

A TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O PAPEL DA *IOT* E DO *MACHINE LEARNING* NA GESTÃO DE PROJETOS

Leonardo Augusto Freitag (UNIOESTE) E-mail: leoafreitag@gmail.com

Luiz Matheus da Silva Bresolin (UNIOESTE) E-mail: luizm1990@hotmail.com

Peterson Carlos Zimmermann Mai (UNIOESTE) E-mail: zimmermann.peterson@gmail.com

Eduardo Cesar Dechechi (UNIOESTE) E-mail: eduardo.dechechi@unioeste.br

José Antonio Cescon (UNIOESTE) E-mail: jose.cescon@unioeste.br

Resumo: Este estudo investiga modelos inovadores de gestão de projetos de obras sustentáveis baseados em Internet das Coisas (*IoT*) e *Machine Learning* (*ML*), com ênfase na identificação de seus graus de inovação, aplicabilidade e contribuição à sustentabilidade. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão sistemática da literatura, conforme as diretrizes PRISMA, abrangendo 18 artigos publicados entre 2020 e 2025 nas bases de dados Scopus, IEEE e Web of Science. Os resultados revelam a predominância de inovações incrementais (94,45%), concentradas na otimização de processos nas fases de planejamento, execução e monitoramento. Observa-se maior incidência das dimensões econômica e ecológica, especialmente na eficiência no uso de recursos e na redução de desperdícios, enquanto a dimensão social permanece subexplorada. Os achados indicam que, embora haja avanços consistentes, ainda há potencial para evolução rumo a soluções mais integradas, inteligentes e orientadas à sustentabilidade.

Palavras-chave: Construção Civil. Internet das Coisas. *Machine Learning*. Inteligência Artificial. Revisão Sistemática.

DIGITAL TRANSFORMATION IN SUSTAINABLE CONSTRUCTION: A SYSTEMATIC REVIEW ON THE ROLE OF IOT AND MACHINE LEARNING IN PROJECT MANAGEMENT

Abstract: This study investigates innovative models for managing sustainable construction projects based on the Internet of Things (*IoT*) and Machine Learning (*ML*), with an emphasis on assessing their levels of innovation, applicability, and sustainability contributions. The research was conducted through a systematic literature review, according to PRISMA guidelines, encompassing 18 articles published between 2020 and 2025 in the Scopus, IEEE, and Web of Science databases. The results reveal a predominance of incremental innovations (94.45%), concentrated on process optimization in the planning, execution, and monitoring phases. A greater incidence of the economic and ecological dimensions is observed, especially in resource efficiency and waste reduction, while the social dimension remains underexplored. The findings indicate that, although there has been consistent progress, there is still potential for evolution towards more integrated, intelligent, and sustainability-oriented solutions.

Keywords: Civil Construction. Internet of Things. Machine Learning. Artificial Intelligence. Systematic Review.

1. Introdução

Construir de forma sustentável deixou de ser uma aspiração futurista para se tornar uma exigência concreta do presente. Em um setor que responde por uma parcela expressiva do consumo energético global (UNEP; GLOBALABC, 2025), a indústria da construção civil enfrenta o duplo desafio de aumentar sua produtividade e, simultaneamente, reduzir seus impactos ambientais e sociais. A incorporação de práticas de governança, sustentabilidade ambiental e responsabilidade social, reunidas no conceito *ESG* (*Environmental, Social and Governance*), tem sido indicada como estratégia para empresas construtoras que buscam viabilidade a longo prazo e acesso a financiamentos verdes (TIAN et al., 2025).

É nesse cenário que a tecnologia assume um papel central. A Internet das Coisas (*IoT*) já está presente em canteiros de obras, monitorando, em tempo real, a resistência do concreto, a qualidade do ar, os sinais vitais dos trabalhadores e o tráfego de cargas em pontes em construção (LOU; WANG e ZHENG, 2025; NIU, 2025). Ferramentas como o *BIM* evoluem para ecossistemas digitais integrados, como o *HydroBIM* e o *Digital Trio*, nos quais o projeto, a execução e a operação de instalações se comunicam de forma contínua e automatizada (ZHANG et al., 2023; ABDELALIM et al., 2024). Drones equipados com *deep learning* mapeiam volumes de entulho com precisão antes restrita a equipes especializadas (JIANG et al., 2022), enquanto sistemas de IA orientam a separação e a destinação de resíduos em tempo real (BANG; ANDERSEN, 2022).

Diante desse panorama em rápida evolução, torna-se necessário organizar e avaliar o que a literatura científica recente tem produzido sobre o tema. Quais modelos realmente funcionam? Quais tecnologias apresentam maior potencial de impacto sustentável? Quais lacunas ainda persistem entre o que se pesquisa e o que se pratica nos projetos de obras? Com essas perguntas como ponto de partida, o presente artigo desenvolve uma revisão bibliográfica sistemática de publicações recentes sobre modelos de gestão de projetos de obras sustentáveis que integram *IoT* e/ou *Machine Learning*, com o objetivo de apresentar um panorama estruturado do conhecimento atual e avaliar o potencial desses modelos inovadores como instrumentos de promoção da sustentabilidade na construção civil. Destinado a profissionais e pesquisadores dos campos da Tecnologia, da Gestão e da Sustentabilidade, este trabalho busca contribuir para a aproximação entre o avanço científico e a prática gerencial no setor construtivo.

O artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2, apresenta o referencial teórico sobre sustentabilidade e *ESG* na construção civil, economia circular e gestão de resíduos de obras, *IoT* aplicada à sustentabilidade em canteiros e estruturas, *Machine Learning* e IA na gestão de projetos sustentáveis e integração *BIM*, *IoT* e IA em modelos de gestão de projetos; a Seção 3 detalha a metodologia da revisão sistemática; a Seção 4 expõe os resultados e promove a discussão dos achados; por fim, a Seção 5 traz as considerações finais, identifica limitações do estudo e sugere recomendações para pesquisas futuras.

2. Referencial Teórico

Esta seção apresenta a fundamentação teórica, a metodologia utilizada e o desenvolvimento do estudo. Para fins analíticos, este estudo adota a tipologia de inovação de Tidd e Bessant (2015), classificando os modelos identificados quanto ao grau de inovação (incremental ou radical) e à natureza da inovação (processual, organizacional ou de produto/serviço), com base no tipo de mudança promovida nos sistemas de gestão de projetos e nas práticas sustentáveis associadas.

2.1. Sustentabilidade e ESG na construção civil

A construção civil é reconhecida como um dos setores com maior impacto ambiental, social e econômico. Além de consumir grandes quantidades de energia e de matérias-primas, gera resíduos volumosos e interfere diretamente na qualidade de vida urbana. Nesse contexto, a incorporação de práticas alinhadas ao conceito *ESG* (*Environmental, Social and Governance*) tem ganhado espaço como forma de reduzir riscos, melhorar a imagem institucional e garantir o acesso a financiamentos e a mercados mais exigentes (TIAN et al., 2025).

Tian et al. (2025) destacam que, embora as empresas da construção estejam começando a reportar indicadores *ESG*, ainda persistem desafios significativos, como a confiabilidade dos dados, a transparência das informações e o alto custo de elaboração de relatórios. O uso de tecnologias digitais, incluindo *blockchain* e automação, é apontado pelos autores como um

caminho promissor para tornar o fluxo de dados *ESG* mais confiável, rastreável e padronizado. Isso reforça a necessidade de modelos de gestão de projetos capazes de integrar a dimensão da sustentabilidade desde o planejamento até a operação das edificações.

A transição de um modelo linear de produção (“extrair–produzir–descartar”) para um modelo circular é central para a sustentabilidade na construção. Salinas Osuna et al. (2021), ao desenvolverem um contêiner e um classificador automático de material reciclável em ambiente educacional, mostram como princípios da economia circular, como reutilização, segunda vida e reciclagem, podem ser operacionalizados por meio de soluções tecnológicas de baixo custo e baseadas em *IoT*.

Outros estudos ampliam essa perspectiva aos canteiros de obras. Pesquisas sobre o uso de IA na redução de resíduos de construção apontam que algoritmos de *Machine Learning* podem apoiar a triagem de resíduos, a previsão de volumes de entulho e a definição de estratégias de reaproveitamento, contribuindo diretamente para a consecução de metas de redução do impacto ambiental (SAAD; UNDERWOOD e FERRIZ-PAPI, 2025; BANG; ANDERSEN, 2022). De forma complementar, o uso de drones e de técnicas de visão computacional permite calcular automaticamente o volume de resíduos de demolição, aumentando a precisão do controle de materiais e do planejamento logístico (JIANG et al., 2022).

2.2. *IoT*, Machine Learning e IA aplicada à sustentabilidade em canteiros e estruturas

A Internet das Coisas (*IoT*) vem sendo utilizada em diferentes frentes da construção sustentável, especialmente no monitoramento em tempo real e no apoio à tomada de decisão. Niu (2025) propõe uma arquitetura de *IoT* baseada em redes definidas por software (SDN) e na teoria dos jogos para a gestão de recursos humanos e de segurança em canteiros de obras.

Nessa arquitetura, sensores ambientais, biométricos, câmeras e sensores ultrassônicos alimentam uma rede inteligente capaz de monitorar condições de risco, apoiar a prevenção de acidentes e otimizar o consumo de energia na própria rede de sensores. Os resultados mostram redução significativa do atraso na transmissão de dados, menor consumo de energia e maior taxa de entrega de pacotes, o que viabiliza aplicações em tempo real em ambientes de obra.

No campo da qualidade e da durabilidade das estruturas, Govindaraju e Basha (2025) apresentam um *framework* de *IoT* para monitoramento em tempo real da resistência do concreto, integrando sensores eletroquímicos e de fibra ótica. Por meio da coleta contínua de dados e do uso de modelos de maturidade, é possível estimar a resistência *in situ* do concreto, o que permite tomar decisões mais seguras quanto à desforma, ao carregamento e à sequência de atividades. Segundo os autores, esse tipo de solução tem potencial para reduzir retrabalho e aumentar a vida útil das estruturas, conectando o *IoT* à sustentabilidade estrutural. Trata-se, porém, de um benefício reportado pelo próprio estudo, ainda sem quantificação numérica.

Aplicações semelhantes são observadas no monitoramento de cargas em pontes com integração *IoT–BIM*, em que sensores instalados em elementos estruturais transmitem dados a modelos digitais, permitindo avaliar a integridade e o desempenho da infraestrutura ao longo do tempo. Tais soluções reforçam a ideia de que a sustentabilidade não se limita à fase de projeto, mas se estende a todo o ciclo de vida da obra.

O uso de *Machine Learning* e outras formas de IA na construção vem crescendo, com aplicações que vão do planejamento à operação. O estudo sobre a importância da IA em projetos de construção iraquianos (AL-ASADI; AL-JUBOORI; FAKHRATOV, 2023) mapeia o papel da IA em várias fases do ciclo de vida: planejamento, execução, manutenção e monitoramento da saúde estrutural. Segundo os autores, a IA pode apoiar a identificação de riscos, o controle de custos e prazos, o monitoramento da qualidade e a previsão das

necessidades de manutenção, tornando a gestão de projetos mais proativa e eficiente.

No campo da sustentabilidade, algoritmos de otimização e *ML* têm sido empregados para minimizar os custos e os impactos ambientais associados aos materiais de construção, apoiando a seleção de alternativas de menor pegada de carbono (LI et al., 2025). Em paralelo, trabalhos que exploram a IA na redução de resíduos mostram que modelos preditivos podem indicar pontos críticos de geração de entulho e sugerir ajustes nos processos construtivos, contribuindo para a economia de recursos.

Um exemplo particular do uso de IA generativa é apresentado por Maceika, Bugajev e Sostak (2024), que investigam o uso do ChatGPT na avaliação de projetos de casas modulares. Nesse estudo, a IA auxilia na construção de escalas de avaliação e na descrição de fatores relevantes, complementando a visão dos especialistas e acelerando o processo de análise multicritério. Embora o foco principal seja a modularidade e o comportamento do consumidor, a abordagem demonstra o potencial dos *LLMs* (*Large Language Model*) para apoiar decisões complexas em projetos, incluindo aspectos de sustentabilidade.

2.3. Integração BIM, IoT e IA em modelos de gestão de projetos

Diversos trabalhos apontam para a convergência entre *BIM*, *IoT* e IA como base para modelos avançados de gestão de projetos sustentáveis. Ghazal e Hammad (2025) propõem o *Integrated Planning and Control Framework (IPCF)*, que utiliza um “*Construction Data Hub*” para integrar dados de múltiplas fontes ao longo do ciclo de vida do projeto, apoiando decisões de planejamento, controle e melhoria contínua. De forma semelhante, Abdelalim et al. (2024) introduzem o conceito de “Trio Digital” no *facilities management*, articulando três modelos digitais complementares que abrangem o projeto, a construção e a operação.

No contexto da infraestrutura hídrica, o conceito de HydroBIM integra modelos *BIM* a dados hidrológicos e de operação de usinas, permitindo simular cenários, avaliar riscos e otimizar o desempenho energético e ambiental dos empreendimentos (ZHANG et al., 2023).

2.4. Fase do ciclo de vida do projeto e natureza da inovação

A gestão de projetos envolve a aplicação de métodos e processos para organizar as atividades necessárias à realização de um objetivo específico. Nesse contexto, um conceito central é o ciclo de vida do projeto, entendido como o conjunto de etapas que orienta seu desenvolvimento desde a definição inicial até a finalização. Segundo o PMI (2021), o ciclo de vida estabelece uma estrutura que auxilia no planejamento, na condução e no acompanhamento das atividades ao longo do projeto.

De acordo com a PMI (2021), os projetos costumam ser organizados em fases, o que permite um melhor controle das atividades e das entregas. A divisão dessas fases pode variar entre setores e organizações, mas é comum adotar quatro etapas principais: iniciação, planejamento, execução e encerramento.

Na fase de iniciação, define-se o projeto, identificam-se as partes interessadas e elabora-se o documento que autoriza o início do projeto. A etapa de planejamento consiste no detalhamento das atividades necessárias à execução do projeto, incluindo a definição do escopo, do cronograma, dos custos e dos recursos, bem como a análise de riscos. Na fase de execução são realizadas as atividades previstas no planejamento, visando à produção das entregas estabelecidas. Durante essa etapa, também ocorre o monitoramento do andamento do projeto, com acompanhamento do desempenho e ajustes quando necessário. A fase final corresponde ao encerramento, quando as entregas são formalmente aceitas, os registros do projeto são consolidados e as atividades são finalizadas.

A estrutura baseada em fases contribui para a organização das atividades do projeto e para o

acompanhamento de seu desempenho. Esse modelo é adotado em diferentes áreas, como engenharia, construção e tecnologia, servindo de referência para o gerenciamento de projetos em diversos contextos.

A literatura sobre inovação costuma diferenciar as mudanças tecnológicas e organizacionais quanto à intensidade. Entre as classificações mais utilizadas está a distinção entre inovações incrementais e radicais, proposta por Tidd e Bessant (2015). As inovações incrementais correspondem a melhorias realizadas em práticas, processos ou tecnologias já existentes. Em geral, envolvem ajustes contínuos que aumentam a eficiência, reduzem custos ou aprimoram o desempenho, sem alterar significativamente a lógica do sistema. Em setores como a construção civil, esse tipo de inovação é frequente, principalmente devido à necessidade de reduzir riscos e manter a continuidade operacional.

Já as inovações radicais estão associadas a mudanças mais profundas, que alteram de forma relevante a maneira como as atividades são realizadas. Esse tipo de inovação pode envolver a adoção de novas tecnologias, a redefinição de processos ou até mesmo mudanças no modelo de negócio. Embora tenham maior potencial de transformação, exigem investimentos mais elevados e maior capacidade de adaptação por parte das organizações.

Neste estudo, essa distinção serviu de base para a classificação dos trabalhos analisados. Foram consideradas incrementais as soluções que aprimoram práticas já consolidadas, e radicais aquelas que indicam mudanças estruturais na forma de gestão de projetos de obras sustentáveis. Além do grau de intensidade, a inovação também pode ser analisada segundo o tipo de mudança que promove. De acordo com Tidd e Bessant (2015), as inovações podem ser classificadas em inovações de processo, organizacionais ou de produto/serviço.

As inovações de processo dizem respeito à forma como as atividades são executadas. Envolvem mudanças nos métodos, nas técnicas e nas rotinas operacionais. No setor da construção, esse tipo de inovação é frequente na adoção de tecnologias digitais, como *IoT* e *Machine Learning*, voltadas ao monitoramento, à automação e ao controle de atividades. As inovações organizacionais estão relacionadas à forma como o trabalho é estruturado e coordenado. Incluem alterações nas práticas de gestão, na integração entre equipes e no uso de sistemas para o compartilhamento de informações. Esse tipo de inovação contribui para aprimorar a comunicação e a tomada de decisão, especialmente em ambientes de alta complexidade.

Por sua vez, as inovações de produto ou serviço consistem na introdução de novas soluções ou funcionalidades que agregam valor ao usuário. Na construção civil, observa-se, no desenvolvimento de sistemas inteligentes, plataformas digitais ou soluções integradas, a melhoria do desempenho e da sustentabilidade das obras. Neste trabalho, essa classificação foi utilizada para analisar como as tecnologias baseadas em *IoT* e/ou *Machine Learning* vêm sendo incorporadas aos modelos de gestão de projetos, permitindo identificar se os avanços se concentram em melhorias operacionais, mudanças organizacionais ou na oferta de novas soluções no setor.

3 Procedimentos Metodológicos

A pesquisa segue as diretrizes do PRISMA (Moher et al., 2009) e o guia de Petticrew e Roberts (2008), aplicando protocolos de busca estruturada, seleção criteriosa de estudos e extração padronizada de dados. As buscas foram realizadas em dezembro de 2025 nas bases Scopus, IEEE Xplore e Web of Science, combinando dois blocos de termos: (i) termos de gestão da construção — “construction management”, “construction industry”, “construction project management” e “project management”; e (ii) termos tecnológicos — “Internet of Things”/“IoT”, “machine learning”, “deep learning”, “artificial intelligence”/“AI” e “industry

4.0”/“Fourth Industrial Revolution”. Os dois blocos foram combinados com o operador booleano AND, o que exige a presença de pelo menos um termo de cada bloco em todas as bases (Tabela 1). Na fase de construção do protocolo, as mesmas combinações de termos também foram testadas em português nas três bases; os resultados, porém, não se mostraram equivalentes entre as plataformas — algumas combinações em português não se comportavam da mesma forma em cada base, exigindo ajustes de sintaxe distintos em cada teste, e o volume de registros retornados variou de forma inconsistente entre as versões em inglês e em português. Diante disso, optou-se por manter os termos em inglês como vetores de busca aplicados de forma uniforme nas três bases, por serem os que garantiram cobertura e comparabilidade consistentes entre Scopus, IEEE Xplore e Web of Science; o filtro de idioma da publicação (português, inglês ou espanhol) foi mantido para não excluir, dentre os registros recuperados por esses termos, estudos eventualmente publicados nesses idiomas. Foram incluídos estudos empíricos, publicados em periódicos e conferências revisados por pares, com foco em sustentabilidade e gestão de projetos com IoT e/ou ML; foram excluídos trabalhos não revisados por pares e publicações fora do escopo tecnológico.

Em todas as três bases, foram aplicados os mesmos critérios de filtragem: período de publicação de janeiro de 2020 a dezembro de 2025; tipo documental restrito a artigos de periódico e a trabalhos completos de anais de conferência; idioma português, inglês ou espanhol; e acesso aberto. Esses filtros foram operacionalizados diretamente nas ferramentas de refino de cada plataforma, e os registros não elegíveis quanto à data, ao tipo documental, ao idioma ou à modalidade de acesso foram removidos antes da exportação para a etapa de triagem; a remoção de duplicatas entre as três bases, por sua vez, ocorreu já na etapa de triagem, descrita a seguir. A opção por restringir a busca a publicações de acesso aberto foi uma decisão metodológica deliberada, adotada para assegurar a recuperação do texto completo de todos os registros e viabilizar a leitura integral na fase de elegibilidade; reconhece-se, contudo, que esse critério pode ter excluído estudos relevantes publicados em periódicos e eventos indexados sem acesso aberto, limitação retomada nas Considerações Finais. A busca inicial resultou em 337 registros, que foram submetidos às etapas subsequentes de triagem, elegibilidade e seleção, conforme os critérios estabelecidos no protocolo de revisão.

Tabela 1 – Estratégia de busca por base de dados

Base de Dados	String de Busca
Scopus	<i>(TITLE-ABS-KEY ("construction management" OR "construction industry" OR "construction project management" OR "project management") AND TITLE-ABS-KEY (("Internet of Things" OR IoT) OR ("machine learning" OR "deep learning" OR "artificial intelligence") OR ("industry 4.0" OR "Fourth Industrial Revolution")) AND TITLE-ABS-KEY ("project management") AND TITLE (construction)) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "Portuguese") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "Spanish") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))</i>
IEEE	<i>(("All Metadata": "construction management" OR "All Metadata": "construction industry" OR "All Metadata": "construction project management") AND ("All Metadata": "Internet of Things" OR "All Metadata": "IoT" OR "All Metadata": "machine learning" OR "All Metadata": "artificial intelligence" OR "All Metadata": "industry 4.0")) — filtros aplicados por faceta da plataforma: Publication Year (2020–2025); Document Types (Conferences, Journals); Open Access (Yes)</i>
Web of Science	<i>(construction management OR construction industry OR construction project management (Topic)) and (Internet of Things OR IoT OR machine learning OR artificial intelligence OR AI OR industry 4.0 (Topic)) and (2020-2025 (Publication Years)) and (Article OR Proceedings Paper (Document Types)) and (English OR Portuguese OR Spanish (Languages)) and (All Open Access (Open Access))</i>

Fonte: Os autores (2026)

Na Scopus, os filtros de período (PUBYEAR), tipo documental (DOCTYPE), acesso aberto (OA) e idioma (LANGUAGE) foram aplicados diretamente na sintaxe de busca, conforme reproduzido na Tabela 1. No IEEE Xplore, os filtros de período (Publication Year) e de tipo documental (Document Types) foram aplicados por meio das facetas de refinamento da plataforma; como o IEEE Xplore não oferece faceta nativa de idioma, a adequação linguística dos registros recuperados foi verificada manualmente após a exportação. Na Web of Science, os filtros de período (Publication Years), tipo documental (Document Types), idioma (Languages) e acesso aberto (Open Access) foram aplicados no painel de refinamento da busca avançada, replicando os mesmos critérios definidos para a Scopus. Em relação à Scopus, a exigência de que o termo “project management” apareça simultaneamente em TITLE-ABS-KEY e, de forma mais restrita, em TITLE, junto ao termo “construction” foi mantida tal como efetivamente aplicada, para preservar a validade dos resultados já obtidos com essa busca. Reconhece-se, contudo, que essa exigência adicional pode ter excluído estudos relevantes sobre edificações sustentáveis, canteiros inteligentes, infraestrutura, BIM e monitoramento estrutural que não utilizassem esses termos exatos no título; trata-se de um trade-off assumido em favor de maior precisão e menor ruído nos resultados da Scopus, retomado como limitação da revisão nas Considerações Finais.

Na etapa de triagem, iniciou-se pela remoção de 90 registros duplicados. Na sequência, foram aplicados os critérios de inclusão relacionados ao caráter empírico dos estudos, à apresentação de casos reais ou de projetos-piloto e à sua aplicabilidade prática, conforme os critérios adotados, o que resultou na exclusão de 147 documentos.

Os critérios adotados foram: (i) estudo de caso aplicado a obras reais ou a projetos-piloto; (ii) pesquisas empíricas, experimentais ou quantitativas; e (iii) propostas de modelos conceituais, desde que validadas. Na fase de elegibilidade, procedeu-se à leitura integral dos 100 documentos remanescentes da triagem, aos quais se aplicou o *checklist* estruturado descrito a seguir. A avaliação da elegibilidade foi realizada com base em um *checklist* estruturado com base em critérios adaptados da literatura, composto pelas seguintes perguntas-chave:

1. O estudo utiliza *IoT* ou *ML*? (considera-se suficiente a presença de *IoT* ou de *ML*, não sendo exigida a combinação dos dois).
2. O estudo é considerado uma inovação?
3. O estudo tem como foco principal a sustentabilidade?

É importante destacar que essas três perguntas avaliam a aderência temática do estudo ao escopo desta revisão e não constituem uma avaliação da qualidade metodológica dos estudos (delineamento, validação dos dados, risco de viés ou confiabilidade dos resultados). Cada questão recebeu pontuação de 1 (Sim), 0,5 (Parcialmente) ou 0 (Não), e apenas os artigos que obtiveram nota total igual ou superior a 2,5 foram incluídos na revisão final. Na prática, esse corte equivale a exigir resposta 'Sim' em pelo menos duas das três perguntas, com a terceira podendo, no máximo, ser respondida como 'Parcialmente', ou seja, nenhum dos três critérios (uso de *IoT/ML*, caráter inovador, foco em sustentabilidade) pode estar totalmente ausente do estudo. Ao término desse processo, 18 estudos atenderam aos critérios e foram mantidos, conforme o fluxo PRISMA descrito por Moher et al. (2009). A definição do critério de corte igual ou superior a 2,5 pontos no *checklist* adotado está diretamente relacionada ao foco analítico deste estudo.

Dos 100 estudos avaliados na fase de elegibilidade, 82 foram excluídos por não atingirem a pontuação de corte de 2,5. Desses, 16 estudos apresentaram, concomitantemente, ausência

total de uso de IoT/ML e foco na sustentabilidade, dos 16 estudos, 2 também apresentaram uso parcial quanto ao caráter inovador. 51 estudos apresentaram ausência total de foco na sustentabilidade. 9 estudos apresentaram simultaneamente ausência parcial de caráter inovador, além da ausência total de foco na sustentabilidade. 2 estudos apresentaram ausência parcial de uso de IoT/ML e de foco na sustentabilidade. 2 estudos apresentaram ausência parcial quanto ao caráter inovador e ao foco na sustentabilidade. 2 estudos apresentaram ausência total quanto ao caráter inovador e parcial quanto ao foco na sustentabilidade.

Considerando que a pesquisa busca analisar modelos inovadores de gestão de projetos de obras sustentáveis baseados em Internet das Coisas (IoT) e Machine Learning (ML), tornou-se necessário assegurar que os trabalhos selecionados apresentassem aderência simultânea a três dimensões centrais: a presença de tecnologias digitais (IoT e/ou ML), a relação com sustentabilidade e o caráter inovador das soluções propostas.

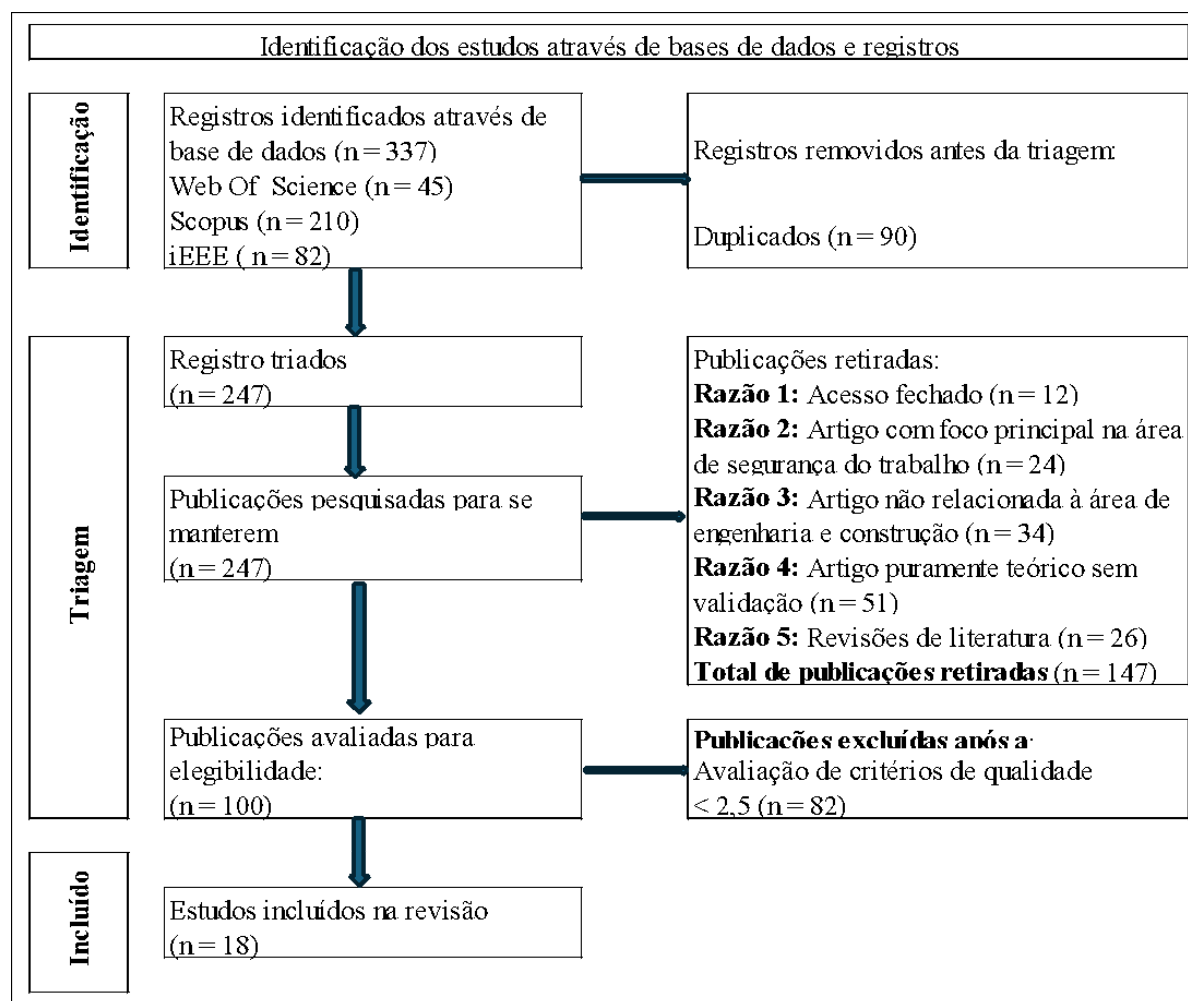
A estrutura de pontuação permitiu avaliar, de forma sistemática, o grau de alinhamento de cada estudo a esses três critérios. Trabalhos que abordavam apenas parcialmente esses elementos ou não apresentavam evidências claras de inovação, sustentabilidade ou aplicação tecnológica tendiam a obter pontuações inferiores ao limite estabelecido e a ser excluídos da análise final. Dessa forma, a amostra final foi composta por estudos que efetivamente dialogam com o objetivo da pesquisa, assegurando maior consistência analítica e coerência temática na avaliação dos modelos investigados.

O processo de seleção e avaliação dos artigos foi conduzido de forma colaborativa entre os autores, com o objetivo de aumentar a confiabilidade e reduzir possíveis vieses individuais na análise dos estudos. Inicialmente, a triagem dos títulos e resumos foi realizada de forma independente, com base nos critérios de inclusão e exclusão previamente definidos. Os 18 estudos foram avaliados por 3 pesquisadores; 3 deles exigiram discussão para chegar a um consenso. Um deles (Id 18) não foi selecionado por todos no primeiro momento. Já em relação aos tipos de inovação, o estudo aqui considerado como inovação radical (Id 11) também demandou discussão para alcançar consenso entre os pesquisadores. Em complemento, ainda houve 13 estudos inicialmente considerados aptos para, no máximo, 2 pesquisadores, que foram posteriormente removidos após avaliação conjunta.

Na etapa de elegibilidade, os artigos selecionados foram submetidos à leitura integral por mais de um pesquisador, que aplicou o *checklist* de avaliação de forma independente. Posteriormente, os resultados foram comparados e eventuais divergências discutidas até se alcançar um consenso. Nos casos de discordância na classificação, realizou-se uma reavaliação conjunta do estudo, considerando sua aderência ao escopo da pesquisa e aos critérios estabelecidos. Esse procedimento colaborativo contribuiu para maior consistência entre avaliadores e maior robustez do processo de seleção dos 18 artigos analisados, reduzindo o risco de vieses individuais na aplicação dos critérios de elegibilidade, sem que isso deva ser interpretado como uma avaliação da qualidade metodológica dos estudos primários em si.

Com os documentos selecionados, procedeu-se à extração de dados dos 18 artigos por meio de um formulário padronizado, que contemplou autores, ano de publicação, periódico ou evento, categorização tecnológica, aplicação na gestão de projetos de obras, dimensão da sustentabilidade e grau de inovação do modelo. Os campos extraídos são sintetizados nas tabelas e na figura apresentadas na Seção 4.

Figura 1 – Fluxo PRISMA



Fonte: Os autores (2026)

4. Análise e Discussão dos Resultados

A Tabela 2 apresenta os 18 artigos selecionados nesta revisão, organizados por identificação, título, ano, autores e fonte de publicação. Esses estudos foram selecionados com base nos critérios de inclusão estabelecidos na metodologia apresentada, que se concentram em Gestão de Projetos de Obras com *IoT* e/ou *Machine Learning* com foco principal em sustentabilidade e Modelos Inovadores.

Tabela 2 – Artigos selecionados

Id	Título	Ano	Autores	Periódico / Evento
----	--------	-----	---------	--------------------

1	Optimization modeling and verification of building materials cost budget for urban rail transit construction	2025	Li et al.	ICIIS 2025: 2025 2nd International Conference on Innovation Management and Information System
2	Traffic load prediction for bridge construction based on Internet of Things and BIM	2025	Lou et al.	Alexandria Engineering Journal
3	An Integrated Planning and Control Framework (IPCF) for Construction Projects—Step 1: Development of the Construction Data Hub (CDH)	2025	Ghazal and Hammad	Applied Sciences (MDPI)
4	An IoT-based architecture for human resource management in construction sites using software defined networking (SDN) and game theory	2025	Niu, Xuejie	Egyptian Informatics Journal
5	ESG introduction mechanism of construction firms based on Bayesian network coupled with machine learning: Evidence from Zhengzhou	2025	Tian et al.	Journal of Environmental Management
6	Design Science Research for Digital Information Management System (DIMS) in Construction and Demolition Waste Management	2025	Saad, Underwood and Ferriz-Papi	The 1st International Conference on Net-Zero Built Environment
7	Digital Integration and Optimization Workflows in Timber Construction with Prefabricated Components: A Business Intelligence-Driven Application for Optimizing Carbon Footprints and Project Performance	2025	Reinders et al.	Proceedings of the 20th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM 2024)
8	Digital Trio: Integration of BIM–EIR–IoT for Facilities Management of Mega Construction Projects	2024	Abdelalim et al.	Sustainability (MDPI)
9	Evaluating Modular House Construction Projects: A Delphi Method Enhanced by Conversational AI	2024	Maceika et al.	Buildings (MDPI)
10	Importance of Using Artificial Intelligence into Iraqi Construction Projects	2023	Al-Asadi et al.	E3S Web of Conferences 457
11	Adaptive control of resource flow to optimize construction work and cash flow via online deep reinforcement learning	2023	Jiang et al.	Automation in Construction
12	Automatic Volume Calculation and Mapping of Construction and Demolition Debris Using Drones, Deep Learning, and GIS	2022	Jiang et al.	Drones (MDPI)
13	Utilising Artificial Intelligence in Construction Site Waste Reduction	2022	Bang and Andersen	Journal of Engineering, Project, and Production Management (EPPM-Journal)
14	HydroBIM — Digital Design, Intelligent Construction, and Smart Operation	2023	Zhang et al.	Journal of intelligent construction

15	Engineering Scheme Decision System Integrating Case Reasoning and BIM Technology	2025	Zhang, Q.	IEEE Access
16	Research on the Use of BIM Technology in Green Building Design Based on Neural Network Learning	2024	Zhang, P.	IEEE Access
17	Real-time concrete strength monitoring: an IoT enabled framework integrating electrochemical and fiber optic sensors for structural integrity assessment	2025	Govindaraju and Basha	Revista Matéria-Rio de Janeiro
18	Desarrollo de un contenedor y clasificador automático de material reciclable como estrategia de economía circular en el contexto educativo	2021	Salinas Osuna et al.	Ingeniería y desarrollo

Fonte: Os autores (2026)

A distribuição anual dos 18 estudos selecionados é a seguinte: 2021 (1 estudo), 2022 (2 estudos), 2023 (3 estudos), 2024 (3 estudos) e 2025 (9 estudos). Trata-se de uma amostra restrita a critérios específicos de busca e de elegibilidade, o que, isoladamente, não permite concluir por um crescimento expressivo da produção científica como um todo. Pode-se afirmar que, na amostra selecionada, a concentração de estudos é maior nos anos mais recentes, o que também pode refletir a maior disponibilidade de publicações em acesso aberto. Esse crescimento pode ser interpretado como reflexo do avanço das tecnologias digitais aplicadas à construção civil, bem como da crescente pressão por práticas sustentáveis no setor. A convergência entre transformação digital e sustentabilidade tem impulsionado o desenvolvimento de soluções baseadas em dados, especialmente em contextos que demandam maior eficiência operacional e redução dos impactos ambientais.

A Tabela 3 organiza os estudos em função das fases do ciclo de vida do projeto. Observa-se maior incidência na categoria “Execução”, o que indica que as tecnologias analisadas têm sido aplicadas principalmente para aprimorar etapas operacionais já estabelecidas pelo planejamento.

Tabela 3 – Fases de aplicação dos artigos selecionados

Fase	Identificações
Execução	1, 2, 4, 11, 12, 17
Planejamento e Execução	3, 7, 13, 14
Planejamento	8, 9, 15, 16
Transversal (Iniciação, Planejamento e Execução)	6, 10
Não se aplica a fases de um projeto	5, 18

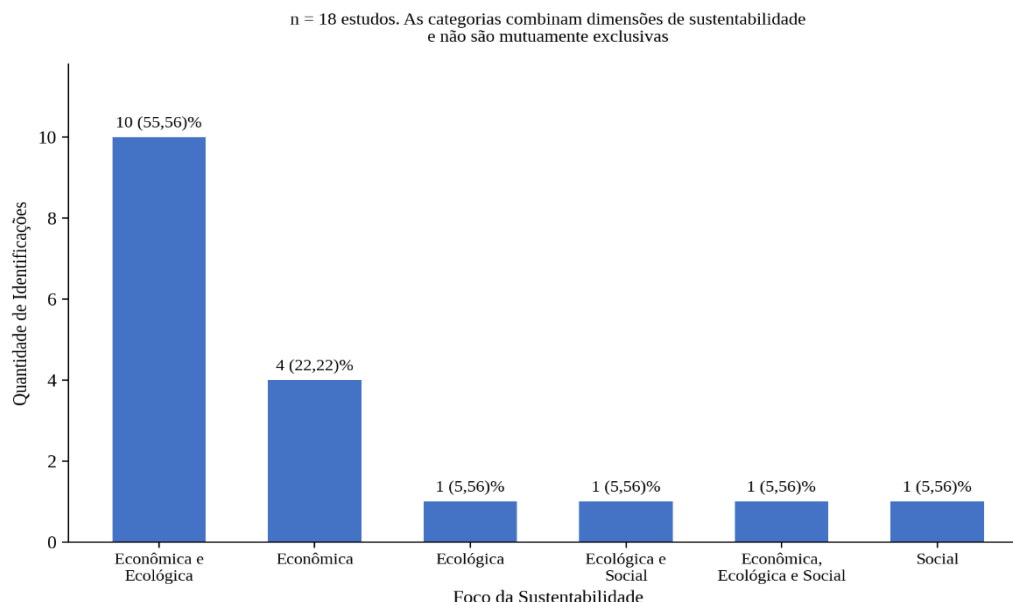
Fonte: Os autores (2026)

Os estudos 5 e 18 foram classificados como "Não se aplica a fases de um projeto" porque investigam, respectivamente, um mecanismo de introdução de critérios ESG em construtoras (TIAN et al., 2025) e um classificador automático de material reciclável desenvolvido em contexto educacional (SALINAS OSUNA et al., 2021): nenhum dos dois descreve uma intervenção situada numa fase específica do ciclo de vida de uma obra (iniciação,

planejamento, execução ou encerramento), tratando-se antes de um processo organizacional e de uma solução tecnológica aplicada fora do contexto de um projeto de construção individual. Ainda assim, ambos foram mantidos na revisão por atenderem aos demais critérios de elegibilidade (uso de IoT e/ou ML, caráter inovador e foco em sustentabilidade), e por ilustrarem, mesmo com relação indireta à gestão de projetos de obras sustentáveis, a aplicação dos princípios de sustentabilidade e economia circular que fundamentam este estudo, podendo ser aplicados na gestão de obras.

A Figura 2 mostra a distribuição das dimensões da sustentabilidade entre os 18 estudos analisados. A dimensão econômica aparece em 15 deles (83,33%), a ecológica em 13 (72,22%) e a social em apenas 3 (16,67%). Vale destacar que, desses 3 casos, apenas um traz a dimensão social isoladamente, e, mesmo nesse caso, a evidência não decorre de um instrumento de avaliação humana direta (entrevista, questionário, indicador ocupacional), e sim de sensoriamento indireto (biométrico e ambiental); nos outros dois, a dimensão social aparece sempre ao lado da dimensão econômica e/ou ecológica. Isso sugere que, quando presente, a preocupação social funciona menos como um objetivo mensurado com instrumentos apropriados e mais como consequência indireta de outros ganhos ou de monitoramento técnico. Parte dessa lacuna provavelmente decorre da própria natureza das tecnologias analisadas. Sensores *IoT* e modelos de *ML* lidam bem com variáveis facilmente mensuráveis, como custo, consumo de material e emissões, mas têm pouco a oferecer quando o que se quer avaliar é a segurança, a saúde ou o bem-estar dos trabalhadores, aspectos que dependem de outros instrumentos, como entrevistas e indicadores de saúde ocupacional. Recomenda-se que os próximos modelos de gestão com *IoT* e *ML* incorporem deliberadamente esses indicadores sociais e de governança, em vez de apenas como consequência indireta de ganhos econômicos ou ambientais.

Figura 2 – Foco da Sustentabilidade nas Publicações Analisadas



Fonte: Os autores (2026)

A Tabela 4 classifica cada publicação como inovação “incremental” ou “radical”. Isso sugere que as aplicações de *IoT* e/ou *ML* identificadas na revisão tendem a aperfeiçoar processos existentes, em vez de propor mudanças disruptivas nos modelos de negócio ou nas cadeias de valor completas. Alguns estudos podem ser vistos como intermediários rumando à

transformação digital plena, ainda que dentro da lógica incremental.

A predominância de inovações incrementais observada na Tabela 4, que corresponde a 94,45% dos estudos analisados, pode ser compreendida a partir de características próprias do setor da construção civil e do nível atual de digitalização das organizações. Conforme discutem Tidd e Bessant (2015), em contextos produtivos mais tradicionais, é comum que a inovação ocorra de forma gradual, priorizando melhorias contínuas em processos já estabelecidos.

No setor da construção, esse comportamento pode ser interpretado à luz da trajetória cumulativa de inovação (*path dependency*), na qual novas tecnologias são incorporadas progressivamente às práticas existentes. Esse processo é característico de setores com regime tecnológico maduro, nos quais a adoção de inovações ocorre de forma incremental, priorizando ganhos de eficiência e redução de riscos, em detrimento de mudanças estruturais mais profundas (TIDD; BESSANT, 2015).

Outro aspecto relevante refere-se aos custos envolvidos na adoção de soluções mais avançadas. A implementação de tecnologias digitais integradas, especialmente as baseadas em inteligência artificial e na interoperabilidade de dados, exige investimentos significativos em infraestrutura, capacitação e governança. Nesse sentido, conforme aponta PMI (2021), a transformação digital em projetos tende a ocorrer de forma progressiva; nos estudos aqui analisados, esse padrão se reflete na maior difusão de inovações de caráter incremental.

A classificação seguiu três indicadores: (a) o estudo aprimora um processo já estabelecido ou é fundamentalmente novo; (b) otimiza uma categoria de solução já existente ou cria uma categoria nova; (c) exige mudança de modelo de negócio ou de estrutura organizacional ou não.

Tabela 4 – Classificação das inovações

Inovação	Identificações	Participação relativa (%)
Incremental	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18	94,45%
Radical	11	5,55%

Fonte: Os autores (2026)

O estudo 11 se diferencia por adotar um controle decisório em malha fechada: em cada etapa, o sistema decide com base na observação atual, utilizando aprendizado por reforço online. Entre os cerca de 20 modelos de otimização do fluxo de recursos comparados no próprio artigo, é o único a apresentar essa característica. Os demais seguem trajetórias fixas, calculadas de antemão por algoritmos genéticos, aprendidas por reforço offline ou por políticas baseadas em regras.

A Tabela 5 apresenta a distribuição em três tipos de inovação: Processo, Organizacional e Produto/Serviço.

Tabela 5 – Tipos de inovação

Tipo de Inovação	Identificações	Participação relativa (%)
Processo	1, 2, 3, 4, 7, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 17	66,67%
Organizacional	5, 6, 8, 13, 14	27,78%
Produto/serviço	18	5,55%

Fonte: Os autores (2026)

Essa classificação é útil para estruturar a discussão dos “modelos inovadores de gestão”; esse resultado sugere que, embora o núcleo das inovações atuais esteja concentrado em melhorias de processos, o avanço da gestão sustentável baseada em *IoT* e/ou *Machine Learning* exigirá transformações organizacionais mais profundas, bem como o desenvolvimento de novos serviços digitais orientados à geração de valor sustentável.

Para garantir a rastreabilidade do processo de seleção, a Tabela 6 detalha, artigo a artigo, a evidência textual que fundamentou a pontuação atribuída a cada um dos três critérios do *checklist* de elegibilidade (uso de *IoT/ML*, caráter inovador e foco em sustentabilidade), descritos na Seção 3. Diferentemente das Tabelas 3, 4 e 5, que sintetizam o resultado final das classificações, a Tabela 6 registra o raciocínio que sustenta cada nota, permitindo ao leitor verificar, de forma independente, por que cada um dos 18 estudos atingiu o corte (ou não) de 2,5 pontos e evidenciando os casos-limite em que a classificação exigiu maior interpretação por parte dos pesquisadores.

Tabela 6 – Elegibilidade dos artigos: evidências e pontuação de aderência temática

Id	1. O estudo utiliza IoT ou ML?	O estudo é considerado uma inovação?	O estudo tem como foco principal a sustentabilidade?	Pontuação
1	Sim: uso extensivo e validado de ML, modelo híbrido LSTM com mecanismo de atenção e Prophet, além de GARCH e Random Forest, com métricas de erro reportadas em tabelas próprias do estudo.	Sim: a combinação específica desses métodos com ponderação dinâmica de 12 fatores, validada empiricamente em dois projetos reais de metrô urbano, é uma síntese não publicada nesse arranjo antes, ainda que os componentes individuais já existam na literatura	Parcial: o benefício ambiental é quantificado e específico, com redução de 53.000 toneladas na compra de cimento e de cerca de 12.000 toneladas de CO2 evitadas, mas é tratado em um único parágrafo secundário, enquanto todo o desenvolvimento metodológico do artigo trata de previsão de custos. Parcial: redução de 18% nas emissões de carbono e de 25% no consumo de energia ocioso, reportada nos resultados e na conclusão como resultado real do modelo aplicado.	2,5
2	Sim: sensores IoT reais (GPS, ETC, monitoramento meteorológico)	Sim: três inovações nomeadas pelos próprios autores e uma integração bidirecional entre BIM e dados de tráfego	Parcial: seção 4.8 dedicada à dimensão "Environmental Impact", com proposta de coleta de dados de emissões de GEE e resíduos sólidos por pacote de trabalho..	2,5
3	Sim: modelo de seleção de atributos com Random Forest (Machine Learning)	Sim: o Modelo de Dados de Trabalho Padrão, de 12 dimensões, unifica quatro estruturas de projeto em uma estrutura mais ampla, preenchendo uma lacuna identificada pelos autores na literatura.	Parcial: o consumo energético dos nós sensores pode ser lido como eficiência energética adjacente à sustentabilidade	2,5
4	Sim: arquitetura IoT em três camadas, quatro tipos de sensores com diagramas de circuito e simulação comparativa de quatro protocolos concorrentes.	Sim: os autores reivindicam ineditismo e apresentam uma função de utilidade própria, combinando energia e atraso por meio da teoria dos jogos.		

5	Sim: rede bayesiana com aprendizado de estrutura e de parâmetros sobre dados reais de questionário, validada por curvas ROC e AUC (Machine Learning)	Sim: os autores afirmam que a pesquisa é a primeira a aplicar redes bayesianas e ML ao processo de introdução de critérios ESG em construtoras.	Sim: o foco central do artigo está relacionado à sustentabilidade. Título, resumo, palavras-chave e todo o artigo abordam a introdução de ESG nas construtoras.	3
6	Sim: IoT é um dos três pilares do framework proposto, com um papel definido na coleta de dados em tempo real.	Parcial: os autores apontam a ausência de um sistema de gestão de informação digital que abranja todo o ciclo de vida do projeto e propõem uma integração entre BIM, IoT e Blockchain, ainda não implementada.	Sim: o objetivo declarado é desenvolver um framework para a gestão de resíduos de construção e demolição no contexto da economia circular. É o foco central do artigo.	2,5
7	Parcial: o artigo trata a IoT como algo futuro, ainda não implementado. Mas a aplicação de Business Intelligence integra dados de BIM, catálogo de componentes pré-fabricados e análise de ciclo de vida, o que sustenta o uso técnico mesmo sem IoT.	Sim: a integração de BIM, catálogo de pré-fabricação e análise de ciclo de vida num único modelo de dados é apresentada pelos autores como algo sem ferramentas equivalentes até então.	Sim: pegada de carbono incorporada é um dos dois indicadores centrais do estudo, já no título, com o objetivo de reduzir a pegada ecológica da construção.	2,5
8	Sim: sensores conectados a um sistema SCADA e a um modelo BIM, com painéis para umidade, temperatura, pressão e câmera.	Sim: o termo "digital trio", proposto como evolução do conceito de gêmeo digital ao incorporar o documento de requisitos de informação ao fluxo, é uma contribuição nomeada pelos próprios autores.	Parcial: sustentabilidade aparece como um dos cinco benefícios listados.	2,5
9	Sim: um modelo de linguagem gera as descrições das escalas de avaliação, documentadas no apêndice com as transcrições completas.	Sim: a combinação do método Delphi com um modelo de linguagem para gerar escalas de avaliação é descrita pelos autores como um desenho de pesquisa novo, aparentemente inédito em construção modular.	Sim: sustentabilidade é destacada nos objetivos do resumo e recebe discussão própria. Nota: no estudo de caso final, o grupo de fatores de sustentabilidade foi excluído da segunda rodada do Delphi pelos próprios participantes, o que vale registrar como ressalva no texto, mesmo mantendo a classificação.	3
10	Sim: o artigo trata de estágios de aplicação de IA na construção, com referências a machine learning e deep learning como etapas do processo descrito.	Parcial: não há proposta de um novo algoritmo ou de uma nova ferramenta. A novidade está no recorte: um ranking de importância percebida da IA por etapa do projeto, específico para o Iraque.	Sim: sustentabilidade é palavra-chave e aparece como motivação em quase todas as subseções do artigo, ligada à conservação de recursos naturais e a projetos sustentáveis.	2,5
11	Sim: uso de aprendizado por reforço profundo, com formulação matemática completa e um simulador de eventos discretos para treinamento.	Sim: primeira aplicação online dessa formulação de fluxo de caixa, cronograma e recursos sob incerteza a esse problema, comparada a cerca de vinte modelos anteriores.	Parcial: a conclusão liga o resultado do modelo a "lean and green construction", o que sustenta a mudança de Não para Parcial.	2,5

12	Sim: dois modelos de deep learning (ML) treinados e comparados para segmentação de imagens, com arquitetura, métricas de acurácia e curvas de treinamento.	Sim: ferramenta própria para converter nuvens de pontos em imagens com elevação e para calcular área e volume, além de uma rede mais leve do que a alternativa comparada.	Sim: o artigo é motivado pela gestão de resíduos de construção e demolição e pelo combate ao despejo ilegal, com uma seção dedicada a esses temas.	3
13	Sim: o artigo associa cada uma das 18 medidas recomendadas a uma técnica de IA e a uma fase do projeto.	Parcial: a contribuição é a síntese do framework e da tabela de medidas, mas as técnicas de IA citadas vêm de uma taxonomia já existente, sem teste de tecnologia nova pelos autores.	Sim: a sustentabilidade é o eixo do artigo desde o título e as palavras-chave, ligada ao objetivo de ação climática.	2,5
14	Sim: sensores (RFID, GPS, infravermelho, scanners a laser) com aplicações demonstradas, incluindo rastreamento de veículos e monitoramento da compactação de barragens.	Sim: sistema próprio, com direitos de propriedade intelectual, aplicado pela primeira vez de forma unificada a barragens hidrelétricas de grande porte.	Parcial: categoria "projeto ecológico" entre os quatro eixos de engenharia, e módulo de "monitoramento ambiental" na plataforma de operação construída.	2,5
15	Parcial: o método de Case-Based Reasoning integrado a BIM é usado ao longo do artigo, com equações próprias de recuperação por similaridade.	Sim: os autores apontam inovação na biblioteca de casos e no mecanismo de recuperação por similaridade residual, aplicados a um domínio ainda não coberto dessa forma.	Sim: aumento da taxa de utilização dos recursos de 75% para 80% (+5 p.p.), associado pelos próprios autores ao uso mais eficiente dos recursos e à redução do desperdício.	2,5
16	Sim: rede neural com retropropagação, arquitetura especificada, formulação matemática e erro de resultado reportado.	Sim: os autores descrevem a aplicação da rede neural à avaliação de risco e custo de edifícios verdes como um primeiro passo nesse domínio pouco explorado.	Sim: a sustentabilidade é o eixo do artigo, com um sistema de critérios que abrange o uso do solo, a energia, a água, a qualidade ambiental interna e a gestão da construção.	3
17	Parcial: especificações de sensores de fibra óptica, estudo de caso em um prédio de dois andares e painel de acompanhamento com atualizações periódicas.	Sim: os autores apontam poucos estudos combinando sensores eletroquímicos e de fibra óptica, e propõem essa integração com modelos clássicos de maturidade do concreto.	Sim: o resumo lista "gestão sustentável do ciclo de vida" como um dos quatro atributos do framework	2,5
18	Sim: rede neural perceptron multicamada com hiperparâmetros definidos, rodando em hardware dedicado que aciona motores e grava os resultados em um banco de dados.	Sim: a integração local do sistema, um contêiner autônomo movido a energia solar, adaptado ao contexto da universidade, é a contribuição prática do estudo.	Sim: o objetivo central é declarado no resumo como uma contribuição ao processo de sustentabilidade ambiental associado à economia circular.	3

Fonte: Os autores (2026)

Destacam-se aplicações voltadas à eficiência de recursos, ao monitoramento inteligente e à gestão de resíduos, reforçando o predomínio das dimensões econômica e ecológica. A menor presença de inovações radicais e de abordagens sociais indica uma limitação dos modelos atuais. Conforme Tidd e Bessant (2015), avanços mais significativos dependem da integração entre tecnologia, processos e estrutura organizacional.

Diante desses achados, a principal contribuição deste estudo reside na proposição de uma

estrutura analítica integrada para a avaliação de modelos de gestão de projetos de obras sustentáveis, articulando simultaneamente o grau e a natureza da inovação e sua aplicação ao longo do ciclo de vida do projeto. Essa abordagem permite uma compreensão mais abrangente do estágio atual de maturidade das soluções baseadas em *IoT* e/ou *Machine Learning*, superando análises fragmentadas e contribuindo para o avanço teórico e aplicado na área.

Sob a perspectiva gerencial, os resultados indicam que, embora haja ganhos relevantes de eficiência, ainda é necessário avançar para modelos mais integrados, que incorporem dimensões sociais e mudanças organizacionais mais profundas, ampliando o potencial transformador das tecnologias no setor.

5 Considerações Finais

Este estudo analisou modelos de gestão de projetos de obras sustentáveis baseados em Internet das Coisas (*IoT*) e *Machine Learning* (*ML*), por meio de uma revisão sistemática da literatura conduzida conforme as diretrizes PRISMA. A análise dos 18 artigos selecionados permitiu identificar padrões relevantes quanto ao grau de inovação, à natureza das soluções e às dimensões da sustentabilidade abordadas.

Os resultados evidenciam a predominância de inovações incrementais (94,45%), concentradas principalmente na melhoria de processos durante a fase de execução. Esse comportamento reflete características estruturais do setor da construção civil, como a baixa maturidade digital, a fragmentação dos processos e a necessidade de mitigar riscos na adoção de novas tecnologias.

No que se refere à sustentabilidade, observou-se maior incidência das dimensões econômicas e ecológicas, com foco na eficiência no uso de recursos e na redução de desperdícios. Em contraste, a dimensão social mostrou-se subexplorada, evidenciando uma lacuna importante e uma oportunidade para o desenvolvimento de modelos mais completos, capazes de incorporar aspectos relacionados à segurança, à saúde e ao bem-estar dos trabalhadores.

Como contribuição científica, o estudo propõe uma abordagem de análise integrada, articulando três dimensões fundamentais: o grau e a natureza da inovação e a fase do ciclo de vida do projeto, o que permite uma compreensão mais estruturada e sistêmica dos modelos investigados. Sob a perspectiva prática, os resultados indicam que a evolução da gestão de projetos na construção civil tende a ocorrer de forma progressiva, exigindo estratégias que conciliem ganhos incrementais de eficiência com avanços na integração tecnológica e organizacional.

Conclui-se que, nos estudos aqui analisados, embora as tecnologias digitais já promovam melhorias relevantes na gestão de projetos de obras sustentáveis, sua plena capacidade transformadora ainda não foi explorada, o que indica que o avanço para modelos verdadeiramente inovadores dependerá da integração entre tecnologia, gestão e sustentabilidade, em uma perspectiva sistêmica e orientada à transformação do setor.

Do ponto de vista da sustentabilidade, essa predominância é coerente com a necessidade de implementar, progressivamente, melhorias em contextos produtivos complexos. Inovações incrementais permitem ganhos operacionais imediatos, com menor necessidade de mudanças estruturais, o que favorece sua adoção em ambientes caracterizados por alta fragmentação e baixa integração tecnológica. Nesse sentido, a consolidação de modelos de gestão verdadeiramente sustentáveis dependerá não apenas da adoção de tecnologias emergentes, mas também da capacidade do setor de promover transformações estruturais que integrem inovação, governança e sustentabilidade de forma sistêmica.

Optou-se por trabalhar apenas com publicações de acesso aberto, o que garantiu a leitura integral de todos os 100 estudos avaliados na fase de elegibilidade. Por outro lado, isso deixou de fora parte da produção científica publicada em periódicos e eventos de acesso pago, muitas vezes ligada a centros de pesquisa mais consolidados. É possível, portanto, que os padrões aqui identificados não se repetissem numa amostra que incluísse essa literatura.

A busca também ficou limitada a três bases de dados (Web of Science, Scopus e IEEE Xplore) e a um recorte temporal específico, o que pode ter deixado de fora estudos relevantes, inclusive os mais recentes. As classificações quanto à inovação, à fase do projeto e à sustentabilidade envolvem certo grau de interpretação; mitigamos isso com a avaliação independente de três pesquisadores e a discussão dos casos de divergência, mas a subjetividade não desaparece por completo. Os 18 estudos incluídos também são heterogêneos entre si, o que dificulta comparações diretas. Por fim, o checklist da Tabela 6 avalia a aderência dos estudos ao escopo temático da revisão (uso de *IoT/ML*, caráter inovador e foco em sustentabilidade), e não a qualidade metodológica dos estudos originais; as dimensões, como delineamento, validação dos dados, risco de viés e confiabilidade dos resultados, não foram avaliadas de forma sistemática. Essa é uma limitação assumida pelo estudo. Recomendamos que trabalhos futuros incorporem instrumentos formais de avaliação da qualidade metodológica e do risco de viés, além de ampliarem as bases consultadas e atualizarem o levantamento periodicamente.

Referências Bibliográficas

- ABDELALIM, A.M.; ESSAWY, A.; ALNASER, A.A.; SHIBEIKA, A. & SHERIF, A. *Digital trio: integration of BIM–EIR–IoT for facilities management of mega construction projects*. Sustainability, v.16, n.15, art.6348, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16156348>.
- AL-ASADI, L.S.M.; AL-JUBOORI, H.A.M.S. & FAKHRATOV, M.A. *Importance of using artificial intelligence into Iraqi construction projects*. E3S Web of Conferences, v.457, art.02012, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345702012>.
- BANG, S. & ANDERSEN, B. *Utilising artificial intelligence in construction site waste reduction*. Journal of Engineering, Project, and Production Management, v.12, n.3, p.239-249, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.32738/JEPPM-2022-0022>.
- GHAZAL, M. & HAMMAD, A. *An integrated planning and control framework (IPCF) for construction projects — Step 1: development of the Construction Data Hub (CDH)*. Applied Sciences, v.15, art.4682, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app15094682>.
- GOVINDARAJU, S. & BASHA, S. *Real-time concrete strength monitoring: an IoT-enabled framework integrating electrochemical and fiber optic sensors for structural integrity assessment*. Revista Matéria, v.30, art.e20240784, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2024-0784>.
- JIANG, C.; LI, X.; LIN, J.R.; LIU, M. & MA, Z. *Adaptive control of resource flow to optimize construction work and cash flow via online deep reinforcement learning*. Automation in Construction, v.150, art.104817, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104817>.
- JIANG, W.; LI, X.; WANG, Y. & ZHANG, Q. *Automatic volume calculation and mapping of construction and demolition debris using drones, deep learning, and GIS*. Drones, v.6, n.10, art.279, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones6100279>.
- LI, P.; ZHANG, T.; LI, Q.; ZHU, X.; YE, C. & XU, L. *Optimization modeling and verification of building materials cost budget for urban rail transit construction*. In: 2nd International Conference on Innovation Management and Information System (ICIIS), p.187-192, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3745676.3745704>.
- LOU, O.; WANG, M. & ZHENG, S. *Traffic load prediction for bridge construction based on Internet of Things and BIM*. Alexandria Engineering Journal, v.127, p.56-65, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.04.077>.

MACEIKA, A.; BUGAJEV, A. & ŠOSTAK, O.R. *Evaluating modular house construction projects: a Delphi method enhanced by conversational AI*. Buildings, v.14, n.6, art.1696, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14061696>.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J. & ALTMAN, D.G. *Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement*. PLoS Medicine, v.6, n.7, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>.

NIU, X. *An IoT-based architecture for human resource management in construction sites using software defined networking (SDN) and game theory*. Egyptian Informatics Journal, v.29, art.100629, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eij.2025.100629>.

PAGE, M.J.; McKENZIE, J.E.; BOSSUYT, P.M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T.C. & MULROW, C.D. *The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews*. BMJ, v.372, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

PETTICREW, M. & ROBERTS, H. *Systematic reviews in the social sciences: a practical guide*. Oxford: Blackwell Publishing, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470754887>.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK Guide)*. 7.ed. Newtown Square: PMI, 2021.

REINDERS, J.; OROZCO, S.; EINGARTNER, V.; FELDHAUS, A.; YANG, Y. & BORREGO, I. *Digital integration and optimization workflows in timber construction with prefabricated components: a business intelligence-driven application for optimizing carbon footprints and project performance*. In: Decarbonizing Value Chains — 20th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM 2024), p.708-715, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-93891-7_78.

SAAD, A.N.; UNDERWOOD, J. & FERRIZ-PAPI, J.A. *Design science research for digital information management system (DIMS) in construction and demolition waste management*. In: 1st International Conference on Net-Zero Built Environment (NTZR 2024), p.1897-1906, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-69626-8_156.

SALINAS OSUNA, E.Y.; ANACONA ORTIZ, J.D.; PATIÑO PERDOMO, O.F. & MILLÁN ROJAS, E.E. *Desarrollo de un contenedor y clasificador automático de material reciclable como estrategia de economía circular en el contexto educativo*. Ingeniería y Desarrollo, v.39, n.1, p.156-174, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14482/inde.39.1.00638>.

TIAN, J.; LIU, Y.; WOOD, L. & SUN, Y. *ESG introduction mechanism of construction firms based on Bayesian network coupled with machine learning: evidence from Zhengzhou*. Journal of Environmental Management, v.375, art.124185, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124185>.

TIDD, J. & BESSANT, J. *Managing innovation: integrating technological, market and organizational change*. 5.ed. Chichester: Wiley, 2015.

UNEP & GLOBALABC. *Global status report for buildings and construction 2024/2025: not just another brick in the wall*. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/47214>.

ZHANG, P. *Research on the use of BIM technology in green building design based on neural network learning*. IEEE Access, v.12, p.94784-94792, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3421540>.

ZHANG, Q. *Engineering scheme decision system integrating case reasoning and BIM technology*. IEEE Access, v.13, p.20040-20053, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3531899>.

ZHANG, Z.; ZHANG, S.; ZHAO, Z.; YAN, L.; WANG, C. & LIU, H. *HydroBIM — digital design, intelligent construction, and smart operation*. Journal of Intelligent Construction, v.1, n.2, art.9180014, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.26599/JIC.2023.9180014>.