ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

# Otimização na montagem de obras com pré-fabricados de concreto em BIM e IA: revisão sistemática

## Optimization in the Assembly of Precast Concrete Construction Projects Using BIM and AI: Systematic Review

**Luiz Velloso de Andrade Junior**
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv) | Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) | São Carlos, SP | Brasil | lvajunior@estudante.ufscar.br
**Sheyla Mara Baptista Serra**
PPGECiv/UFSCar | São Carlos, SP | Brasil | sheylabs@ufscar.br
**Marcelo de Araujo Ferreira**
PPGECiv/UFSCar | São Carlos, SP | Brasil | marcelof@ufscar.br

### Resumo

O processo de otimização pode ser aplicado na indústria da construção por meio da Inteligência Artificial (IA) e do *Building Information Modelling* (BIM) com o propósito de apoiar a tomada de decisões técnicas e gerenciais. O processo de otimização pode ser considerado como o ato de encontrar as variáveis, ou condições que fornecem o valor mínimo ou máximo de uma determinada função ou conjunto de funções, necessários para minimizar custos e/ou maximizar benefícios. Os projetos de construção de elementos pré-fabricados envolvem várias variáveis que precisam ser consideradas, especialmente durante os serviços de montagem em canteiros de obras. O objetivo é identificar e analisar os métodos de otimização por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). A metodologia adotada tem como base uma revisão bibliográfica, promovendo a compreensão das abordagens na aplicação da IA e do BIM. Obtém-se como principais resultados, a identificação e análise de métodos de otimização, a serem aplicados no tema em estudo. A contribuição deste estudo apresentada por intermédio da IA, BIM e pela pesquisa operacional, com a utilização de métodos matemáticos e algoritmos computacionais, contribuem para a tomada de decisões.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Otimização; Planejamento; *Building Information Modelling*; Elementos Pré-fabricados de concreto.

### Abstract

The optimization process through the application of Artificial Intelligence (AI) and Building Information Modeling (BIM) is important in construction industry in technical decision-making, for assembly services on construction sites. The optimization process can be considered as the act of finding the variables, or conditions that provide the minimum or maximum value of a

Como citar:
ANDRADE JUNIOR, L. V.; SERRA, S. M. B.; FERREIRA, M. A. Otimização na montagem de obras com pré-fabricados de concreto em BIM e IA: revisão sistemática. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

given function or set of functions, necessary to minimize costs and/or maximize benefits. The objective is to identify and analyze optimization methods through a Systematic Literature Review (SLR). The methodology is based on a bibliographical review, promoting understanding of technical approaches in the application of AI and BIM. The main results are the identification and analysis of optimization methods to be applied to the topic under study. The contribution of this study presented through AI, BIM, and operational research, with the use of mathematical methods and computational algorithms, contribute to decision making.

*Keywords: Artificial Intelligence; Optimization; Planning; Building Information Modelling; Prefabricated Concrete.*

## INTRODUÇÃO

A inteligência artificial (IA) e o *Building Information Modelling* (BIM) apresentam papel importante na otimização de processos para aprimorar a eficiência e a segurança, na montagem das obras com elementos pré-fabricados de concreto, nos aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais, influenciando na redução de custos, prazos, desperdícios, riscos; e no aumento da produtividade e qualidade.

A IA é uma área da ciência da computação, que tem como objetivo criar mecanismos e/ou máquinas tecnológicas que tenham a competência de realizar atividades humanas, como a capacidade de raciocinar, perceber, compreender a linguagem, aprender, ver, ouvir e efetuar atividades das mais diversas efetuadas por humanos [1].

A IA pode ser definida, como uma simulação computacional da capacidade humana de raciocinar e resolver problema [2]. O algoritmo é todo e qualquer procedimento capaz de solucionar um dado problema, por meio de passos previamente elaborados, e otimizar, significar e aperfeiçoar algum processo [3].

Os autores [4] foram os pioneiros em introduzir o BIM no desenvolvimento de projetos de construção utilizando métodos de otimização.

A utilização de técnicas de otimização facilita a tomada de decisão em problemas complexos nos diferentes segmentos de projetos de engenharia [5]. Para facilitar esse processo, pode ser utilizada a pesquisa operacional que consiste na utilização de métodos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais para ajudar na tomada de decisões [6].

A abordagem de um problema de otimização envolve a consideração do modelo de análise do sistema, o algoritmo e o modelo de otimização [6]. De uma maneira geral, a otimização de um projeto envolve: a seleção de um conjunto de variáveis para descrever as alternativas de projeto; a seleção de um ou mais objetivos expressos em termos das variáveis de projetos, para minimizar ou maximizar; a determinação de um outro conjunto de variáveis que devem ser satisfeitas por qualquer projeto aceitável; e a determinação de um conjunto de valores para as variáveis de projeto, que minimizam ou maximizam o objetivo, enquanto satisfazem todas as restrições [7].

Os problemas são associados à otimização de problemas não lineares com restrições, sendo resolvidos por algoritmos, sendo baseados a partir de uma solução inicial ou de uma população de soluções, no caso dos métodos bioinspirados que geram uma sequência de soluções de projeto melhoradas [7].

A otimização pode ser definida como estabelecimento racional de um projeto que é o melhor dentro de todos dos projetos possíveis de acordo com um ou mais objetivos predefinidos e obedecendo um conjunto previsto de restrições geométricas e/ou restrições relacionadas com o comportamento e a integridade dos sistemas em engenharia, restrições tecnológicas etc. [7].

Com relação ao estudo da otimização na montagem de obras com pré-fabricados de concreto, a elaboração do projeto de montagem dos elementos pré-fabricados é importante para permitir a análise dos requisitos, objetivos e restrições a serem consideradas na otimização de processos, pois são analisados o planejamento de montagem, carga e descarga, montagem, tolerância relativa à montagem, ferramentas, gestão de montagem e qualidade [8].

## ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS

Neste artigo foram considerados, o estudo de otimização na montagem de obras com pré-fabricados de concreto. As ligações em estruturas pré-fabricadas, devem atender a diferentes critérios de projeto e desempenho, relacionados com o comportamento estrutural, tolerâncias dimensionais, resistência a fogo, durabilidade, manutenção, facilidade de manuseio e montagem [9].

O projeto de sistemas construtivos em concreto pré-fabricado está relacionado com os processos de fabricação e montagem, integrando tecnologias de materiais, elementos e componentes (ligações) necessários para a composição dos sistemas estruturais pré-fabricados em concreto armado ou protendido, considerando tanto as etapas transitórias quanto as definitivas. A qualidade do projeto deve atender às exigências de desempenho considerando o comportamento em uso, quando submetido às condições de exposição [10].

Considera-se algumas etapas a esse método construtivo como: execução da produção, locação das alças de içamento, transporte, armazenamento e montagem dos elementos pré-fabricados. Quanto ao transporte, os elementos pré-fabricados podem ser suspensos, e movimentados por intermédio de máquinas, equipamentos e acessórios apropriados em ponto de suspensão localizados nos elementos pré-fabricados, definidos em projeto, evitando choques e movimentos abruptos [11].

Os serviços de montagem devem ser objeto de um planejamento detalhado, na qual devem ser definidos os equipamentos a serem utilizados, a sequência de montagem dos elementos, verificando se as condições de acesso do equipamento, no local da montagem. A seleção do sistema de transporte, baseia-se nas quantidades a serem transportadas e nas características dos equipamentos disponíveis, quanto à capacidade, velocidade, confiabilidade e custo. Para a definição do planejamento de montagem deve-se observar a execução do Plano de *Rigging*, ou seja, consiste em elaborar um projeto de montagem dos elementos pré-fabricados, considerando a planta de locação do local de montagem, e o correto posicionamento do guindaste durante a operação de montagem [8].

## MÉTODO DE PESQUISA

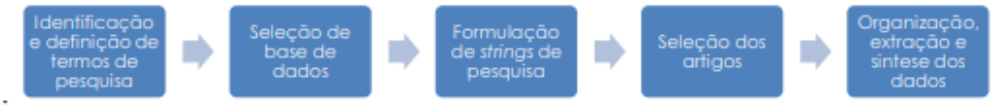
Como ferramenta instrumental para o processo de realização da pesquisa proposta, foi utilizado o software *StArt (State Of the Art through Systematic Review)* [12].

A pesquisa que tem como objetivo reunir o máximo de informações disponíveis sobre uma determinada área de conhecimento [13]. Estuda a organização dos setores científicos e tecnológicos a partir de fontes bibliográficas e patentes para identificar os atores, suas relações, o crescimento e tendências de conhecimento em uma área [14].

A contribuição científica relevante neste processo de pesquisa é que sua aplicação possibilita identificar as lacunas de conhecimento para refino e lapidação da questão de pesquisa de um pesquisador [15]. É um processo caracterizado como "Baseado em Evidências" (*Evidence-based*) com a coleta de informações (evidências) que comprovem, justifiquem, complementem e embasem em desenvolvimento [16].

Considera-se a estrutura metodológica proposta por [17], conforme a Figura 1.

**Figura 1: Etapas da pesquisa**




Fonte: Adaptado de (RUIZ, GRANJA, 2013)

### IDENTIFICAÇÃO E DEFINIÇÃO DOS TERMOS DE PESQUISA

Os termos da pesquisa utilizados referem-se as palavras chaves: otimização (*optimization*), modelos de informação da construção (*building information modelling*), inteligência artificial (*intelligence artificial*), algorítmos (*algorithms*), elementos pré-fabricados (*prefabricated elements*), montagem (*assembly*), edifícios pré-fabricados (*prefabricated buildings*).

### SELEÇÃO DE BASE DE DADOS

As bases de dados escolhidas para a pesquisa foram: *Engineering Village, Scopus, Web of Science, e Science Direct* por apresentarem reportórios relacionados com a área de conhecimento em engenharias. Foi selecionado o período de busca considerando o período de 2018 a 2024.

### ELABORAÇÃO DAS STRINGS DE PESQUISA

Várias abordagens podem ser utilizadas para a definição da *string* de busca como: consultar especialistas, e identificar os termos a partir de artigos conhecidos [18]. É importante, que os termos da *string* de busca devam estar alinhados ao objetivo e às questões de pesquisa. As *strings* de pesquisa elaboradas para este trabalho são apresentadas no Quadro 1.

**Quadro 1: *Strings* utilizadas na pesquisa**

| **BaseS de dados** | ***Strings*** |
|---|---|

| | |
|---|---|
| ***Web of Science*** | (optimization and planning) AND (building information) AND (Intelligence artificial and algorithms) OR (assembly prefabricated elements) AND (prefabricated buildings) |
| ***Engineering Village*** | (((((optimization and planning) and (building information modelling) and (intelligence artificial and algorithms) or (assembly prefabricated elements) and ( prefabricated buildings)) WN ALL)) AND ((({precast concrete} OR {artificial intelligence} OR {decision making} OR {construction} OR {concrete construction} OR {genetic algorithms} OR {learning algorithms} OR {buildings} OR {optimization} OR {concrete buildings} OR {deep learning} OR {ant colony optimization} OR {intelligent buildings} OR {machine learning}) WN CV) AND ({ja} WN DT) AND ({all} WN ACT))) |
| ***Scopus*** | {[(“optimization and planning”) OR (“building information modelling”) OR (“intelligence artificial and algorithms”)] AND [(“assembly of prefabricated elements”) OR (” prefabricated buildings”)]} |
| ***Science Direct*** | (optimization and planning) AND (building information) AND (Intelligence artificial and algorithms) OR (assembly prefabricated elements) AND (prefabricated buildings) |

Fonte: os autores.

### SELEÇÃO DOS PERIÓDICOS

Os critérios de seleção empregados nos artigos foram a leitura do título, as palavras-chave e resumo, a fim de eliminar aqueles que os teores não fossem relevantes a pesquisa. Com as *strings* e as estratégias de busca bem definidas, as buscas pelos artigos foram iniciadas.

No intuito de filtrar artigos que são úteis, definiu-se alguns critérios de seleção de inclusão e exclusão. Portanto, os critérios de inclusão definem as características a serem consideradas, e os critérios de exclusão, excluem os estudos que não pertencem ao contexto em estudo.

## RESULTADOS

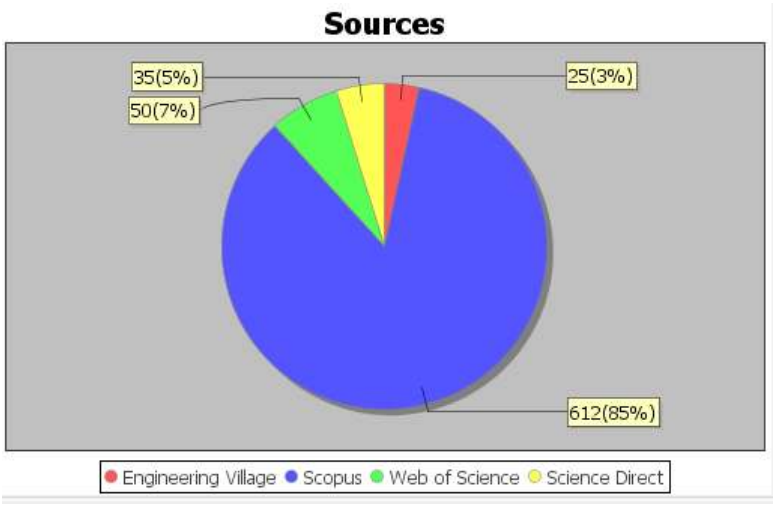
### IDENTIFICAÇÃO DOS TRABALHOS

No Gráfico 1, observa-se que foram identificados 789 trabalhos, resultantes da combinação das quatro *strings*, identificadas por local de busca, nas bases de dados.

Como resultado na análise em estudo, foram considerados 56 artigos como aceitos. Na última etapa de sumarização, selecionou-se 32 artigos, após a análise dos títulos e a leitura dos resumos apresentados. O resultado do Protocolo Prisma dessa pesquisa pode ser observado na Figura 2.

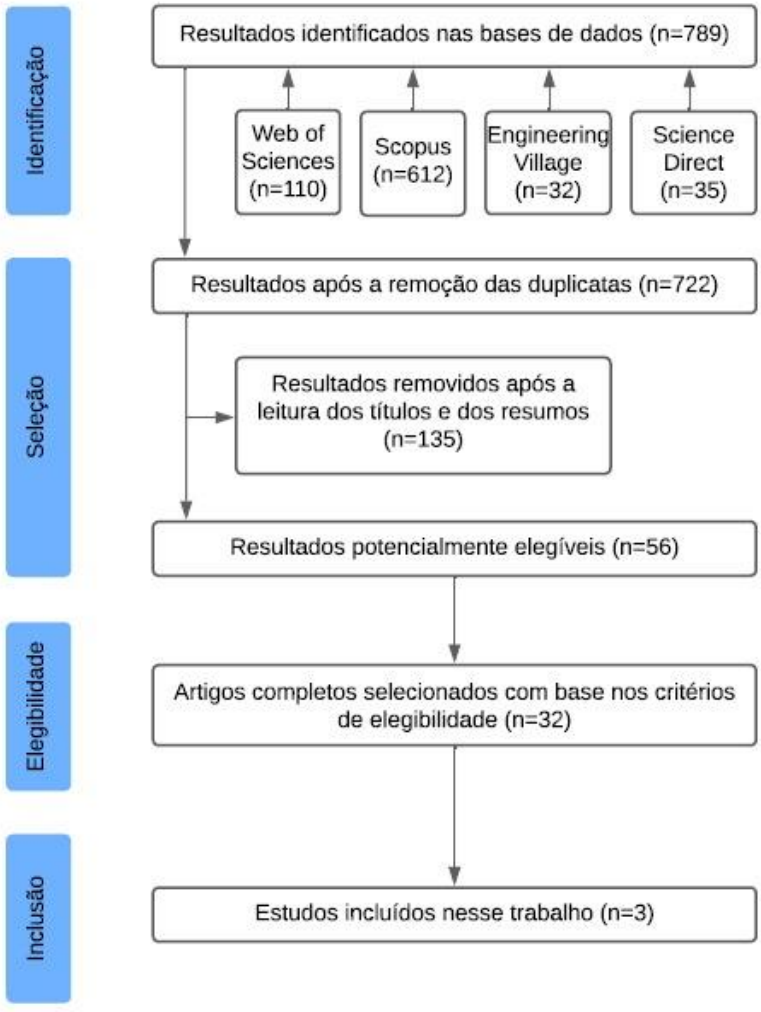
O Quadro 2, apresenta 13 (treze) artigos considerados mais relevantes sobre a pesquisa, com a identificação dos algoritmos de otimização.

**Gráfico 1: Quantitativo de trabalhos por bases de dados**




Fonte: os autores.

**Figura 2: Protocolo do Prisma**




Fonte: os autores

**Quadro 2: Artigos mais relevantes sobre a pesquisa**

| Data | Título | Autor(es) | Periódico | Algoritmo | Análise sucinta do artigo |
|---|---|---|---|---|---|
| 2024 | Simulation-based metaheuristic optimization algorithm for material handing | Saavedra Seueldo, C., Perez Colo, I., De Paula, M. *et al* [19] | Journal of Intelligent Manufacturing | Algoritmo Seno Cosseno | Otimização baseada em simulação metaheurística para resolver o problema de materiais em ambientes dinâmicos |
| 2024 | Automated prefabricated slab splitting design using a multipopulation coevolutionary algorithm and BIM | Xu, C.; Zheng, X.; Wu, Z.; Zhang, C [20] | Journal Buildings | Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO) | Modelo de otimização para minimizar os custos compostos de fabricação e montagem, com laje mista pré-fabricada, baseadas em BIM |
| 2023 | Generating BIM model from structural and architectural plans using artificial intelligence | Martin Urbieta, Matias Urbieta, Tomas Laborde, Guillermo Villareal, Gustavo Rossi [21] | Journal of Building Engineering | Algoritmo Mask R-CNN | Abordagem para gerar modelos BIM baseados em algorítmos IA por meio da análise de projetos arquitetônicos e estruturais |
| 2023 | An improved multi-objective optimization and decision-making method on construction sites layout of prefabricated buildings | Yao, G.; Li, R.; Yang, Y. [22] | Sustainability International Journal of Industrial and Systems Engineering | Algoritmo Genético (GA) - MPC -NSGA-II | Otimização multi-objetivo e tomada de decisão no layout de canteiros de obras de edifícios pré-fabricados |
| 2023 | Application of computer vision in optimal design of assembled buildings | Ding, Y; Song. K; Liu, X *et al* [23] | Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction | Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO) | Otimização de energia de forma dos componentes pré-fabricados com a sua segurança e confiabilidade |
| 2023 | Collaborative planning for stacking and installation of prefabricated building components regarding crane-collision avoidance | Wenyu Zhang, Hong Zhang, Lu Yu [24] | Journal of Construction Engineering and Management | Algoritmo de Enxame de Partículas Binárias (PSO) | Planejamento para empilhamento no local dos componentes de construção pré-fabricados para evitar colisão com guindastes, para minimizar o tempo de construção |
| 2023 | Application of BIM technology on the design and construction of prefabricated buildings | Yuhang Liu [25] | International Conference on Functional Materials and Civil Engineering | Modelos digitais | Aplicação da tecnologia BIM na otimização de projeto e construção de edifícios pré-fabricados, na construção, gestão do local e qualidade |

| Data | Título | Autor(es) | Periódico | Algoritmo | Análise sucinta do artigo |
|---|---|---|---|---|---|
| 2022 | Optimization of the stacking plans for precast concrete slab based on assembly sequence | Zou, Y.; Gao, Q.; Wang, S. [26] | Journal Buildings | Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO) | Otimização dos planos de empilhamento de lajes pré-moldadas de concreto baseado na sequência de montagem, na utilização do espaço do pátio e no transporte |
| 2022 | Automated route planning for construction site utilizing building information Modeling | Ankan Karmakar, Abhishek Raj Singh, Venkata Santosh Kumar Delhi [27] | Journal of information Technology in Construction | Algoritmo de Dijkstra | Otimização de rotas veículos de construção no layout do canteiro de obras, com a integração de BIM |
| 2022 | Building a genetic algorithm-based and BIM-based 5D time and cost optimization model | Majed Alzara, Yehia Abdelhamid Attia, Sameh Youssef Mahfouz, Ahmed M. Yosri, A. Ehab [28] | IEEE *Access* | Algoritmo Genético (GA) | Otimização no modelo BIM 5D, com IA para minimizar custos e prazos, para avaliar a evolução do projeto |
| 2021 | A BIM-based approach to automated prefabricated building construction site layout planning | Bin Yand, Tengwei Fang, Xiaoqun Luo, Boda Lio, Miaosi Dong [29] | KSCE Journal of Civil Engineering | Algoritmo Genético (GA) / Enxame de Partículas (PSO) | Otimização baseada em BIM para planejamento de layout de canteiro de obras, para redução de custos e prazos de obras pré-fabricadas |
| 2018 | Dynamic construction material layout planning optimization model by integrating 4D BIM | Cheng, MEU.; Chang, NW [30] | Engineering with Computers | Algoritmo Genético (GA) / Algoritmos Rede Neurais Artificiais | Otimização baseada em BIM para layout de alocação de materiais de construção do canteiro de obras |
| 2018 | Design for manufacture and assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings | Zhenmin Yuan, Chengshuang Sun, Yaowu Wang [31] | Journal Automation in Construction | Algorithms Machine Learning / Large Language Models (LLM) | Otimização do projeto paramétrico BIM orientado ao DfMA para fabricação e montagem de edifícios pré-fabricados |

Fonte: os autores.

## ANÁLISE DE RESULTADOS

Nessa seção são apresentadas as principais análises de resultados dos estudos identificados pelos artigos de maior relevância, relacionados com IA, BIM e PO (pesquisa operacional), com a identificação de métodos matemáticos e algoritmos computacionais, para análise e tomada de decisões, para a otimização na montagem de obras com pré-fabricados de concreto, pelos autores sendo:

Apresenta-se um método aprimorado de otimização multiobjetivo e tomada de decisão no layout de canteiros de obras de edifícios pré-fabricados. Foi observado no artigo *An Improved Multi-Objective Optimization and Decision-Makuing Method on Construction Sites Layout of Prefabricated Buildings* algoritmos genéticos que possuem capacidades de pesquisa global e podem resolver rapidamente problemas não lineares complexos. O algoritmo genético de classificação não dominado (MPC-NSGA-II algorithm) propõe um critério de classificação não dominado baseado no algoritmo genético clássico. Edifícios pré-fabricados requerem recursos adequados para vários materiais, equipamentos de içamento, pois componentes pré-fabricados ocupam grande espaço nos canteiros de obras [22].

O planejamento de rotas de veículos de construção constitui um componente significativo do layout do canteiro de obras (*site layout planning*). Foi observado no artigo *Automated Route Planning for Construction Site Utilizing BIM*, que a indústria da construção não possui um método padrão de planejamento de rotas de veículos, resultando em situações caóticas em sites. Propõe-se uma integração de técnicas de otimização com *Building Modelagem de Informação* (BIM) para gerar rotas viáveis levando em conta a natureza dinâmica da construção projetos. O módulo de otimização funciona com base no algoritmo de caminho mais curto de Dijkstra para resolver o problema multiobjetivo de distância viável versus conflito mínimo e distância viável versus evitar estradas altamente povoadas no site [27].

A integração do BIM com a tecnologia de IA pode oferecer inúmeras oportunidades para construir e projetar. Foi observado no artigo *Building a Genetic Algorithm-based and BIM-based 5D Time and Cost Optimization Model,* que o estudo utiliza um código (plugin) criado pelo algoritmo genético GA e integrado ao modelo BIM-5D via Navisworks como plugin para reduzir o tempo e o custo gerais dos projetos de construção. BIM é um processo que melhora a qualidade do projeto, comunicação e gerenciamento, reduzindo custos e melhorar os cronogramas. Algoritmos genéticos utilizam técnicas de busca e otimização global, são úteis para resolver problemas de otimização, como escalonamento e menor caminho [28].

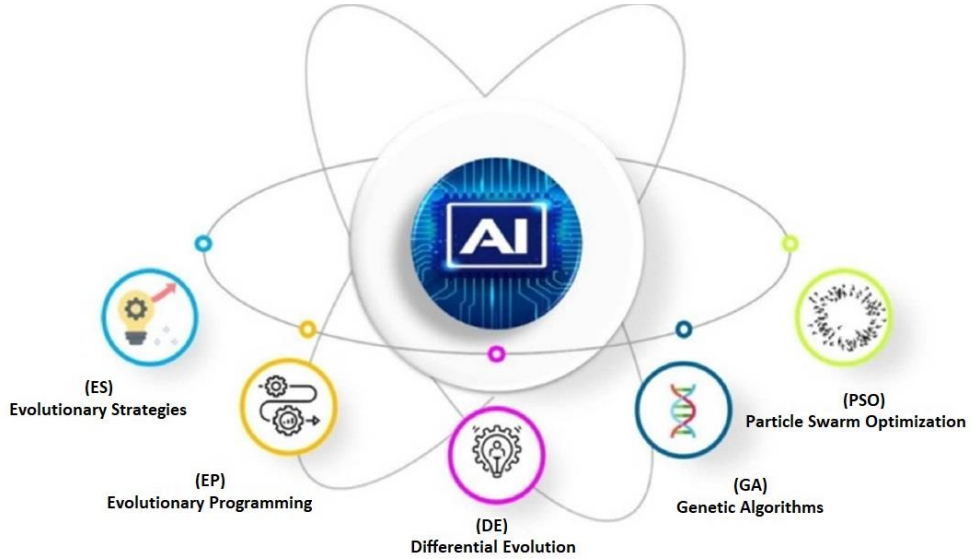
Abordagem baseada em BIM para planejamento automatizado de layout de canteiros de obras pré-fabricadas, com a integração a um algoritmo de otimização, que utiliza a plataforma de programação visual Dynamo para criar um canal de informação entre o BIM e o algoritmo de otimização. Foi observado no artigo *A BIM-based Approach to Automated Prefabricated Building Construction Site Layout Planning*, que para esta otimização, foram considerados um algoritmo genético (GA) e otimização por enxame de partículas (PSO), para validar a abordagem proposta e mostrar uma redução efetiva no custo de transporte de material e perda desnecessária de tempo [29].

O projeto para fabricação e montagem (*Design for Manufacture and Assembly*) (DfMA) no projeto de edifícios pré-fabricados combina com do BIM para desenvolver o conceito e processo de projeto paramétrico orientado ao DfMA. Foi observado no artigo *Design for Manufacture and Assembly-oriented Parametric Design of Prefabricated Buildings*, que o processo de redesenvolvimento do BIM orientado ao

DFMA e o processo de otimização do modelo de informações de construção pré-fabricado orientado ao DFMA são explorados e desenvolvidos [31].

Em síntese, apresenta-se uma visão das técnicas de otimizações de IA, mais utilizadas com os de métodos matemáticos e algoritmos computacionais, conforme a Figura 3.

**Figura 3: Métodos de otimização IA**




Fonte: ALZARA *et al.*, 2022

Legenda em português:
ES – Estratégias evolutivas;
EP – Programação evolutiva;
DE – Evolução diferencial;
GA – Algoritmos genéticos;
PSO – Otimização de enxame de partículas.

## NUVEM DE PALAVRAS

Por intermédio da ferramenta *StArt* elabora-se a nuvem de palavras, obtidas a partir dos artigos de maior relevância, conforme a Figura 4. A nuvem de palavras tem o objetivo de identificar nova palavras chaves a serem utilizadas na pesquisa atual.

A nuvem de palavras tem o objetivo de identificar nova palavras chaves a serem utilizadas na pesquisa atual ou em novas buscas. Consiste em organizar de forma sistemática, por diferente cores e tamanhos, às palavras chaves mais citadas nos trabalhos pesquisados [32].

Constata-se os termos mais recorrentes nos textos apresentados, tais como: *artificial intelligence*, BIM *(building Information modeling), optimization, planning, algorithms, prefabricated elements, prefabricated buildings, genetic algorithms, on site assembly*, dentre outras.

**Figura 4: Nuvem de palavras dos artigos de maior relevância**




Fonte: os autores.

## CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi identificar e analisar um conjunto de publicações de artigos, visando identificar métodos de otimização, referente as abordagens técnicas de IA e BIM e pela pesquisa operacional, com a utilização de métodos matemáticos e algoritmos computacionais, relacionados a montagem de obras com elementos pré-fabricados, que tenha como contribuição a comunidade científica e a sociedade. Este artigo por meio da revisão sistemática da literatura, possibilitou a identificação de estudos viáveis a serem desenvolvidos e aplicados, mediante a execução de programações computacionais, nos processos de montagem de obras com elementos pré-fabricados.

Apresentados resultados e aplicações dos algoritmos de otimização encontrados, tendo uma predominância nos estudos na literatura de utilização dos algoritmos genéticos (GA) e do algoritmo de enxame de partículas (PSO), entre outros.

A integração do BIM com a tecnologia de IA pode oferecer inúmeras oportunidades para construir e projetar, a Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO), pode se beneficiar da IA para lidar com suas questões mais significativas, como custos, cronogramas e segurança [33].

Os estudos apresentados podem contribuir para trabalhos futuros, aprofundando nos estudos dos algoritmos de otimização, para utilização em processos de montagem de obras de elementos pré-fabricados de concreto.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Brasil.

## REFERÊNCIAS

[1] OLIVEIRA, A. **Inteligência Artificial.** Lisboa: Fundação Francisco Manuel dos Santos. Coleção Ensaios da Fundação, 2018.

[2] RICH, E., KNIGHT, K. **Inteligência Artificial**. 2ª Edição. São Paulo: Makron Books do Brasil: McGraw Hill, 1994.

[3] ASHLOCK, D. **Evolutionary Computation for Modeling and Optimization**. New York: Sprinkler, 2006. 572p.

[4] LIU, S.; MENG, X.; TAM, C. **Building information modeling-based building design optimization for sustainability.** Energy and Buildings, Dalian, v. 105, p. 139-153, 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.037 0378-7788

[5] YANG, X.; KOZIEL, S. (Ed.). **Computational optimization and applications in engineering and industry**. New York: Springer Science & Business Media, 2011.

[6] JANCHIKOSKI, F. R.; BAEDELLI, G.; CRIPPA, J. **Otimização Computacional para Desenvolvimento de Projetos Sustentáveis em BIM**: Uma Revisão Sistemática da Literatura. 16º Seminário de Iniciação Científica, FAE Centro Universitário, Curitiba, 2022.

[7] ANTONIO, C.C. **Otimização de Sistemas de Engenharia. Fundamentos e Algoritmos para o Projeto Ótimo**. Editora Engebook, 2020. 574p.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA DE CONCRETO (ABCIC). **Manual de Montagem das Estruturas Pré-moldadas de Concreto**. São Paulo, 2019.

[9] ACKER, A. V. **Manual de sistemas pré-fabricados de concreto.** FERREIRA, M. A. Tradução para o português do inglês. São Paulo: ABCIC, 2003.

[10] FERREIRA, M. A. **Diretrizes de projeto: sistemas pré-moldados de concreto**. Notas de aula. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 2013, 162 p.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062:2017**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017.

[12] ZAMBONI, A. B. *et a*l. StArt Uma ferramenta computacional de apoio à Revisão Sistemática. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOFTWARE – SESSÃO DE FERRAMENTAS, CbSoft, 1th. Set., 2010, Salvador. **Proceedings.**.. Salvador: UFBA, 2010. p. 10-12.

[13] KITCHENHAM, B. A., CHARTERS, S. **Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering**. Tech. Rep. EBSE-2007-01, Keele University, 2007.

[14] SPINAK, E. **Dicionário enciclopédico de bibliometria, cienciometria e informetria**. Montevideo, 1996, 245 p.

[15] ENGSTRÕM, E.; RUNESON, P. **Software product line testing – A systematic mapping study**. Department of Computer Science, Lund University, SE-221 00 Lund, Sweden. Information and Software Technology, v. 53, 2011, p. 2-13. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2010.

[16] KITCHENHAM, B. A. **Systematic Literature reviews in software engineering** – A systematic literature review. Information and Software Technology, v. 51, 2009, p. 7-15. http://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009

[17] RUIZ, J. A.; GRANJA, A. D. Mapeamento sistemático da literatura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, Salvador, 2013 [...] Salvador: ANTAC, 2013

[18] PETERSEN, K.; VAKKALANKA, B, KUZNIARZ, L. **Guidelines for Conducting Systematic Mapping Studies in Software Engineering:** An Update Information and Software Technology, v. 64, 2015, pp. 1-18. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.03.007

[19] SUELDO, S., COLO, P. I., DE PAULA, M., VILLAR, S. A., ACOSTA, G. G. **Algoritmo de otimização metaheurística baseado em simulação para manuseio de materiais**. Journal of Intelligent Manufacturing, 2024. https://doi.org/10.1007/s10845-024-02327-0

[20] XU, C.; ZHENG, X.; WU, Z.; ZHANG, C. **Automated Prefabricated Slab Splitting Design Using a Multipopulation Coevolutionary Algorithm and BIM**. Buildings, v.14, p.433, 2024. https://doi.org/10.3390/buildings14020433

[21] URBIETA, M.; URBIETA, M.; LABORDE, T.; VILLAREAL, G.; ROSSI, G. **Generaling BIM model from structural and architetural plans using artificial intelligence**. Journal of Building Engineering, v. 78, 2023, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107672

[22] YAO, G.; LI, R.; YANG, Y. **An Improved Multi-Objective Optimization and Decision-Making Method on Construction Sites Layout of Prefabricated Buildings**. Journal Sustainability, v.15, p.6279, 2023. https://doi.org/10.3390/su15076279

[23] DING, Y; SONG, K.; LIU X et al. Application of computer vision in optimal design of assembled buildings**.** In: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS – SMART INFRASTRUCTURE AND CONSTRUCTION. **Proceedings** … 2023. https://doi.org/10.1680/jsmic.22.00032

[24] ZHANG, W.; ZHANG, H.; YU, L. Collaborative Planning for Stacking and Installation of Prefabricated Building Components Regarding Crane-Collision Avoidance. Journal of Construction Engineering and Management, v. 149, Issue 6. 2023. https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-12955

[25] LIU, Y. **Application of BIM technology on the design and construction of prefabricated buildings.** International Conference on Functional Materials and Civil Engineering, v. 24, p. 58-65, 2023. https://doi.org/10.54254/2755-2721/24/20230677

[26] ZOU, Y.; GAO, Q.; WANG, S. **Optimization of the Stacking Plans for Precast Concrete Slab Based on Assembly Sequence**. Buildings, v.12, p. 153, 2022. https://doi.org/10.3390/buildings12101538

[27] KARMAKAR, A.; SINGH, A. R.; KUMAR, V. S. D. **Automated route planning for construction site utilizing Building Information Modeling.** Journal of Information Technology in Construction (ITcon), Special issue: 'The Eastman Symposium', v. 27, p. 827-844, 2022. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.040

[28] ALZARA, M.; ATTIA, Y. A.; MAHFOUZ, S. Y.; YOSRI, A. M.; EHAB, A. **Building a genetic algorithm-based and BIM-based 5D time and cost optimization model.** IEEE *Access.* https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3317137

[29] YANGA, B.; FANGA T.; LUOA, X.; LIUA, B., DONGA, M. **A BIM-Based Approach to Automated Prefabricated Building Construction Site Layout Planning**. KSCE Journal of Civil Engineering. https://doi.org/10.1007/s12205-021-0746-x - 2021

[30] MEU; C., NW, C. **Modelo dinâmico de otimização de planejamento de layout de material de construção através da integração de 4D BIM**. Engenharia com Computadores, v.35, p. 703–720, 2019. https://doi.org/10.1007/s00366-018-0628-0

[31] YUAN, Z.; SUN, C.; WANG, Y. Design for Manufacture and Assembly Oriented Parametric Design of Prefabricated Buildings. **Journal Automation in Construction**, v. 88 p. 13-22, 2018. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.021

[32] PRAIS, J.L. de S.; ROSA, V.F. da. Nuvem de palavras e mapa conceitual: estratégias e recursos tecnológicos na prática pedagógica. In: Estudos sobre Educação. […], v. 28, n. 1, p. 201-219, 2017.

[33] PANTELI, C.; KYLILO, A., FOKAIDES, P. A. **Building information modeling applications in smartbuildings: from design to commissioning and beyond a critical review.** Journal of Cleaner Production, v.265, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.12176