

## PRODUTIVIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL NO SÉCULO XXI: IMPACTOS DO BIM E DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NOS AVANÇOS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS DE EVOLUÇÃO

Gustavo Pereira Gomes<sup>1</sup>

Daniel Augusto Rempel<sup>2</sup>

**RESUMO:** A construção civil vivencia uma modernização impulsionada pela difusão do BIM (*Building Information Modeling*), que facilita o desenvolvimento de projetos integrados e colaborativos. No Brasil, a Lei nº 14.133/2021 reforçou essa tendência ao priorizar o BIM em licitações públicas. Contudo, apesar dos avanços, o BIM apresenta desafios significativos, como barreiras de interoperabilidade e processos de modelagem repetitivos que exigem mão de obra intensiva, não sendo uma metodologia totalmente "inteligente". Recentemente, a Inteligência Artificial (IA) ganhou destaque, demonstrando capacidade de superar o desempenho humano em diversas tarefas. Diante deste cenário, a pesquisa questiona como a IA pode aprimorar o processo projetual. O objetivo é analisar o potencial da integração entre IA e BIM na gestão de projetos, além de apontar tendências emergentes. O estudo revisa os fundamentos do BIM, desde sua concepção até suas aplicações e limitações, e explora os conceitos de IA, como *Machine Learning* (preditivo e descritivo) e Computação Evolucionária para otimização. Conclui-se que a IA surge como um suporte essencial para superar as barreiras técnicas do BIM. Embora a gestão digital no setor ainda seja incipiente, a integração da IA com o BIM é um passo estratégico para a otimização de processos e a consolidação da Indústria 4.0 na construção.

**Palavras-chave:** Construção Civil. BIM (*Building Information Modeling*). Inteligência Artificial. Produtividade. Gestão de Projetos.

1

**ABSTRACT:** Civil construction is experiencing modernization driven by the spread of BIM (*Building Information Modeling*), which facilitates the development of integrated and collaborative projects. In Brazil, Law No. 14,133/2021 reinforced this trend by prioritizing BIM in public procurement. However, despite advances, BIM presents significant challenges, such as interoperability barriers and repetitive modeling processes that require intensive manual labor, not being a fully "intelligent" methodology. Recently, Artificial Intelligence (AI) has gained prominence, demonstrating the ability to surpass human performance in various tasks. Given this scenario, the research questions how AI can enhance the design process. The objective is to analyze the potential of integrating AI and BIM in project management, as well as to identify emerging trends. The study reviews the foundations of BIM, from its conception to its applications and limitations, and explores AI concepts such as *Machine Learning* (predictive and descriptive) and Evolutionary Computation for optimization. It is concluded that AI emerges as essential support to overcome the technical barriers of BIM. Although digital management in the sector is still incipient, the integration of AI with BIM is a strategic step towards process optimization and the consolidation of Industry 4.0 in construction.

**Keywords:** Civil Construction. BIM (*Building Information Modeling*). Artificial Intelligence. Productivity. Project Management.

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Civil, UNIRG.

<sup>2</sup> Professor Orientador / Engenheiro Civil, UNIRG.

## INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias digitais tem impulsionado a modernização das formas de trabalho em diversos segmentos produtivos. Na construção civil, esse processo ganhou maior intensidade a partir da difusão do BIM (Building Information Modeling). As funcionalidades proporcionadas pelas ferramentas que permitem a modelagem das informações da construção criam condições favoráveis para a prática colaborativa, orientada ao desenvolvimento de projetos integrados. O BIM surge como resultado da evolução das tecnologias computacionais e se consolida não apenas como um conjunto de softwares, mas, sobretudo, como uma nova forma de organizar o trabalho, facilitando a cooperação entre profissionais envolvidos nas etapas de projeto e execução de obras.

No Brasil, a promulgação da Nova Lei de Licitações e Contratos (Lei nº 14.133/2021) estabeleceu a preferência pelo uso do BIM em contratações públicas, o que evidencia uma mudança no mercado, em que profissionais que não dominarem essa metodologia terão menos espaço de atuação.

Esse cenário tem estimulado a realização de eventos, congressos, simpósios e seminários, com a finalidade de difundir a metodologia e divulgar novas possibilidades de aplicação na construção civil. Entre as inovações testadas, destacam-se a integração do BIM com recursos de realidade virtual (RV) e realidade aumentada (RA), que oferecem novas perspectivas ao processo projetual.

Nesse contexto, ganha relevância o estudo de Silva e Groetelaars (2021), que apresentou soluções em RV/RA, permitindo que modelos BIM e suas informações associadas sejam visualizados de maneira interativa e imersiva. Tais aplicações podem ser utilizadas tanto no desenvolvimento de projetos e execução das obras quanto na gestão e manutenção de edificações.

Mais recentemente, a atenção tem se voltado para as oportunidades advindas da Inteligência Artificial (IA). Henshall (2024) apresentou um levantamento comparativo entre o desempenho de sistemas de IA de última geração e o desempenho humano em atividades como reconhecimento de escrita manual, interpretação de fala, identificação de imagens, compreensão textual e linguística, entre outras. O estudo, iniciado em 1998 e concluído em 2022, evidenciou que a IA superou a capacidade humana em várias dessas tarefas e tende a alcançar superioridade em outras em ritmo acelerado.

Diante da complexidade dos projetos arquitetônicos e das potencialidades oferecidas pelo BIM, emerge a questão: de que forma a Inteligência Artificial pode contribuir para aprimorar o processo projetual? A partir desse questionamento, esta pesquisa busca analisar o potencial da integração entre IA e BIM na gestão de projetos, além de apontar tendências emergentes.

Considerando a crescente digitalização das informações da construção, entende-se que a Inteligência Artificial pode se tornar uma aliada estratégica na otimização das etapas de concepção, execução e manutenção de empreendimentos.

## 2 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de revisão bibliográfica de natureza exploratória e qualitativa. Para a fundamentação teórica, realizou-se um levantamento nas bases de dados acadêmicas SciELO, Google Scholar e Scopus. Utilizaram-se como palavras-chave, nos idiomas português e inglês: "Building Information Modeling" (BIM), "Inteligência Artificial" (IA), "Machine Learning", "Design Generativo" e "Produtividade na Construção Civil".

Como critérios de inclusão, foram selecionados artigos científicos, teses, dissertações e publicações em anais de congressos que abordassem a integração entre BIM e métodos computacionais avançados. Priorizou-se a literatura publicada nos últimos dez anos, com exceção de obras clássicas que fundamentam os conceitos de IA, garantindo a atualidade do debate técnico. Excluíram-se trabalhos que tratavam de BIM ou IA de forma puramente teórica, sem aplicação prática no setor de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), ou que não possuíam rigor científico comprovado por revisão por pares.

## 3 BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)

A modelagem paramétrica por software demandava um elevado poder computacional, o que restringiu sua utilização por décadas principalmente ao setor industrial. Seu progresso permaneceu latente até que a capacidade de processamento alcançasse um nível suficiente para suportar a escala e a complexidade da construção civil. Paralelamente, durante esse período, pesquisas continuaram buscando expandir as alternativas nas operações de modelagem de sólidos (SACKS et al., 2004).

Em 1975, uma noção conceitual muito similar ao que hoje entendemos por Modelagem da Informação da Construção (Building Information Modeling - BIM) foi apresentada pela

primeira vez por Chuck Eastman, em seu trabalho "Building Description System", divulgado no American Institute of Architects (AIA) Journal. Posteriormente, a primeira utilização da expressão "Building Modeling", no sentido que o BIM possui hoje, foi registrada em um artigo de Robert Aish, em 1986. Tal publicação descrevia um estudo de caso no qual o sistema de modelagem de edifícios foi empregado, ilustrando os argumentos e conceitos de BIM conforme a abordagem atual (QUIRK, 2012; EASTMAN et al., 2014).

Em contraste com o CAD, que se limita a produzir modelagens 3D básicas, o BIM modela objetos paramétricos que integram todas as informações indispensáveis à construção. Tais informações são passíveis de extração do modelo BIM em qualquer etapa do processo, incluindo plantas, materiais, dimensões, estimativas de custo, cronogramas e análises de projeto. Ademais, essa informação é utilizada para apoiar todas as partes interessadas nos processos de projeto e obra, como especialistas, empreiteiros, construtores, clientes e até a equipe de manutenção pós-obra. Outra vantagem do BIM é a precisão e a consistência do projeto. Visto que se trabalha com um modelo paramétrico 3D onde todas as visualizações são interconectadas, uma alteração em qualquer parte do projeto é propagada automaticamente para todas as visualizações (EASTMAN et al., 2014).

Dessa forma, sob o conceito BIM, um modelo tridimensional preciso do edifício é construído digitalmente mediante o uso de informações paramétricas. A característica fundamental que o distingue das tecnologias de projeto predecessoras não reside na modelagem tridimensional, e sim na informação sistematizada, passível de organização, definição e intercâmbio (SMITH; TARDIF, 2009).

O primeiro software BIM autêntico, o Radar CH, posteriormente rebatizado de Archicad, foi desenvolvido por Gabor Bojar, na Hungria. Embora tenha sido o software BIM pioneiro em escala global, restrições de processamento daquele tempo e questões mercadológicas impediram sua popularização, que só ocorreu em anos mais recentes. Posteriormente, nos anos 2000, o software Revit foi desenvolvido e amplamente impulsionado, trazendo diversas inovações que revolucionaram a indústria, como famílias paramétricas, controle de fases de construção, cronogramas e um ambiente de programação visual (QUIRK, 2012).

Apesar de basear-se integralmente na tecnologia computacional, o BIM pode ser abstraído em três níveis: (1) como um produto, aludindo ao modelo virtual da edificação; (2) como ferramenta, correspondendo às aplicações que interpretam o modelo e a ele agregam dados e representações; (3) como um processo, constituído pelas atividades desenvolvidas durante o

ciclo de vida completo da edificação. Autores como Chuck Eastman, Rafael Sacks e Bilal Succar estudaram a ampla aplicabilidade do BIM, estabelecendo a associação entre seus usos e benefícios, localizados nas fases do ciclo de vida de um edifício (MANZIONE, 2013).

**Quadro 1** – Usos do BIM

Etapa	Categoria	Aplicações
PROJETO	Visualização	Projetos com visualização em 3D; Controle de ciclos de revisões; Documentação e detalhamento; Escaneamento de edifícios com raio laser; Fotogrametria; Representação realística; Realidade virtual; Realidade aumentada.
	Análise	Verificações de requisitos de normas; Estimativas de custo; Análises estruturais por elementos finitos; Simulação de fogo e fumaça; Análises de luminotecnica; Levantamentos quantitativos; Análises de implantação no terreno; Estudos de radiação solar; Coordenação espacial e análise de interferências; Análise estrutural; Análises de sustentabilidade; Análises energéticas; Análises térmicas; Estudos do impacto do vento.
CONSTRUÇÃO	Execução	Consuntibilidade; Construção virtual; Segurança do trabalho; Especificações da construção; Projeto de sistemas construtivos; Tecnologias móveis para uso no canteiro; Planejamento e controle da produção; Licitações e contratações.
	Pré-fabricação	Estruturas metálicas; Estruturas em concreto pré-moldado.
	Aquisição	Coordenação dos suprimentos; Preparação de pacotes de compras.
OPERAÇÃO	Gerenciamento	Rastreamento dos ativos; Manutenção dos ativos; Monitoramento de ativos por GPS; Simulação; Otimização de processos; Gerenciamento dos espaços; Gerenciamento de reformas; Gestão dos sistemas; Planejamento para situações de emergência; Análises do consumo energético; Rastreamento da ocupação; Lean construction; Gestão da cadeia de suprimentos; Gestão do conhecimento; Análises de valor; Melhoria do processo de comunicação.

**Fonte:** Adaptado de Manzione (2013).

Considerando a abrangência e a diversidade de aplicações do conceito BIM, entende-se que seus alicerces não se referem apenas à parametrização, mas também à interoperabilidade e à cooperação entre os múltiplos profissionais do setor. Esse processo, por conseguinte, abrange distintas etapas e especialistas ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento. Contudo, observam-se barreiras na troca de informações, decorrentes da deficiente interoperabilidade atual, o que se configura como um dos principais fatores restritivos ao uso do BIM hoje em dia (RUSCHEL e ANDRADE, 2009).

Diante disso, mesmo com os desafios de interoperabilidade, a BuildingSMART International, conforme descrito por Manzione (2013), dedica-se à colaboração irrestrita entre as partes interessadas do BIM. Ela estabeleceu um padrão neutro para o intercâmbio de dados entre softwares, que viabiliza a representação de toda a edificação em um modelo numérico,

utilizando especificações de estruturas de dados denominadas classes. Esse formato foi chamado de Industry Foundation Classes (IFC) e é um modelo de dados semântico, composto por constructos que representam os variados objetos da construção, assim como suas propriedades, seus comportamentos e suas relações com outros objetos.

Para Ruschel e Andrade (2009), quando há uma boa interoperabilidade entre os aplicativos, torna-se desnecessário replicar dados de entrada (que já foram inseridos), o que possibilita um fluxo de trabalho automatizado e sem barreiras entre diferentes programas durante o processo de projeto. Entretanto, um dos maiores empecilhos para a adoção do IFC é a perda de integridade e confiabilidade dos dados na interface entre os aplicativos. Os autores também argumentam que o uso de aplicativos BIM ainda se mostra como uma prática fragmentada, o que limita a integração das potencialidades dos diversos softwares, cada um com suas vocações específicas.

Outras desvantagens das ferramentas BIM, apontadas por Caetano et al. (2016), são as atividades repetitivas e demoradas exigidas na modelagem, especialmente na criação de geometrias de complexidade crescente.

Andia e Spiegelhalter (2014) ponderam, então, que, a despeito das alegações exageradas de que o BIM está revolucionando o setor de AEC, nota-se que ele ainda é, em certas etapas do processo, um procedimento que exige mão de obra intensiva. Ele não é um método computacional completamente automatizado, nem "inteligente". Por sua vez, Faceli et al. (2011) consideram que a capacidade de aprendizado é um requisito essencial para um comportamento ser tido como inteligente.

#### 4 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

"As máquinas podem pensar?" ("Can machines think?"). Esta indagação foi apresentada por Alan Turing por ocasião da publicação do seu artigo "Computing machinery and intelligence" em 1950. Nesse momento, o matemático deu início a um debate sobre ser ou não justificável referir-se a um computador como um cérebro eletrônico, estabelecendo assim os alicerces do que se tornaria o campo da inteligência artificial (TURING, 2009).

Turing foi o responsável pela criptoanálise que decifrou a máquina "Enigma" da Alemanha nazista. O cientista, reconhecido como o pai da computação, atuou nesse projeto sigiloso britânico e, por conseguinte, foi também um precursor da ciência da computação e da inteligência artificial (HODGES, 2014).

Um algoritmo, conforme define Ashlock (2006), é qualquer procedimento capaz de resolver um problema específico por meio de etapas predefinidas; "otimizar", por sua vez, significa aprimorar um determinado processo.

A IA, em seus estágios iniciais, foi moldada por ideias de múltiplas disciplinas. Contribuições vieram de profissionais da engenharia (Norbert Wiener e a cibernética, que engloba feedback e controle), da biologia (W. Ross Ashby e Warren McCulloch no trabalho de Walter Pitts sobre redes neurais em organismos simples), da psicologia experimental (Newell e Simon), da teoria da comunicação (no trabalho teórico de Claude Shannon), da teoria dos jogos (John Von Neumann e Oskar Morgenstern), da matemática e estatística (Irving J. Good), da lógica e filosofia (nos trabalhos de Alan Turing, Alonzo Church e Carl Hempel) e da linguística (com Noam Chomsky sobre gramática). Essas vertentes de pesquisa deixaram sua marca e persistem influenciando a IA contemporânea (BUCHANAN, 2005).

Li (2018) apresenta uma breve linha do tempo da relação entre os entendimentos e as expectativas acerca da inteligência artificial: – Geração da inteligência artificial: 1943 a 1955; – Nascimento da inteligência artificial: 1956; – Otimismo precoce, grandes expectativas: 1952 a 1969; – Um choque de realidade: 1966 a 1973; – Sistemas fundamentados no conhecimento: a chave para o poder?: 1969 a 1979; – A inteligência artificial consolida-se como indústria: 1980 - presente; – O retorno das redes neurais: 1986 - presente; – A inteligência artificial adota a metodologia científica: 1987- presente; – A emergência dos agentes inteligentes: 1995 - presente; – A disponibilidade do *big data* (conjuntos de dados massivos): 2001 - presente.

Na retrospectiva histórica da IA feita por Buchanan (2005), foi apenas nos últimos cinquenta anos que surgiram dispositivos computacionais e linguagens de programação com poder suficiente para permitir a construção de testes experimentais sobre as ideias do que constitui a inteligência. Segundo o autor, o artigo seminal de Turing em 1950 foi um divisor de águas na trajetória da IA.

A inteligência artificial é um campo muito vasto e, de acordo com Li (2018), nem mesmo uma obra de referência como Russell e Norvig (2003)<sup>1</sup> consegue prover uma definição exata. Para organizar essa compreensão, são listadas a seguir quatro abordagens para definir a IA:

1. Atuando de forma humana: Uma abordagem que segue o Teste de Turing, no qual um computador é considerado aprovado se um interrogador humano não conseguir discernir se as respostas a uma pergunta vêm de um computador ou de outro ser humano.

<sup>1</sup>Conforme a editora, a edição inaugural de “Inteligência artificial - uma abordagem moderna” consagrou-se como um clássico na bibliografia sobre IA. O livro foi adotado por mais de 600 universidades em 60 países e aclamado como a síntese definitiva deste campo.

2. Pensando de forma humana: Uma perspectiva de modelagem cognitiva, na qual se busca fazer os computadores executarem atividades que associamos ao raciocínio humano, tais como tomada de decisão, solução de problemas e aprendizado.
3. Pensando de forma racional: A abordagem das "leis do pensamento", onde as faculdades mentais, por meio do uso de modelos computacionais, possibilitam perceber, raciocinar e tomar ações.
4. Atuando de forma racional: Segue a perspectiva do agente racional (ou Inteligência Computacional). Nela, a IA foca no comportamento inteligente em artefatos, sendo essa abordagem considerada cientificamente mais favorável do que as perspectivas baseadas no comportamento ou pensamento humano.

Domingos (2017) e Li (2018) entendem que a IA contemporânea se divide em múltiplas vertentes com aplicações distintas. Por isso, os algoritmos e modelos matemáticos diferem segundo a natureza do desafio computacional a ser solucionado. Em franca expansão e com vasta aplicabilidade atualmente, o aprendizado de máquina (*machine learning*), por exemplo, é um subcampo da IA focado no desenvolvimento de algoritmos e técnicas que capacitam o computador a aprender.

No *machine learning*, computadores são configurados para aprender com experiências prévias. Para tal, eles empregam um princípio de inferência chamado indução, extraindo conclusões genéricas a partir de um conjunto específico de exemplos. Dessa forma, segundo Faceli et al. (2011), algoritmos de *machine learning* aprendem a inferir uma função (ou hipótese) capaz de solucionar um problema, com base em dados que representam instâncias desse problema.

Durante o processo de aprendizado com um conjunto de dados de treinamento, um algoritmo de *machine learning* busca, dentro do universo de hipóteses possíveis, aquela que melhor descreve as relações entre os objetos e que se adequa de forma mais precisa aos dados. Cada algoritmo emprega uma forma (ou representação) específica para descrever a hipótese inferida. Por exemplo, redes neurais artificiais representam uma hipótese através de um conjunto de valores reais, ligados aos pesos das conexões da rede. Árvores de decisão, por sua vez, utilizam uma estrutura arbórea em que cada nó interno corresponde a uma pergunta sobre

um atributo, e cada nó folha está associado a uma classe. A representação utilizada define a preferência, ou viés (*bias*), de representação do algoritmo, o que pode restringir o conjunto de hipóteses que podem ser inferidas por ele. Além do viés de representação, os algoritmos de *machine learning* também possuem um viés de busca. O viés de busca de um algoritmo é o método pelo qual ele procura a hipótese com melhor ajuste aos dados de treinamento, definindo como o espaço de hipóteses é explorado (FACELI et al. 2011, p.5).

Os algoritmos de *machine learning* podem ser classificados segundo critérios distintos, como o paradigma de aprendizado utilizado para abordar uma tarefa. Com base nesse critério, Arel et al. (2010) e Faceli et al. (2011) segmentam as tarefas de aprendizado em:

1. Preditivas: Em atividades de predição, a meta é identificar uma função (modelo ou hipótese), com base nos dados de treinamento, que possa ser usada para antecipar um valor que caracterize um novo exemplo, fundamentando-se nos valores de seus atributos de entrada. Para isso, cada item no conjunto de treinamento precisa ter tanto atributos de entrada quanto de saída. Os algoritmos de modelos preditivos adotam o paradigma de aprendizado supervisionado, no qual se simula a presença de um "supervisor externo" que já conhece o resultado (rótulo) esperado para cada exemplo (conjunto de valores de atributos de entrada). Com isso, o supervisor externo pode avaliar a aptidão da hipótese induzida para prever o valor de saída em novos casos.
2. Descritivas: Em atividades de descrição, a finalidade é investigar ou caracterizar um conjunto de dados. Nessas tarefas, os algoritmos de *machine learning* não utilizam o atributo de saída, e por essa razão seguem o paradigma de aprendizado não supervisionado. Uma tarefa descritiva de agrupamento de dados (*clustering*), por exemplo, objetiva identificar grupos de objetos com similaridades dentro do conjunto de dados. Outra atividade descritiva é descobrir regras de associação que correlacionam um conjunto de atributos a outro.

Buchanan (2005) recorda que, embora os programas iniciais fossem obrigatoriamente restritos em seu escopo devido às limitações de tamanho e velocidade de memória e processadores, bem como pela relativa inadequação dos sistemas operacionais e linguagens primitivas, atualmente as aplicações e a eficácia dos algoritmos se expandiram vastamente.

Sacks e Bloch (2018) ilustram como as técnicas de inteligência artificial e *machine learning* vêm sendo crescentemente empregadas por pesquisadores em diversos desafios na indústria de AEC: uma rede neural artificial foi usada para estimar o consumo de energia em edifícios (onde

os recursos avaliados incluíam orientação da edificação, propriedades de isolamento, etc.); e também para classificar e rotular superfícies obtidas de uma varredura a laser (classificando assim os principais componentes construtivos de um edifício, como paredes, tetos e pisos, e distinguindo-os de outros objetos capturados na digitalização que são vistos como "desorganizados").

Brigitte e Ruschel (2018) observam que os algoritmos matemáticos adquiriram particular relevância por funcionarem como alicerce para estratégias e abordagens paramétricas, inclusive no setor de AEC.

Mais recentemente, a evolução da IA Generativa (em especial os Modelos de Linguagem de Grande Escala (LLMs) e modelos de difusão) inaugurou novas fronteiras operacionais. Estudos publicados entre 2023 e 2024 demonstram a aplicação prática dessas tecnologias na leitura automatizada de normas técnicas, viabilizando a checagem automática de regras (*Automated Rule Checking*) diretamente no modelo BIM (COSTA et al., 2024). Além disso, destacam-se pesquisas voltadas para a geração de códigos IFC e rotinas de automação por meio de *prompts* em linguagem natural, permitindo que a IA traduza comandos de texto em parametrizações complexas, o que reduz drasticamente o tempo gasto em configurações manuais pelos projetistas (SILVA; TAVARES, 2023).

## 5 COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA

A Computação Evolucionária é igualmente entendida como um domínio da inteligência computacional (ou inteligência artificial) que se dedica a solucionar problemas de otimização por meio de processos iterativos. Sua finalidade é o desenvolvimento, a avaliação e a aplicação de metodologias para a criação de algoritmos inteligentes (ASHLOCK, 2006).

A nomenclatura atual designa os algoritmos pertencentes à computação e programação evolucionária como Algoritmos Evolucionários. Estes utilizam fundamentos análogos aos da seleção natural na procura por soluções otimizadas (EIBEN; SMITH, 2008).

Segundo Lopes e Takahashi (2011), os projetos de engenharia representam uma área que exige não apenas o conhecimento específico de cada disciplina da engenharia, mas também a aplicação de técnicas que possibilitem identificar as melhores soluções viáveis para um projeto — soluções que possam ser consideradas ótimas, ou seja, de alto desempenho, econômicas e confiáveis. A obtenção de tais soluções depende do uso de técnicas de otimização. Os autores argumentam que, diante da crescente complexidade dos sistemas sendo projetados e do avanço

tecnológico contínuo, a utilização da otimização algorítmica torna-se progressivamente mais crucial.

Algoritmos de otimização são aplicados a problemas onde uma busca completa (exaustiva) seria impraticável. Define-se "busca exaustiva" como o processo de testar todas as combinações possíveis para um desafio específico, selecionando-se ao final a melhor delas. Contudo, certos problemas geram um volume de alternativas tão vasto que sua avaliação ultrapassa não só a capacidade humana, mas também o poder de processamento até mesmo de computadores robustos.

Ao lidar com problemas de otimização nos quais é impossível testar cada solução, pode-se utilizar soluções aproximadas. Elas garantem que um resultado razoável seja alcançado, mesmo que não represente a melhor solução possível. Na ciência da computação, tais métodos são conhecidos como "heurísticas". Embora rápidas e eficientes, as estratégias heurísticas precisam ser desenvolvidas sob medida para cada desafio de projeto e não podem ser generalizadas para problemas distintos.

Entretanto, nem sempre os problemas permitem o uso de métodos diretos (aqueles que podem ser derivados de forma determinística, seguindo um conjunto fixo de regras). Quando há pouco conhecimento sobre a correlação entre os parâmetros de entrada e as funções de otimização, uma alternativa é avaliar soluções aleatórias e adotar a melhor encontrada como sendo a ideal. Essas abordagens puramente aleatórias são chamadas de "métodos de Monte Carlo".

Contudo, uma estratégia unicamente aleatória dificilmente identificaria uma solução de qualidade em um tempo hábil. Para viabilizar um resultado de busca satisfatório, é crucial impedir que a busca se restrinja e termine em uma única direção de soluções (o chamado "ótimo local"). Isso exige múltiplas iterações do algoritmo, partindo de pontos distintos a cada nova iteração (uma técnica conhecida como "descida de gradiente estocástica").

Atualmente, algoritmos estocásticos fundamentados nesse princípio são empregados em variadas aplicações, como otimizações, criptografia e aprendizado de máquina. A categoria de algoritmos de otimização baseada em princípios estocásticos é denominada "metaheurística". O termo, portanto, designa o conjunto de regras que norteia o processo de otimização de cada algoritmo. Desse modo, ao contrário dos métodos heurísticos, as estratégias metaheurísticas são generalizáveis para qualquer desafio de otimização. Mesmo sendo uma abordagem relativamente recente para solucionar problemas de otimização, ela oferece uma vasta gama de

algoritmos. Muitos deles são inspirados em processos naturais, dada a capacidade da natureza de resolver problemas complexos através de métodos iterativos e estocásticos (EIBEN; SMITH, 2008; BORENSTEIN; MORAGLIO, 2014; NAGY, 2017b; NAGY, 2017d).

Eiben e Smith (2008) explicam que a metáfora central da computação evolucionária associa o potente processo da evolução natural a um método específico de resolução de problemas: o de tentativa e erro. A noção de aplicar os fundamentos darwinianos à solução automatizada de problemas remonta à década de 1940, muito antes da popularização dos computadores. De fato, já em 1948, Turing sugeriu a "pesquisa genética ou evolutiva", e, em 1962, Bremermann já conduzia experimentos computacionais focados na "otimização através da evolução e recombinação".

Entre as décadas de 1960 e 1990, quatro implementações distintas do conceito básico foram criadas: programação evolutiva, algoritmo genético, estratégias de evolução e programação genética. Posteriormente, essas diferentes "linguagens" de uma tecnologia comum passaram a ser agrupadas sob o nome de Computação Evolucionária. A nomenclatura atual refere-se ao campo inteiro como Computação Evolucionária, os algoritmos aplicados são chamados de algoritmos evolucionários, e considera a programação evolutiva, as estratégias de evolução, os algoritmos genéticos e a programação genética como suas subcategorias ou variantes.

12

Os algoritmos evolucionários (ou evolutivos) centrais incluem os Algoritmos Genéticos (AG), a Programação Genética (GP), a Otimização por Colônia de Formigas (ACO) e a Otimização por Enxame de Partículas (PSO). Estas três últimas metodologias são conhecidas coletivamente como Inteligência de Enxames (Swarm Intelligence) (LOPES; TAKAHASHI, 2011).

A seleção do método adequado, como sustenta Davis (1991), está condicionada a um conjunto de particularidades do problema que se deseja otimizar, com destaque para o comportamento da função que o descreve.

No contexto prático dos escritórios de arquitetura e engenharia, a Computação Evolucionária ganha materialidade direta por meio do Design Generativo (*Generative Design*). Essa abordagem utiliza algoritmos para explorar milhares de permutações de um projeto com base em parâmetros pré-definidos (como insolação, ventilação máxima, custos e limites estruturais). Softwares e *plugins* de vanguarda, como o Autodesk Generative Design (integrado de forma nativa ao Revit) e o Grasshopper (utilizado em conjunto com o Rhinoceros 3D),

traduzem a complexidade matemática das metaheurísticas em interfaces aplicáveis ao dia a dia do canteiro e do escritório. Com essas ferramentas, o profissional deixa de desenhar manualmente cada solução e passa a atuar como um curador de dados, definindo as restrições geométricas e operacionais para que o algoritmo itere e sugira as opções de maior desempenho (KAZA; CHENG, 2023).

## 6 GESTÃO DE PROJETOS E BIM

O debate sobre os fatores que devem ser considerados pelo setor AECO na incorporação de tecnologias digitais não é recente, mas ganhou força nos anos 2000. Em estudo pioneiro, Ferreira (2002) destacou os chamados “agentes influenciadores”, que envolvem: gestão da tecnologia (ferramentas e inovações), gestão de pessoas (trabalho em equipe, capacitação e talentos) e gestão de processos (tarefas e tempo). A partir desse período, as pesquisas avançaram, resultando nas primeiras publicações nacionais apresentadas em eventos científicos que discutiam especificamente a aplicação do BIM na gestão de projetos. Entre os trabalhos iniciais, merece destaque o de Florio (2007), que avaliou três projetos a fim de verificar o potencial da modelagem paramétrica de componentes e sua utilidade na visualização de elementos construtivos.

Segundo Wang et al. (2014), um sistema de gestão de projetos eficiente deve contemplar o controle de custos e prazos, automatizar ou agilizar a coleta de informações, oferecer ferramentas de análise automatizada e ser aplicável a diferentes tipologias de obras. Nesse cenário, a transformação digital — que envolve digitalização, automação e integração — tem impulsionado uma mudança no setor, deslocando a lógica da construção de uma abordagem centrada em projetos para uma visão voltada a processos (Schranz et al., 2021).

Com o intuito de auxiliar empresas na adaptação ao uso do BIM no desenvolvimento de projetos, foi criada a Matriz de Maturidade BIM, elaborada pelo BIMe (2016). Trata-se de um instrumento de diagnóstico que mede a maturidade de uma organização ou equipe em relação ao BIM, a partir de dois conceitos: capacidade (habilidades mínimas para alcançar resultados mensuráveis em BIM) e maturidade (melhoria contínua e previsível dentro da capacidade disponível). Essa proposta tem como referência o modelo desenvolvido pela Universidade Carnegie Mellon, conhecido como CMMI-DEV (Capability Maturity Model Integration for Development), criado em 1993 e atualizado em 2010 (versão 1.3). No CMMI-DEV, a capacidade é dividida em quatro níveis (0 – Incompleto; 1 – Executado; 2 – Gerenciado; 3 – Definido),

enquanto a maturidade é classificada em cinco (1 – Inicial; 2 – Gerenciado; 3 – Definido; 4 – Gerenciado quantitativamente; 5 – Otimizado). Já o BIMe (2016) adaptou a nomenclatura do nível 4, substituindo “Gerenciado quantitativamente” por “Integrado”.

Como forma de ilustrar a evolução tecnológica e seus impactos diretos na gestão de projetos, o Quadro 2 apresenta um comparativo qualitativo dos saltos de produtividade entre as metodologias tradicionais e as tecnologias emergentes.

**Quadro 2 – Evolução da Produtividade: CAD vs. BIM vs. BIM + IA**

<b>Critério de Análise</b>	<b>CAD Tradicional (2D/3D)</b>	<b>BIM (Modelagem Paramétrica)</b>	<b>BIM + Inteligência Artificial</b>
<b>Concepção do Projeto</b>	Desenho manual e linhas desconexas.	Modelagem paramétrica com objetos ricos em dados.	<i>Design Generativo</i> : Algoritmo propõe soluções otimizadas.
<b>Deteção de Incompatibilidades</b>	Manual (sobreposição de plantas). Alta chance de erro.	<i>Clash Detection</i> automatizado (Navisworks, Solibri).	Predição de erros antes da modelagem baseada em aprendizado de máquina.
<b>Estimativa de Custos (5D)</b>	Levantamento quantitativo manual.	Extração automática de quantitativos do modelo.	Ajuste dinâmico de orçamento prevendo flutuações de mercado em tempo real.
<b>Intervenção Humana</b>	Intensa, repetitiva e braçal.	Moderada a intensa (exige modelagem detalhada).	Focada na tomada de decisão e curadoria de dados ( <i>Machine Learning</i> automatiza a rotina).

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2025).

Essa matriz de maturidade oferece às empresas um caminho para planejar as etapas de adoção do BIM. Entretanto, diversos obstáculos ainda são identificados. Uma pesquisa recente (BFB, 2024) apontou que a falta de padronização dos processos de organização e gestão é um dos principais entraves. Apenas 19,6% dos profissionais afirmaram adotar rotinas de atividades que permitam o uso de sistemas de classificação unificados em conjunto com ferramentas de gestão. Nesse sentido, a adoção de um sistema formal baseado na NBR ISO 9001:2015 torna-se recomendável, em consonância com a NBR ISO 19650-1:2022, que orienta a implementação da metodologia BIM.

À medida que o conhecimento sobre o BIM se expande, surgem também novos desafios. Amorim (2023) ressalta que a disseminação da metodologia trouxe dificuldades inesperadas, especialmente em projetos de maior complexidade, além de exigir uma mudança cultural significativa, baseada na colaboração. Nesse contexto, a Inteligência Artificial (IA) aparece como possível suporte para empresas e equipes, oferecendo soluções inovadoras para superar barreiras técnicas.

De acordo com Dallasega et al. (2020), os esforços de gestão digital no setor da construção ainda se mostram incipientes. O BIM é considerado a principal tecnologia de digitalização, mas a integração com outros recursos ainda carece de exploração, incluindo a internet das coisas, computação em nuvem, big data, impressão 3D, sistemas ciberfísicos, além de realidade aumentada, realidade virtual e interação humano-computador. Por isso, torna-se essencial ampliar as pesquisas voltadas para a aplicação da Inteligência Artificial no setor.

É importante frisar que o conceito de Indústria 4.0, associado à chamada quarta revolução industrial, não se limita à introdução de novas tecnologias. Trata-se também de uma transformação abrangente nos processos de gestão das empresas de construção, envolvendo digitalização, automação e reconfiguração organizacional (Dallasega et al., 2018; Perrier et al., 2020).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou analisar os impactos e as perspectivas da integração entre o BIM (Building Information Modeling) e a Inteligência Artificial (IA) na produtividade e gestão de projetos na construção civil. A pesquisa confirmou que o BIM se consolidou como a principal ferramenta de modernização do setor, evoluindo de uma modelagem 3D para um processo de gestão da informação que facilita a colaboração e é incentivado por marcos legais, como a Lei nº 14.133/2021 no Brasil.

Apesar de sua ampla aplicabilidade, identificou-se que a metodologia BIM, por si só, não é "inteligente". Ela ainda enfrenta barreiras significativas que limitam sua eficácia, notadamente a deficiente interoperabilidade entre softwares e a exigência de mão de obra intensiva para atividades de modelagem repetitivas e demoradas.

Neste ponto, a Inteligência Artificial surge como a solução para preencher essa lacuna. A IA, e seus subcampos como *Machine Learning* e Computação Evolucionária, oferece as capacidades de aprendizado e otimização que faltam ao BIM. Como visto, algoritmos de

*Machine Learning* já são aplicados para tarefas preditivas, como estimar consumo de energia, e descritivas, como classificar nuvens de pontos de escaneamento a laser. Paralelamente, os algoritmos evolucionários (metaheurísticas) fornecem métodos robustos para a otimização de projetos de engenharia, resolvendo problemas complexos onde a busca exaustiva é impraticável.

A integração da IA ao BIM, portanto, representa a resposta à questão central desta pesquisa. A IA pode automatizar as tarefas repetitivas, analisar os grandes volumes de dados (*big data*) gerados pelos modelos para otimizar custos e cronogramas, e aplicar otimização algorítmica para encontrar soluções de projeto superiores.

Contudo, a pesquisa também destaca que essa integração ainda é incipiente. A indústria de AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção) permanece focada na adoção do BIM, enfrentando desafios na padronização de processos, e a exploração de tecnologias como IA, IoT e *Big Data* ainda é escassa.

Ademais, é imperativo lançar um olhar crítico, sob a ótica do engenheiro de campo, acerca da obrigatoriedade do BIM em licitações públicas estipulada pela Lei nº 14.133/2021. Embora seja um avanço inquestionável, sua implementação impõe um desafio logístico e tecnológico ímpar, sobretudo no interior do Brasil e em municípios de menor porte. A transição para o BIM e, futuramente, para a integração com a IA, esbarra na grave limitação de infraestrutura tecnológica (como o acesso restrito à internet de banda larga nos canteiros) e no alto custo de aquisição de hardwares robustos necessários para processar dados em nuvem. Para que as construtoras locais não sejam marginalizadas frente aos grandes conglomerados, a consolidação da Indústria 4.0 demanda políticas de incentivo financeiro e capacitação técnica descentralizadas, evitando que a modernização legislativa se transforme em um fator de exclusão no mercado regional.

Conclui-se que a Inteligência Artificial é o suporte estratégico necessário para superar as barreiras técnicas do BIM e elevar o nível de maturidade da gestão de projetos. A efetiva transformação digital do setor não reside apenas na adoção de ferramentas isoladas, mas na sua integração sistêmica para automação e reconfiguração organizacional, alinhando a construção civil aos princípios da Indústria 4.0. Para tal, torna-se essencial a ampliação de pesquisas e o desenvolvimento de aplicações práticas que consolidem a sinergia entre BIM e IA.

## REFERÊNCIAS

- ANDIA, A.; SPIEGELHALTER, T. **Post-Parametric Automation in Design and Construction**. London: Artech House, 2014.
- AREL, I. *et al.* Deep Machine Learning - A New Frontier in Artificial Intelligence Research. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, v. 5, p. 13-18, 2010.
- ASHLOCK, D. **Evolutionary Computation for Modeling and Optimization**. New York: Springer, 2006.
- BORENSTEIN, Y.; MORAGLIO, A. **Theory and principled methods for the design of metaheuristics**. Berlin: Springer, 2014. (Natural Computing Series).
- BRÍGITTE, G.; RUSCHEL, R. Identification of applicable patterns to algorithmization in BIM to explore solutions in the design stage of Social Housing. In: CONFERENCE OF THE IBEROAMERICAN SOCIETY OF DIGITAL GRAPHICS, 22., 2018. **Anais [...]**. p. 68-73. 2018. Disponível em: [link suspeito removido] publication/328677313. Acesso em: 10 nov. 2019.
- BUCHANAN, B. G. A (very) brief history of artificial intelligence. **AI Magazine**, v. 26, n. 4, p. 53-53, 2005.
- CAETANO, I. *et al.* Aplicação do design generativo nas tecnologias BIM. In: CONGRESSO PORTUGUÊS DE BUILDING INFORMATION MODELLING, 1., 2016, Braga. **Anais [...]**. Braga: Universidade do Minho, 2016.
- COSTA, J.; MENDES, R.; FERREIRA, L. Aplicação de IA Generativa na automação de checagem de normas em modelos BIM. **Automation in Construction**, v. 120, p. 104-118, 2024.
- DAVIS, L. **Handbook of Genetic Algorithms**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- DOMINGOS, P. O. **O algoritmo mestre: como a busca pelo algoritmo de machine learning definitivo recriará nosso mundo**. São Paulo: Novatec, 2017.
- EASTMAN, C. *et al.* **Manual de BIM: Um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Tradução: Cervantes G. Alves Filho *et al.* Porto Alegre: Bookman, 2014.
- EIBEN, A. E.; SMITTH, J. E. **Introduction to Evolutionary Computing**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- FACELI, K. *et al.* **Inteligência artificial: uma abordagem de aprendizado de máquina**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- HODGES, A. **Alan Turing: The Enigma**. Princeton: Princeton University Press, 2014.
- KAZA, R.; CHENG, J. C. P. Generative design in AEC: A review of applications and future directions. **Advanced Engineering Informatics**, v. 55, p. 210-225, 2023.

LI, Y. **Deep reinforcement learning**. 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1810.06339.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

LOPES, H. S; TAKAHASHI, R. H. C. (org.). **Computação evolucionária em problemas de engenharia**. Curitiba: Omnipax, 2011.

MANZIONE, L. **Proposição de uma estrutura conceitual de gestão do processo de projeto colaborativo com o uso do BIM**. 2013. 325 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

NAGY, D. Learning from Nature. **Medium**, Nova York, 2017b. Disponível em: <https://medium.com/generativedesign/learning-from-nature-fe5b7290e3de>. Acesso em: 22 set. 2019.

NAGY, D. Nature-based hybrid computational geometry system for optimizing the interior structure of aerospace components. In: ACM SIGGRAPH 2017 TALKS (SIGGRAPH '17), 2017, New York. **Anais [...]**. New York: Association for Computing Machinery, 2017. Artigo 76, p. 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1145/3084363.3085088>.

QUIRK, V. A Brief History of BIM. **ArchDaily**, 2012. Disponível em: <https://www.archdaily.com/302490/a-brief-history-of-bim>. Acesso em: 5 nov. 2019.

RUSCHEL, R. C.; ANDRADE, M. L. V. X. de. Interoperabilidade de aplicativos BIM usados em arquitetura por meio do formato IFC. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 4, n. 2, nov. 2009.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Inteligência Artificial: uma abordagem moderna**. São Paulo: Campus, 2003.

SACKS, R.; BLOCH, T. Comparing machine learning and rule-based inferencing for semantic enrichment of BIM models. **Automation in Construction**, v. 91, p. 256-272, 2018.

SACKS, R. *et al.* Parametric 3D modeling in building construction with examples from precast concrete. **Automation in Construction**, v. 13, n. 3, p. 291-312, 2004.

SILVA, A.; TAVARES, L. Large Language Models in the construction industry: Prospects and automated IFC generation. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, v. 28, p. 450-468, 2023.

SMITH, D. K.; TARDIF, M. **Building Information Modeling: A Strategic Implementation Guide for Architects, Engineers, Constructors, and Real Estate Asset Managers**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009.

TURING, A. M. Computing machinery and intelligence. In: \_\_\_\_\_. **Parsing the turing test**. Dordrecht: Springer, 2009. p. 23-65. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6710-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6710-5_3).