TECNOLOGIAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE FACHADAS COM GEOMETRIA COMPLEXAS

ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR COMPUTATIONAL SIMULATION OF ENERGY EFFICIENCY IN FAÇADE WITH COMPLEX GEOMETRIES

Claudia B. T. Menezes[1]; Julia da R. P. Reyes[2]; Thaís M. Stefano[3], Aline C. Marques[4]; Luciana M. B. Figueiredo[5]; Mônica S. Salgado[6]; Lucas R. Caldas[7]

1Mestranda | claudia.menezes@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; 2Mestranda | julia.reyes@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; 3Mestranda | thais.stefano@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; 4Doutora | alinecalazans@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; 5Doutora | lucianafigueiredo@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil. 6Doutora | monicassalgado@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; 7Doutor | lucas.caldas@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo:
A adoção das tecnologias digitais no setor de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO), mostrou-se relevante com a disseminação da metodologia BIM (*Building Information Modeling* – Modelagem da Informação da Construção). Mais recentemente, a Inteligência Artificial (IA) assumiu protagonismo nas discussões sobre as possibilidades oferecidas ao setor. A adoção de tecnologias digitais para simulação na área de conforto ambiental e eficiência energética não é recente, uma vez que os aplicativos que permitem a análise ambiental datam dos anos 1980. No entanto, é possível perceber a complexidade de realizar simulações de estruturas curvas e/ou não homogêneas, assim como as adaptativas/cinéticas. Dessa forma, essa revisão da literatura tem como objetivo traçar um panorama geral de como a IA tem se associado à simulação computacional como um facilitador para o desenvolvimento de fachadas com geometrias complexas e energeticamente eficientes, contribuindo para a melhoria da qualidade do ambiente construído, tendo em vista o papel fundamental das envoltórias na eficiência energética dos edifícios. Os resultados indicam um conjunto de possibilidades, destacando o aprendizado de máquina como suporte à concepção de fachadas eficientes e ambientalmente responsivas.

Palavras-chave:
Inteligência Artificial; Modelagem Paramétrica; Simulação Computacional; Fachadas Complexas; Eficiência Energética

Abstract:
The adoption of digital technologies in the Architecture, Engineering, Construction, and Operations (AECO) sector has proven to be relevant with the widespread use of the Building Information Modeling (BIM) methodology. More recently, Artificial Intelligence (AI) has taken a leading role in discussions about the possibilities it offers the sector. The use of digital technologies for simulation in the areas of environmental comfort and energy efficiency is not new, as applications for environmental analysis date back to the 1980s. However, it can be challenging to perform simulations of curved and/or non-homogeneous structures, as well as adaptive/kinetic ones. Therefore, this literature review aims to provide an overview of how AI has been associated with computational simulation as a facilitator for the development of facades with complex and energy-efficient geometries, contributing to the improvement of the built environment's quality. This is especially important given the fundamental role of building envelopes in a building's energy efficiency. The results indicate a range of possibilities, highlighting machine learning as a support for the design of efficient and environmentally responsive facades.

Keywords: *Artificial Intelligence; Parametric Modeling; Computational Simulation; Complex Façades; Energy Efficiency.*

1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética, segundo Lamberts et al. (2014), pode ser entendida como um atributo que possibilita qualidade ambiental aos usuários com baixo consumo de energia. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2023), os setores residencial, comercial e público são responsáveis por 50,8% do consumo total de energia elétrica no país. Uma das causas do alto consumo de energia elétrica é o padrão de arquitetura, que desconsidera os atributos energéticos-climáticos. Segundo Gonçalves e Bode (2015, p. 37), "consequências decorrentes da inadequação do edifício ao meio ambiente que o envolve demandam a utilização de equipamentos eletromecânicos para corrigir essa inadequação", aumentando, consequentemente, o consumo de energia. Os autores reforçam a importância e urgência na redução da demanda energética, seja através de novas tecnologias ou até mesmo na busca por condutas comportamentais mais conscientes, principalmente devido às graves mudanças climáticas que vêm ocorrendo atualmente.

Logo, um projeto arquitetônico que segue os conceitos da arquitetura bioclimática deve incluir análises sobre seu desempenho energético, pois cada decisão tomada irá influenciar diretamente na qualidade ambiental da edificação. Vale ressaltar que tais estudos devem ser realizados desde as etapas iniciais do projeto, pois sua adição em uma etapa final pode causar uma grande alteração no projeto e/ou um alto custo, levando ao seu descarte (Lamberts et al., 2014).

Desde os anos 2000 o setor de AECO conta com as possibilidades oferecidas pela metodologia BIM, definida pelo MDIC (2018, p. 04) como "um conjunto de tecnologias e processos integrados que permite a criação, utilização e atualização de modelos digitais de uma construção, de modo colaborativo, servindo a todos os participantes do empreendimento, durante todo o ciclo de vida da construção". Sob essa ótica, a modelagem simulacional por meio do BIM, propicia ao arquiteto a possibilidade de realizar os mais diversos tipos de simulação computacional, de conceber um modelo parametrizado que permite a visualização da volumetria, da incidência solar, da aplicação de materiais e acabamentos, bem como da avaliação do desempenho dos elementos arquitetônicos (Oliveira et al., 2022).

Recentemente, a metodologia BIM e as ferramentas de simulação têm se beneficiado das alternativas oferecidas pela IA que, segundo Almusaed et al. (2023), é um termo usado para descrever um grupo de sistemas computadorizados capaz de desenvolver trabalhos realizados por seres humanos e que se relaciona com, basicamente, todas as áreas de conhecimento. O campo da IA traz novas abordagens para o desenvolvimento de construções inteligentes para ampliar conhecimento e maximizar a eficiência energética. As técnicas de IA podem ser utilizadas para diferentes tarefas, como, por exemplo, para modelagem, aprendizagem (com abordagens de aprendizagem automática - Machine Learning) e raciocínio (Golafshani et al., 2024). Entretanto, ainda restam dúvidas sobre de que maneira estas alternativas vêm sendo utilizadas. Assim, o presente artigo apresenta os resultados de uma revisão da literatura onde o objetivo é identificar de que maneira a IA pode pode ser associada à modelagem paramétrica de fachadas com geometrias complexas e desempenho energético eficiente, contribuindo para a melhoria da qualidade do ambiente construído.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Dentre os estudos explorados na revisão realizada observa-se o uso de software e plugins associados à simulação de desempenho energético. Santos *et al.* (2022) destacam a aplicação de diferentes plataformas voltadas à simulação computacional com foco na eficiência energética, tais como Autodesk Revit, Archicad, Autodesk Vasari, Rhinoceros, DIVA e Ecotect. Essas ferramentas, além de promoverem a interoperabilidade entre sistemas, possibilitam a modelagem de estruturas e formas complexas por meio da parametrização e da instalação de plugins específicos. Contudo, a complexidade das interfaces e a necessidade de domínio de conceitos matemáticos e lógicos

ainda representam desafios para os usuários, especialmente no que se refere à modelagem de geometrias sofisticadas (Jasiocha *et al.*, 2023).

Considerando que as edificações representam uma parte considerável do consumo energético no mundo, novas tecnologias passam a desempenhar um papel fundamental para a sustentabilidade energética. Com o objetivo de melhorar a eficiência energética na construção, surge o conceito de *Smart Building*. De acordo com Aguilar *et al*. (2021), um dos principais elementos das *Smarts Buildings* é o Building Energy Management Systems (BEMSs), o qual busca combinar estratégias para melhorar a eficiência e a conservação de energia em um edifício, implementando tarefas fundamentais de gestão da energia, como o monitoramento da informação sobre o fornecimento de energia, automação, detecção de anomalias na utilização da energia, supervisão dos custos da energia, entre outros.

O campo da IA traz novas abordagens para o desenvolvimento de construções inteligentes com o objetivo de gerar conhecimento e maximizar a eficiência energética. As técnicas de IA podem ser utilizadas para diferentes tarefas. Por exemplo, podem ser utilizadas para modelagem (com sistemas multi-agente), aprendizagem (com abordagens de aprendizagem automática - *Machine Learning* - ML), raciocínio (com sistemas Fuzzy), entre outras, que podem ser incorporadas nestes ambientes (Golafshani *et al*., 2024). O ML é amplamente utilizado no setor da construção. Mustika *et al.* (2020) afirmam que o ML é uma subdivisão da IA capacitando sistemas a aprender e melhorar de forma autônoma. Por meio do treinamento de máquinas, com a entrada de dados históricos e experiências, esses sistemas podem adaptar-se para resolver problemas sem a necessidade de intervenção humana. Como apontado por Baduge *et al*. (2022), o ML baseia-se na análise de padrões em dados e permite a construção de modelos preditivos que evoluem conforme novos dados são processados. Diferentemente dos métodos de programação tradicionais, que dependem de regras e códigos pré-definidos por humanos, o ML oferece uma abordagem mais dinâmica e adaptável.

2.1. MÉTODOS

O artigo foi elaborado por meio de uma revisão da literatura. Inicialmente, foi realizada uma pesquisa preliminar em anais dos principais eventos nacionais relacionados ao tema, assim como em periódicos, utilizando palavras-chaves em português. Porém, foi identificado um número muito limitado de estudos nacionais que se relacionasse especificamente com o tema de simulação computacional de fachadas com geometria complexa utilizando IA. Dessa maneira, optou-se pela busca de pesquisas desenvolvidas em âmbito internacional. Nesse sentido, foram selecionadas as seguintes bases de dados para realizar a pesquisa: Scopus, Science Direct e Google Acadêmico. O período foi limitado em 5 anos (2019-2024) e por área do conhecimento (Engineering, Materials Sciences, Social Sciences, Multidisciplinary, Arts and Humanities).

Após a definição dos filtros de busca, foram utilizadas strings com o objetivo de refinar os resultados e concentrar a pesquisa nos estudos mais alinhados ao tema investigado. As combinações de termos utilizados foram: Simulation AND Complex Geometry, com objetivo de entender os desafios e limitações das simulações de elementos complexos. Complex Geometry AND Artificial Intelligence AND Architecture AND BIM para entender de que modo e com qual ferramenta a inteligência artificial pode auxiliar no processo de simulação computacional de elementos complexos. E por fim, Simulation AND Artificial Intelligence AND Architecture AND BIM Machine Learning AND Façade, com intuito de entender o uso do aprendizado de máquinas na simulação computacional de formas complexas.

A partir da leitura dos resumos, 208 artigos se encaixavam na temática proposta. Posteriormente, foi realizada a leitura da introdução e da metodologia, uma vez que o objetivo era entender o modo como se aplica o uso de IA associada ao BIM na simulação ambiental, e 138 artigos foram escolhidos. Por fim, através da leitura completa dos artigos e exclusão de artigos repetidos, 27 foram selecionados para o presente trabalho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção sugere-se uma análise descritiva e discussão dos principais resultados, apresentando fatores contribuintes e implicações do que foi encontrado.

O Quadro 1 apresenta a sistematização dos artigos selecionados na revisão, com o objetivo de mapear os principais estudos relacionados ao uso de tecnologias digitais aplicadas à simulação de desempenho, eficiência energética e modelagem de fachadas complexas.

Eixo Temático	Autor e ano	Título
Simulação e Eficiência Energética	Rico-Martinez (2020)	Daylight transmittance through Expanded Metal shadings
	Yamamoto *et al*. (2021)	Analysis method based on coupled heat transfer and CFD simulations for buildings with thermally complex building envelopes
	Le-Thanh (2021)	Optimal design of an Origami-inspired kinetic façade by balancing composite motion optimization for improving daylight performance and energy efficiency
	Hershcovich *et al*.(2021)	Thermal and ventilation performance of a curved double-skin facade model
	Yaman (2021)	Different Façade Types and Building Integration in Energy Efficient Building Design Strategies
	Huang *et al*. (2022)	Thermal and ventilation performance of a curved double-skin facade model
	Mahdavinejad *et al*. (2024)	The impact of facade geometry on visual comfort and energy consumption in an office building in different climates
	Sadegh *et al.* (2022)	Kinetic facades: An evolutionary-based performance evaluation framework
	Liu M. *et al*. (2024)	Adjoint-based shape optimization for radiative transfer in porous structure for volumetric solar receiver
	Sommese *et al.* (2024)	Light-responsive kinetic façade system inspired by the Gazania flower: A biomimetic approach in parametric design for daylighting
Inteligência Artificial no processo de projeto	Polat e İlerisoy (2020)	A Geometric Method on Facade Form Design with Voronoi Diagram
	Yi e Kim (2021)	Self-shaping building skin: Comparative environmental performance investigation of shape-memory-alloy (SMA) response and artificial-intelligence (AI) kinetic control
	Nasiri *et al.* (2022)	Data Analytics and Information Technologies for Smart Energy Storage Systems: A State-of-the-Art Review
	Summa *et al.* (2022)	Combining artificial intelligence and building engineering technologies towards energy efficiency: the case of ventilated façades
	Elsamanoudi *et al.* (2022)	Parametric Hypercell Mechanism for Adaptive Building Skin: A Case Study in New Administrative Capital, Egypt
	Ali *et al.* (2023)	Facade Style Mixing Using Artificial Intelligence for Urban Infill
Eixo Temático	**Autor e ano**	**Título**
Inteligência Artificial no processo de projeto	Biloria *et al.* (2023)	Multi-performative façade systems: The case of real-time adaptive BIPV shading systems to enhance energy generation potential and visual comfort
	Rane *et al.* (2023)	Integrating Building Information Modelling (BIM) with ChatGPT, Bard, and similar generative artificial intelligence in the architecture, engineering, and construction industry: applications, a novel framework, challenges, and future scope
	Urbieta *et al*. (2023)	Generating BIM model from structural and architectural plans using Artificial Intelligence
	Golafshani *et al.* (2024)	An artificial intelligence framework for predicting operational energy consumption in office buildings
Machine Learning (ML)	Argibas (2019)	Façade form-finding with swarm intelligence
	Santos et al. (2019)	Automatic Simplification Of Complex Building Geometry For Whole-building Energy Simulations

Aprendizado de Máquina	Sadegh *et al*. (2022)	Kinetic facades: An evolutionary-based performance evaluation framework
	Hussien *et al*. (2023)	Predicting energy performances of buildings' envelope wall materials via the random forest algorithm
	Hazbei *et al*. (2024)	Optimizing architectural multi-dimensional forms; a hybrid approach integrating approximate evolutionary search, clustering and local optimization
	Liu R. *et al*. (2024)	Energy-efficient rapid additive manufacturing of complex geometry ceramics

Quadro 1: Relação dos artigos selecionados a partir da revisão da literatura.
Fonte: os autores (2025).

A Figura 1 ilustra, os principais resultados obtidos a partir da revisão da literatura. O primeiro gráfico, referente ao número de artigos por ano, evidencia a evolução das publicações entre 2019 e 2024, permitindo observar o crescimento do interesse acadêmico pelo tema ao longo dos últimos anos. Já o segundo gráfico mostra a distribuição dos artigos por país, revelando quais nações têm se destacado na produção científica sobre o tema. A análise geográfica permite identificar padrões de contribuição internacional e reforça o caráter global das pesquisas voltadas à inovação tecnológica na AECO.

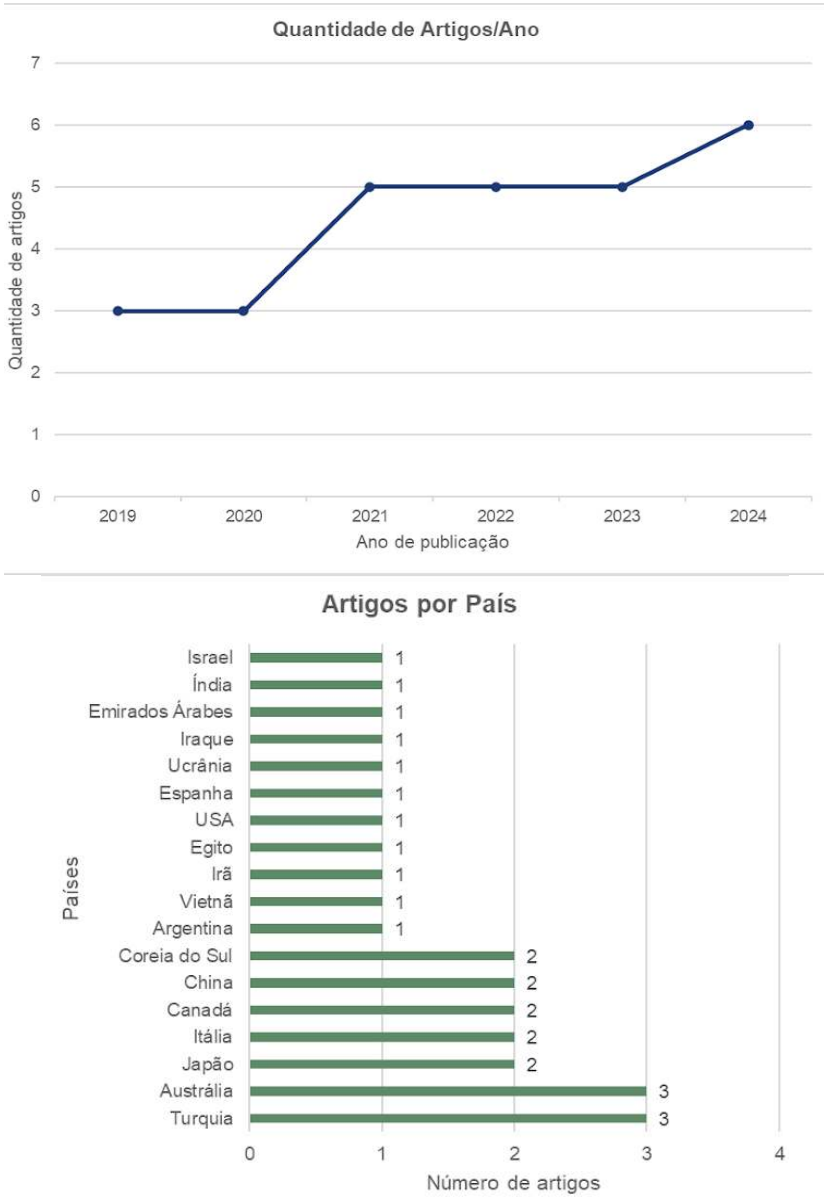


Figura 1: Análise Temporal e por País das Publicações Revisadas
Fonte: os autores (2025).

A partir do levantamento apresentado, os resultados foram organizados em três categorias temáticas, com o objetivo de possibilitar uma análise mais aprofundada das contribuições de cada abordagem. A primeira categoria, “Simulação e Eficiência Energética”, busca compreender as tipologias de fachadas mais exploradas em contextos de geometrias complexas e seu papel na melhoria do desempenho energético. Além disso, são destacados os principais softwares de simulação utilizados, os quais demonstram potencial de integração com ferramentas de IA, fortalecendo o processo de desenvolvimento de projetos arquitetônicos com geometrias não convencionais. Em seguida, discute-se o eixo “Uso da IA na adequação ambiental”, com foco na forma como a IA vem sendo incorporada às diferentes etapas do processo projetual, desde a concepção até a operação das edificações. Por fim, apresenta-se a categoria “ML”, considerando seu destaque na revisão como a principal técnica de IA aplicada, evidenciando seu potencial para otimização de desempenho, análise de grandes volumes de dados e suporte à tomada de decisão no design de fachadas responsivas e ambientalmente eficientes.

3.1. SIMULAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A envoltória de uma edificação atua como uma barreira protetora e cumpre o papel de interface entre o meio externo e interno, sendo responsável diretamente pela sensação térmica dos ambientes e de seus usuários. Segundo Yaman (2021), aproximadamente 60% das perdas de calor que ocorrem em todo edifício estão relacionadas diretamente com a forma e as propriedades termo-físicas das fachadas. Rico-Martinez *et al*. (2020) reforçam a importância de se pensar no design das fachadas com o intuito da redução do uso da energia, principalmente devido às mudanças climáticas atuais. Logo, o envelope da edificação deve estar adaptado ao clima no qual esta está inserida, minimizando os aspectos negativos do meio externo e potencializando os positivos, na busca por um melhor desempenho da construção (Gonçalves; Bode, 2015; Mahdavinejad *et al*., 2024).

Em seu trabalho, Yaman (2021) lista diferentes sistemas de fachadas com estratégias de projeto focadas em eficiência energética, sendo essas: Fachadas de pele dupla, Fachadas de pele adaptáveis, Fachadas de painéis fotovoltaicos, Fachadas verdes verticais, Fachadas de mídia e, por fim, Fachadas de Membrana Estrutural - principal foco do atual trabalho. Estas, segundo o autor, possuem um grande potencial na redução do consumo de energia e do controle da luz natural. Um exemplo está presente no trabalho de Hershcovich *et al*. (2021) que, testando novas geometrias e formas complexas em concreto, alcançou uma melhora no desempenho térmico de cerca de metade dos modelos simulados quando comparado ao modelo base. Ao combinar características geométricas dos modelos com melhor desempenho, as taxas de transferência de calor atingiram uma melhora de, aproximadamente, 29% quando comparado com uma fachada de forma simples.

Existem também as fachadas inspiradas nas formas e padrões da natureza (biomimética). Além da questão estética, essas fachadas complexas buscam estudar o comportamento das flores e plantas, por exemplo, utilizando uma forma com o mínimo de material e consumindo menos energia, assim como também é feito na natureza (Polat; İlerisoy, 2020; Sommese *et al.,* 2024). Alguns autores também estudaram as fachadas cinéticas, que podem mudar sua forma para se adaptar às condições do ambiente que a circunda. Em um estudo realizado por Le-Thanh *et al.* (2021), todos os designs de fachadas cinéticas propostas (inspiradas em formas de origami) reduziram o consumo de energia da edificação simulada quando comparado com o modelo base.

Dentre todos os artigos analisados, é possível perceber a complexidade de realizar simulações de estruturas curvas e/ou não homogêneas, assim como as adaptativas/cinéticas. Diversos autores ressaltam o aumento da dificuldade devido a utilização de métodos numéricos (como cálculos de pontos, por exemplo), assim como o aumento do tempo de computador necessário para a realização das simulações (Yehorchenkov *et al.,* 2019; Yamamoto *et al.,* 2021, Liu M. *et al.,* 2024). Trabalhos realizados por Huang *et al.* (2022) e Liu R. *et al.* (2024) utilizam laboratórios no seu processo de metodologia, mas que também traz uma certa limitação dos testes realizados devido ao uso de modelos físicos.

A complexidade da forma geométrica limita o processo de modelagem, levando muitas vezes à necessidade otimização e simplificação do modelo. Porém, ocorre uma perda nesse processo de

simplificação, custando um tempo para remodelagem assim como na presença de uma lacuna de informações entre o modelo real e o modelo simulado, visto que essa alteração da geometria irá interferir diretamente nos resultados sobre o desempenho daquela estrutura (Santos *et al*., 2019; Hazbei *et al.,* 2024).

A maioria dos trabalhos analisados utilizam o software *Rhinoceros* em conjunto com os plugins *Grasshopper, Ladybug, Honeybee*, entre outros. Todavia, esses programas utilizam uma linguagem de programação, o que aumenta a dificuldade durante o processo da simulação computacional. Muitos também produziram um *script* em uma tentativa de facilitar e otimizar as simulações computacionais, mas ainda assim dentro de um padrão de linguagem e conhecimento muito específicos, dificultando o uso para usuários não especialistas (Argibas, 2019; Santos *et al.,* 2019). Segundo Elsamanoudi *et al.* (2022), mudanças na fachada como mover, rotacionar e alterar a escala são transformações básicas e fáceis de resolver através da modelagem paramétrica via Rhinoceros. Porém, alterações como dobrar/retrair, inflar e torcer são consideradas complexas e exigem um grande entendimento de programação, além de um maior tempo de simulação.

3.2. O USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO PROCESSO

A IA tem se mostrado promissora na automação de processos, permitindo que arquitetos e designers explorem soluções inovadoras com maior eficiência e criatividade. De acordo com Rane *et al.* (2023), a IA, quando integrada ao BIM, aumenta significativamente a fase de exploração do projeto, facilitando a geração de alternativas de design com base no processo de modelagem paramétrica. Sob essa ótica, o uso da IA tem se mostrado relevante e promissora em diversas etapas da construção, principalmente na otimização de recursos, na análise do desempenho energético e na previsão de custos, contribuindo para um desenvolvimento mais sustentável e econômico dos projetos.

Durante as etapas de concepção e planejamento de projeto, a IA pode desempenhar um papel fundamental como ferramenta de suporte, otimizando diversas atividades essenciais para o desenvolvimento. Rane *et al*. (2023) descrevem que a interação entre arquitetos com os sistemas de IA generativa possibilita a otimização do processo criativo e a exploração de novas possibilidades, como é o caso do IFcade, uma ferramenta que usa IA para misturar estilos arquitetônicos de duas fachadas de referência para gerar novos designs (Khairadeen *et al.,* 2023). O uso da IA, nas etapas preliminares, além de otimizar o processo de criação, permite o desenvolvimento de soluções rápidas, auxiliando a análise e tomada de decisão ágil do profissional responsável. Além disso, pode ser aplicada em estágios mais avançados do processo projetual, onde pode ser explorada para gerar modelos BIM a partir de desenhos arquitetônicos e estruturais, por meio da análise de plantas para identificar os elementos de construção (Urbieta *et al.,* 2023).

As técnicas de IA também se mostram essenciais para a implementação do controle preditivo do desempenho energético de materiais, analisando fatores como espessura da parede, orientação e massa térmica (Hussien *et al.,* 2023). Esses fatores proporcionam uma base sólida para a criação de edificações mais sustentáveis e eficientes, alinhando-se às demandas contemporâneas por construções que minimizem o impacto ambiental. Segundo Luong (2023), através de técnicas de aprendizado de máquina é possível prever o consumo anual de energia com alta velocidade e precisão ainda nos estágios iniciais do projeto. Nesse sentido, a IA pode ser uma ferramenta essencial para facilitar a integração da forma, materialidade e eficiência energética de maneira otimizada. Observa-se essa integração com o auxílio da IA na otimização do design de fachadas cinéticas, que se adaptam às condições climáticas e à luz solar, melhorando o desempenho energético das edificações. Desse modo, os algoritmos ajudam a resolver problemas complexos avaliando simultaneamente o desempenho de iluminação natural e eficiência energética na fachada (Sadegh *et al.,* 2022).

No contexto do desempenho energético da edificação na fase de uso-operação e manutenção, Nasiri *et al.* (2022), apresentam o uso da IA no contexto da eficiência energética: rastreando falhas, controlando a demanda de energia, e otimizando o consumo em tempo real, permitindo que os edifícios operem de maneira mais sustentável e econômica. Portanto, percebe-se que a adoção

dessa tecnologia não é apenas uma tendência, mas uma necessidade para promover uma abordagem mais holística e integrada na administração dos edifícios. A Figura 2 ilustra as aplicações da IA nas diferentes fases do ciclo de vida de da construção civil.

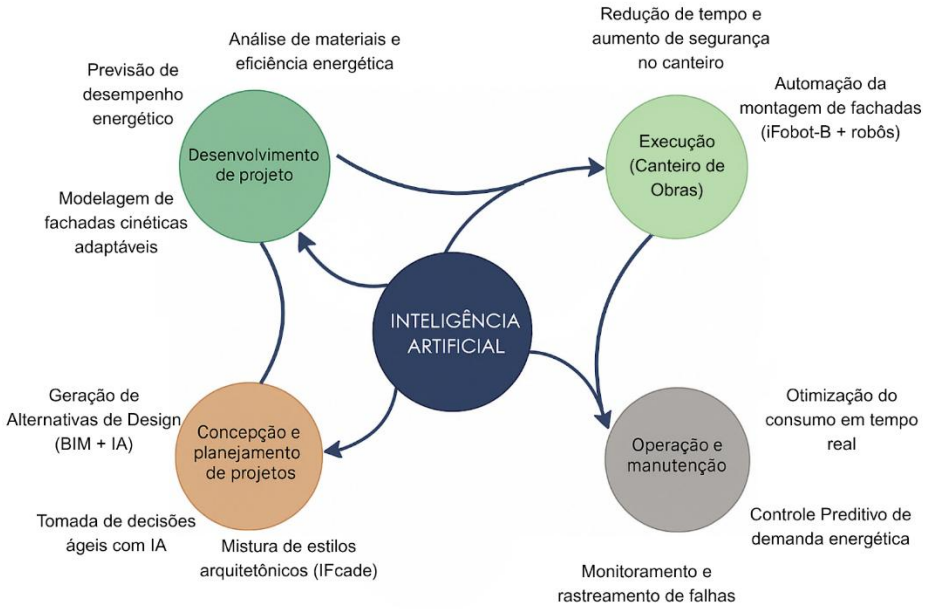


Figura 2: Aplicações da Inteligência Artificial nas Etapas do Ciclo de Vida de Projetos na Construção Civil
Fonte: os autores (2025).

Nesse contexto, os avanços em tecnologia da informação, automação e análise de dados têm provocado transformações significativas na indústria da AECO. A partir dos dados coletados na revisão, destaca-se o uso do ML pelo seu potencial de análise sistemática de grandes volumes de informação, possibilitando a criação de modelos preditivos capazes de aprimorar diferentes aspectos do setor, como segurança, eficiência energética, redução de custos operacionais e construtivos, aceleração de cronogramas e otimização do retorno sobre investimento (*payback*), além de fomentar práticas mais sustentáveis (Mustika *et al*., 2020). Aliado aos softwares de simulação, o ML configura-se como uma metodologia poderosa no desenvolvimento de formas arquitetônicas complexas e eficientes. Sua aplicação conjunta com ferramentas paramétricas e simulacionais contribui para superar as limitações técnicas de modelagem e simulação de estruturas curvas e não homogêneas, representando uma estratégia promissora para a concepção de soluções inovadoras e sustentáveis na AECO.

Com base na análise dos artigos revisados, emergem duas linhas principais de pesquisa que se vinculam diretamente à eficiência energética por meio de simulações e da aplicação de aprendizado de máquina. Essas linhas são: a Otimização do Projeto Paramétrico de Iluminação Natural e a Parametrização de Fachadas e Envoltórias Dinâmicas. Para ambas as vertentes, conforme destacado por Liu *et al.* (2023), o uso de técnicas de ML tanto para derivar soluções ideais de iluminação natural quanto para desenvolver fachadas adaptativas com geometrias complexas, capazes de se ajustar às condições externas, oferece uma abordagem dinâmica e menos trabalhosa em comparação com métodos tradicionais, como a modelagem física em escala e simulações computacionais.

A aplicação de ML permite analisar grandes volumes de dados, facilitando a criação de soluções otimizadas que conciliam conforto visual e eficiência energética. A integração de aprendizado de máquina nesses processos amplia a capacidade de avaliação de uma variedade maior de alternativas de design, permitindo ajustes precisos nas configurações espaciais. Com isso, é possível maximizar o aproveitamento da luz natural, ajustando-se a padrões comportamentais e às condições climáticas específicas, além de equilibrar diferentes indicadores de desempenho de iluminação e garantir um ambiente interno visualmente confortável ao longo do dia (Yuanyuan *et al.*, 2022). A aplicação de métodos computacionais avançados, como o uso de algoritmos, tem o

intuito de lidar com a multifuncionalidade e as adaptações não lineares necessárias no design de geometria complexas. Ao integrar o ML, são criados fluxos de trabalho dinâmicos que permitem que fachadas respondam de maneira eficiente às variáveis de iluminação e promovam maior conforto e eficiência energética.

Sob essa ótica, com o objetivo de compreender como o ML tem contribuído para a modelagem e simulação de fachadas complexas e energeticamente eficientes, elaborou-se um quadro síntese que detalha as metodologias adotadas, as formas de aplicação do ML e os principais softwares utilizados nos estudos analisados (Quadro 2).

Autores	Tipo de fachada	Uso ML	Ferramentas adotadas
Downs *et al*., 2021	Adaptadas Auto moldadas	ANNs[1] (Artificial Neural Networks) para prever condições internas e controlar dinamicamente a fachada	Python, Arduino, RStudio
Lin e Tsay, 2021	Diversos	ANNs[1] (Artificial Neural Networks) para prever desempenho da iluminação diurna com base em dados intermediários.	DIVA, Grasshopper, Ladybug, DeCodingSpaces, Dodo
Biloria *et al*., 2023	Responsivas	Otimização de parâmetros como calor, iluminação e ventilação em tempo real.	Rhino, Grasshopper, Honeybee, Wallacei, NSGA-2
Liu *et al*., 2023	Adaptáveis com painéis fotovoltaicos	Vários algoritmos (KNN[1] - k-Nearest Neighbor -, SVM[1] - Support Vector Machine -, RF[1] - Random Forest) para otimizar o painel fotovoltaico com material composto de alumínio.	EnergyPlus, Python
Summa *et al*.,2024	Ventiladas	Previsão da temperatura e fluxo de calor em fachadas ventiladas com RT[1] e LSTM[1] (long short-term memory	RapidMiner, Keras (Python)
Rezaie *et al.,* 2024	Pele dupla e simples	Modelos híbridos para prever consumo energético - GB[1] (Gradient Boosting) + HGS[1] (Hunger Games Search).	Design Builder, Gradient Boosting, Hunger Games Search

Quadro 2: artigos selecionados para a revisão referente ao uso do Machine Learning na simulação de fachadas.
Nota: 1- As siglas referem-se a modelos computacionais de IA empregados nos estudos revisados. Esses algoritmos foram utilizados para prever ou otimizar aspectos relacionados ao desempenho ambiental de fachadas, como temperatura, iluminação, ventilação e geração de energia.
Fonte: os autores (2025).

Observa-se uma convergência entre os avanços em simulação computacional, modelagem paramétrica e o uso de IA, especialmente o ML, associada ao BIM como suporte essencial à concepção de fachadas eficientes e ambientalmente responsivas. A crescente complexidade das geometrias, associada à busca por soluções arquitetônicas adaptáveis e sustentáveis, tem impulsionado o desenvolvimento de ferramentas cada vez mais precisas e integradas. O ML surge como um diferencial importante ao permitir o tratamento de grandes volumes de dados ambientais, a automação de análises e a geração de soluções otimizadas para eficiência energética e conforto visual, desde as fases iniciais do projeto. As tendências apontam para a ampliação do uso dessas técnicas em contextos reais de projeto, com forte integração a plataformas como BIM, bancos de dados climáticos e sensores IoT, favorecendo a construção de fluxos de trabalho inteligentes, preditivos e colaborativos. Nesse cenário, a adoção de tecnologias baseadas em IA não apenas representa um avanço técnico, mas também uma resposta estratégica às demandas contemporâneas por edificações mais sustentáveis, adaptáveis e energeticamente eficientes

4. CONCLUSÕES

As envoltórias das edificações cumprem uma função fundamental como essa interface de troca entre o ambiente construído e o entorno. Diversas pesquisas comprovam a importância de se pensar em fachadas não tradicionais, que respondam às necessidades de se adaptar ao meio ambiente na qual estão inseridas, seja através de formas complexas ou até mesmo fachadas

cinéticas, na busca por edificações mais sustentáveis. Porém, diversos autores reforçam a complexidade de realizar simulações computacionais referentes à eficiência energética ou desempenho térmico em elementos complexos, como fachadas curvas, por exemplo, tanto na modelagem como no processamento de dados.

Logo, diferentes pesquisas estudaram o impacto do uso da IA durante as simulações computacionais de formas complexas, entendendo como essa ferramenta pode ser um importante otimizador do processo. A análise realizada neste estudo, revela a ampla aplicação do ML no que diz respeito à elaboração de geometrias complexas, principalmente quando se fala sobre fachadas e envoltórias arquitetônicas. Cada estudo mostra a importância do ML na adaptação dinâmica das fachadas às condições ambientais e de uso, possibilitando maior eficiência energética, conforto térmico e iluminação natural.

Os estudos analisados revelam o potencial da integração entre dados ambientais, simulações e controle em tempo real, aspectos fundamentais para o desenvolvimento de fachadas responsivas, inteligentes e adaptáveis. As metodologias abrangem algoritmos de regressão, utilizados para prever valores numéricos baseados em dados de entrada; redes neurais artificiais, inspiradas no cérebro humano, são capazes de resolver tarefas complexas a partir de uma grande base de informações; modelos preditivos, que visam estimar comportamentos futuros a partir de dados disponíveis. Além disso, destacam-se técnicas avançadas como algoritmos evolutivos baseados na evolução biológica para solucionar problemas complexos; e os modelos híbridos e integrados, que combinam diferentes técnicas para melhorar o desempenho das análises. Esses recursos demonstram que o uso de ML se configura como uma importante ferramenta para lidar com a complexidade dos sistemas de fachadas, contribuindo para inovações no design arquitetônico e para o aprimoramento da sustentabilidade das edificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, J.; GARCES-JIMENEZ, A.; R-MORENO, M. D.; GARCÍA, R. A systematic literature review on the use of artificial intelligence in energy self-management in smart buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 151, p. 111530, 2021.

ALMUSAED, A.; YITMEN, I.; ALMSSAD, A. Enhancing Smart Home Design with AI Models: A Case Study of Living Spaces Implementation Review. **Energies**, v. 16, n. 6, p. 2636–2636, 2023.

BADUGE, S. K.; THILAKARATHNA, S.; PERERA, J. S.; ARASHPOUR, M.; SHARAFI, P.; TEODOSIO, B.; SHRINGI, A.; MENDIS, P. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. **Automation in Construction,** v. 141, n. 2, p. 104440, 2022.

BILORIA, N.; MAKKI, M.; ABDOLLAHZADEH, N. Multi-performative façade systems: The case of real-time adaptive BIPV shading systems to enhance energy generation potential and visual comfort. **Frontiers in Built Environment**, v. 9, p. 1119696, 2023.

DOWNS, A.; KOOTBALY, Z.; HARRISON, W.; PILLIPTCHAK, P.; ANTONISHEK, B.; AKSU, M.; SCHLENOFF, C.; GUPTA, S. K. Assessing Industrial Robot agility through international competitions. **Robotics and computer-integrated manufacturing**, v. 70, n. 102113, p.102-113, 2021.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanço Energético Nacional 2023 – Relatório Final - Ano Base 2022,** Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf. Acesso em: 17 jun. 2024.

GOLAFSHANI, E.; CHINIFORUSH, A.; ZANDIFAEZ, P.; NGO, T. An artificial intelligence framework for predicting operational energy consumption in office buildings. **Energy and Buildings**, v. 317, p. 114409–114409, 2024.

GONÇALVES, J. C. S., BODE, K. **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

JASIOCHA , J.; GALAFASSI, M.; CARVALHO, C. Aplicação prática de um fluxo de trabalho paramétrico em projeto arquitetônico. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2023. **Anais** [...]. [S. l.], 2023.

KHAIRADEEN, A.; LEE, U. J. Facade Style Mixing Using Artificial Intelligence for Urban Infill. **Architecture**, v. 3, p. 258–269, 2023.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Eletrobras Procel, 2014.

LIN, C., & TSAY, Y. A metamodel based on intermediary features for daylight performance prediction of façade design**. Building and Environment**. v. 206, n. 108371, p. 108371, 2021.

LIU, J.; BI, G.; GAO, G.; ZHAO, L. Optimal design method for photovoltaic shading devices (PVSDs) by combining geometric optimization and adaptive control model. **Journal of Building Engineering**, v. 69, p. 106101, 2023.

LUONG, L. D. An AI-driven model for predicting and optimizing energy-efficient building envelopes. **Alexandria Engineering Journal**, v. 79, p. 480–50, 2023.

MDIC - Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Estratégia BIM BR**, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/building-information-modelling-bim/26-11-2018-estrategia-BIM-BR-2.pdf. Acesso em: 14 jul 2024.

MUSTIKA, S.; BERAWI, M. A. The utilization of machine learning techniques in the building design stage: a qualitative review. In: **APRU 2020 Sustainable Cities and Landscapes PhD Symposium**, 2020. Auckland: The University of Auckland, 2020.

OLIVEIRA, F. M.; BITTENCOURT, L.; DÓRIA, D. Aplicação de uma ferramenta BIM de simulação de eficiência energética em projeto de habitações multifamiliar. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2022.

REZAIE, M.; KARIMINIA, S.; BAND, S. S.; AMERI, R.; FAROKHI, M.; PAI, H. T.; GOCER, O.; RISMANCHI, B.; SHOOSHTARIAN, S. Energy consumption of high-rise double skin façade buildings, a machine learning analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 89, n. 109230, 2024.

SANTOS, J. dos; ALCÂNTARA, B.; SOUZA, W.; SALGADO, M. Utilização do BIM como apoio à simulação para análise do desempenho das edificações: uma revisão sistemática da literatura. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2022.

SUMMA, S.; MIRCOLI, A.; POTENA, D.; ULPIANI, G.; DIAMANTINI, C.; PERNA, C. Di. Combining artificial intelligence and building engineering technologies towards energy efficiency: the case of ventilated façades. **Construction Innovation**, v. 24, n. 7, p. 44-64, 2024.

TOPUZ, B.; ÇAKICI ALP, N. Machine learning in architecture. **Automation in Construction**, v. 154, p. 105012, 2023.

YUANYUAN, L; HUANG, C.; ZHANG, G.; YAO, J. Machine Learning Modeling and Genetic Optimization of Adaptive Building Facade Towards the Light Environment. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA – CAADRIA, 27., 2022, Sydney. **Anais** [....]. Hong Kong: Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, 2022. v. 1, p. 141–150.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem ao CNPq.