Industrialização, Digitalização, Desempenho

5º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção e 5º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos

FLORIANÓPOLIS-SC | 20 a 22 de agosto

[1]INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MACHINE LEARNING EM EDIFICAÇÕES: MAPEAMENTO DAS LACUNAS DE CONHECIMENTO NA INTEGRAÇÃO COM BIM

Artificial Intelligence and Machine Learning in Building Construction: Mapping Knowledge Gaps in BIM Integration

Lívia Pasdiora
Universidade Federal do Paraná | Curitiba, Paraná | liviapasdiora@gmail.com

Sergio Scheer
Universidade Federal do Paraná | Curitiba, Paraná | sergioscheer@gmail.com

RESUMO

A complexidade inerente a projetos de edificações, marcada por múltiplas variáveis e desafios, demanda o uso de ferramentas computacionais para otimizar a tomada de decisões. O BIM consolida-se como essencial para gerenciar dados durante todo o ciclo de vida dos projetos, mas suas limitações motivaram a integração com tecnologias emergentes como Inteligência Artificial (IA) e *Machine Learning* (ML), visando aprimorar processos na construção de edificações. Este artigo realiza uma revisão sistemática da literatura, analisando 107 publicações e identificando lacunas de conhecimento nessa integração. A análise, baseada numa adaptação do protocolo PICO, revelou grande concentração de estudos em fases iniciais do ciclo de vida, com ênfase em eficiência energética e modelagem BIM. Redes Neurais e Algoritmos Generativos destacaram-se como as principais intervenções aplicadas, demonstrando eficiência na otimização de projetos e automatização de tarefas repetitivas. Mesmo com grande volume de estudos investigando essa integração, algumas lacunas foram identificadas, como a subutilização de tecnologias emergentes como Algoritmos Genéticos e GANs e a baixa ocorrência de estudos em fases pós-ocupacionais da edificação. Recomenda-se, para estudos futuros, explorar essas opções pouco estudadas e adaptar pesquisas já feitas em escalas ampliadas e contextos regionais diversificados.

Palavras-chave: BIM, Machine Learning, Inteligência Artificial, Construção Civil, Arquitetura

ABSTRACT

The inherent complexity of building projects, marked by multiple variables and challenges, requires the use of computational tools to optimize decision-making. Building Information Modeling (BIM) has established itself as essential for managing data throughout a project's lifecycle, but its limitations have driven the integration with emerging technologies such as Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML), aiming to improve processes in the construction of buildings. This article conducts a systematic literature review, analyzing 107 publications and identifying knowledge gaps in this integration. The analysis, based on an adaptation of the PICO protocol, revealed a strong concentration of studies on early lifecycle phases, with emphasis on energy efficiency and BIM modeling. Neural Networks and Generative Algorithms stood out as the primary interventions applied, demonstrating efficiency in project optimization and automation of repetitive tasks. Despite the significant volume of studies investigating this integration, critical gaps were identified, such as the underutilization of emerging technologies (e.g., Genetic Algorithms and GANs) and the scarcity of studies on post-occupancy phases. For future studies, it is recommended to explore these under-researched options and adapt existing research to larger scales and diverse regional contexts.

***Keywords**: BIM, Machine Learning, Artificial Intelligence, Construction Industry, Architecture*

1 INTRODUÇÃO

Dentro do contexto de um projeto de edificação, onde há uma grande quantidade de variáveis e desafios a serem contemplados, o uso de recursos computacionais é valioso para apoiar o processo de tomada de decisões (CARLO; LAMBERTS, 2008). O uso do BIM (*Building Information Modeling*) já é fundamental para gerenciar o crescente volume de dados e informações relativos ao ciclo de vida de um projeto, e as limitações existentes motivaram diversas pesquisas a explorarem a aplicação de Inteligência Artificial (IA), especialmente *Machine Learning* (ML), para melhorar processos inerentes ao setor de AEC (ALZARA *et al*., 2023). De acordo com Alves, Palha e Almeida Filho (2025), a integração entre BIM e IA mostra um futuro promissor, abrindo caminho para explorar a automatização de atividades repetitivas, enriquecer modelos paramétricos com atribuição de informações, otimizar simulações e análises energéticas, entre outras possibilidades.

[1]PASDIORA, L.; SCHEER, S. Inteligência Artificial e Machine Learning em Edificações: Mapeamento das Lacunas de Conhecimento na Integração com BIM. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2025, Florianópolis. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2025.

O termo Inteligência Artificial refere-se a sistemas capazes de simular funções cognitivas humanas, como aprendizagem, raciocínio, processamento de linguagem e até o exercício da criatividade. Essas habilidades permitem que a IA execute desde tarefas rotineiras, como automatização de processos repetitivos, até atividades complexas, como resolução de problemas específicos (ZHANG *et al*., 2022). Uma das possibilidades de aplicação da IA na indústria AEC são os Algoritmos Generativos, uma abordagem heurística para resolver problemas de otimização, que geram novos conteúdos a partir dos dados com os quais foram treinados. Em outras palavras, aplicando ao contexto da construção civil, essa abordagem possibilita a criação de uma ampla gama de opções, como a definição de conceitos iniciais para a planta baixa de um determinado projeto, permitindo a avaliação e escolha dentre milhares de opções que seriam impossíveis de serem desenvolvidas manualmente em pouco tempo (PESTANA; PAICE; WEST, 2024). Outra possibilidade similar são os Algoritmos Genéticos, uma categoria que requer menos regras e restrições e funciona através de uma técnica de busca aleatória de otimização global, similar ao que acontece nos processos de evolução natural (CITADIN, 2015), utilizados para resolver problemas mais complexos, como otimização de custos de uma obra (WU *et al*., 2024).

Outra técnica aplicável no âmbito da construção civil é o *Machine Learning*, um subconjunto da IA que permite que computadores e sistemas identifiquem padrões em dados e, a partir disso, melhorem seu desempenho e tomem decisões com base nos dados fornecidos. Uma das subcategorias mais populares do ML são as Redes Neurais, que tem seu funcionamento inspirado no cérebro humano, utilizando estruturas de nós interconectados para processar informações (ALPAYDIN, 2020).

Embora a integração entre IA/ML e BIM em edificações venha sendo intensamente estudada, faltam revisões sistemáticas que mapeiem as lacunas de conhecimento de forma consolidada. Essa carência é crítica, pois a rápida evolução do tema exige acompanhamento contínuo dos estudos emergentes. Sem um panorama atualizado, o avanço das pesquisas torna-se fragmentado, dificultando a coordenação de esforços.

Tomando como base o cenário apresentado e a diversidade de soluções aplicáveis em edificações, a presente pesquisa buscou analisar o estado da arte da aplicação de tecnologias de IA em conjunto com BIM, com o objetivo de identificar as lacunas de conhecimento nesse contexto, fazendo um levantamento das abordagens mais utilizadas e relacionando o contexto na qual elas foram implementadas.

2 METODOLOGIA

A metodologia escolhida para a condução da pesquisa foi a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), definida por Sampaio e Mancini (2007) como um processo investigativo que sintetiza publicações relevantes sobre um tema específico por meio de estratégias sistematizadas de busca. A primeira etapa de uma revisão exige uma questão clara para nortear a pesquisa. Portanto, o presente estudo buscou responder a seguinte pergunta: Qual o estado da arte e quais as lacunas de conhecimento na integração entre IA/ML e BIM aplicados ao processo de construção de edifícios?

A segunda etapa consistiu na definição dos termos de busca e critérios de elegibilidade. Foram estabelecidos como critérios de inclusão: (i) artigos indexados em bases científicas de referência, publicados entre 2020 e março de 2025; (ii) estudos que abordassem intervenções baseadas em Inteligência Artificial e/ou Machine Learning, juntamente com BIM; (iii) aplicação dessas soluções em pelo menos uma fase do ciclo de vida de edificações, abrangendo desde a concepção projetual até a fase de gerenciamento pós-ocupacional.

Os critérios de exclusão adotados foram: (i) artigos publicados anteriormente a 2020; (ii) estudos que mencionavam IA ou ML sem propor intervenções ou usos práticos dessas metodologias; (iii) pesquisas focadas em geração de *prompts* de imagem sem aplicabilidade concreta no âmbito da construção civil; (iv) trabalhos focados no uso das citadas tecnologias apenas para desenvolver metodologias de ensino em faculdades de arquitetura e engenharia; (v) artigos de revisão de literatura; (vi) estudos que mensuravam através de questionários e entrevistas a percepção de usuários, estudantes ou profissionais sobre a aceitação da IA em práticas construtivas e (vii) publicações dedicadas a outras tipologias construtivas (pontes, túneis e rodovias).

A busca inicial nas três bases de dados selecionadas (*Scopus, Web of Science e Engineering Village*) identificou um total de 1371 artigos. Após a triagem inicial, que incluiu a análise de títulos, palavras-chave e resumos e exclusão de duplicatas, prosseguiu-se com a leitura integral dos textos. Mediante a aplicação dos critérios de inclusão definidos anteriormente, 107 artigos foram selecionados para compor a amostra final da

RSL, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Busca e tratamento de dados

PALAVRAS-CHAVE E FILTROS DE SELEÇÃO	SCOPUS	WEB OF SCIENCE	ENGINEERING VILLAGE	TOTAL
("Machine Learning" OR "Generative AI" OR "Generative Design" OR "Artificial Intelligence") AND ("Construction" OR "Architect* design" OR "Civil Engineering" OR "AEC") AND "BIM"	572	301	498	1371
Selecionados após exclusão de duplicatas			788	
Selecionados após leitura dos títulos			460	
Selecionados após leitura de resumos e palavras-chave			221	
Selecionados após leitura do artigo na íntegra			**107**	

Fonte: Os autores (2025)

Para extrair e analisar os dados dos artigos selecionados, optou-se por adotar uma versão simplificada da estratégia PICO, acrônimo para População, Intervenção, Comparação e "*outcomes*" (desfecho). Proveniente da área médica, essa estratégia pode ser adaptada para outras áreas, buscando transformar a pergunta da pesquisa em termos bem definidos para nortear a extração de dados para análise (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

Para estruturar a análise dos estudos selecionados, adaptou-se o protocolo PICO da seguinte forma: (i) População: identificação do contexto abordado (fase projetual, fase pós-ocupação, orçamento, gerenciamento etc.); (ii) Intervenção: caracterização da tecnologia empregada e (iii) Desfecho: Análise dos resultados alcançados. Optou-se pela não utilização do componente "comparação", tradicionalmente presente no método PICO, visto que a maioria dos estudos comparava as soluções propostas com processos convencionais não automatizados, o que não agregaria valor na análise final. Além disso, incorporou-se ao protocolo um componente de análise referente ao contexto geográfico de aplicação dos estudos. Essa decisão justifica-se pelo fato de que, embora a maioria dos artigos trate de casos hipotéticos e simulações virtuais, verificou-se que 20 estudos incluídos apresentaram casos reais com recortes regionais explícitos. Dessa forma, procedeu-se à extração sistemática dessa informação sempre que explicitada, permitindo a análise comparativa de padrões regionais na aplicação das tecnologias investigadas.

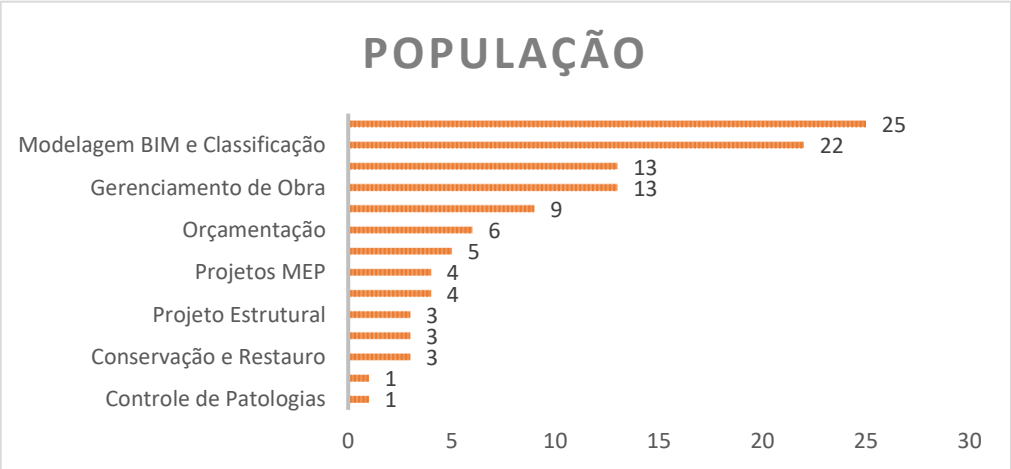
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão discutidos os resultados obtidos através da análise dos 107 artigos selecionados.

3.1 População

A categoria referente à população busca identificar em quais escopos as tecnologias relacionadas com IA e ML foram adotadas com mais frequência, identificando os eixos temáticos com maior quantidade de pesquisas desenvolvidas nos últimos cinco anos. A soma final é superior ao número total de estudos pois alguns artigos analisaram mais de um escopo na mesma pesquisa. Os dados estão ilustrados na Figura 1.

Figura 1: População



Fonte: Os autores (2025)

A análise revela uma grande concentração de estudos nas áreas referentes à eficiência energética e modelagem BIM, que somadas representam quase a metade (42%) de todos os estudos. No âmbito da eficiência energética, as tecnologias aplicadas foram diversificadas, mas o objetivo almejado foi majoritariamente focado no desenvolvimento de edificações mais sustentáveis, projetos otimizados para promover maior conforto aos usuários utilizando menos recursos artificiais de refrigeração e aquecimento, diminuição da emissão de CO2 e adequação para uso mais eficiente de energias renováveis. A tecnologia que mais teve ocorrências foi a técnica conhecida como *Random Forest*, uma técnica dentro do âmbito do ML que busca combinar diferentes dados e modelos para, após uma robusta análise, obter um único resultado. Essa tecnologia mostrou-se útil nos artigos analisados pois combinava e analisava vários cenários e possibilidades retornando a melhor opção possível para ser adotada no projeto.

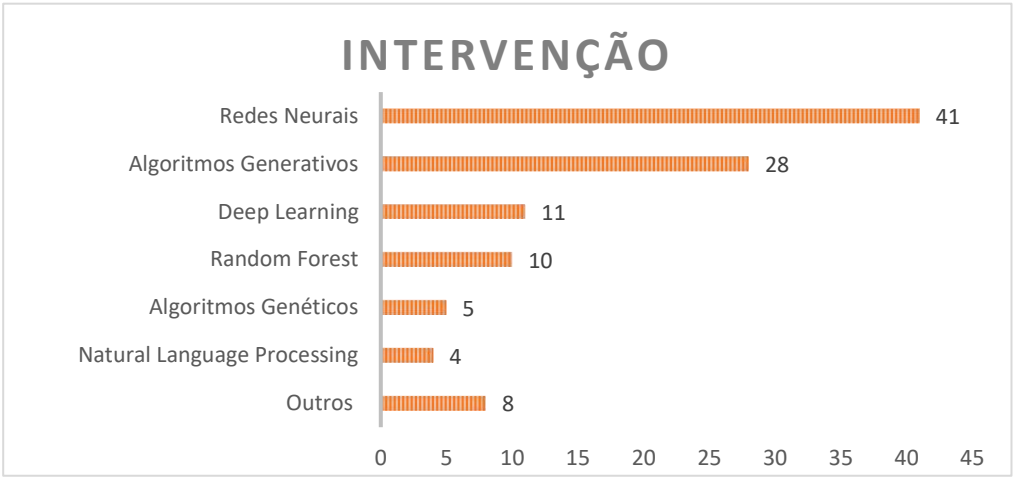
Os artigos categorizados como Modelagem e Classificação BIM foram aqueles que tratavam estudos buscando otimização no desenvolvimento de modelos em *softwares* BIM, como conversões automatizadas de projetos 2D em modelos 3D, nomeação de ambientes em plantas baixas e classificação de elementos dentro de estruturas de padronização IFC (*Industry Foundation Classes*), facilitando o intercâmbio de informações e posterior extração de quantitativos para orçamento, por exemplo. Nesse eixo temático, as Redes Neurais tiveram destaque como tecnologia mais utilizada, simulando o funcionamento do cérebro humano para automatizar tarefas repetitivas.

As categorias menos exploradas até agora foram referentes à projetos complementares (compatibilização de projetos entre diferentes disciplinas, otimização de projetos estruturais e desenvolvimento de projetos de hidráulica, elétrica e ar-condicionado) e as que tratam dos ciclos pós-obra da edificação (conservação e restauro de edificações históricas, controle de patologias e gerenciamento pós-ocupacional).

3.2 Intervenção

Essa categoria busca identificar quais categorias dentro do amplo conceito de inteligência artificial foram utilizados em cada um dos artigos avaliados.

Figura 2: Intervenção



Fonte: Os autores (2025)

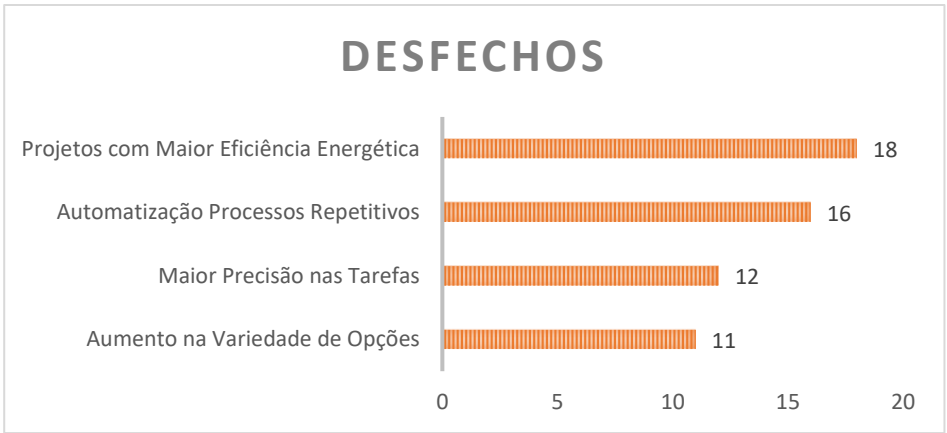
Com base nas informações ilustradas na Figura 2, nota-se que Redes Neurais, categoria derivada do *Machine Learning*, foi a mais frequente, sendo a tecnologia adotada em 38% dos estudos analisados. Essa abordagem está relacionada à diversos eixos temáticos diferentes, desde as etapas iniciais de concepção de projeto até análises pós-ocupacionais. Como essa tecnologia busca imitar o funcionamento do cérebro humano, seu leque de aplicações é diverso. As tipologias que se destacaram dentro do âmbito das redes neurais foram *Convolutional Neural Network* (CNN), um tipo de rede neural focada em reconhecimento e processamento de imagem, *Graph Neural Network* (GNN), que tem como propósito o processamento de dados através de gráficos e *Artificial Neural Network* (ANN), orientada para tomada de decisões.

A segunda tecnologia que se destaca são os Algoritmos Generativos, presentes em 28 dos 107 artigos analisados. Os estudos que adotaram essa abordagem focam majoritariamente nas etapas iniciais de projeto, como no desenvolvimento de plantas, *layouts* arquitetônicos e fachadas otimizadas para maior eficiência energética. A vantagem do uso de algoritmos generativos é possibilitar a geração de uma grande quantidade de opções diferentes, permitindo a escolha da mais adequada para cada caso.

3.3 Desfecho

Essa seção analisou e quantificou as quatro melhorias mais recorrentes identificadas nos estudos a partir da aplicação de IA/ML em processos de construção e desenvolvimento de projetos, em comparação a métodos tradicionais não automatizados. Os resultados estão ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - Desfechos



Fonte: Os autores (2025)

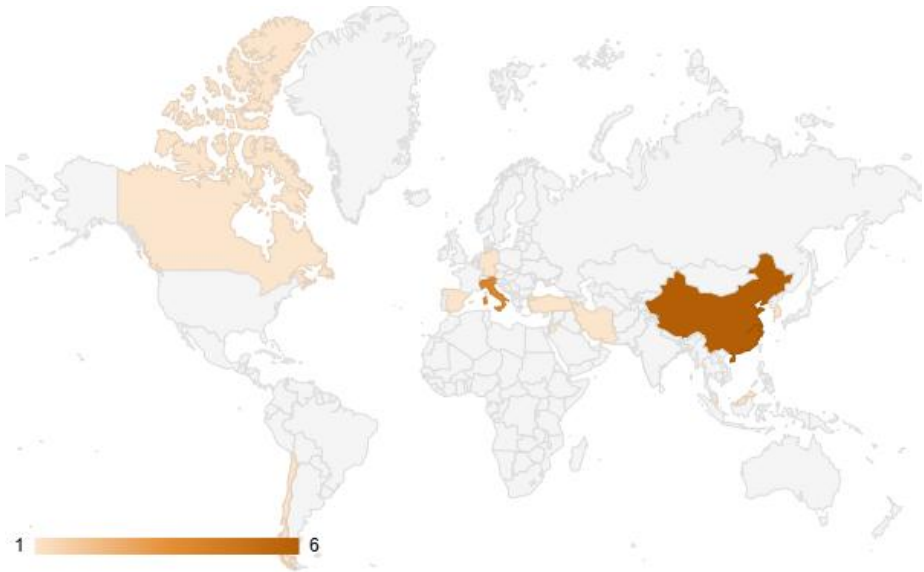
Dentre os 107 artigos analisados, o desfecho mais recorrente evidenciou que projetos que empregaram técnicas computacionais como Algoritmos Generativos e *Random Forest* alcançaram soluções projetuais com eficiência energética superior às desenvolvidas através de métodos tradicionais. Isso decorre da capacidade dessas técnicas de gerar uma ampla variabilidade de solução dentro de parâmetros pré-estabelecidos, por meio de processos automatizados, superando em velocidade e quantidade e qualidade as abordagens convencionais. A multiplicidade de opções viabiliza uma avaliação exaustiva de praticamente todos os cenários possíveis, permitindo a seleção de alternativas que priorizam o conforto térmico-ambiental, reduzem o consumo energético e otimizam a aplicação de materiais.

Outro resultado relevante identificado foi a automatização de processos repetitivos, com ênfase em atividades de modelagem em softwares BIM e classificação de elementos conforme padrões IFC. Essa automação foi predominantemente viabilizada por Redes Neurais que, após treinamento com diretrizes pré-estabelecidas de modelagem e classificação, executavam tarefas repetitivas com velocidade significativamente superior à dos métodos manuais, assegurando conformidade técnica e redução de inconsistências.

3.4 Contexto geográfico de aplicação

Dos 107 estudos analisados, a maioria (81%) baseou-se em simulações computacionais, casos hipotéticos, ambientes virtuais ou estudos de caso sem vinculação a contextos geográficos específicos. Contudo, 20 artigos apresentaram recortes espaciais explícitos, permitindo a identificação do contexto geográfico de aplicação das tecnologias investigadas. Os resultados estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4 – Contexto geográfico



Fonte: Os autores (2025)

Entre os estudos com localização geográfica definida, a China se destacou como o país mais representado, com seis pesquisas. Esses trabalhos abordaram contextos variados, como a otimização de construções pré-fabricadas (ZHAO; NINGNING, 2024) e o uso de inteligência artificial para melhorar o desempenho energético de edifícios (WU *et al.,* 2022). Em segundo lugar veio a Itália, com quatro estudos concentrados principalmente na preservação de edifícios históricos. Outros países também apareceram nesse recorte geográfico, cada um com um estudo: Turquia, Jordânia, Irã, Malásia, Ilhas Maurício, Coreia do Sul, Alemanha, Espanha, Canadá e Chile.

Essa distribuição mostra um claro foco na Ásia e Europa, enquanto as Américas, África e Oceania

permanecem pouco representadas, indicando uma importante lacuna de pesquisas aplicadas nesses contextos.

4 DISCUSSÃO

Os resultados desta revisão sistemática demonstram avanços significativos na aplicação de IA/ML, sobretudo em etapas iniciais de projeto, como estudos conceituais de layout e modelagem paramétrica, que somados representam 56% de todos os artigos analisados. Entretanto, mesmo em áreas amplamente exploradas, como eficiência energética, persistem lacunas científicas. Conforme concluído por Zhu *et al*. (2025), um dos artigos mais recentes nesse contexto analisados nessa revisão, embora a literatura já aborde amplamente análises de desempenho energético, a diversidade de fatores regionais (condições climáticas, perfis de ocupação, diversidade socioeconômica) impões desafios críticos ao treinamento de redes neurais, limitando a generalização de modelos. Adicionalmente, através da análise de contexto geográfico de aplicação das pesquisas, identificou-se um viés geográfico na amostra: a maioria dos estudos analisados concentra-se em edificações chinesas e europeias, revelando a carência de aplicações dessas metodologias em contextos diversos, em especial na América do Sul, África e Oceania, onde as particularidades climáticas e socioeconômicas demandam abordagens específicas.

Conforme evidenciado pela análise de população, persistem lacunas significativas em categorias importantes para o setor. A primeira delas refere-se a projetos complementares (hidráulica, elétrica, climatização e estruturas): embora estudos recentes, como os de Pestana, Paice e West (2024), que empregaram algoritmos generativos, e Li *et al.* (2024), utilizando redes neurais GNN, destaquem resultados superiores aos métodos tradicionais em suas pesquisas, as aplicações foram aplicadas em escalas reduzidas, indicando a necessidade de explorar soluções de IA/ML em projetos de maior complexidade e dimensão. Quanto à compatibilização entre disciplinas, o treinamento de redes neurais emerge como a principal intervenção tecnológica. Porém os autores Sehadeh e Alshboul (2025) alertam que, embora os resultados sejam promissores na resolução de conflitos entre projetos, a adoção em larga escala enfrenta obstáculos como a demanda por *hardwares* de alto desempenho e a necessidade de treinamento contínuo dos modelos para adaptação a particularidades de cada projeto, fatores que limitam sua aplicabilidade prática.

Outra lacuna crítica identificada refere à fase pós-ocupacional das edificações, categoria pouco explorada na literatura analisada. Estudos nesse âmbito, como os de Cascone, Parisi e Caponetto (2024) e Li e Yang (2025), revelam desafios similares aos observados nas pesquisas focadas em compatibilização de projetos, como as limitações de *hardware* e a necessidade de validação em escalas maiores. Paralelamente, os autores propõem a adição de outras tecnologias emergentes para otimizar os processos descritos, como o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), buscando aprimorar a precisão dos dados de entrada para a execução de algoritmos generativos e treinamento de redes neurais, mitigando assim inconsistências decorrentes de amostras restritas ou pouco representativas.

Outro exemplo de abordagem inovadora com pouca representatividade na literatura analisada é o proposto por Su, Li e Na (2021), que aplicam algoritmos generativos para avaliação e precificação de empreendimentos imobiliários, uma frente ainda pouco explorada no campo da IA/ML. Adicionalmente, a presente revisão não identificou estudos que explorassem a aplicação dessas tecnologias em temas como economia circular (reutilização de materiais pós-demolição, por exemplo) ou até demolição sustentável de edificações existentes, evidenciando lacunas em áreas emergentes que demandam estudos para investigar a viabilidade da aplicação de tecnologias relacionadas a IA.

Dentre as intervenções tecnológicas analisadas, destacam-se categorias com grande potencial e ocorrência baixa na literatura analisada, como Algoritmos Genéticos. Conforme demonstrado por Ratajczak, Siegele e Niederwieser (2023), esses algoritmos demonstram eficiência superior em comparação a metodologias tradicionais, porém foram pouco explorados provavelmente devido à complexidade inerente à parametrização e treinamento desses algoritmos. Diante desse cenário, os avanços contínuos em relação às ferramentas de IA e ML podem popularizar o uso de Algoritmos Genéticos na indústria AEC, posicionando-se como uma fronteira estratégica a ser explorada em estudos futuros, buscando resolver problemas complexos como planejamento logístico e alocação de recursos.

Por fim, identificou-se a ausência de referências a tecnologias emergentes de redes neurais, como *Generative Adversarial Networks* (GANs) nos estudos analisados. As GANs, redes neurais que sintetizam dados a partir de padrões aprendidos através de treinamentos repetitivos, representam uma ferramenta promissora para

análise e geração autônoma de soluções projetuais baseadas em dados validados anteriormente. À semelhança de algoritmos generativos, as GANs destacam-se pela capacidade de aprendizado adversarial, superando métodos convencionais em complexidade e adaptabilidade. Entretanto, sua ausência na literatura revisada revela mais uma lacuna a ser explorada, com aplicações que podem ir desde a automação criativa de design de projetos até a otimização de cenários operacionais mais complexos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo se propôs a conduzir uma revisão sistemática da literatura analisando 107 publicações acadêmicas, buscando responder qual o estado da arte e quais as lacunas de conhecimento na integração entre IA/ML e BIM aplicados no âmbito da construção civil. Adotou-se uma versão adaptada do protocolo PICO para extração e análise de dados, permitindo a avaliação dos contextos de aplicação, tecnologias empregadas, benefícios comparativos em relação a métodos tradicionais e contexto geográfico de aplicação dos estudos. Os resultados indicam uma concentração temática nas fases iniciais do clico de vida das edificações, com predominância de estudos relativos à eficiência energética e modelagem BIM. Redes Neurais, principalmente *Convolucionais* (CNNs) e Algoritmos generativos emergiram como as intervenções mais frequentes, demonstrando eficácia na otimização de projetos e automação de processos repetitivos. Contudo, lacunas foram identificadas, como a subutilização de Algoritmos Genéticos e GANs e a escassez de aplicações de IA/ML em fases pós-ocupação.

Como diretrizes para pesquisas futuras, recomenda-se: (i) explorar tecnologias emergentes subutilizadas, como GANs e Algoritmos Genéticos, principalmente em contextos mais complexos de otimização e geração de soluções; (ii) validar metodologias consolidadas em pesquisas já publicadas em projetos de maior escala e complexidade, evoluindo os protótipos aplicados em pequena escala e (iii) priorizar estudos em regiões geográficas pouco exploradas, como a América do Sul, principalmente em estudos que buscam otimizar eficiência energética, aplicando soluções já validadas em diferentes contextos climáticos e socioeconômicos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

ALPAYDIN, E. Introduction to machine learning. 4ed. Cambridge Massachusetts: The MIT press, 2020. 655 p.

ALVES, J. L.; PALHA, R. P.; ALMEIDA FILHO, A. T. de. Towards an integrative framework for BIM and artificial intelligence capabilities in smart architecture, engineering, construction, and operations projects. Automation in Construction, [s. l.], v. 174, p. 106168, abr. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106168. Acesso em: 11 abr. 2025.

ALZARA, M. et al. Building a genetic algorithm-based and BIM-based 5D time and cost optimization model. IEEE Access, [s. l.], p. 1, set. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1109/access.2023.3317137. Acesso em: 12 abr. 2025.

AZEVEDO, R. C.; ENSSLIN, L. Metodologia da Pesquisa para Engenharias. 1ed. Belo Horizonte: PPGEC/CEFET-MG. 2020. 196 p.

CARLO, J.; LAMBERTS, R. Development of envelope efficiency labels for commercial buildings: Effect of different variables on electricity consumption. Energy and Buildings, [s. l.], v. 40, n. 11, p. 2002-2008, jan. 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.002. Acesso em: 9 abr. 2025.

CASCONE, S.; PARISI, G.; CAPONETTO, R. BIM-Based Strategies for the Revitalization and Automated Management of Buildings: A Case Study. Sustainability, [s. l.], v. 16, n. 16, p. 6720, ago. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su16166720. Acesso em: 11 abr. 2025.

CITADIN, Jucilane Rosa. Um algoritmo genético para formação de grupos heterogêneos na aprendizagem colaborativa. 2015. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2015.

HENG, Z.; NINGNING, Z. BIM Control Method for Hidden Quality Cost of Prefabricated Building Construction Project. Stavební obzor - Civil Engineering Journal, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 306-320, out. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.14311/cej.2024.03.0021. Acesso em: 4 jun. 2025.

LI, A. et al. Design information-assisted graph neural network for modeling central air conditioning systems. Advanced Engineering Informatics, [s. l.], v. 60, p. 102379, abr. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102379. Acesso em: 10 abr. 2025.

LI, X.; YANG, X. A Novel Optimization Approach for Revolutionizing Architectural Design in Chinese Cultural Heritage. HighTech and Innovation Journal, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 151-164, mar. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.28991/hij-2025-06-01-011. Acesso em: 12 abr. 2025.

PESTANA, E.; PAICE, A.; WEST, S. Optimizing MEP design in early AEC projects through generative design. Automation in Construction, [s. l.], v. 165, p. 105, set. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105566. Acesso em: 11 abr. 2025.

RATAJCZAK, J.; SIEGELE, D.; NIEDERWIESER, E. Maximizing Energy Efficiency and Daylight Performance in Office Buildings in BIM through RBFOpt Model-Based Optimization: The GENIUS Project. Buildings, [s. l.], v. 13, n. 7, p. 1790, jul. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/buildings13071790. Acesso em: 10 abr. 2025.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. Revista Brasileira de Fisioterapia, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 83-89, fev. 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s1413-35552007000100013. Acesso em: 9 abr. 2025.

SHEHADEH, A.; ALSHBOUL, O. Enhancing Engineering and Architectural Design Through Virtual Reality and Machine Learning Integration. Buildings, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 328, jan. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/buildings15030328. Acesso em: 13 abr. 2025.

SU, T.; LI, H.; AN, Y. A BIM and machine learning integration framework for automated property valuation. Journal of Building Engineering, [s. l.], v. 44, p. 102636, dez. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102636. Acesso em: 12 abr. 2025.

WU, X. et al. Intelligent optimization framework of near zero energy consumption building performance based on a hybrid machine learning algorithm. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [s. l.], v. 167, p. 112703, out. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112703. Acesso em: 5 jun. 2025.

WU, Z. Application of Artificial Intelligence Technology in Smart Building Integrated Management Platform under Big Data Environment. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, [s. l.], v. 9, n. 1, jan. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.2478/amns-2024-2378. Acesso em: 12 abr. 2025.

ZHANG, F. et al. Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry. Automation in Construction, [s. l.], v. 139, p. 104289, jul. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104289. Acesso em: 13 abr. 2025.

ZHU, Y. et al. Application of hybrid machine learning algorithm in multi-objective optimization of green building energy efficiency. Energy, [s. l.], p. 133581, jan. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133581. Acesso em: 10 abr. 2025.