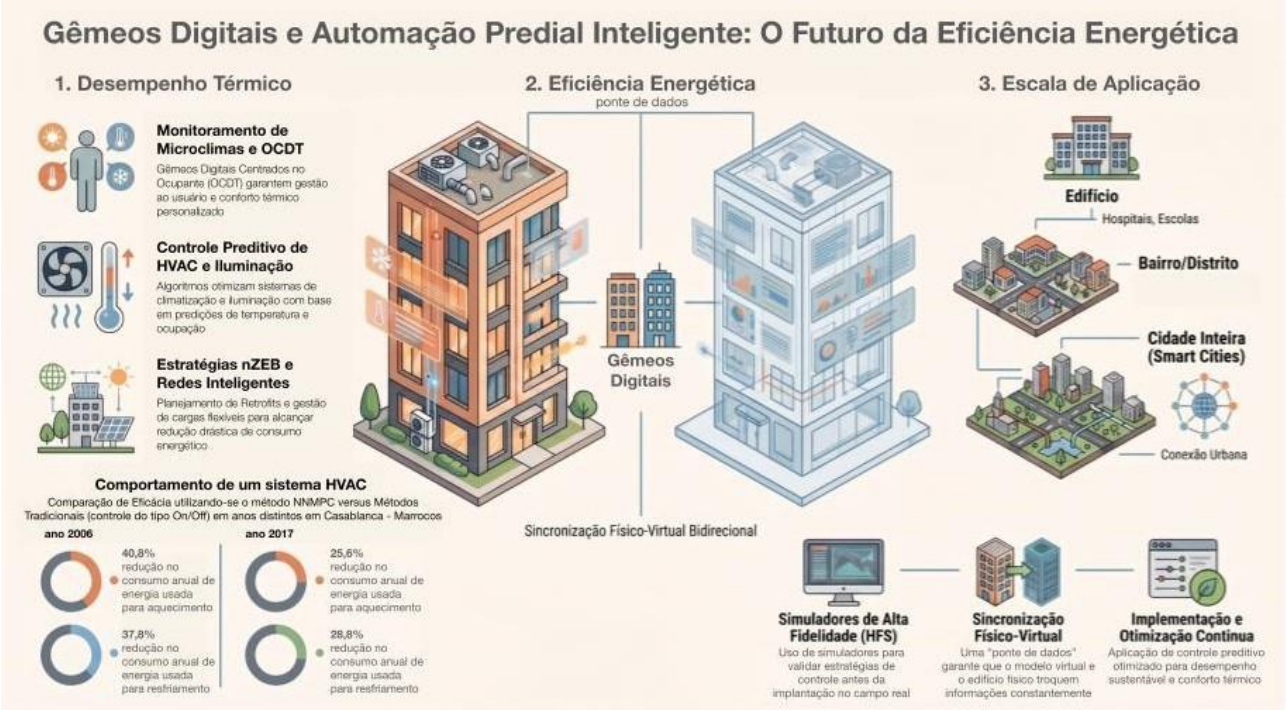
Para a simulação do desempenho e conforto térmico, os DTs são utilizados para verificar o comportamento físico da edificação e prever condições ambientais internas. As abordagens variam desde o monitoramento de índices de conforto e calibração de

modelos térmicos até a integração ativa do usuário no sistema, utilizando dados sensoriais e subjetivos para personalizar o condicionamento ambiental.

O foco para a eficiência energética reside na otimização operacional e no suporte à decisão para intervenções. Destacam-se o uso de controle preditivo, gestão de flexibilidade da demanda e o planejamento de *retrofits* voltados à meta de edifícios de energia zero (NZEB) [21][22].

Já as aplicações para escalabilidade e integração tecnológica abrangem diversas escalas — do edifício isolado ao contexto urbano. O núcleo metodológico dessas implementações baseia-se na tríade: integração BIM-IoT, aplicação de Inteligência Artificial e uso de simuladores de alta fidelidade para garantir a precisão físico-virtual [23][24][25]. A Figura 1 ilustra o contexto descrito acima.

Figura 1 - *Definições e usos dos Gêmeos Digitais*



Fontes: [7][9][11][12][26][17][18][9], [19][20][23][31][27], [28][29][30][31][32][33][34][35][36][37][38][39]
Gerado por: NotebookLM.

O Conceito de Gêmeo Digital na Construção Civil

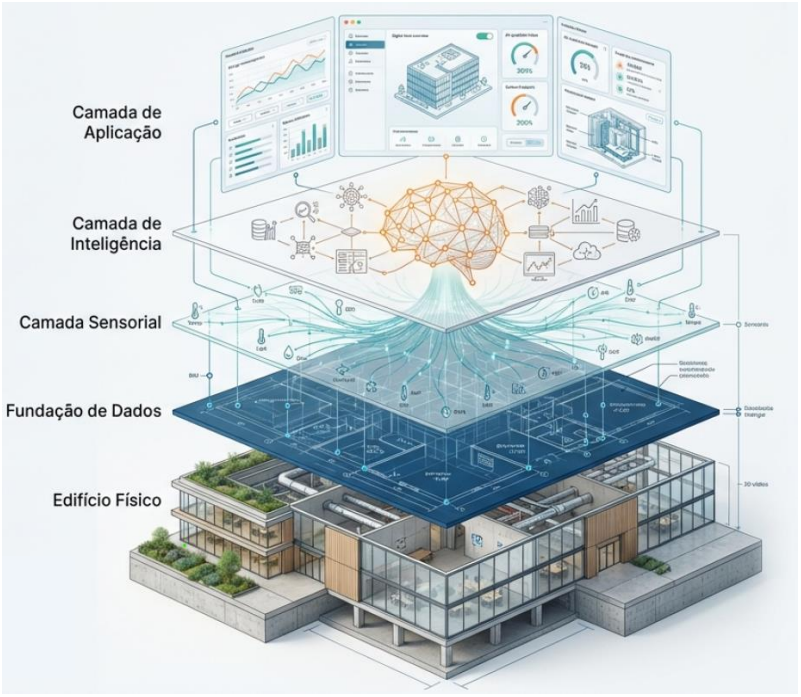
Com base nos estudos analisados, o Gêmeo Digital é definido como uma representação virtual dinâmica de um ativo físico, sistema ou processo, caracterizado por uma troca de informações bidirecional e em tempo real [9][12]. Diferente do BIM (*Building Information Modeling*), que é frequentemente estático e focado nas fases de projeto e construção, o DT atua na fase operacional, servindo como uma réplica que mimetiza o comportamento real do edifício para fins de monitoramento, predição e otimização [9].

A literatura estabelece uma tríade essencial para sua existência: o objeto físico, sua réplica digital e a conexão de dados que os une [8]. Essa tecnologia evoluiu de modelos puramente descritivos para sistemas autônomos, capazes de aprender com dados históricos e tomar decisões independentes para autorregulação.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8686

A Figura 2 ilustra graficamente os elementos constituintes e suas interfaces de trabalho de um DT em seu modelo operacional ideal.

Figura 2: Blueprint do Gêmeo Digital



Fonte: NotebookLM

Aplicações no Desempenho Térmico e Eficiência Energética

Apesar de haver uma separação entre os conceitos, as aplicações dos gêmeos digitais nessas áreas são intrinsecamente ligadas, visando o equilíbrio entre o conforto dos ocupantes e a redução do consumo energético.

No campo do desempenho térmico, os DTs são utilizados para o monitoramento e visualização de microclimas com o mapeamento térmico em tempo real através de sensores IoT que permitem visualizar a distribuição de temperatura e umidade, calculando índices de conforto como o PMV (*Predicted Mean Vote*) e o PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfi*ed) [40][26][16][11][41]. São também utilizados para aplicações centradas nos ocupantes (OCDT), conceito que dá gerência aos usuários, permitindo que escolham locais de assento que melhor se alinhem às suas preferências térmicas individuais [12][32], e ainda na predição de temperatura interna com algoritmos de *Deep Learning* e modelos de "caixa-cinza" que preveem a evolução térmica interna, permitindo ajustes proativos [39][13][42].

Quanto à eficiência energética, os estudos destacam o controle preditivo de modelo (MPC) com a utilização do DT para otimizar sistemas HVAC e iluminação, ajustando *setpoints* com base em previsões meteorológicas e de ocupação [13], essa abordagem proativa pode reduzir o consumo de energia para aquecimento em até 40,8% e para resfriamento em 37,8% [14]. São utilizados no planejamento de *Retrofits* e nZEB através da simulação de cenários para transformar edifícios existentes em edifícios de energia quase nula (*Net Zero Energy Buildings*), avaliando o custo-benefício de intervenções na envoltória [33][19][18] e, na gestão de cargas flexíveis, integrando

com *Smart Grids* para deslocar picos de demanda energética para períodos de maior produção renovável, reduzindo custos operacionais [20][29][13][22][43].

Integração com Simulação Termoenergética e Dados de Calibração

A modelagem termoenergética (Building Energy Modeling - BEM) é considerada um subconjunto vital do ecossistema de um Gêmeo Digital. Enquanto o BIM fornece a base geométrica, os motores de simulação (como EnergyPlus, TRNSYS e IDA ICE) fornecem a capacidade analítica para prever comportamentos futuros [8] [38].
Para que esses modelos sejam confiáveis, é necessária uma calibração rigorosa utilizando dados sensoriais de temperatura, umidade relativa, níveis de CO2, presença humana e status de atuadores do HVAC coletados diretamente no edifício, via redes de sensores IoT [27][37][8][41][13][40][44]. Dados Climáticos através de arquivos EPW históricos, combinados com previsões meteorológicas locais em tempo real [9][44] também são utilizados, assim como os metadados do edifício, com as propriedades térmicas dos materiais e geometria detalhada proveniente do modelo BIM. A validação é feita comparando as saídas do modelo com a "verdade de campo", utilizando métricas estatísticas como o RMSE e o MAE ou modelos avançados de Deep Learning (Aprendizado Profundo) projetados para processar dados de nuvem de pontos em larga escala [16][35][13][25][45].

Escopo dos Estudos: Edificações e Geografia

A tipologia-alvo dos estudos é diversificada, demonstrando a versatilidade da aplicação, com foco predominante em edifícios educacionais/bibliotecas/campi universitários e edifícios de escritórios/comerciais [26][33][9][12][13][25][46][21][47]. Foram encontradas também pesquisas em hospitais, devido à sua complexidade sistêmica [35][38], em edifícios residenciais unifamiliares e multifamiliares [11][34][18][30][31] e em prédios históricos [48]. Geograficamente, os estudos são liderados pelos Estados Unidos [12][49][50], Reino Unido [9][18] e China [7][51], com contribuições significativas de países europeus como Alemanha, Dinamarca, Itália, Polônia e Noruega.

Vantagens Mensuradas e Impacto Real

Os benefícios reportados pela implementação de DTs são quantificáveis e significativos, dentre eles: (a) economia de energia, citando reduções no consumo entre 10% e 40% em sistemas de climatização através de controle preditivo [13][14]; (b) satisfação dos ocupantes com aumento na percepção e satisfação térmica através de interfaces interativas [12]; (c) otimização operacional com detecção de falhas que sistemas convencionais ignoram e redução drástica no tempo de processamento de simulações complexas [26][52]; (d) ganhos econômicos pela redução expressiva de até 20% em custos de manutenção e energia [33], redução dos custos do ciclo de vida em 36,8% [47]; (e) impacto ambiental com a redução das emissões de CO2 [33][37].

Entraves para Implementação em Edifícios Existentes

A aplicação de DTs em edifícios existentes enfrenta barreiras mais severas do que em novas construções, principalmente quanto aos dados e documentação, pela ausência de modelos BIM originais e a carência de metadados arquitetônicos precisos que dificultam a criação da réplica digital [33][36][25][18]. O custo é outro entrave bastante significativo, em função do alto investimento inicial para a instalação de uma malha densa de sensores IoT, somado ao custo de manutenção desses dispositivos, tornando proibitivos para muitos gestores [26][33][36][53][54][52][55]. São referenciados ainda, a interoperabilidade com a fragmentação de dados em "silos" e a falta de padrões universais para a conexão entre softwares de design, simulação e gestão predial que impedem a fluidez das informações [39][8][56][53][24] e, por fim, o comportamento humano, através da dificuldade em modelar a imprevisibilidade das ações dos usuários, como a abertura manual de janelas, o que gera uma lacuna de desempenho persistente [36][56].

Lacunas e Direções Futuras

A literatura aponta para a necessidade de democratizar o acesso aos dados operacionais através de interfaces voltadas para os ocupantes e não apenas para gestores.

As direções futuras incluem a padronização, estabelecendo protocolos de interoperabilidade baseados em ontologias abertas para reduzir o custo de implementação e facilitar a atualização automática entre BIM e BEM [26][15]. A expansão do nível do edifício para a escala de distritos e cidades inteligentes para gestão de energia em larga escala [36][38][57] e a interpretabilidade da IA, desenvolvendo modelos de inteligência artificial que não sejam apenas precisos, mas também baseados em princípios físicos para maior confiabilidade [58][59], também são mencionados.

CONCLUSÕES

Os Gêmeos Digitais (DT) representam uma evolução transformadora na gestão do ambiente construído, deixando de ser meros modelos visuais para se tornarem ecossistemas operacionais dinâmicos. A literatura apresentou a efetividade do uso de Gêmeos Digitais para o aumento da eficiência energética de edifícios e o conforto térmico dos ocupantes. O monitoramento em tempo real por sensores auxiliou na definição de estratégias de consumo de sistemas de ar condicionado e iluminação, reduzindo os gatos com energia e focando em índices de conforto para decidir como atuar no controle desses sistemas. Entretanto, algumas variáveis são mais difíceis de prever, como é o caso do comportamento dos usuários, trazendo entraves nas questões de predição em tempo real dos fatores que irão aumentar o conforto térmico e a eficiência energética dos edifícios.

Foi possível identificar que não há uma limitação de tipologia edilícia nem de localidade para o uso dos gêmeos digitais, porém, há um número significativo de estudos realizados em edifícios educacionais e comerciais e localizados nos Estados Unidos. Um destaque relevante é quanto à fidelidade da modelagem e monitoramento de edifícios existentes e históricos pois muitas informações dos componentes construtivos não estão disponíveis no momento da modelagem dessas construções. O maior entrave encontrado para a implementação de Gêmeos Digitais é o custo dos sensores e o processamento de dados em tempo real.

Como uma tecnologia relativamente nova, acredita-se que os Gêmeos Digitais têm muito a evoluir e, com a disseminação da IA, integrar cada vez mais as construções que enfatizam questões de desempenho térmico e eficiência energética.

Declaração

Durante a preparação deste artigo, todos autores utilizaram a ferramenta NotebookLM (Gemini 1.5 Pro) para a tradução, revisão, melhoria de coesão, interpretação de dados e geração de imagens. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] EASTMAN, C., TEICHOLZ, P., SACKS , R., LISTON, K. **Manual de BIM**. PORTO ALEGRE: BOOKMAN, 2014.

[2] DE WILDE, P. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. **Automation in Construction**, vol. 41, p. 40–49, May 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009.

[3] GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *In*: **Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 85–113. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.

[4] TAO, F. et al. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, vol. 15, no. 4, p. 2405–2415, Apr. 2019. DOI: https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186.

[5] OKOLI, C. Guia Para Realizar uma Revisão Sistemática de Literatura. Tradução de David W. A. Duarte; revisão técnica de João Mattar. **EaD em Foco**, vol. 9, no. 1, Apr. 2019. DOI: https://doi.org/10.18264/eadf.v9i1.748.

[6] PAGE, M. J. et al. A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. **Revista Panamericana de Salud Pública**, vol. 46, p. 1-21, Dec. 2022. DOI: https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.112.

[7] AROWOIYA, V. A.; MOEHLER, R. C.; FANG, Y. Digital twin technology for thermal comfort and energy efficiency in buildings: A state-of-the-art and future directions. **Energy and Built Environment**, Oct. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.05.004.

[8] ZECH, P. et al. Agile, continuous building energy modeling and simulation. **Simulation**, vol. 101, no. 3, p. 241–265, Mar. 2025. DOI: https://doi.org/10.1177/00375497241251852.

[9] MAREE, J. P.; BAGLE, M. A Building Automation and Control micro-service architecture using Physics Inspired Neural Networks. *In*: **E3S Web of Conferences**. [S. l.]: EDP Sciences, Dec. 2022. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236213001.

[10] MAGHNIE, M. et al. Cloud-based hardware-in-the-loop testing of building automation controllers. *In*: **Journal of Physics: Conference Series**. [S. l.]: IOP Publishing Ltd, Nov. 2021. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012025.

[11] HOSAMO, H. et al. 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**, vol. 17, no. 2, p. 125–171, 2023. DOI: https://doi.org/10.1080/17512549.2022.2136240.

[12] SAADATIFAR, S.; SAWYER, A. O.; BYRNE, D. Occupant-Centric Digital Twin: A Case Study on Occupant Engagement in Thermal Comfort Decision-Making. **Architecture**, vol. 4, no. 2, p. 390–415, Jun. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/architecture4020022.

[13] CLAUSEN, A. et al. A digital twin framework for improving energy efficiency and occupant comfort in public and commercial buildings. **Energy Informatics**, vol. 4, Sep. 2021. DOI: https://doi.org/10.1186/s42162-021-00153-9.

[14] AGOUZOUL, A.; SIMEU, E.; TABAA, M. Advancing Sustainable Building Practices: Intelligent Methods for Enhancing Heating and Cooling Energy Efficiency. **Sustainability**, vol. 16, no. 7, Apr. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16072879.

[15] IQBAL, F.; MIRZABEIGI, S. Digital Twin-Enabled Building Information Modeling–Internet of Things (BIM-IoT) Framework for Optimizing Indoor Thermal Comfort Using Machine Learning. **Buildings**, vol. 15, no. 10, May 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15101584.

[16] ANDRITSOU, D.; ALEXIOU, C.; POTSIOU, C. BIM, 3D Cadastral Data and AI for Weather Conditions Simulation and Energy Consumption Monitoring. **Land**, vol. 13, no. 6, Jun. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/land13060880.

[17] DULAIMI, A. et al. DIGITAL TWIN SOLUTION IMPLEMENTED ON ENERGY HUB TO FOSTER SUSTAINABLE SMART ENERGY CITY, CASE STUDY OF SUSTAINABLE SMART ENERGY HUB. *In*: **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. [S. l.]: Copernicus Publications, Oct. 2022. p. 41–48. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W3-2022-41-2022.

[18] WALCZYK, G.; OŻADOWICZ, A. Building Information Modeling and Digital Twins for Functional and Technical Design of Smart Buildings with Distributed IoT Networks—Review and New Challenges Discussion. **Future Internet**, vol. 16, no. 7, Jul. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/fi16070225.

[19] BOTH, M. et al. Automated monitoring applications for existing buildings through natural language processing based semantic mapping of operational data and creation

of digital twins. **Energy and Buildings**, vol. 300, Dec. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113635.

[20] BORJA-CONDE, J. A. et al. Thermal modeling of existing buildings in high-fidelity simulators: A novel, practical methodology. **Energy and Buildings**, vol. 292, Aug. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113127.

[21] HOSAMO, H. H. et al. Digital Twin framework for automated fault source detection and prediction for comfort performance evaluation of existing non-residential Norwegian buildings. **Energy and Buildings**, vol. 281, Feb. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112732.

[22] LEE, K. S. et al. Exploring digital twin interfaces for occupant-building interaction to enhance personal comfort and energy efficiency. **Energy and Built Environment**, vol. 6, no. 2, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2025.03.005.

[23] KAEWUNRUEN, S.; RUNGSKUNROCH, P.; WELSH, J. A digital-twin evaluation of Net Zero Energy Building for existing buildings. **Sustainability**, vol. 11, no. 1, Jan. 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/su11010159.

[24] AGOSTINELLI, S. et al. Cyber-physical systems improving building energy management: Digital twin and artificial intelligence. **Energies**, vol. 14, no. 8, Apr. 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/en14082338.

[25] HAN, J.; AI, L. Building Energy Systems Using Digital Twins and Genetic Algorithms. **Scalable Computing: Practice and Experience**, vol. 26, no. 3, p. 1429–1439, Apr. 2025. DOI: https://doi.org/10.12694/scpe.v26i3.4167.

[26] BAYER, D.; PRUCKNER, M. A digital twin of a local energy system based on real smart meter data. **Energy Informatics**, vol. 6, no. 1, Dec. 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s42162-023-00263-6.

[27] ABDELRAHMAN, M.; CHONG, A.; MILLER, C. Personal thermal comfort models using digital twins: Preference prediction with BIM-extracted spatial-temporal proximity data from Build2Vec. **Energy and Buildings**, vol. 260, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.105213

[28] HEIDARYKIANY, R.; ABABEI, C. HVAC energy cost minimization in smart grids: A cloud-based demand side management approach with game theory optimization and deep learning. **Energy and AI**, vol. 16, May 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100362.

[29] RUTKOWSKI, R. et al. Digital Twin in the Design and Dynamic Assessment of Energy Performance of Multi-Family Buildings. **Energies**, vol. 17, no. 23, Dec. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/en17236150.

[30] BASTOS PORSANI, G. et al. Empirical evaluation of EnergyPlus infiltration model for a case study in a high-rise residential building. **Energy and Buildings**, vol. 296, Oct. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113322.

[31] SAYED, A. N. et al. Enhancing building sustainability: A Digital Twin approach to energy efficiency and occupancy monitoring. **Energy and Buildings**, vol. 328, Feb. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115151.

[32] JRADI, M.; MADSEN, B. E.; KAISER, J. H. DanRETwin: A Digital Twin Solution for Optimal Energy Retrofit Decision-Making and Decarbonization of the Danish Building Stock. **Applied Sciences**, vol. 13, no. 17, Sep. 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/app13179778.

[33] OCHS, F. et al. Monitoring and simulation-based optimization of two multi-apartment NZEBs with heat pump, solar thermal and PV. **Journal of Building Performance Simulation**, vol. 17, no. 1, p. 1–26, 2024. DOI: https://doi.org/10.1080/19401493.2023.2227605.

[34] BJØRNSKOV, J.; THOMSEN, A.; JRADI, M. Large-scale field demonstration of an interoperable and ontology-based energy modeling framework for building digital twins. **Applied Energy**, vol. 387, Jun. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125597.

[35] LESNYAK, E. et al. Applied Digital Twin Concepts Contributing to Heat Transition in Building, Campus, Neighborhood, and Urban Scale. **Big Data and Cognitive Computing**, vol. 7, no. 3, Sep. 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/bdcc7030145.

[36] PIRAS, G.; MUZI, F.; TIBURCIO, V. A. Enhancing Space Management through Digital Twin: A Case Study of the Lazio Region Headquarters. **Applied Sciences**, vol. 14, no. 17, Sep. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/app14177463.

[37] TANASE, A.; CROITORU, C. Optimizing building performance with Digital Twins: Pathways to energy efficiency and decarbonization. *In*: **E3S Web of Conferences**. [S. l.]: EDP Sciences, Jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560801004.

[38] GOURLIS, G.; KOVACIC, I. A holistic digital twin simulation framework for industrial facilities: BIM-based data acquisition for building energy modeling. **Frontiers in Built Environment**, vol. 8, Sep. 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.918821.

[39] NOROUZI, P.; MAALEJ, S.; MORA, R. Applicability of Deep Learning Algorithms for Predicting Indoor Temperatures: Towards the Development of Digital Twin HVAC Systems. **Buildings**, vol. 13, no. 6, Jun. 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings13061542.

[40] DESOGUS, G. et al. From Building Information Model to Digital Twin: A Framework for Building Thermal Comfort Monitoring, Visualizing, and Assessment. **Buildings**, vol. 13, no. 8, Aug. 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings13081971.

[41] ELARWADY, Z. et al. Modeling indoor thermal comfort in buildings using digital twin and machine learning. **Developments in the Built Environment**, vol. 19, Oct. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100480.

[42] HENZEL, J. et al. Energy Consumption Forecasting for the Digital-Twin Model of the Building. **Energies**, vol. 15, no. 12, Jun. 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/en15124318.

[43] LIBRALATO, M.; D'AGARO, P.; CORTELLA, G. Development of an energy digital twin from a hotel supervision system using building energy modelling. *In*: **Journal of Physics: Conference Series**. [S. l.]: Institute of Physics, 2023. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/3/032014.

[44] ALBARSSI, S.; HOU, S. S.; LATIF, E. Thermally Future-Proofing Existing Libyan Housing Stock with Biobased Insulation Materials and Passive Measures: An Empirical and Numerical Study Using a Digital Twin. **Buildings**, vol. 14, no. 1, Jan. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings14010175.

[45] MARU, M. B. et al. Improved building facade segmentation through digital twin-enabled RandLA-Net with empirical intensity correction model. **Journal of Building Engineering**, vol. 78, Nov. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107520.

[46] DLESK, A. et al. INTEGRATION OF SPATIALLY ORIENTED DATA FROM IOT TO FACILITY MANAGEMENT AND BIM. *In*: **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. [S. l.]: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Jun. 2023. p. 31–36. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W2-2023-31-2023.

[47] CASCONE, S.; PARISI, G.; CAPONETTO, R. BIM-Based Strategies for the Revitalization and Automated Management of Buildings: A Case Study. **Sustainability**, vol. 16, no. 16, Aug. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16166720.

[48] NI, Z. et al. Improving energy efficiency while preserving historic buildings with digital twins and artificial intelligence. *In*: **IOP Conference Series: Earth and Environmental**

Science. [S. l.]: IOP Publishing Ltd, Oct. 2021. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/863/1/012041.

[49] LIAO, L. et al. Evaluation of Complexity Issues in Building Information Modeling Diffusion Research. **Sustainability**, vol. 14, no. 5, Mar. 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/su14053005.

[50] THORVE, S. et al. High resolution synthetic residential energy use profiles for the United States. **Scientific Data**, vol. 10, no. 1, Dec. 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41597-022-01914-1.

[51] TANG, Y. et al. Vertical Greenery System (VGS) Renovation for Sustainable Arcade-Housing: Building Energy Efficiency Analysis Based on Digital Twin. **Sustainability**, vol. 15, no. 3, Feb. 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/su15032310.

[52] EDTMAYER, H. et al. Modelling virtual sensors for real-time indoor comfort control. **Journal of Building Engineering**, vol. 67, May 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106040.

[53] SPUDYS, P. et al. Classifying the operational energy performance of buildings with the use of digital twins. **Energy and Buildings**, vol. 290, Jul. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113106.

[54] BORKOWSKI, A. S. Low-Cost Internet of Things Solution for Building Information Modeling Level 3B—Monitoring, Analysis and Management. **Journal of Sensor and Actuator Networks**, vol. 13, no. 2, Apr. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/jsan13020019.

[55] PEREIRA, P. F.; RAMOS, N. M. M. Low-cost Arduino-based temperature, relative humidity and CO2 sensors - An assessment of their suitability for indoor built environments. **Journal of Building Engineering**, vol. 60, Nov. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105151.

[56] TAHMASEBINIA, F. et al. Advanced Energy Performance Modelling: Case Study of an Engineering and Technology Precinct. **Buildings**, vol. 14, no. 6, Jun. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings14061774.

[57] CORRADO, C. R. et al. Combining Green Metrics and Digital Twins for Sustainability Planning and Governance of Smart Buildings and Cities. **Sustainability**, vol. 14, no. 20, Oct. 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/su142012988.

[58] MANFREN, M. et al. Lean and interpretable digital twins for building energy monitoring – A case study with smart thermostatic radiator valves and gas absorption heat pumps. **Energy and AI**, vol. 14, Oct. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100304.

[59] HAN, F. et al. Predictive Analysis of a Building's Power Consumption Based on Digital Twin Platforms. **Energies**, vol. 17, no. 15, Aug. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/en17153692.