AUTOMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA ESTIMATIVA DE CUSTOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE TECNOLOGIAS DIGITAIS EMERGENTES

Automation and Optimization of Construction Cost Estimation: A Systematic Review of Emerging Digital Technologies

Ana Dulce de Castro Holanda
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza, Ceará | anadulceholanda@alu.ufc.br

José de Paula Barros Neto
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza, Ceará | jpbarros@ufc.br

RESUMO

Os métodos tradicionais de orçamentação estão sujeitos a imprecisões devido à falta de integração entre as fases do projeto. A aplicação do *Building Information Modeling* (BIM), apesar de difundido na construção civil, ainda enfrenta desafios relacionados à orçamentação, como baixa interoperabilidade entre *softwares* e ausência de padronização. Contudo, abordagens como inteligência artificial, *machine learning* e redes neurais vêm sendo empregadas na previsão de custos na construção, ampliando a capacidade analítica e a precisão das estimativas. Este trabalho propõe uma revisão sistemática da literatura para identificar como a associação dessas tecnologias pode auxiliar na otimização e automação na estimativa de custos na construção civil. A metodologia incluiu a análise de 160 artigos publicados entre 1998 e 2025, que abordaram o uso dessas tecnologias na elaboração de orçamentos e gestão de custos. Os resultados indicaram tendências emergentes, como o uso de modelos híbridos que combinam redes neurais com algoritmos de otimização (como AOA e PSO) e a integração entre BIM e sistemas de *deep learning* para previsão de custos. Este estudo contribui ao sistematizar o estado da arte e apoiar profissionais na adoção de soluções mais precisas, automatizadas e orientadas por dados para orçamento e controle de custos na construção civil.

Palavras-chave: Automação da Estimativa de Custos; Inteligência Artificial na Construção; Building Information Modeling (BIM); Machine Learning.

ABSTRACT

Traditional cost estimation methods are subject to inaccuracies due to the lack of integration between project phases. Although Building Information Modeling (BIM) is widely adopted in the construction industry, it still faces challenges in cost estimation, such as low interoperability between software systems and a lack of standardization. However, approaches such as artificial intelligence, machine learning, and neural networks have been increasingly applied to construction cost forecasting, enhancing analytical capacity and estimation accuracy. This study presents a systematic literature review aimed at identifying how the integration of these technologies can support the optimization and automation of cost estimation in construction. The methodology involved the analysis of 160 articles published between 1998 and 2025, which addressed the use of these technologies in budgeting and cost management. The results revealed emerging trends, such as the use of hybrid models that combine neural networks with optimization algorithms (such as AOA and PSO) and the integration of BIM with deep learning systems for real-time cost prediction. This study contributes by systematizing the state of the art and supporting professionals in adopting more accurate, automated, and data-driven solutions for budgeting and cost control in construction.

Keywords: *Cost Estimation Automation; Artificial Intelligence in Construction; Building Information Modeling (BIM); Machine Learning.*

1 INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO

A estimativa de custos é uma etapa crucial no desenvolvimento de projetos na indústria da construção. Esse processo geralmente integra três atividades principais: 1) classificação de todos os materiais da construção; 2) a quantificação de materiais, equipamentos e mão de obra necessários para a execução dos serviços; e 3) a apropriação dos custos correspondentes (Fazeli *et al.* 2021). A acurácia dos custos pode ser afetada por fatores como o nível de detalhamento dos projetos, o número de premissas adotadas, o prazo de entrega e a experiência dos profissionais envolvidos. Tradicionalmente, esse processo é realizado com base em desenhos bidimensionais (2D) e, mais recentemente, em modelos tridimensionais (3D). No entanto, essas abordagens demandam tempo e recursos elevados, além de estarem sujeitas a erros humanos, devido ao grande volume de cálculos manuais e à subjetividade das interpretações técnicas. Além disso, a atualização de orçamentos diante de alterações de projeto permanece como um desafio relevante para a gestão de custos. Bilge e Yaman (2022) destacam a gestão de custos como bloco central da gestão da construção.

Com o avanço das tecnologias digitais, experimentado pela indústria da construção nos últimos anos, diversas ferramentas vêm sendo incorporadas, com o intuito de mitigar os principais desafios evidenciados pelo setor. Entre essas tecnologias, destaca-se o *building information modeling* (BIM), cuja aplicação, embora consolidada em diversos segmentos na construção civil, ainda enfrenta desafios na orçamentação, como a baixa interoperabilidade estre softwares e a falta de padronização (Fazeli *et al*. 2021). Paralelo a isso, abordagens como inteligência artificial (IA), *machine learning (ML) e,* redes neurais vêm sendo empregadas na previsão de custos na construção, ampliando a capacidade analítica e a precisão das estimativas (Alshboul *et al.,* 2022; Hong *et al*., 2020).

A IA envolve o desenvolvimento de sistemas capazes de aprender e tomar decisões com base em dados, englobando métodos como ML e *deep learning* (Russell e Norvig, 2010). O ML, por sua vez, permite a construção de modelos preditivos a partir de dados históricos, com mínima intervenção humana (Mitchell, 1997). Zabin *et al*. (2022) destacam o uso de ML associado ao BIM para automação de cronogramas, monitoramento de obras, identificação de riscos e estimativas de custo.

As redes neurais artificiais (*artificial neural networks* — ANNs) são uma abordagem do ML que utiliza diversas unidades de processamento trabalhando em conjunto, semelhante ao cérebro humano. Ela é constituída por nós (neurônios artificiais) organizados em camadas. Cada nó processa informações e distribui o resultado para outros nós (Mitchell, 1997). A rede é treinada através de exemplos, ajustando os pesos internos para melhorar as suas previsões (Russell e Norvig, 2010). De modo geral, cada rede neural é composta pela camada de entrada, camadas ocultas (onde ocorre o processamento de dados) e uma camada de saída. Quanto maior é a quantidade de camadas ocultas na rede, maior é a complexidade das relações entre as variáveis, caracterizando o chamado de *deep learning*. Zhang e Mo (2024) exploraram a utilização de redes neurais associadas ao BIM na otimização e previsão de custos na construção de edificações. Hong *et al.* (2020) também utilizaram uma abordagem de rede neural na previsão de custos líquidos, associados à utilização do BIM.

Desta forma, a presente pesquisa teve como objetivo analisar a produção científica sobre a automação e otimização da estimativa de custos na construção civil, por meio de uma revisão da literatura. Especificamente, procurou-se: 1) mapear a produção científica sobre o uso de tecnologias emergentes na automação de custos na construção civil, verificando o perfil de autoria dos trabalhos e obras de maior impacto; 2) identificar as principais tecnologias adotadas no setor e temáticas relacionadas; 3) detectar lacunas na literatura, destacando oportunidades para novos estudos e inovações na área. As pesquisas foram levantadas na base de dados da Scopus, resultando em uma amostra final de 160 trabalhos.

2 MÉTODO DE PESQUISA

A presente pesquisa adotou uma abordagem de Revisão Sistemática da Literatura (RSL) adaptada de Zabin *et al.* (2022), a fim de garantir rigor, transparência e reprodutibilidade na identificação e análise das tecnologias digitais emergentes aplicadas na estimativa de custos na construção civil. Este processo foi dividido em quatro etapas principais: 1) definição do problema de pesquisa; 2) realização de um estudo bibliométrico para identificação dos trabalhos mais relevantes e influentes no tema; 3) resumo e categorização das evidências; e 4) interpretação dos resultados.

2.1 PROBLEMAS DE PESQUISA

Apesar do crescente uso de tecnologias digitais como o BIM, a IA e o ML na construção, a literatura carece de uma visão sistematizada sobre como elas têm sido aplicadas especificamente na automação e otimização da estimativa de custos. Essa lacuna dificulta a identificação de tendências, limitações e oportunidades de integração entre estas tecnologias.

Nesse contexto, as seguintes questões de pesquisa foram estabelecidas para orientar a Revisão Sistemática da Literatura:

- Como as tecnologias digitais emergentes têm sido aplicadas para automação e otimização da estimativa de custos em projetos de construção?

Identificaram-se quais tecnologias foram utilizadas, em quais fases do projeto e quais benefícios foram observados.

- Quais são as principais limitações e lacunas de pesquisa relacionadas ao uso de tecnologias digitais na estimativa de custos da construção civil?

Analisaram-se as restrições e os desafios enfrentados na implementação destas tecnologias e foram propostas direções para as pesquisas futuras.

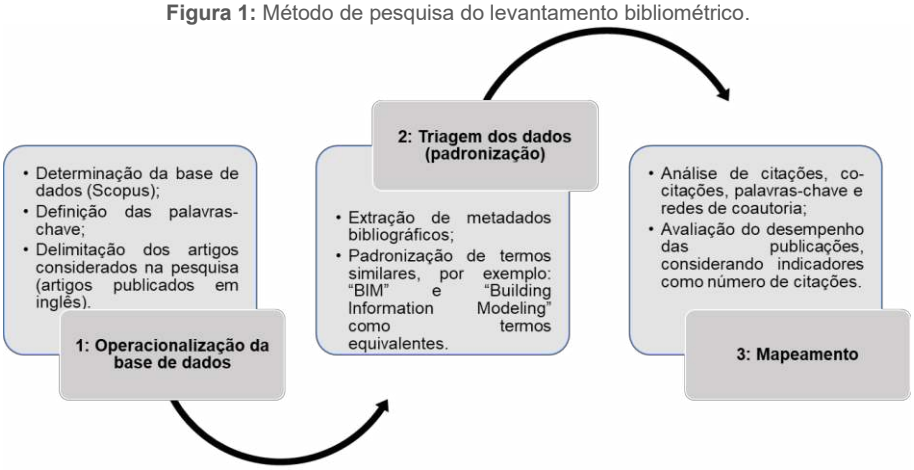
2.2 ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

Inicialmente, definiu-se a base de dados Scopus como fonte principal de pesquisa, em razão de sua ampla cobertura e reconhecimento internacional na comunidade científica. Foram estabelecidas palavras-chave para garantir a intersecção temática entre estimativa de custos, digitalização da construção civil e tecnologias inteligentes, utilizadas na busca por meio da seguinte expressão:

(TITLE-ABS-KEY("cost estimation" OR "construction cost" OR "budgeting" OR "cost planning") AND TITLE-ABS-KEY("automation" OR "optimization" OR "digital technologies" OR "process automation") AND TITLE-ABS-KEY("construction" OR "building industry" OR "AEC industry") AND TITLE-ABS-KEY("BIM" OR "Building Information Modeling" OR "AI" OR "artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning"))

A busca inicial resultou em 310 trabalhos, sem limitação de data de publicação. Após a aplicação dos critérios de refinamento — considerando apenas artigos completos publicados em língua inglesa — foram selecionados 162 trabalhos para a etapa de análise detalhada. A análise identificou a adequação dos trabalhos ao escopo desta pesquisa, sendo examinados os títulos, resumos e palavras-chave de cada publicação. Após essa etapa de validação, a amostra final contou com 160 exemplares para a análise sistemática, abrangendo o período de 1998 a 2025. Posteriormente, os dados foram tratados com o objetivo de padronizar a escrita de elementos como palavras-chave, nomes de autores e países, de modo a evitar duplicações e inconsistências. Foram realizadas correções e unificações de termos equivalentes, por exemplo, "BIM" e "*Building Information Modeling*", que foram considerados como uma única entrada para garantir a precisão da análise bibliométrica. Conforme indicado na Figura 1.

Figura 1: Método de pesquisa do levantamento bibliométrico.



Fonte: dos autores.

As informações bibliográficas descritivas da amostra — como a evolução quantitativa das publicações na área, os principais autores, obras e países — foram organizadas em uma planilha eletrônica para estruturação dos dados. Em seguida, as informações foram analisadas com o auxílio do software VOSviewer© (versão 1.6.20), que possibilitou a construção de mapas de redes, permitindo observar a força das conexões entre os elementos e sua proximidade.

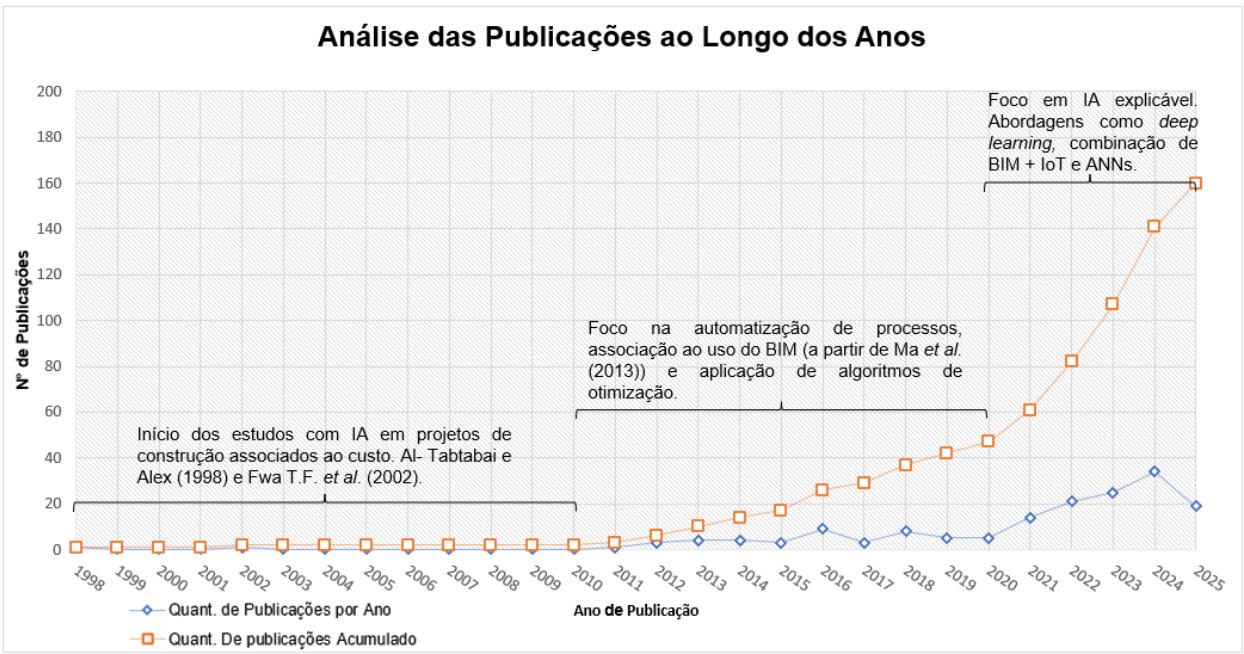
3 RESULTADOS

3.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

3.1.1 Evolução da Produção Científica

Com relação à evolução da produção científica na temática, a Figura 2 evidencia o crescimento contínuo da quantidade de publicações entre 1998 e 2025. Até 2011, apenas duas publicações envolviam a aplicação de tecnologias digitais na otimização de custos na construção, configurando a vanguarda dessa linha de pesquisa. Esse cenário inicial pode ser atribuído à imaturidade tecnológica do período, sendo transformado pela evolução e disseminação de novas ferramentas nos anos seguintes. A partir de 2021, observa-se um expressivo aumento do interesse acadêmico, refletido na duplicação do número de publicações em apenas quatro anos, culminando em um pico de produção em 2024.

Figura 2: Análise da evolução da quantidade de publicação entre os anos de 1998 e 2025



Fonte: dos autores.

Os trabalhos de Al-Tabtabai *e Alex* (1998) e Fwa *et al.* (2002), introduziram o uso de algoritmos genéticos (AGs) para mitigar diferentes problemas de otimização na construção civil. Al-Tabtabai e Alex (1998) focaram na utilização de AGs para a seleção ótima de projetos de construção, identificando as interdependências entre os projetos e suas restrições, com o objetivo de aprimorar as tomadas de decisões financeiras em empresas de construção. Já Fwa T. *et al*. (2002) voltaram-se para a otimização do *design* de projetos de rodovias, considerando fatores como o custo de produção e o atendimento às exigências técnicas.

Entre 2010 e 2020, Ma *et al.* (2013) apresentaram um modelo semi-automatizado de estimativa de custos baseado em dados do modelo IFC, com especificações e extração automatizada de quantitativos. O trabalho foi um dos primeiros a integrar modelagem BIM com algoritmos de otimização voltados à fase de orçamentação. Destaca-se também o trabalho de Lee *et al.* (2014). Os autores propuseram um método baseado em ontologia a fim de automatizar a estimativa de custos de revestimentos cerâmicos em edificações. A abordagem utilizou dados extraídos de modelos BIM e aplicou consultas automáticas via SPARQL, para obtenção das informações necessárias. Já Chen e Tang (2019) voltaram-se para a otimização de cronogramas e custos de manutenção de fachadas, empregando modelos BIM com simulações de cronograma (BIM 4D) e estimativas de custos (BIM 5D), processados através de programação digital em *Web SQL* e *JavaScript*, com suporte de dados extraídos via IFC (*Industry Foundation Classes*).

Nos últimos cinco anos, sublinha-se o estudo de Alshboul *et al.* (2022). Os autores desenvolveram modelos de machine learning (*XGBoost*, DNN e *Random Forest*) para prever os custos de construção de edifícios sustentáveis. Por outro lado, Zhang *et al.* (2021) apresentaram um algoritmo paramétrico gerativo para criar automaticamente projetos de edifícios residenciais urbanos na China.

3.1.2 Países que Mais Contribuíram com a Produção Científica (baseado na afiliação dos autores)

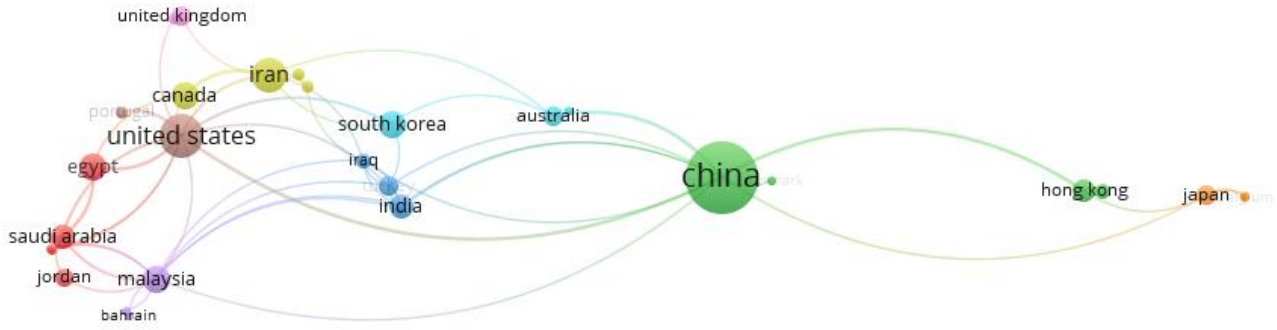
A Tabela 1 apresenta os países com mais de cinco publicações na base de dados analisada, considerando a afiliação dos autores. A China é o país com a maior produção científica em volume, com 60 artigos. Os Estados Unidos, embora com um volume menor (23 publicações), destacam-se por sua rede de colaboração internacional, formando conexões mais amplas com outros países. conforme evidenciado na Figura 3. A Coreia do Sul, por sua vez, mesmo com uma quantidade reduzida de publicações, registra uma elevada quantidade de citações (497), o que indica uma alta relevância e impacto acadêmico de suas contribuições para a área de estudo.

Tabela 1: Análise dos países que mais publicaram (baseado em autores afiliados).

ITEM	PAÍSES	N° DE PUBLICAÇÕES	N° DE CITAÇÕES
1	China	60	843
2	Estados Unidos	23	547
3	Irã	14	348
4	Canadá	9	108
5	Egito	9	65
6	Malásia	9	96
7	Coreia do Sul	9	497
8	Índia	7	30
9	Arábia Saudita	7	122
10	Hong Kong	6	239

Fonte: dos autores

Figura 3: Rede de coautoria de países.

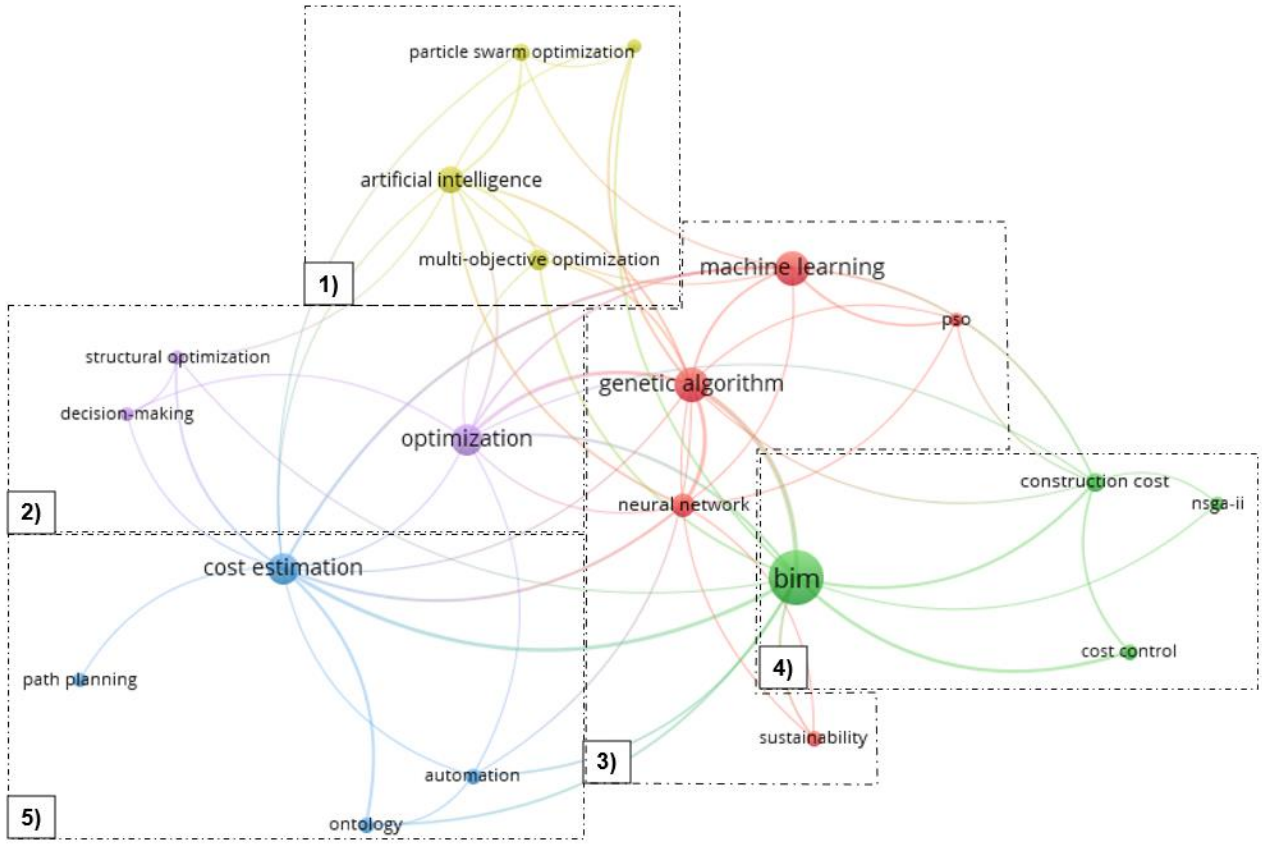


Fonte: dos autores

3.1.3 Análise de Co-ocorrência de Palavras-chave

As principais aplicações foram obtidas da rede de co-ocorrência de palavras-chave. Das 609 palavras, 20 apresentaram 3 ou mais ocorrências, conforme apontado na Figura 4.

Figura 4: Análise de co-ocorrência de palavras-chave



Fonte: dos autores

O mapeamento reforça o papel do BIM como principal expoente na automatização e otimização na gestão de custos da construção civil, representado no Cluster 4. O Cluster 3 aponta as diferentes tecnologias associadas ao uso do BIM, destacando-se *machine learning*, algoritmos genéticos e redes neurais. O Cluster 1 destaca a IA como um conceito-chave, vinculada à otimização de processos e à estimativa de custos por meio de tecnologias digitais. O Cluster 2 agrupa estudos focados em técnicas de otimização e em modelos de apoio à tomada de decisão. Por fim, no Cluster 5, a palavra central é "estimativa de custos", relacionada a ontologia, automação e planejamento de projetos.

3.2 ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS EMERGENTES

A Tabela 2 apresenta as tecnologias mais relevantes, baseadas no número de citações dos artigos publicados nos últimos cinco anos (acima de 40 citações), aplicadas à estimativa de custos na construção civil. Também foram incluídos os estudos de 2024, mais citados, permitindo uma avaliação atual das tecnologias emergentes.

Alshboul *et al*. (2022) pesquisaram a aplicação de algoritmos de *machine learning* (XGBoost, d*eep neural networks - DNN* e *Random Forest).* O estudo focou no desenvolvimento de modelos capazes de estimar com maior precisão os orçamentos de edifícios sustentáveis. A extração automatizada de quantitativos foi objeto de estudo de Gao *et al.* (2022), através de *deep learning;* Fazeli *et al*. (2021), Valinejadshoubi *et al.* (2024) e Wang *et al.* (2024), utilizando o BIM; e Akanbi e Zhang (2021), que integraram técnicas de processamento de *natural language processing* - NLP e BIM.

Zhang *et al.* (2021) utilizaram algoritmos paramétricos na automatização de projetos. Amini *et al.* (2024) combinaram técnicas de *automated machine learning* - AutoML, simulação de Monte Carlo - MCS e métodos de decisão multicritério fuzzy (MCDM) para lidar com a variabilidade *record-to-record* - RTR em registros de movimento sísmico para projetos de estruturas de barragens. O modelo procura otimizar o consumo total de concreto utilizado nesse tipo de estrutura.

Almahameed *et al.* (2024) investigaram o uso de diversos algoritmos de machine learning e integração com *particle swarm optimization* - PSO para modelagem preditiva e otimização de custos em projetos de construção. Abo Mhady *et al.* (2024) propuseram um modelo híbrido que integra *artificial neural networks* – ANN, *adaptive neuro-fuzzy inference systems* – ANFIS e o *archimedes optimization algorithm* – AOA, (AOA-ANN e AOA-ANFIS). As ANN foram utilizadas para modelagem preditiva da Estimativa de Conclusão (*Estimate at Completion* – EAC), enquanto o ANFIS combinou a capacidade de aprendizado das redes neurais com a lógica fuzzy, permitindo lidar com dados não lineares de forma mais interpretável. Já o AOA foi empregado para otimizar a seleção dos atributos, identificando as variáveis que mais impactam no custo final dos projetos de construção.

Tabela 2: Tecnologias Recentes adotadas na gestão de custos

TECNOLOGIA	APLICAÇÃO PRINCIPAL	REFERÊNCIA(S)	Nº DE CITAÇÕES
XGBoost, DNN, Random Forest	Previsão de custos edifícios sustentáveis	Alshboul *et al*. (2022)	84
Algoritmo paramétrico	Projeto automatizado de residenciais	Zhang *et al.* (2021)	81
Deep learning	Extração automatizada de quantitativos	Gao *et al.* (2022)	63
NLP + BIM	Extração automatizada de dados de projeto	Akanbi e Zhang (2021)	46
BIM	Automação de quantitativos e sistemas inteligentes	Fazeli *et al*. (2021); Valinejadshoubi *et al.* (2024); Wang *et al*. (2024)	45 11 11
AutoML + MCDM + Simulação	Otimização de projetos estruturais	Amini *et al*. (2024)	20
ML + PSO	Modelagem preditiva e otimização	Almahameed *et al.* (2024)	16
ANN + ANFIS + AOA	Previsão de custos finais (EAC)	Abo Mhady *et al.* (2024)	5

Fonte: dos autores

4 DISCUSSÕES

A evolução temporal da produção científica revela 3 fases distintas sobre a maturação do campo ao longo do tempo. Inicialmente, entre os anos de 1998 e 2010, destacam-se aplicações isoladas de algoritmos de otimização, voltadas para problemas pontuais de obra e com baixa integração entre ferramentas. Na segunda etapa o BIM passa a ser incorporado às estimativas de custo, viabilizando a automação dos processos com dados oriundos de modelos digitais, como observado nos trabalhos de Ma *et al*., 2013, Lee *et al.,* 2014 e Chen e Tang, 2019. Nos últimos anos, o uso de *machine learning* e redes neurais passa a ser explorado em conjunto com o BIM, promovendo ganhos de acurácia, escalabilidade e capacidade preditiva (Zhang e Mo, 2024; Alshboul *et al.,* 2022; Hong *et al*., 2020).

A análise de co-ocorrência de palavras-chave (Figura 4) evidencia 5 eixos principais que estruturam a produção científica sobre a temática. O BIM, presente no cluster 4, é destacado como o principal termo de integração entre diferentes abordagens, frequentemente associado com *cost control, sustainability* e *construction cost*, refletindo seu papel central na digitalização da gestão de custos (Zhang *et al*., 2022; Fazeli

et al., 2021). No entanto, o avanço recente está associado principalmente à incorporação de técnicas de inteligência artificial, como o *machine learning,* redes neurais e algoritmos genéticos (Zhang e Mo, 2024; Alshboul *et al.,* 2022; Hong *et al.*, 2020). Nota-se ainda a coexistência entre abordagens clássicas de otimização e métodos emergentes baseados em IA, sugerindo que, embora as novas abordagens estejam em expansão, elas ainda são complementadas por práticas consolidadas de tomada de decisão (Amini *et al*., 2024; Ma *et al.,* 2013). Por fim, termos como *ontology* e *automation* associados à estimativa de custos, refletem a preocupação com a padronização dos processos, desafio ainda relevante (Lee *et al.,* 2014; Chen e Tang, 2019).

Os modelos de *machine learning* destacados na Tabela 2 (*XGBoost, Random Forest, DNN,* AutoML e MCDM), permitem prever custos com maior precisão, ao analisar padrões complexos a partir de dados históricos, minimizando erros comuns nas estimativas tradicionais. Enquanto técnicas como ANN, ANFIS e AOA, ajudam a refinar a previsão de custos ao longo da execução do projeto. A utilização do BIM automatiza a extração de quantitativos e agiliza a simulação de custos, aumentando a eficiência e reduzindo o retrabalho.

O principal desafio, para modelos híbridos como os estudados por Abo Mhady *et al.* (2024), Amini *et al*., (2024) e Akanbi e Zhang, (2021), refere-se à baixa interpretabilidade dos modelos, dificultando a compreensão sobre como cada variável influencia a previsão final de custo. Além disso, existe a necessidade de grandes bases de dados, uma vez que conjuntos de dados reduzidos podem aumentar o risco de *overfiting,* comprometendo a capacidade de generalização dos modelos. A eficiência do AOA e dos modelos híbridos também depende fortemente da correta escolha dos hiperparâmetros e da configuração do processo de treinamento.

5 CONCLUSÕES

Este artigo realizou uma revisão da literatura combinada com uma análise bibliométrica, com o objetivo de mapear e compreender o uso de tecnologias emergentes na gestão de custos e orçamentação na construção civil. Para tal, foram analisadas 160 publicações em inglês de 1998 a 2025. O estudo identificou um aumento significativo no número de artigos científicos publicados nos últimos 5 anos, evidenciando o interesse científico pela temática e corroborando com a digitalização da construção civil.

As questões e objetivos da pesquisa foram atendidos. A principal contribuição deste trabalho reside na identificação das principais tecnologias mais adotadas para aprimorar o controle e a previsão de custos. Com base nos resultados, foi possível identificar que o BIM associado a técnicas de *machine learning* foram as mais exploradas, concordando com os resultados obtidos por Zabin *et al.* (2022). Dentre as técnicas de ML, dá-se destaque para as redes neurais artificiais (ANN e DNN), associadas a algoritmos de otimização, como o AOA, o PSO e técnicas interpretativas como o SHAP. Estas abordagens têm se mostrado promissoras, permitindo análises mais robustas e automatizadas.

Além disso, este artigo contribui ainda com a identificação das limitações da aplicação destas tecnologias. Os desafios incluem (1) a qualidade e consistência dos dados de entrada, especialmente aqueles extraídos dos modelos BIM; (2) a necessidade de grandes volumes de dados, a fim de evitar *overfitting*, garantindo a generalização; (3) complexidade computacional e difícil adoção por empresas de engenharia; e (4) a baixa interpretabilidade de técnicas baseadas em redes neurais, dificultando a compreensão sobre a influência individual das variáveis nos custos finais.

Entre as limitações deste estudo, destaca-se a adoção exclusiva da base Scopus e do idioma inglês, podendo ocultar aplicações e estudos na área. Em pesquisas futuras poderão ser exploradas outras bases como a *Web of Science*, além de aprofundar a categorização das tecnologias por fases do ciclo de vida de projetos, possibilitando uma visão mais refinada das suas aplicações e desafios.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro e institucional que possibilitou a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

ABO MHADY, Mohammed; SHEHAB, Mohamed; YUN, Gi Hwan; WEN, Hongyu. Estimate-at-completion (EAC) prediction using Archimedes optimization with adaptive fuzzy and neural networks. **Automation in Construction**, [s.l.], v. 160, 105653, 2024. ISSN 0926-5805. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580524000636. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105653.

AKANBI, Temitope; ZHANG, Jiansong. Design information extraction from construction specifications to support cost estimation**. Automation in Construction,** [s.l.], v. 131, p. 103835, nov. 2021. ISSN 0926-5805. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580521002867. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103835

ALMAHAMEED, Bader; BISHARAH, Majdi. Applying machine learning and particle swarm optimization for predictive modeling and cost optimization in construction project management. **Asian Journal of Civil Engineering**, [s.l.], v. 17, n. 2, p. 1281–1294, 2023. ISSN 1563-0854. doi:https://doi.org/10.1007/s42107-023-00843-7

ALSHBOUL, Ahmad; AL-BAIATY, Ammar; ELHAG, Tamer; ELOMARI, Ibrahim. Extreme Gradient Boosting-Based Machine Learning Approach for Green Building Cost Prediction. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 13, p. 6651, 2022. ISSN 2071-1050. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/360970797_Extreme_Gradient_Boosting-Based_Machine_Learning_Approach_for_Green_Building_Cost_Prediction. Acesso em: 27 abr. 2025. doi:10.3390/su14116651.

AL-TABTABAI, Hashem; ALEX, P. An evolutionary approach to the capital budgeting of construction projects. **Cost Engineering**, Morgantown, West Virginia, v. 40, n. 10, p. 28–34, 1998. ISSN 0274-9696. Disponível em: https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0032179802&origin=inward&txGid=4f2e4947ee3694d7381656bfb854e2f3. Acesso em: 27 abr. 2025.

AMINI, Ali; ABDOLLAHI, Azam; HARIRI-ARDEBILI, Mohammad Amin. An automated machine-learning-assisted stochastic-fuzzy multi-criteria decision making tool: Addressing record-to-record variability in seismic design**. Structural Safety**, [S.l.], v. 106, p. 102636, 2024. ISSN 0167-4730. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494624001285. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111354.

BILGE, Eymen Çağatay; YAMAN, Hakan. Research trends analysis using text mining in construction management: 2000–2020. **Engineering, Construction and Architectural Management**, Bradford, v. 29, n. 8, p. 3210–3233, 2021. ISSN 0969-9988. Disponível em: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ECAM-02-2021-0107/full/html. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2021-0107.

CHEN, Chao; TANG, Liyin. BIM-based integrated management workflow design for schedule and cost planning of building fabric maintenance. **Automation in Construction**, v. 97, p. 88–103, 2019. ISSN 0926-5805. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102944.

FAZELI, Abdulwahed; DASHTI, Mohammad Saleh; JALAEI, Farzad; KHANZADI, Mostafa. An integrated BIM-based approach for cost estimation in construction projects. **Engineering, Construction and Architectural Management,** Vol. 28 No. 9, pp. 2828-2854. Disponível em: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ECAM-01-2020-0027/full/html. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2020-0027.

FWA, T. F.; CHAN, W. T.; SIM, Y. P. Optimal vertical alignment analysis for highway design. **Journal of Transportation Engineering**, [s.l.], v. 128, n. 5, p. 395–402, 2002. ISSN 0733-947X. Disponível em: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:5(395). Acesso em: 27 abr. 2025.

GAO, Tianci; LI, Zihan; GAO, Yan; SCHONFELD, Paul; FENG, Xiaoyun; WANG, Qingyuan; HE, Qing. A deep reinforcement learning approach to mountain railway alignment optimization**. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, [s.l.], v. 37, n. 1, p. 73–92, 2021. ISSN 1093-9687. https://doi.org/10.1111/mice.12694.

HONG, Ying; HAMMAD, Ahmed; AKBARNEZHAD, Ali; ARASHPOUR, Mehrdad. A neural network approach to predicting the net costs associated with BIM adoption. **Automation in Construction**, [s.l.], v. 119, 103306, 2020. ISSN 0926-5805. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519314554. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103306.

LEE, Seul-Ki; KIM, Ka-Ram; YU, Jung-Ho. BIM and ontology-based approach for building cost estimation. **Automation in Construction**, v. 41, p. 96–105, 2014. ISSN 0926-5805. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658051300188X. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.020.

MA, Zhiliang; WEI, Zhenhua; ZHANG, Xiude. Semi-automatic and specification-compliant cost estimation for tendering of building projects based on IFC data of design model. **Automation in Construction**, [s.l.], v. 30, p. 126–135, 2013. ISSN 0926-5805. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580512002154. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.020.

MITCHELL, Tom M. **Machine Learning**. New York: McGraw-Hill, 1997. ISBN 978-0070428072. Disponível em: https://www.cs.cmu.edu/~tom/mlbook.html. Acesso em: 27 abr. 2025.

RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. **Artificial Intelligence: A Modern Approach.** 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010. ISBN 978-0136042594. Disponível em: https://aima.cs.berkeley.edu. Acesso em: 27 abr. 2025.

VALINEJADSHOUBI, Mojtaba; MOSELHI, Osama; IORDANOVA, Ivanka; VALDIVIESO, Fernando; BAGCHI, Ashutosh. Automated system for high-accuracy quantity takeoff using BIM. **Automation in Construction**, [s.l.], v. 157, p. 105155, 2024. ISSN 0926-5805. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580523004156. Acesso em: 1 jul. 2025. doi:https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105155

WANG, Yonghao; LU, Hailu; WANG, Yao; YANG, Zhenqin; WANG, Qingshan; ZHANG, Hao. A hybrid building information modeling and collaboration platform for automation system in smart construction. **Ain Shams Engineering Journal**, [s.l.], v. 15, n. 4, 101530, 2024. ISSN 2090-4479. doi:https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.01.013.

ZABIN, Asem; GONZÁLEZ, Vicente A.; ZOU, Yang; AMOR, Robert. Applications of machine learning to BIM: A systematic literature review. **Advanced Engineering Informatics**, [s.l.], v. 51, 101474, 2022. ISSN 1474-0346. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147403462100224X. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101474.

ZHANG, Fan; CHAN, Albert; DARKO, Amos; CHEN, Zhengyi; LI, Dezhi. Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry. **Automation in Construction**, [s.l.], v. 139, 104289, 2022. ISSN 0926-5805. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522001625. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104289.

ZHANG, Jingyu; LIU, Nianxiong; WANG, Shanshan. Generative design and performance optimization of residential buildings based on parametric algorithm. **Energy and Buildings**, v. 244, p. 111033, 2021. ISSN 0378-7788. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111033. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111033.

ZHANG, Yanfen; MO, Haijun. Intelligent building construction cost optimization and prediction by integrating BIM and Elman neural network**. Heliyon**, [s.l.], v. 10, n. 4, e37525, 2024. ISSN 2405-8440. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024135566. Acesso em: 27 abr. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37525.