Indústria 5.0: Oportunidades e Desafios para Arquitetura e Construção

13º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção e 4º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção

ARACAJU-SE | 08 a 10 de Novembro

[1]INVESTIGAÇÃO DAS APLICAÇÕES INTEGRADAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E BIM NA INDUSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Investigating the Integrated Applications of Artificial Intelligence and BIM in the Construction Industry

Josivan Leite Alves
Universidade Federal de Pernambuco | Recife, Pernambuco | josivan.leite@ufpe.br

Rachel Perez Palha
Universidade Federal de Pernambuco | Recife, Pernambuco | rachel.palha@ufpe.br

Adiel Teixeira de Almeida Filho
Universidade Federal de Pernambuco | Recife, Pernambuco | adielfilho@cin.ufpe.br

RESUMO

As tecnologias digitais avançam incorporando modelagens baseadas em Inteligência Artificial (IA), ao passo que a Construção Civil aplica o Modelagem da Informação da Construção (BIM). Nesse contexto, este artigo tem como objetivo identificar quais são os principais benefícios e desafios da integração entre BIM e IA discutindo também as direções para pesquisas futuras. Para isso, aplica-se uma revisão sistemática da literatura que compreende a aplicação de bibliometria e análise de conteúdo em 166 artigos indexados na *Scopus* e *Web of Science*. Os resultados desta pesquisa mostram que a literatura explora e atesta a viabilidade da automação dos processos de projeto com a combinação de BIM e IA através de dados. Todavia, apontam a necessidade do desenvolvimento de linhas de pesquisas dedicadas a formalização do conhecimento do domínio de automação para potencial utilização dos dados BIM para aplicação de forma contextualizada em diferentes projetos da construção. As contribuições deste trabalho destacam a importância da exploração de novas tecnologias para o ambiente construído, ao passo que explana os desafios de incorporação na indústria. Esta pesquisa ainda contribui para a literatura através da identificação de potenciais tópicos a serem desenvolvidos que podem ser novas tendências de pesquisa.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; BIM; Benefícios; Tecnologia; Construção Civil.

ABSTRACT

While digital technologies advance, incorporating models based on Artificial Intelligence (AI), Civil Construction applies Building Information Modeling (BIM). In this context, this paper aims to identify the main benefits and challenges of integrating BIM and AI, as well as discuss directions for future research. For this, we apply a systematic review of the literature, which includes the application of bibliometrics and content analysis in 166 articles indexed in Scopus and Web of Science databases. Our results show that the literature explores and attests to the feasibility of automating design processes with the combination of BIM and AI through data. However, they point out the need to develop research fields dedicated to formalizing knowledge in the automation domain for the potential use of BIM data for application in a contextualized way in different construction projects. The contributions of this paper highlight the importance of the exploration of new technologies for the built environment, while discuss the challenges of incorporation in the industry. This research also contributes to the literature by identifying potential topics to can be new research trends.

Keywords: Artificial Intelligence; BIM; Benefits; Technology; Construction.

1 INTRODUÇÃO

A era da digitalização incorpora sistemas e tecnologias inteligentes que são usados para criar ambientes de simulação entre os mundos físico e virtual. Conhecida como Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0), a era da digitalização incorpora os modelos de Inteligência Artificial (IA) aplicados à ciência e a engenharia. A Indústria 4.0 é marcada pelas modelagens de análise de dados com precisão, aprendizado, conhecimento, comunicação, planejamento e a operação de objetos (ZHANG *et al.*, 2022). Nesse sentido, a aplicação da Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modeling* - BIM) mudou gradualmente a forma como as informações sobre o ambiente construído são criadas, armazenadas e trocadas entre diferentes *stakeholders* (DARKO *et al.*, 2020). As tecnologias digitais avançam incorporando modelagens baseadas em Inteligência Artificial (IA), tais como análise de dados, aprendizado de máquina, aprendizado profundo, entre outros (BOJE *et al.*, 2020).

[1]ALVES, J. L; PALHA, R. P; ALMEIDA FILHO, A. T Investigação das Aplicações Integradas de Inteligência Artificial e BIM na Industria da Construção Civil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2023, Aracaju. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2023.

Nesse sentido, a automação dos processos de projetos é uma importante área de pesquisa no domínio da indústria da construção civil, com potencial para reduzir significativamente tempo, custo e outros recursos envolvidos no ciclo de vida de um projeto (WANG *et al.*, 2022). A IA pode oferecer vastas oportunidades para melhorias significativas de produtividade por meio da análise de grandes volumes de dados com rapidez e precisão. Além disso, sistemas e tecnologias de IA podem resolver problemas práticos, complexos e não lineares e, uma vez programados, podem realizar previsões e generalizações em alta velocidade (DARKO *et al.*, 2020). Os benefícios da integração do BIM e IA pode ser um fator importante para os processos de planejamento em projetos de construção e como verificador de riscos automatizado em tempo real (WANG *et al.*, 2022).

Nesse contexto, este artigo tem como objetivo identificar quais são os principais benefícios e desafios da integração entre BIM e IA discutindo também as direções para pesquisas futuras. Para isso, utiliza-se uma revisão sistemática da literatura que compreende a aplicação de bibliometria e análise de conteúdo.

2 INTERFACES ENTRE BIM E IA

No contexto da Indústria 4.0, a construção civil pode se beneficiar com constantes inovações no sentido da digitalização e inteligência, de forma a conseguir um aumento considerável na automação, produtividade e confiabilidade na análise de dados. As oportunidades oferecidas pela aplicação de IA residem na modelagem da cadeia de valor da construção, incluindo planejamento, construção, operação e manutenção. Com a aplicação de artefatos da ciência da computação, a IA leva os sistemas a detectar e aprender entradas como o ser humano para percepção, representação de conhecimento, raciocínio, resolução de problemas e planejamento (PAN; ZHANG, 2021).

A IA é a capacidade de um sistema de identificar, interpretar, fazer inferências e aprender com os dados para atingir metas organizacionais e sociais predeterminadas. A IA compreende a capacidade de um sistema de interpretar corretamente dados externos, aprender com esses dados e usar esses aprendizados para atingir metas e tarefas específicas por meio de adaptação flexível as condições dos projetos (MIKALEF; GUPTA, 2021).

De acordo com Zhang *et al.* (2022), o BIM é uma representação digital das características físicas e funcionais de uma instalação, pois pode ser interpretado como um produto, uma tecnologia ou um processo. Como tal, serve como um recurso de conhecimento compartilhado para informações sobre uma instalação, formando uma base confiável para decisões durante seu ciclo de vida (ZHANG *et al.*, 2022).

Técnicas de IA associadas ao BIM podem ser adotadas para estender as funções do sistema de suporte ao projetista. A IA pode interpretar automaticamente a compatibilidade de diferentes projetos. Além disso, de acordo com as regras e restrições de projeto, algoritmos de projeto podem auxiliar na geração de outras soluções arquitetônicas, armadura de aço, componentes estruturais de fachada ou fabricação de painéis de madeira para edifícios residenciais modulares (ZHANG *et al.*, 2022).

A associação de dados e a integração de todos os subsistemas inteligentes podem ser realizadas construindo uma plataforma de gerenciamento abrangente de construção inteligente baseado na combinação de BIM e IA (WANG; HU, 2022). Para maximizar o uso dos dados, IA pode atuar no monitoramento automatizado do progresso do local da obra, detecção precoce de possíveis problemas, otimização da logística e programação do modelo da construção no BIM, gerenciamento da cadeia de valor da construção e avaliação estrutural (PAN; ZHANG, 2021). Paralelamente aos desenvolvimentos na indústria da construção, a pressão externa por um ambiente construído mais inteligente é exercida por agendas mais ambiciosas de energia e emissões de carbono (BOJE *et al.*, 2020).

Por fim, a combinação de BIM com IA incide na percepção de valor para projetos de construção e seus componentes como produtos inteligentes capazes de fornecer informações sobre planejamento e execução em tempo real durante e após a construção. Do ponto de vista do sistema, a combinação de IA e BIM (com o BIM fornecendo informações sobre os componentes) permite uma análise de ciclo de vida mais eficiente (TURNER *et al.*, 2021).

3 METODOLOGIA

Para o alcance do objetivo desta pesquisa, aplicou-se uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), pois é um processo estruturado, replicável e transparente. Essa abordagem tem um papel importante para a aplicação prática de *frameworks* por meio de evidências, pois identifica as principais contribuições científicas de uma área (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003). O processo de composição da amostra foi realizado nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science* (WoS) para identificar estudos realizados em diferentes áreas que abordem simultaneamente a integração de BIM e IA.

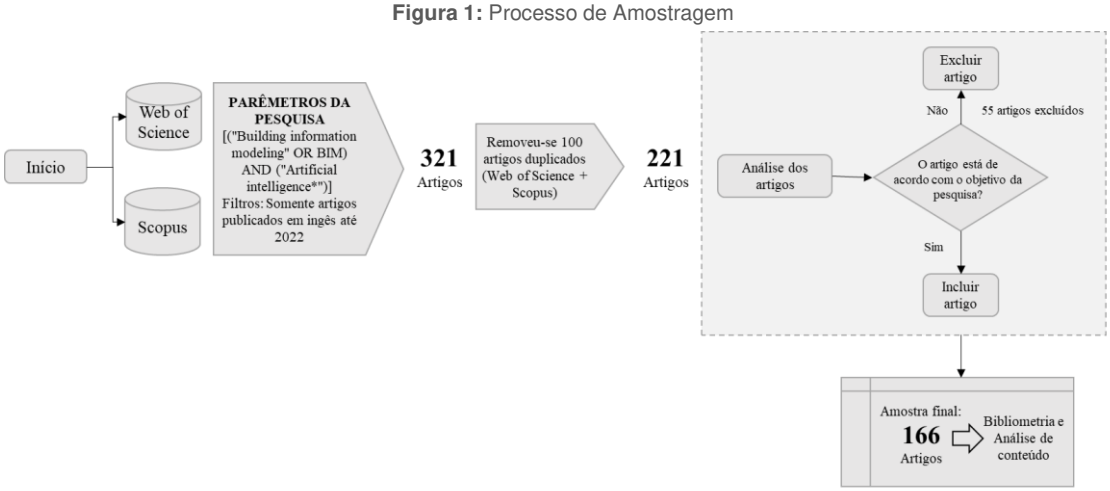
3.1 Processo de Amostragem

As *strings* de busca utilizadas foram [("*Building information modeling" OR* BIM) AND ("*Artificial intelligence**")] em títulos, resumos ou palavras-chave. As bases selecionadas são reconhecidas mundialmente pelo volume e qualidade de documentos científicos nelas indexados (SANTOS; CARVALHO, 2021). Utilizou-se o ambiente do RStudio para a união dos arquivos de metadados de ambas as bases e remoção de eventuais duplicatas.

Inicialmente a *Scopus* forneceu 492 documentos e a WoS forneceu 202. Aplicou-se o filtro do tipo de produção, limitando na Scopus a "*articles*" e "*review*" (totalizando 213 documentos) e na WoS a "*article*", "*early access*" e "*review*" (153 documentos). A busca foi feita em meados de março de 2023, assim limitamos a amostra a artigos publicados até 2022 e considerou-se artigos escritos apenas em inglês totalizando nessa fase 180 artigos na Scopus e 141 na WoS. Além disso, identificou-se 100 artigos duplicados que foram removidos, o que totalizou uma amostra de 221 artigos, assim como mostra a Figura 1.

Todos os títulos e resumos foram lidos para a exclusão dos artigos que não estavam de acordo com o escopo deste estudo. Os critérios de exclusão foram: artigos que não relacionavam a modelagem na construção civil por BIM ser sigla de algumas análises estatísticas e métodos de intervenção na área de ciências da saúde; e artigos que apenas que apontam que a inteligência artificial pode ser aplicada em pesquisa futuras, mas não aprofundam a relação com BIM. Assim, 55 artigos foram excluídos por não estarem condizentes com o escopo da pesquisa. Portanto, 166 artigos compõem a amostra final (Anexo 1) e a Figura 1 mostra seu processo de composição.

Figura 1: Processo de Amostragem



Fonte: Os autores.

3.2 Análise dos Dados

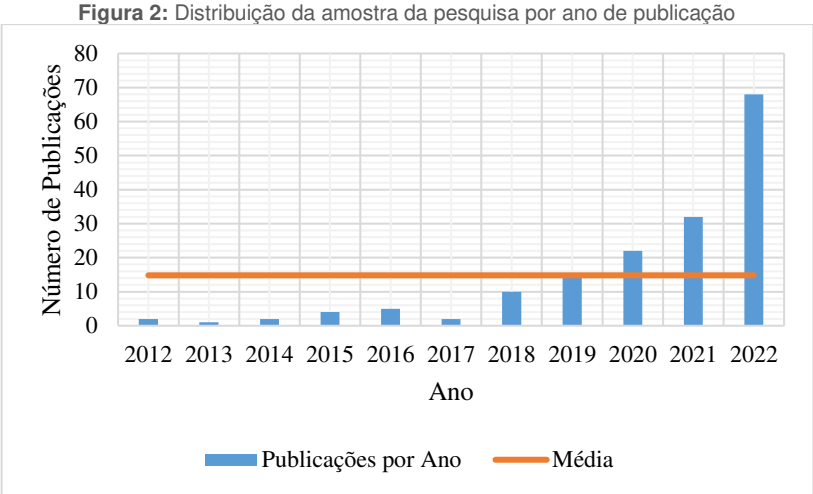
Utilizou-se o ambiente de computação estatística do RStudio para o pré-processamento e limpeza dos metadados bibliográficos das bases de dados Scopus e WoS, removendo assim arquivos duplicados e fazendo a união dos arquivos do tipo .bib. As análises bibliométricas foram feitas no pacote R do bibliometrix que fornece um conjunto de ferramentas para pesquisa quantitativa em bibliometria (ARIA; CUCCURULLO, 2017). Dessa forma, foi possível analisar as tendencias e evoluções do campo de pesquisa. As referências foram administradas com o *software* Mendeley. Por fim, a análise de conteúdo foi feita com auxílio do Nvivo para busca textual em todas a amostra, o que permitiu identificar as correlações entre temáticas relacionadas ao escopo do trabalho (LOPES; CARVALHO, 2018).

4 RESULTADOS

4.1 Bibliometria

Os metadados dos 166 artigos que compõem a amostra desta pesquisa foram importados para os *softwares* para análise. A Figura 2 mostra a distribuição dos artigos por anos, mostrando que o tema é emergente na literatura. Em média, são publicados 15 artigos por ano, com um desvio padrão de 20. Todavia, observa-se um grande volume de artigos a partir de 2020, com seu o maior número de publicações em 2020 (68 artigos). O *Journal Automation in Construction* concentra cerca de 17% da amostra, seguido do *Journal of Computing in Civil Engineering* (4%), *Engineering, Construction and Architectural Management* (4%), *Sustainability (Switzerland)* (3%) e *Buildings* (3%).

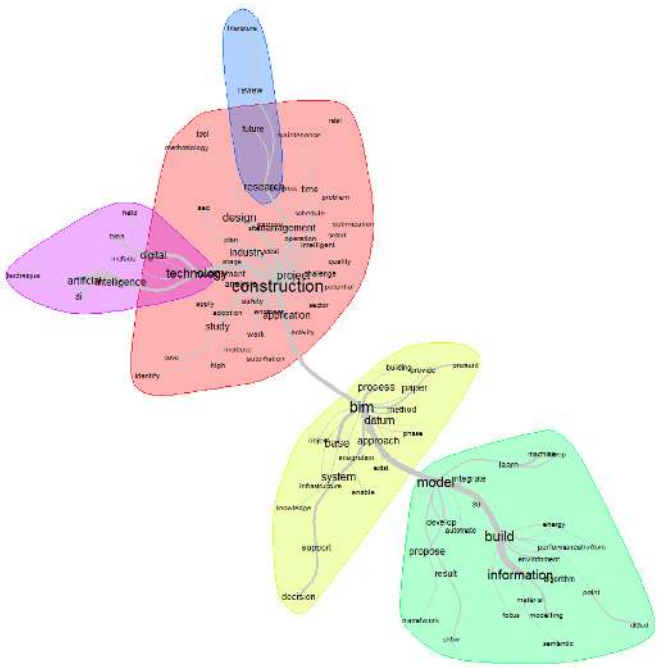
Figura 2: Distribuição da amostra da pesquisa por ano de publicação



Fonte: Os autores.

Performou-se a análise de similitude para co-ocorrência de combinações entre palavras nos títulos e resumos. Isso possibilitou a identificação da estrutura do conteúdo do corpus textual da amostra, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3: Análise de similitude



Nota: Gerado com o Iramuteq.
Fonte: Os autores.

A Figura 3 explora as contribuições e direcionamento para pesquisas futuras sobre a correlação entre IA e BIM. O cluster lilás correlaciona a adoção de tecnologias na construção como gêmeos digitais para criar modelos virtuais que se aproximam da realidade dos projetos. Esses modelos 3D permitem que as equipes de construção interajam virtualmente durante a fase de projeto e planejamento, incorporando também os principais *stakeholders* do projeto. A adoção das tecnologias de automação nos processos de construção faz parte de uma agenda da indústria para a resolução de problemas que envolvem principalmente custo, tempo, qualidade e manutenção, a partir da operacionalização de construções inteligentes (ver cluster vermelho e azul). Para isso, os engenheiros buscam meios para utilização proativa de dados gerados em projetos BIM para análises e integração de conhecimento para modelagem de projetos. Nesse sentido, são utilizados algoritmos para o suporte na tomada de decisão e para potencializar a performance de projetos (ver cluster amarelo e verde).

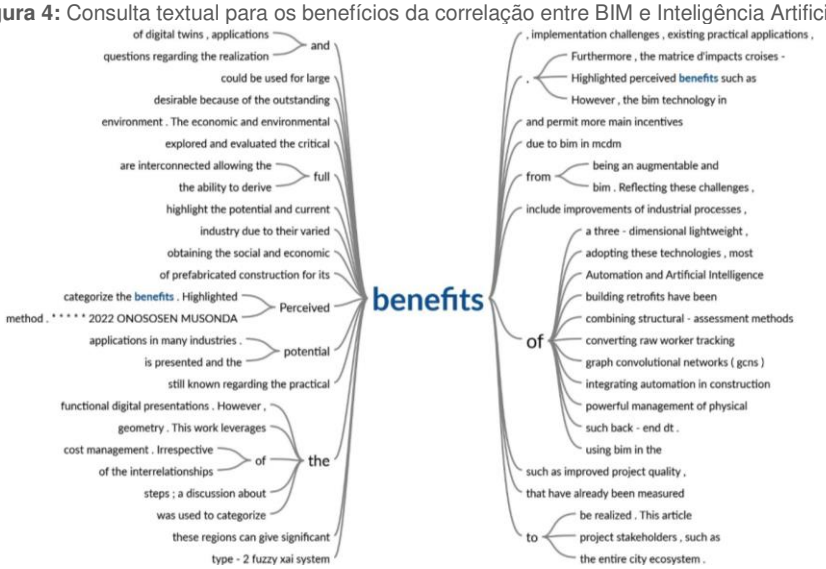
4.2 Análise de Conteúdo

Através de uma lógica de repetição e interação entre os artigos da amostra, a leitura completa dos artigos através do Nvivo forneceu padrões recorrentes que direcionam a duas potenciais preocupações da literatura. A primeira delas busca compreender a motivação da implementação da IA no ambiente construído através da análise dos principais benefícios. Essa preocupação pode ocorrer como forma de justificar os investimentos nessas tecnologias. A segunda analisa quais são os desafios ainda a serem enfrentados pela indústria para que se possa usufruir dos benefícios das tecnologias de IA. Exploramos essas duas frentes de pesquisa a busca por texto no Nvivo que é apresentado na Figura 4 e Figura 5.

Conforme é mostrado na Figura 4, os autores exploram a potencialização dos benefícios utilização do BIM através da IA, por meio na análise e interpretação de dados. Musella *et al.* (2021) buscam avaliar os impactos da IA para a segurança e performance dos projetos, reafirmando a importância do BIM como importante ferramenta para a indústria; enquanto Igwe *et al.* (2022) complementam que o BIM é uma poderosa ferramenta na estimativa e planejamento de custos. Logo, a aplicação conjunta dessas duas tecnologias beneficia os projetos através da contínua coleta, processamento, relatórios e documentação para monitoramento de projeto em tempo real e gerenciamento de recursos de construção (IGWE *et al.*, 2022; MUSELLA *et al.*, 2021). Entre os principais benefícios citados na amostra, destacam-se: melhoria da eficácia da produção, sustentabilidade dos projetos, monitoramento do ambiente de trabalho e segurança em tempo real, controle, medições em tempo real, banco de dados para a tomada de decisão, maior previsibilidade, melhoria nos processos e comunicação com stakeholders.

Esses benefícios podem ser viáveis através da captura de dados sobre o andamento de projetos, atividades de trabalhadores, atividades de veículos, condições climáticas e condições no canteiro de obras. Com essas informações, pode ser possível a condução de análises de dados e algoritmos de inteligência artificial. Algoritmos de programação e otimização podem então ser implantados para derivar novas estratégias para resolver possíveis problemas que surgem durante um projeto de construção (TURNER *et al.*, 2021).

Figura 4: Consulta textual para os benefícios da correlação entre BIM e Inteligência Artificial



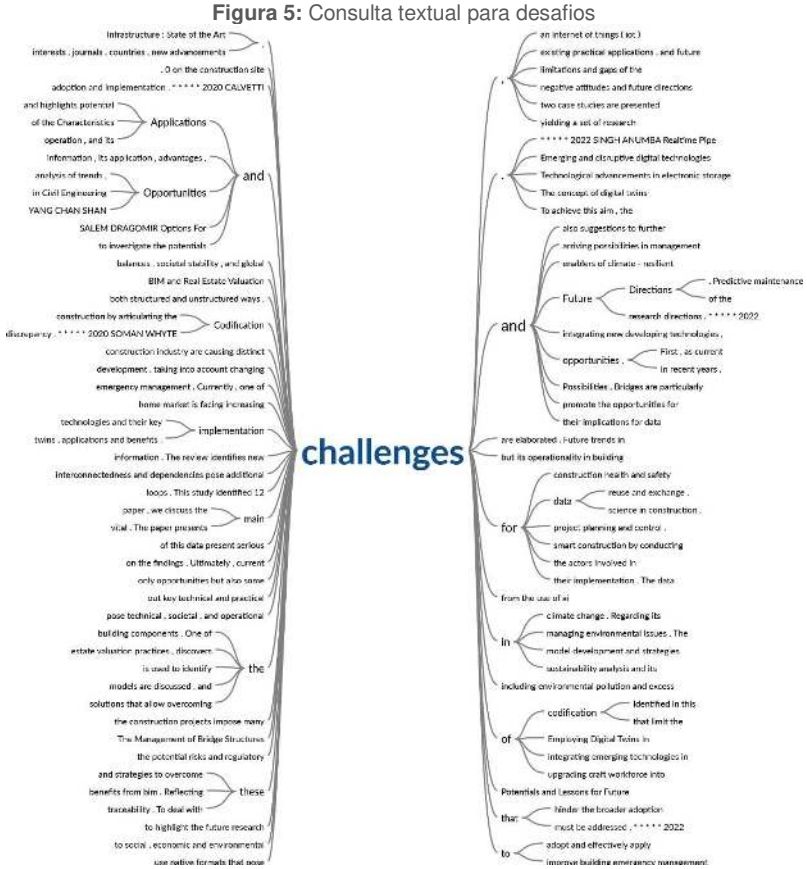
Nota: Gerado com o Nvivo.
Fonte: Os autores.

Um dos principais desafios da integração do BIM e IA reside na falta de padronização adequadas dos dados quando se considera todo o ciclo de vida de uma construção (SHAHZAD *et al.*, 2022). Em um contexto de aplicação de dados entre diferentes obras, o compartilhamento de dados e informações acaba sendo também uma barreira devido a propriedade intelectual, sigilos contratuais e diferentes contextos para cada projeto. Outra dificuldade da aplicação de IA é a dificuldade de conversão de conhecimento tácito para explicito devido as limitações gerenciais que a indústria possui (COLLINS *et al.*, 2022; TURNER *et al.*, 2021). Uma preocupação de autores como Collins *et al.* (2022) e Doukari, Seck e Greenwood (2022) é com o nível de maturidade e expertise no uso do BIM entre os participantes do projeto.

Soman e Whyte (2020) ainda destacam que os desafios tangem os problemas de codificação de informações de projetos. Os problemas de codificação podem reduzir a qualidade das informações para o processamento de dados. A baixa legibilidade dos dados pela máquina é um desafio significativo para a codificação, o que foi observado em todos os projetos. As informações do produto (que no caso são as obras) são bem codificadas através de BIM, desenhos CAD, modelos de análise e assim por diante em todos os projetos. No entanto, as informações codificadas são distribuídas entre diferentes formatos e bancos de dados, limitando a aplicação de análises (SOMAN; WHYTE, 2020).

Para os desafios, destacam-se: a experiência/competência inadequada dos participantes dos projetos, barreiras culturais, os custos das tecnologias, a baixa demanda dos clientes, resistência à mudança, conflito de interesses, o modelo do negócio, falta de estratégias digitais para implementar e usar as novas tecnologias, falta de apoio da liderança, falta de consciência contratual, compatibilidade de dados e segurança e propriedade de dados.

Figura 5: Consulta textual para desafios



Nota: Gerado com o Nvivo.
Fonte: Os autores.

Por fim, apresenta-se os principais direcionamento para pesquisas futuras na Tabela 1. Nesses direcionamentos, alguns autores desta amostra orientam futuros pesquisadores a explorarem modelos de tomada de decisão sobre a aplicação integrada de BIM e IA. Outros orientam o desenvolvimento de algoritmos para análise e interpretação desses temas centrais, principalmente para a comparação de diferentes soluções para eficiência energética. É válido destacar o crescente interesse em aplicações sustentáveis através dessas tecnologias digitais.

Tabela 1: Direcionamentos para pesquisas futuras

Tema central	Aplicações	Fonte
Gerenciamento de *Facilities*	Processamento de dados das instalações para manutenção e redução de custos operacionais	(LEON-GARZA *et al.*, 2022; MARZOUK; ZAHER, 2020; PEDRAL SAMPAIO; AGUIAR COSTA; FLORES-COLEN, 2022);
Segurança	Controle da segurança das atividades de projeto durante a fase de execução da obra.	(KIM; CHO; KIM, 2018; YANG *et al.*, 2021)
Gestão da cadeia de suprimentos	Integração de diferentes fontes de dados para acompanhamento em tempo real de fornecimento de materiais e matérias-primas.	(SACKS *et al.*, 2020; SILVA; CARVALHO; VIEIRA, 2022; TURJO *et al.*, 2021)
Gerenciamento e controle da qualidade de edificações	Utilização de sensores para análises da deterioração de edificações, tais como patrimônios tombados e museus.	(LEE *et al.*, 2022; LEON-GARZA *et al.*, 2022)
Sustentabilidade de projetos	Viabilização do desenvolvimento de projetos sustentáveis.	(ÇETIN; DE WOLF; BOCKEN, 2021; HETEMI; ORDIERES-MERÉ; NUUR, 2020; PETROVA *et al.*, 2019; RODRIGUEZ-TREJO *et al.*, 2017)
Análise da eficiência de energia	Avaliação de impactos energéticos e otimização de modelos para comparação de eficiência energética em termos de custos.	(MOHANTA; DAS, 2023; RŮŽIČKA *et al.*, 2022; SHA *et al.*, 2019)

Fonte: Os autores.

5 DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa mostram que a literatura relacionada a indústria da construção civil explora e atesta a viabilidade da automação dos processos de projeto com a combinação de BIM e IA através de dados. Todavia, apontam a necessidade do desenvolvimento de linhas de pesquisas dedicadas a formalização do conhecimento do domínio de automação para potencial utilização dos dados BIM para aplicação de forma contextualizada em diferentes projetos da construção (DOUKARI; SECK; GREENWOOD, 2022).

As pesquisas que exploram a integração entre BIM e IA buscam principalmente compreender como essas tecnologias podem beneficiar o planejamento e controle de construção, controle de custo, otimização do planejamento, gerenciamento de instalações auxiliado por computador (IGWE *et al.*, 2022). A principal premissa é que o BIM pode ser usado como ponto de fornecimento de dados que podem ser interpretados pela IA, que através de linguagem de programação, automatizam processos de projeto, segurança, controle e otimização de recursos.

As principais tecnologias discutidas na amostra desta pesquisa são aprendizado de máquina, sistemas baseados em conhecimento, robótica, otimização, gêmeos digitais, Internet das Coisas (IoT), realidade aumentada, equipamentos automatizados (drones e robôs) (DOBRUCALI *et al.*, 2022; DOUKARI; SECK; GREENWOOD, 2022; IGWE *et al.*, 2022). Os autores estão interessados em incorporar essas tecnologias aos processos construtivos para fins de lucratividade, eficiência e segurança, assim como foi feito em outras indústrias (DOBRUCALI *et al.*, 2022).

Zhang *et al.* (2022) destacam que a maioria dos *software*s BIM são habilitados para capturar informações digitais durante o processo de projeto e criar os arquivos de *log* de eventos. Logo, ao analisar arquivos de *log* BIM com técnicas de IA, os gerentes de projeto podem obter características do comportamento do projeto e a produtividade das equipes, bem como os comandos de projeto preditivos para melhorar a eficiência da modelagem (ZHANG *et al.*, 2022).

Com relação a novas tendências de pesquisa, os autores orientam o desenvolvimento de estudos para avaliações para tecnologias que possam potencializar a aplicação de alternativas sustentáveis para as construções, tomando como base as orientações de certificações como a *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) que estabelecem requisitos detalhados para componentes de construção (ZHANG *et al.*, 2022).

A sustentabilidade da edificação pode ser avaliada em projetos BIM e com a adoção de técnicas de IA essas as informações de construção ainda podem ser estimadas de forma automatizada e inteligente. Zhang *et al.* (2022) exemplifica que essas estimativas podem ser feitas para a avaliação automática do índice de aproveitamento do concreto para, por exemplo, elaboração de um relatório de sustentabilidade (ÇETIN; DE WOLF; BOCKEN, 2021; HETEMI; ORDIERES-MERÉ; NUUR, 2020; PETROVA *et al.*, 2019). Estendendo essas análises para o ciclo de vida dos projetos, a IA pode auxiliar nas análises relacionadas a eficiência energética e gerenciamento de instalações. Outro campo de pesquisa emergente é a análise da cadeia de

suprimentos, principalmente em cidades inteligentes (MOHANTA; DAS, 2023; RŮŽIČKA *et al.*, 2022; SHA *et al.*, 2019).

Por fim, pode-se afirmar que a informações geradas em projetos BIM permite que as construtoras tenham entendimento aprimorado dos custos, materiais e cronograma dos projetos. No entanto, reconhece-se que a indústria como um todo encontra-se em um estágio inicial de transição para automação dos processos, tendo em vista que algumas empresas ainda não utilizam completamente o BIM em seus projetos ou ainda estão enraizados em modeles bidimensionais (LEON-GARZA *et al.*, 2022). Associado a isso, as pesquisas nesse campo ainda podem estar em uma fase embrionária, principalmente na avaliação de modelos digitais para edificações (MUSELLA *et al.*, 2021).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa objetivou conhecer os principais benefícios e desafios da integração entre BIM e IA na indústria da construção civil através de uma revisão sistemática da literatura. Dessa forma, observou-se que incorporação de tecnologias à indústria pode beneficiar diferentes processos em projetos de ambientes construídos, principalmente aqueles orientados à tomada de decisão. Os desafios dessa incorporação estão relacionados principalmente a fatores culturais da indústria como o atraso na automação dos processos, a ausência e compatibilidade de dados BIM para processamento na IA. As contribuições deste trabalho destacam a importância exploração de novas tecnologias, ao passo que explana os desafios de incorporação na indústria.

Esta pesquisa ainda contribui para a literatura através da identificação de potenciais tópicos ainda a serem desenvolvidos no contexto do ambiente construído. Os desafios para novas pesquisas residem principalmente na integração de recursos físicos e de *software* complexos. Isso também incorpora equipamentos para captura de dados, como sensores e câmeras. Além disso, destaca-se a importância da compreensão da relação humano e máquina o gerenciamento de potenciais artefatos de projetos (documentos, interpretação de requisitos, gerenciamento de equipes) e especificações relacionadas a IA incluindo confiabilidade, segurança e privacidade.

Como contribuição para a prática, este artigo expõe o grande potencial de aplicação da integração de BIM e IA para a área da construção, mas relembra que a indústria ainda possui um nível muito baixo de utilização de tecnologia de ponta. Existem benefícios ainda a serem explorados na prática, tais como desempenho, confiabilidade, eficiência energética e redução custos operacionais.

Por fim, esta pesquisa possui algumas limitações relacionadas a temporalidade das análises e a linguagem dos artigos da amostra (limitou-se apenas para artigos em inglês). Por ser um tema emergente na literatura, as análises e tendencias de pesquisa podem mudar ao longo dos anos, o que pode necessitar de algumas atualizações ao longo dos anos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE - TO-APQ-1178-21-52652); e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - 315245/2020-4).

REFERÊNCIAS

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, *[S. l.]*, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. DOI: 10.1016/j.joi.2017.08.007. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751157717300500.

BOJE, Calin; GUERRIERO, Annie; KUBICKI, Sylvain; REZGUI, Yacine. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. **Automation in Construction**, *[S. l.]*, v. 114, p. 103179, 2020. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580519314785.

ÇETIN, Sultan; DE WOLF, Catherine; BOCKEN, Nancy. Circular Digital Built Environment: An Emerging Framework. **Sustainability**, *[S. l.]*, v. 13, n. 11, p. 6348, 2021. DOI: 10.3390/su13116348. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6348.

COLLINS, Fiona C.; RINGSQUANDL, Martin; BRAUN, Alexander; HALL, Daniel M.; BORRMANN, Andre. Shape encoding for semantic healing of design models and knowledge transfer to scan-to-BIM. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction**, *[S. l.]*, v. 175, n. 4, p. 160–180, 2022. DOI: 10.1680/jsmic.21.00032. Disponível em: https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jsmic.21.00032.

DARKO, Amos; CHAN, Albert P. C.; ADABRE, Michael A.; EDWARDS, David J.; HOSSEINI, M. Reza; AMEYAW, Ernest E. Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. **Automation in Construction**, *[S. l.]*, v. 112, p. 103081, 2020. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103081. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092658051930651X.

DOBRUCALI, Esra; DEMIRKESEN, Sevilay; SADIKOGLU, Emel; ZHANG, Chengyi; DAMCI, Atilla. Investigating the impact of emerging technologies on construction safety performance. **Engineering, Construction and Architectural Management**, *[S. l.]*, 2022. DOI: 10.1108/ECAM-07-2022-0668. Disponível em: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ECAM-07-2022-0668/full/html.

DOUKARI, Omar; SECK, Boubacar; GREENWOOD, David. The Creation of Construction Schedules in 4D BIM: A Comparison of Conventional and Automated Approaches. **Buildings**, *[S. l.]*, v. 12, n. 8, p. 1145, 2022. DOI: 10.3390/buildings12081145. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-5309/12/8/1145.

HETEMI, Ermal; ORDIERES-MERÉ, Joaquin; NUUR, Cali. An Institutional Approach to Digitalization in Sustainability-Oriented Infrastructure Projects: The Limits of the Building Information Model. **Sustainability**, *[S. l.]*, v. 12, n. 9, p. 3893, 2020. DOI: 10.3390/su12093893. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3893.

IGWE, Uchenna Sampson; MOHAMED, Sarajul Fikri; AZWARIE, Mohd Bin Mat Dzahir; UGULU, Rex Asibuodu; AJAYI, Olusegun. Acceptance of contemporary technologies for cost management of construction projects. **Journal of Information Technology in Construction**, *[S. l.]*, v. 27, p. 864–883, 2022. DOI: 10.36680/j.itcon.2022.042. Disponível em: https://www.itcon.org/paper/2022/42.

KIM, Kyungki; CHO, Yong; KIM, Kinam. BIM-Driven Automated Decision Support System for Safety Planning of Temporary Structures. **Journal of Construction Engineering and Management**, *[S. l.]*, v. 144, n. 8, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001519. Disponível em: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0001519.

LEE, Seojoon; JEONG, Minkyeong; CHO, Chung-Suk; PARK, Jaewon; KWON, Soonwook. Deep Learning-Based PC Member Crack Detection and Quality Inspection Support Technology for the Precise Construction of OSC Projects. **Applied Sciences**, *[S. l.]*, v. 12, n. 19, p. 9810, 2022. DOI: 10.3390/app12199810. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/12/19/9810.

LEON-GARZA, Hugo; HAGRAS, Hani; PEÑA-RIOS, Anasol; CONWAY, Anthony; OWUSU, Gilbert. A type-2 fuzzy system-based approach for image data fusion to create building information models. **Information Fusion**, *[S. l.]*, v. 88, p. 115–125, 2022. DOI: 10.1016/j.inffus.2022.07.007. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1566253522000665.

LOPES, Ana Paula Vilas Boas Viveiros; DE CARVALHO, Marly Monteiro. Evolution of the open innovation paradigm: Towards a contingent conceptual model. **Technological Forecasting and Social Change**, *[S. l.]*, v. 132, p. 284–298, 2018. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.02.014. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162518302786.

MARZOUK, Mohamed; ZAHER, Mohamed. Artificial intelligence exploitation in facility management using deep learning. **Construction Innovation**, *[S. l.]*, v. 20, n. 4, p. 609–624, 2020. DOI: 10.1108/CI-12-2019-0138. Disponível em: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/CI-12-2019-0138/full/html.

MIKALEF, Patrick; GUPTA, Manjul. Artificial intelligence capability: Conceptualization, measurement calibration, and empirical study on its impact on organizational creativity and firm performance. **Information & Management**, *[S. l.]*, v. 58, n. 3, p. 103434, 2021. DOI: 10.1016/j.im.2021.103434. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378720621000082.

MOHANTA, Ashaprava; DAS, Sutapa. Decision support system for the early stage of green building envelope design considering energy and maintainability. **Architectural Engineering and Design Management**, *[S. l.]*, v. 19, n. 2, p. 163–182, 2023. DOI: 10.1080/17452007.2022.2094869. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452007.2022.2094869.

MUSELLA, Christian; SERRA, Milena; MENNA, Costantino; ASPRONE, Domenico. Building information modeling and artificial intelligenc: Advanced technologies for the digitalisation of seismic damage in existing buildings. **Structural Concrete**, *[S. l.]*, v. 22, n. 5, p. 2761–2774, 2021. DOI: 10.1002/suco.202000029. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/suco.202000029.

PAN, Yue; ZHANG, Limao. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. **Automation in Construction**, *[S. l.]*, v. 122, p. 103517, 2021. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103517. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580520310979.

PEDRAL SAMPAIO, Rodrigo; AGUIAR COSTA, António; FLORES-COLEN, Inês. A Systematic Review of Artificial Intelligence Applied to Facility Management in the Building Information Modeling Context and Future Research Directions. **Buildings**, *[S. l.]*, v. 12, n. 11, p. 1939, 2022. DOI: 10.3390/buildings12111939. Disponível em:

https://www.mdpi.com/2075-5309/12/11/1939.

PETROVA, Ekaterina; PAUWELS, Pieter; SVIDT, Kjeld; JENSEN, Rasmus Lund. Towards data-driven sustainable design: decision support based on knowledge discovery in disparate building data. **Architectural Engineering and Design Management**, *[S. l.]*, v. 15, n. 5, p. 334–356, 2019. DOI: 10.1080/17452007.2018.1530092. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452007.2018.1530092.

RODRIGUEZ-TREJO, Sergio; AHMAD, Ahmad Mohammad; HAFEEZ, Mian Atif; DAWOOD, Huda; VUKOVIC, Vladimir; KASSEM, Mohamad; NAJI, Khalid K.; DAWOOD, Nashwan. Hierarchy based information requirements for sustainable operations of buildings in Qatar. **Sustainable Cities and Society**, *[S. l.]*, v. 32, p. 435–448, 2017. DOI: 10.1016/j.scs.2017.03.005. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670716307119.

RŮŽIČKA, Jan; VESELKA, Jakub; RUDOVSKÝ, Zdeněk; VITÁSEK, Stanislav; HÁJEK, Petr. BIM and Automation in Complex Building Assessment. **Sustainability**, *[S. l.]*, v. 14, n. 4, p. 2237, 2022. DOI: 10.3390/su14042237. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/14/4/2237.

SACKS, Rafael; BRILAKIS, Ioannis; PIKAS, Ergo; XIE, Haiyan Sally; GIROLAMI, Mark. Construction with digital twin information systems. **Data-Centric Engineering**, *[S. l.]*, v. 1, p. e14, 2020. DOI: 10.1017/dce.2020.16. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S2632673620000167/type/journal_article.

SANTOS, Paula de Oliveira; CARVALHO, Marly Monteiro De. Exploring the challenges and benefits for scaling agile project management to large projects: a review. **Requirements Engineering**, *[S. l.]*, v. 27, n. 1, p. 117–134, 2021. DOI: 10.1007/s00766-021-00363-3. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/s00766-021-00363-3.

SHA, Huajing; XU, Peng; YANG, Zhiwei; CHEN, Yongbao; TANG, Jixu. Overview of computational intelligence for building energy system design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, *[S. l.]*, v. 108, p. 76–90, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.018. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032119301510.

SHAHZAD, Muhammad; SHAFIQ, Muhammad Tariq; DOUGLAS, Dean; KASSEM, Mohamad. Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. **Buildings**, *[S. l.]*, v. 12, n. 2, p. 120, 2022. DOI: 10.3390/buildings12020120. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-5309/12/2/120.

SILVA, Tássia Farssura Lima; CARVALHO, Marly Monteiro; VIEIRA, Darli Rodrigues. BIM Critical-Success Factors in the Design Phase and Risk Management: Exploring Knowledge and Maturity Mediating Effect. **Journal of Construction Engineering and Management**, *[S. l.]*, v. 148, n. 10, 2022. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002343. Disponível em: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0002343.

SOMAN, Ranjith K.; WHYTE, Jennifer K. Codification Challenges for Data Science in Construction. **Journal of Construction Engineering and Management**, *[S. l.]*, v. 146, n. 7, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001846. Disponível em: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0001846.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, *[S. l.]*, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003. DOI: 10.1111/1467-8551.00375. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-8551.00375.

TURJO, Manoshi Das; KHAN, Mohammad Monirujjaman; KAUR, Manjit; ZAGUIA, Atef. Smart Supply Chain Management Using the Blockchain and Smart Contract. **Scientific Programming**, *[S. l.]*, v. 2021, p. 1–12, 2021. DOI: 10.1155/2021/6092792. Disponível em: https://www.hindawi.com/journals/sp/2021/6092792/.

TURNER, Christopher J.; OYEKAN, John; STERGIOULAS, Lampros; GRIFFIN, David. Utilizing Industry 4.0 on the Construction Site: Challenges and Opportunities. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, *[S. l.]*, v. 17, n. 2, p. 746–756, 2021. DOI: 10.1109/TII.2020.3002197. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9117064/.

WANG, Hongbo; HU, Yan. Artificial Intelligence Technology Based on Deep Learning in Building Construction Management System Modeling. **Advances in Multimedia**, *[S. l.]*, v. 2022, p. 1–9, 2022. DOI: 10.1155/2022/5602842. Disponível em: https://www.hindawi.com/journals/am/2022/5602842/.

WANG, Hongxin; XU, Peng; SHA, Huajing; GU, Jiefan; XIAO, Tong; YANG, Yikun; ZHANG, Dingyi. BIM-based automated design for HVAC system of office buildings—An experimental study. **Building Simulation**, *[S. l.]*, v. 15, n. 7, p. 1177–1192, 2022. DOI: 10.1007/s12273-021-0883-7. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/s12273-021-0883-7.

YANG, Yang; CHAN, Albert P. C.; SHAN, Ming; GAO, Ran; BAO, Fengyu; LYU, Sainan; ZHANG, Qingwen; GUAN, Junfeng. Opportunities and Challenges for Construction Health and Safety Technologies under the COVID-19 Pandemic in Chinese Construction Projects. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, *[S. l.]*, v. 18, n. 24, p. 13038, 2021. DOI: 10.3390/ijerph182413038. Disponível em: https://www.mdpi.com/1660-4601/18/24/13038.

ZHANG, Fan; CHAN, Albert P. C.; DARKO, Amos; CHEN, Zhengyi; LI, Dezhi. Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry. **Automation in Construction**, *[S. l.]*, v. 139, p. 104289, 2022. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104289. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580522001625.

Anexo 1: Amostra da pesquisa – Continua

Autoria	Ano	Autoria	Ano
Ergan; Akinci	2012	Eber	2020
Hamid Musirin; Rahim; Kamari	2012	You;Feng	2020
Wang; Li ;Rezgui	2013	Cucurnia;Ridolfi	2020
Macher; Landes; Grussenmeyer;	2014	Frias;Maria;Sanchez;Almeida	2020
Woo ;Menassa	2014	Dark;Chan;Adabre;Edwards	2020
Jalaei ;Jrade ;Nassiri	2015	Marzouk;Zaher	2020
Kim ;Kim ;Fischer ;Orr	2015	Pillai;Matus	2020
Chen;Lu;Pen;Rowlinson;Huang	2015	Nakahata;Noguchi;Iwasaki	2021
Golparvar-Fard;Pea-Mora	2015	Yang;Chan;Shan;Gao;Bao;Lyu	2021
Chen ;Pan	2016	Muhammad;Ying;Nithish;Xin	2021
Chardon;Brangeon ;Bozonnet	2016	Johansen;Nielsen;Schultz;Teizer	2021
Tixier ;Hallowell;Rajagopalan	2016	Jang;Kim;Ju;An	2021
Yang ;Shi ;Wu	2016	Bosch-Sijtsema;Claeson-Jonsson	2021
Solihin ;Eastman ;Lee	2016	Cheng;Fang;Wang	2021
Rodriguez-Trejo;Ahmad ;Hafeez	2017	Musella;Serra;Menna;Asprone	2021
Juszczyk	2017	Liu;Jiang	2021
Kamari;Laustsen;Peterson	2018	Karan;Asgari;Rashidi	2021
Mcarthur;Shahbazi;Fok	2018	Caterino;Nuzzo;Ianniello;Varchet	2021
Kim;Cho;Kim	2018	Schranz;Urban;Gerger	2021
Bloch;Sacks	2018	Mulero-Palencia;Lvarez-Daz	2021
Li;Xue ;Li;Hong;Shen	2018	Spallone;Palma	2021
Bruno; ;Fatiguso	2018	Etin;Bocken	2021
Khairulzaman ;Usman	2018	Ma;Li ;Wang;Yang	2021
Marroquin;Dubois J;Nicolle	2018	Chen;Yuan;Ji;Lu;Xiao;Tao;Kang	2021
Carreira;Castelo;Gomes	2018	Pan;Zhang	2021
Fioravanti;Novembri;Rossini	2018	Sresakoolchai;Kaewunruen	2021
Rossini	2019	Alheeti;Aldaiyat	2021
Zhou;Zhao;Wang;Huang;Li	2019	Du	2021
Sha ;Xu;Yang ;Chen;Tang	2019	Matrone;Martini	2021
Bianconi F;Filippucci M;Buffi A	2019	Du	2021
Karan ;Asadi	2019	Li;Duan;Su	2021
Bongiorno;Bosurgi;Carbone	2019	Tavakolan;Mohammadi;Zahraie	2021
Livshits;Glebovskyi;Protsuto	2019	He;Li;Gan;Ma	2021
Tefani;Stankovski	2019	Turner;Oyekan;Stergioulas	2021
Acharya;Khoshelham;Winter	2019	Galluccio	2021
Cheng; Chang	2019	Maureira;Pinto;Yepes;Garcia	2021
Hu;Castro-Lacouture	2019	Abdirad;Mathur	2021
Antonino;Nicola;Claudio;Luciano	2019	Manzoor;Othman;Pomares	2021
Petrova;Pauwels;Svidt;Jensen	2019	Yitmen;Alizadehsalehi;Akiner	2021
Lu;Liu;Liu;Liu	2019	Hong;Xie;Bhumbra;Brilakis	2021
Rossini F	2019	Gonzalez;Demetrio;Toledo;Arna	2021
Sacks;Brilakis;Pikas;Xie;Girolam	2020	Matrone;Martini	2021
Sacks;Girolami;Brilakis	2020	Meschini;Pellegrini;Locatelli	2022
Bloch;Sacks	2020	Zhang ;Zou	2022
Bienvenido-Huertas;Nieto-Julin	2020	Leon-Garza;Hagras;Pea-Rios	2022
Novembri;Rossini	2020	Farghaly;Collinge;Mosleh;Manu	2022
Soman;Whyte	2020	Pedral ;Aguiar;Flores-Colen	2022
Arashpour;Heidarpour;Akbar	2020	Fras;Pinto;Sousa;Lorenzo	2022
Boje;Guerriero;Kubicki;Rezgui	2020	Etin;Gruis ;Straub	2022
Nekouvaght;Taghaddos;Mousaei	2020	Baghalzadeh;Keivani;Moehler	2022
Calvetti;Magalhes;Sujan;Gonalve	2020	Lee;Jeong;Cho;Park;Kwon	2022
Hetemi;Ordieres-Mer;Nuur	2020	Lin;Huang;Putranto	2022
Doukari;Greenwood	2020	Matos;Rodrigues;Costa;Rodrigue	2022
Martinez;Al-Hussein;Ahmad	2020	Garcia-Gago;Snchez-Aparicio	2022
Lu;Xie;Parlikad;Schooling	2020	Baduge;Thilakarathna	2022
Hsu;Chang;Chen;Wu	2020	Wang;Issa;Anumba	2022

Anexo 1: Amostra da pesquisa – Fim

Autoria	Ano		Autoria	Ano
Cai	2022		Cdric;Patrick;Ursula;Marcelline	2022
Doukari;Seck;Greenwood	2022		Wang;Hu	2022
Rodrigues;Cotella;Rodrigues;Roch	2022		Salunkhe;Gobinath;Vinay;Joseph	2022
Mahmudnia;Arashpour;Yang	2022		Wan;Abdullah;Ismail	2022
Elghaish;Chauhan;Matarneh;Pour	2022		Omar;Mahdjoubi	2022
Zhang;Chan;Darko;Chen;Li	2022		Li;Li;Zhang	2022
Scherz;Hoxha;Kreiner;Passer	2022		Sun;Liu	2022
Wang;Xu;Sha;Gu;Xiao;Yang	2022		Singh;Prasath	2022
Hajirasouli;Banihashemi	2022		Villa;Bruno;Aliev;Piantanida	2022
Collins;Ringsquandl;Braun;Hall	2022		Argyroudis;Mitoulis;Chatzi;Baker	2022
Wang;Wang;Ma;Li;Tie	2022		Zabin;Gonzlez;Zou;Amor	2022
Kanyilmaz;Tichell;Loiacono	2022		Luo;Li;Crabbe;Pu	2022
Sun;Ki	2022		Megahed;Hassan	2022
Arrotia; ;Melhado	2022		Jiang;Han;Bai	2022
Salem;Dragomir	2022		Xu;Duo;Tang	2022
Dinis;Poas;Guimares;Range	2022		Yu;Ha;Lee;Choi;Koo	2022
Singh ;Anumba	2022		Chen;Ying	2022
Shahzad;Shafiq;Douglas;Kassem	2022		Bien;Salamak	2022
Hallaji;Fang;Winfrey	2022		Wu;Yuan;Tang;Tian	2022
Igwe;Mohamed;Dzahir;Ugulu	2022		Lehtola;Koeva;Elberink;Raposo	2022
Jafary;Shojaei;Rajabifard;Ngo	2022		Onososen;Musonda	2022
Dobrucali;Demirkesen;Sadikoglu	2022		Herrera-Martin;Castilla-Rodriguez	2022
Tang;Liu	2022		Opoku;Perera;Osei-Kyei	2022
Talla;Mcilwaine	2022		Kim;Lim;Yum;Son	2022
Mohanta;Das	2022		Ozerol;Selcuk	2022
Doukari;Greenwood;Rogage;Kasse	2022		Pan;Zhang	2022
Srivastava;Jawaid;Singh	2022		Kor;Yitmen;Alizadehsalehi	2022

Fonte: Os autores.