

BIM COMO SUPORTE À AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFÍCIOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

BIM AS A SUPPORT FOR BUILDING LIFE CYCLE ASSESSMENT: A SYSTEMATIC REVIEW

JORDANA DE OLIVEIRA | UNISINOS

REGINA CÉLIA ESPINOSA MODOLO, DRa. | UNISINOS

MARCO AURÉLIO STUMPF GONZÁLEZ, DR. | UNISINOS

RESUMO

A demanda por construções mais sustentáveis tem apresentado um crescimento a partir do avanço tecnológico de alternativas que minimizam os impactos das edificações. Porém, a avaliação do ciclo de vida dos empreendimentos ainda carece de desenvolvimento de tecnologias de levantamento e análise de dados primários. Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo, identificar o potencial uso da ferramenta BIM (Building Information Modeling) para apoiar na avaliação ambiental de edificações. Por meio da metodologia de revisão sistemática de literatura, foram analisados 30 artigos publicados na base de dados da Science Direct, publicados entre 2017 e 2021, baseados em questões de pesquisa e critérios de inclusão e exclusão previamente definidos. Como resultados, se identificou que o foco das pesquisas é facilitar os processos de avaliação ambiental integrando bancos de dados e modelos BIM. Verificou-se, que as pesquisas apresentam dificuldades na seleção de softwares e bancos de dados, bem como, na interoperabilidade entre sistemas. Foi possível identificar também que, a qualidade dos dados obtidos para a avaliação do ciclo de vida está ligada às fontes de dados ambientais, sendo sugerido o maior envolvimento de fornecedores no processo. Com tudo, foi possível concluir que a evolução do processo deve levar em conta os resultados das análises a considerar na gestão de ativos, demolição, reconstrução e reciclagem, temas poucos explorados nas pesquisas.

PALAVRAS-CHAVE: Ferramentas de Avaliação Ambiental; BIM; Avaliação de Ciclo de Vida.

ABSTRACT

The demand for more sustainable buildings has shown growth from the technological advance of alternatives that minimize the impacts of buildings. However, the assessment of the life cycle of projects still lacks the development of technologies for surveying and analyzing primary data. Given the above, this article aims to identify the potential use of the BIM (Building Information Modeling) tool to support the environmental assessment of buildings. Through the methodology of systematic literature review, 30 articles published in the Science Direct database, published between 2017 and 2021, were analyzed, based on research questions and previously defined inclusion and exclusion criteria. As a result, it was identified that the focus of research is to facilitate environmental assessment processes by integrating databases and BIM models. It was found that the researches present difficulties in the selection of software and databases, as well as in the interoperability between systems. It was also possible to identify that the quality of the data obtained for the life cycle assessment is linked to the sources of environmental data, suggesting a greater involvement of suppliers in the process. However, it was possible to conclude that the evolution of the process must take into account the results of the analysis to be considered in the management of assets, demolition, reconstruction and recycling, topics little explored in research.

KEY WORDS: Environmental Assessment Tools; BIM; Life Cycle Assessment.



1. INTRODUÇÃO

A busca por soluções de construção mais sustentáveis tem se intensificado em todo o mundo, por exigências governamentais e sociais, sendo um fator relevante para o sucesso de um projeto (EDWARDS *et al.*, 2019). Com isso, as iniciativas na área focam na redução da geração de resíduos; no desenvolvimento de materiais de construção alternativos; nas alternativas de produção que reduzam a emissão de gases de efeito estufa; e na reutilização de seus componentes, reduzindo tanto o consumo de novos materiais quanto a geração de resíduos para destinação final (CARVAJAL-ARANGO *et al.*, 2019; AKINADE *et al.*, 2017).

Dentre outros fatores, essa preocupação se deve pela alta taxa de contribuição nos níveis de emissão de dióxido de carbono (CO₂), tanto incorporado aos materiais utilizados, quanto na operação dos edifícios. Na literatura científica, a maior atenção é dada aos impactos do uso e operação das edificações – energia consumida para aquecer, resfriar, ventilar e iluminar (NIZAM; ZHANG; TIAN, 2018). Todavia, as emissões pela energia incorporada na extração, fabricação e transporte dos materiais, além dos processos construtivos e de manutenção, também contribuem no impacto total da edificação (ABANDA; OTI; TAH, 2017).

Considerando essa cadeia produtiva, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se apresenta como uma importante ferramenta na tomada de decisão para acelerar o uso de materiais com melhor desempenho a longo prazo. Mesmo sendo um instrumento essencial para essa análise, são lacunas observadas: critérios para alocação de impactos e créditos de reutilização ao longo de vários ciclos de vida, bem como a análise de incertezas considerando os longos períodos de vida útil das edificações (EBERHARDT; BIRGISDÓTTIR; BIRKVED, 2019).

Diante disso, a utilização de tecnologias para uma gestão ambiental mais eficiente é necessária, sendo uma das alternativas o Building Information Modeling (BIM). O BIM tem sido amplamente pesquisado como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão nos processos de avaliação ambiental, pelo fornecimento facilitado de quantitativos dos materiais de construção e por proporcionar colaboração e melhor visualização dos componentes do projeto, enriquecidos com dados (SAFARI; AZARIJAFARI, 2021). Com isso, se apresenta com grande potencial para promover o desenvolvimento sustentável, a proteção ambiental, e para aprimorar o processo de tomada de decisão no setor da construção (NAJJAR *et al.*, 2017).

Liu *et al.* (2021) evidenciam que estudos relacionando BIM e sustentabilidade tiveram início em 2007, com um incremento considerável a partir de 2014. Alguns dos principais temas abordados são: a potencialização de análise do desempenho das construções; o apoio a avaliação de construções verdes; a redução dos resíduos de construção e o monitoramento de performance de sustentabilidade. Neste tema, envolvendo desempenho térmico, de

energia, de dióxido de carbono, e uso da água.

Diante do cenário apresentado, o presente estudo tem como objetivo verificar quais os potenciais de utilização do BIM para apoiar as ferramentas de avaliação ambiental na construção civil, identificando os softwares e bancos de dados mais utilizados, além das dificuldades observadas nos estudos, tendo como foco as abordagens de avaliação ambiental de todo o ciclo de vida da construção.

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesse artigo foi a revisão sistemática de literatura. Safari e Azarijafari (2021) realizaram uma revisão sistemática de literatura a fim de analisar o status da atual sobre a integração entre ACV e BIM, seguido da identificação de lacunas de pesquisa e oportunidades para essa integração. Para o estudo, os autores basearam-se no método PRISMA.

O método PRISMA se caracteriza por uma lista de verificação de itens que devem ser apresentados em artigos científicos de revisões sistemáticas e meta-análises (PRISMA, 2020).

Apesar de ter sido criado para pesquisas da área médica, o método passou a ser adotado em diversas áreas do conhecimento, dentre elas a engenharia (PRISMA, 2020). Com base nessas referências, são apresentadas as etapas da pesquisa, divididas em: escopo, busca de evidências e estrutura de análise.

2.1 Escopo

O objetivo geral dessa pesquisa é analisar os potenciais de utilização do BIM no apoio às ferramentas de avaliação ambiental, no setor da construção civil. A partir de pesquisas prévias sobre o tema, foram elaboradas a questão geral (QG) do estudo, além de duas questões específicas (QS), e cinco questões estatísticas (QE).

O Quadro 1 apresenta as questões de pesquisa utilizadas para a realização da busca pelos trabalhos já publicados sobre o tema.

Id	Questão detalhada
QG1	Quais os potenciais de utilização do BIM para apoiar as ferramentas de avaliação ambiental na construção civil?
QS1	Quais são as barreiras técnicas para implementação do BIM no apoio a avaliação ambiental?
QS2	Quais são as dificuldades processuais para implementação do BIM no apoio a avaliação ambiental?
QE1	Quais as principais ferramentas de computação utilizadas para avaliação ambiental de edificações da construção civil?
QE2	Quais as principais estruturas de bancos dados que suportam a avaliação ambiental de edificações da construção civil?
QE3	Em quais periódicos os resultados foram publicados?
QE4	Qual é a origem das pesquisas?
QE5	Quantas foram as publicações por ano?

Quadro 1: Questões de pesquisa

Fonte: Autores (2022).

2.2 Busca de evidências

O processo de pesquisa teve início na seleção das bases científicas dos artigos. Ganiyu *et al.* (2020) utilizaram em sua revisão sistemática, as bases Scopus, EBSCOhost, Science Direct e Google Acadêmico. Carvajal-Arango *et al.* (2019), por sua vez, utilizaram as bases Science Direct, Scopus, Compex/Engineering Village, Springerlink, Taylor & Francis, e Google Scholar. Considerando essas e outras pesquisas baseadas em revisões sistemáticas de literatura, este artigo adotou com as bases a Science Direct e Scielo, a fim de obter fontes de artigos em periódico, revisados por pares, e nas línguas portuguesa e inglesa.

Na sequência, foram definidas as strings de busca, que consideram as questões de pesquisa para obter um maior número de artigos relevantes sobre o tema. As palavras-chave utilizadas foram: avaliação de ciclo de vida; avaliação ambiental de resíduos; métodos de avaliação ambiental; impacto ambiental; projeto com eficiência de resíduos e BIM, sempre em inglês, nas seguintes combinações: ("Life Cycle Assessment" OR "waste environmental assessment" OR "environmental assessment methods" OR "environmental impact" OR "Waste-efficient project") AND ("building information modelling" OR "building information modeling" OR "BIM").

Com isso, foram elencados critérios de inclusão (CI) e exclusão (CE) dos trabalhos. Inicialmente, os artigos foram selecionados com base no ano de publicação, sendo excluídos os anteriores à 2017, e tendo como ponto de corte junho de 2021. Com esse filtro, restaram 79 e 18 trabalhos, respectivamente, nas bases Science Direct e Scielo. Filtrando pelos idiomas português e inglês, a base de dados Scielo reduziu a busca para 9 trabalhos e a Science Direct se manteve com o mesmo número. Por fim, filtrando apenas artigos em periódicos e removendo outros tipos de publicação, obteve-se 76 resultados na Science Direct e o 9 na Scielo.

A partir disso, os 85 trabalhos foram analisados qualitativamente. A primeira etapa da análise foi a leitura dos títulos e palavras-chave dos artigos, verificando quais deles abordavam somente uma das temáticas (BIM ou avaliação ambiental de materiais e resíduos), de forma isolada. Nesse filtro, também foram excluídos trabalhos que abordavam questões de infraestrutura e urbanismo, que não são o foco do artigo.

A partir dos processos descritos, o Quadro 2, apresenta os critérios de seleção utilizados na pesquisa.

Após a análise, foram selecionados 57 artigos, sendo todos da base Science Direct, dos quais foram lidos os resumos e analisados os mesmos critérios.

Por fim, os trabalhos foram classificados por periódico e foi verificado o fator de impacto de cada um deles. Nessa análise, identificou-se que 4 deles estavam publicados em periódicos sem fator de impacto, sendo estes desconsiderados para a pesquisa. Portanto, se obteve como

resultado um total de 30 artigos que serviram de referência para responder as questões de pesquisa.

Critério	Descrição
CI1	Publicações em inglês e português
CI2	Estudos que abordam as ferramentas de avaliação ambiental apoiada pela metodologia ou softwares BIM
CI3	Estudos que abordam avaliação ambiental de energia incorporada e da produção dos materiais, não somente de operação
CE1	Artigos publicados antes de 2017
CE2	Estudos publicados em congressos, livros e capítulos de livros
CE3	Artigos que abordam somente uma das temáticas (BIM ou avaliação ambiental de materiais e resíduos), de forma isolada
CE4	Artigos que tratam de obras de infraestrutura ou urbanização
CE5	Artigos com objetivo de comparar materiais ou sistemas construtivos
CE6	Periódicos que não apresentam fator de impacto

Quadro 2: Critérios de Inclusão e Exclusão.

Fonte: autores (2022).

Cabe ressaltar que Safari e Azarijafari (2021) analisaram em sua pesquisa um total de 50 artigos, considerando publicações entre 2011 e 2020, dados que se assemelham ao número que foi observado nessa pesquisa. Ainda, os autores verificaram que menos de 10% dos artigos publicados sobre o tema BIM no período de 2017 a 2020 se relacionam à ACV, o que se identificou também nas etapas de triagem por título, palavras-chave e resumo, nas quais foi retirado um número significativo de trabalhos que tratavam somente da temática BIM. A Figura 1 apresenta o processo de seleção realizado.

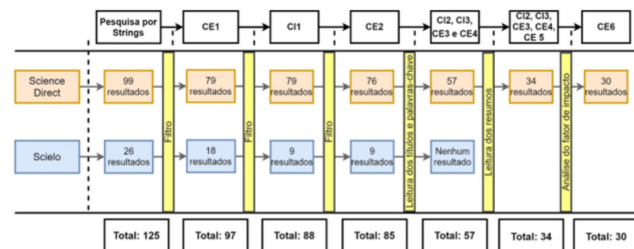


Figura 1: Processo de triagem das publicações

Fonte: Autores(2022)

2.3. Estrutura de Análise

A análise dos artigos foi realizada com base no objetivo geral do trabalho e para responder às questões de pesquisa. A partir da leitura dos estudos, as principais evidências foram organizadas em tabelas para uma análise sistemática dos resultados. Com foco nas questões de pesquisa, foram identificados softwares e bancos de dados utilizados, para uma análise qualitativa e quantitativa, bem como foram verificadas as dificuldades técnicas e processuais observadas nos estudos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A discussão dos resultados foi dividida entre as questões de pesquisa, nos próximos tópicos. Para a discussão das questões de pesquisa, foram utilizadas as referências selecionadas com base nos critérios apresentados na metodologia.

3.1. QG1: Quais os potenciais de utilização do BIM para apoiar as ferramentas de avaliação ambiental na construção civil?

Conhecer os impactos ambientais dos componentes específicos de uma edificação é essencial para os profissionais no momento de tomar decisões quanto aos materiais que serão utilizados, de forma a atingir um mínimo impacto ambiental (SAFARI; AZARIJAFARI, 2021). Quando se trata de ferramentas de avaliação de ciclo de vida, há uma grande incerteza quanto a vida útil dos componentes da construção. Bem como, obter uma lista completa dos elementos nas fases iniciais do projeto não é viável nos processos tradicionais (RÖCK *et al.*, 2018).

Bueno e Fabricio (2018) observam que a maior dificuldade se dá na aplicação da ACV nos estágios iniciais dos projetos, quando muitas definições ainda não estão estabelecidas. Em contrapartida, na presente pesquisa, se observa que a grande parte dos estudos analisados aplicaram as ferramentas na fase inicial do projeto, no intuito de minimizar os impactos, sendo menos estudadas as fases finais de vida.

Seyis (2020), após uma revisão de literatura e entrevistas com especialistas, classificou vinte e uma principais vantagens da utilização integrada de BIM e ACV. Sendo as principais: apoiar os tomadores de decisão nos estágios iniciais de projeto, integrar as dimensões da ACV ao processo de tomada de decisão e a comparação de diferentes materiais e produtos alternativos. Para o autor, há interrelação entre esses itens, demonstrando que atender aos requisitos de sustentabilidade nos estágios iniciais é crucial para o sucesso do projeto.

Santos *et al.* (2019), por sua vez, destacam três formas de utilização do BIM para ACV e CCV (custo do ciclo de vida). A primeira seria a utilização de vários programas em separado para a realização das análises. A segunda, extrair os quantitativos do modelo BIM e combinar com um banco de dados, para analisar os impactos totais do projeto. Por fim, se tem a incorporação dos dados de ACV no modelo BIM, para que este modelo contenha as informações na ocasião da operação, manutenção e fim de vida do edifício.

Portanto, é possível afirmar que o BIM se apresenta como uma importante ferramenta para extrair quantidades de materiais com um menor esforço, sendo utilizada para cálculo da lista de materiais, atividades e energia operacional (SAFARI; AZARIJAFARI, 2021). Ainda, vale mencionar que o BIM pode se traduzir como uma ferramenta

mais amigável, facilitando a tomada de decisão nas fases mais iniciais do projeto e possibilitando testar diferentes opções de design, ainda com custos baixos em relação às mudanças nas fases finais do projeto (RÖCK *et al.*, 2018).

Para além da extração de quantitativos, Eleftheriadis; Mumovic; Greening (2017), a partir de uma revisão de literatura, destacam que o BIM tem sido eficiente em “aprimorar as capacidades da equipe para projetar um edifício, monitorar e gerenciar os processos durante as fases de manutenção e simular o sequenciamento de desconstrução de fim de vida”.

Ainda, segundo Eleftheriadis; Duffour; Mumovic (2018), o BIM pode trazer melhorias significativas para uma tomada de decisão mais colaborativa sobre o design e construção do projeto, promovendo a responsabilidade compartilhada entre arquitetos e engenheiros. No estudo de caso realizado pelos autores, verificou-se que os projetos estruturais, otimizados a partir do BIM, afetaram positivamente o desempenho de carbono incorporado do edifício. Isso também, a partir de um fluxo de trabalho baseado em ciclos de feedback.

Apesar disso, o principal apoio do BIM para a avaliação ambiental observado nos artigos foi a automatização dos processos de extração de quantidades de materiais, que precisam ainda ser combinados com dados de inventários, a fim de se obter resultados para comparar diferentes soluções. Da mesma forma, se observou uma forte tendência da incorporação dos dados ambientais no próprio modelo, principalmente nos artigos mais recentes, como uma evolução da utilização do BIM para gestão de todo o ciclo de vida da construção.

LU *et al.* (2021) identificaram, assim como neste estudo, que mais de 70% dos artigos analisados extraíram os quantitativos do modelo BIM 3D para uma planilha, a fim de combinar com inventários de materiais. Os autores destacam a necessidade de desenvolvimento de softwares, pois mesmo que requeiram investimento de tempo e recursos, podem facilitar as atualizações do projeto.

Soust-Verdaguer; Llatas; García-Martínez (2017) sugerem que os modelos BIM devem incluir mais informações sobre as propriedades e características dos componentes do edifício, para maior eficiência da análise. No mesmo sentido, Santos *et al.* (2020) analisaram as vantagens em não apenas realizar a extração de quantitativos por meio do BIM para uma análise externa, mas de realizar a importação de dados econômicos, ambientais e mecânicos de projeto para o modelo BIM.

A partir disso, os cálculos são realizados de forma automática, conforme o projeto vai evoluindo, da mesma forma que pode se obter um modelo mais rico em informações para a operação e possíveis reformas do edifício. Para além, iniciativas como essa promovem a criação de objetos com informações ambientais dos materiais correspondentes pela indústria (SANTOS *et al.*, 2020).

Se observa nos artigos analisados uma limitação nos estudos de edificações já existentes, para aplicar o BIM no apoio a gestão da edificação e o fim de vida. Nesse sentido, verificou-se que a maioria deles foca na fase de projeto e simulação de operação da edificação, como ABBASI; NOORZAI (2021) e ALWAN *et al.* (2021). O fato demonstra que a reciclagem e reutilização de componentes da construção ainda são pouco exploradas.

Dentre os artigos que abordam o potencial de reciclagem dos materiais, destaca-se Honic *et al.* (2019), que propõe a criação de passaportes de materiais, considerando o potencial de reciclagem, a partir do percentual do material que pode ser reciclado. De acordo com os autores, os estágios iniciais do projeto são caracterizados por baixo nível de detalhamento do projeto e baixo nível de conhecimento dos materiais componentes. Consequentemente, sem dados sobre a composição do material e respectivos indicadores sobre reciclagem e ACV.

Por essa razão, os autores propõem o uso de elementos predefinidos, que possibilitariam avaliações de passaporte de materiais em estágios iniciais de projeto. No entanto, o uso desses elementos é visto por profissionais de projeto como um limitador na elaboração do design do edifício. Através da aplicação da metodologia BIM em estudos de caso, os pesquisadores puderam definir os principais domínios que desempenham um papel crucial para a implementação dos passaportes de materiais. Esses domínios são organizações da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), indústria e órgãos reguladores (HONIC *et al.*, 2019).

É importante destacar outras iniciativas propostas, como: integração do BIM com a seleção de materiais, integrando o Revit a um plug-in que analisa o custo e impacto ambiental do material em função de seu transporte até o canteiro de obras (CHEN; NGUYEN, 2019); decomposição das atividades de construção para identificar os tipos de equipamentos, quantidades e horas de trabalho para cada tarefa, calculando o consumo de energia das máquinas e equipamentos de construção (ZHANG; NIZAM; TIAN, 2018); comparação dos processos de renovação e reconstrução para edifício antigos, a partir de uma abordagem BIM-ACV (FENG *et al.*, 2020).

Quanto ao gerenciamento de resíduos de construção, Guerra *et al.* (2019) elaboraram um algoritmo que, a partir de equações lineares, calcula uma estimativa de resíduos de drywall e concreto com base em registros de compra de projetos e registros de cargas de caminhão de transporte de resíduos. Apesar da contribuição como uma metodologia baseada em dados disponíveis, os autores ressaltam erros de estimativa que dependem diretamente de perdas decorrentes de processos da obra, e que dificilmente podem ser quantificados.

Analisando os resíduos de demolição, Wang *et al.* (2018) apresentam uma metodologia para cálculo do carbono incorporado para tratamento de resíduos diversos

como alvenaria, alumínio, aço, vidro, etc. Com base em dados gerados por meio de um software BIM, foi possível identificar melhores opções de tratamento dos resíduos e aqueles que possuem maior potencial de redução da emissão de carbono, por meio de sua utilização após a reciclagem.

A partir dos resultados obtidos, a Figura 2 apresenta as principais contribuições do BIM para a avaliação ambiental de edificações



Figura 2: Principais aplicações do BIM na avaliação ambiental de edifícios identificados nos artigos
Fonte: Autores (2022).

Quanto a análise ambiental mais abrangente, considerando também impactos econômicos e sociais, Safari e Azarijafari (2021) salientam a ausência de pesquisas que focam nos três pilares da sustentabilidade (ambiental, econômico e social). Dos artigos analisados, apenas um considerou a abordagem social da avaliação ambiental, oito consideraram as esferas econômicas e ambiental e vinte e um somente a abordagem ambiental.

O artigo que analisa as três dimensões da sustentabilidade (ambiental, econômica e social) utiliza o BIM no apoio à Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV). Como principal contribuição do estudo, indica-se a definição de um banco de dados organizado, a partir da harmonização das esferas e dos requisitos de dados (LLATAS; SOUST-VERDAGUER; PASSER, 2020).

Apesar de não abordarem em sua metodologia os aspectos sociais, Feng *et al.* (2020) também destacam a importância desses indicadores, ao tratar da renovação ou reconstrução de edificações históricas. Nesse caso, devem ser analisados o valor do patrimônio histórico da cidade e da edificação, para a população em seu entorno. A Figura 3 apresenta o número de artigos que avaliam cada um dos pilares da sustentabilidade.



Figura 3: Esferas da sustentabilidade avaliadas pelos artigos selecionados na pesquisa.
Fonte: autores (2022).

Diante do que foi apresentado, verifica-se que a utilização do BIM combinado a estimativas de custos e cronograma pode proporcionar um novo paradigma de tomada de decisão na construção civil. Com esses procedimentos, se pode reduzir os riscos associados as fases iniciais do projeto, bem como desenvolver as análises de energia e sustentabilidade conforme o projeto evolui, promovendo decisões mais pautadas sobre questões sustentáveis (ELEFTHERIADIS; MUMOVIC; GREENING, 2017).

Cabe destacar que após a obtenção dos resultados da avaliação do ciclo de vida da edificação, é necessário analisar os resultados, a fim de se otimizar o projeto por completo. Para isso, Lu *et al.* (2021) sugerem a utilização de análise de sensibilidade, análise de incerteza, otimização multicritério, avaliação do ciclo de vida social, sistema de certificação de edifícios verdes, entre outros.

A partir da identificação dos potenciais de utilização do BIM para apoio a avaliação ambiental, foram analisadas as barreiras técnicas e de processo para implementação dessa metodologia.

3.2. QS1: Quais são as barreiras técnicas para implementação do BIM no apoio a avaliação ambiental?

Para Eleftheriadis; Mumovic; Greening (2017), existem três aspectos principais que precisam ser desenvolvidos nas técnicas de avaliação ambiental por meio do BIM. São eles: inventários ou bancos de dados de energia do ciclo de vida; modelos de projeto que integrem medidas de energia econômicas e parâmetros de incerteza, como mudanças climáticas; além de protocolos para definição de parâmetros de manutenção e fim de vida das edificações, que são carregados de incertezas.

Yang *et al.* (2018) justificam a falta de disseminação da ACV na construção pelas dificuldades em gerenciamento de dados, interoperabilidade, falta de banco de dados e desperdícios de tempo. Com base na leitura dos artigos, se verificou que as barreiras técnicas para implementação do BIM nos processos dividem-se em três grupos: o

detalhamento e definições de projeto; as estruturas de banco de dados; e a interoperabilidade entre sistemas.

Após uma análise sistemática sobre a integração BIM-ACV, Safari; Azarijafari (2021) verificaram dificuldades nos estudos em estabelecer os níveis de detalhamento necessários do modelo para a realização da avaliação. Bem como, barreiras na atualização dos resultados da ACV em tempo real, junto às atualizações de projeto, ou ainda mudanças realizadas durante a construção e operação, que podem ter impacto significativo sobre os resultados da avaliação. Os autores ressaltam, a importância da definição do LOD (Level of development) pelos projetistas e do trabalho colaborativo entre a equipe (SAFARI; AZARIJAFARI, 2021). Outra pesquisa sinaliza que o LOD e a capacidade do software utilizado para modelagem podem influenciar diretamente na entrada das informações (SOUST-VERDAGUER; LLATAS; GARCÍA-MARTÍNEZ, 2017).

Observa-se, em análises realizadas continuamente ao longo da concepção do projeto, que a variabilidade vai reduzindo até as suas fases finais, conforme os dados são refinados, podendo causar super ou subestimativas de alguns elementos (CAVALLIERE *et al.*, 2019). Porém, autores que compararam análises de um mesmo projeto desenvolvido em LOD 100 e após 300, verificaram que os resultados ficaram dentro da faixa de incerteza estimada, podendo apoiar na estimativa de impactos, desde que considerados tais níveis de incerteza (REZAEI; BULLE; LESAGE, 2019).

Destaca-se ainda a relação entre a facilidade de alteração do projeto e o nível de precisão de análise. Segundo Su *et al.* (2020), a equipe de projeto deve avaliar o benefício de alterar o projeto enquanto se está no estágio inicial, tendo em contrapartida menor precisão de resultados. Ou então, realizar a avaliação em um LOD mais avançado, tendo resultados mais precisos e maior dificuldade e custos de alteração do projeto.

Com base nos estudos analisados, foi possível verificar que a implementação de análises BIM-ACV/CCV necessitam informações além do que normalmente contém os modelos, para que sejam conduzidas de forma adequada (SANTOS *et al.*, 2019a). Porém, nas fases iniciais do projeto, a entrada de dados ainda é bastante manual, pois o modelo BIM não possui as informações do design necessárias para a ACV, tornando o processo complexo e demorado (RÖCK *et al.*, 2018). Além disso, com a inserção manual desses dados, outro problema é a padronização dos elementos. Para minimizar o problema, é importante a utilização de normas de modelagem locais, a fim de manter o padrão de modelagem indicado no país (HONIC *et al.*, 2019).

No presente estudo, se observa que, apesar da importância da especificação do LOD, somente 9 artigos apresentam essa informação, sendo estes especificados no Quadro 3.

Referência	LOD
RÖCK <i>et al.</i> (2018)	200
SANTOS <i>et al.</i> (2020b)	200
ALWAN <i>et al.</i> (2021)	300
SU <i>et al.</i> (2020)	300
YANG <i>et al.</i> (2018)	300
REZAEI; BULLE; LESAGE (2019)	100 e 300
CAVALLIERE <i>et al.</i> (2019)	Fase de Planejamento do Projeto, LOD 100; na fase de Projeto, LOD 300; Pedido de Licença de Construção, Licitação e fase de Construção, LOD 400
HOLLBERG; GENOVA; HABERT (2020)	LOD varia
SANTOS <i>et al.</i> (2019)	Para análise completa maior ou igual a 300

Quadro 3: Nível do modelo de desenvolvimento (LOD) adotado nos artigos
Fonte: Autores (2022).

Outros problemas técnicos apontados nos estudos foram: a utilização de diferentes unidades de medidas que não seriam abrangidas pelo sistema e a impossibilidade de trabalhar de forma simultânea em duas plataformas (ABANDA; OTI; TAH, 2017); dificuldades na especificação da quantidade de elementos repetidos (SANTOS *et al.*, 2020b); e a utilização de densidade dos materiais ao invés de seu volume, para estimativa de energia (ALWAN *et al.*, 2021).

Alwan *et al.* (2021) ainda ressaltam que a subutilização do BIM nessa área se deve pelo fato de não haver pacotes de software comerciais usados em BIM para avaliação ambiental. Ainda, a confusão gerada pela gama de softwares e conjuntos de dados disponíveis, no momento de escolher o que melhor se aplica a cada caso.

Como exemplo disso, Bueno e Fabricio (2018), comparando a avaliação do ciclo de vida por meio do software Gabi com o plug-in Tally™, no Autodesk Revit, verificaram discrepância nos resultados pela simplificação do plug-in, que desconsiderava elementos utilizados durante a construção. Da mesma forma, concluiu-se que os dois softwares levam o usuário para interpretações diferentes, não apenas pela entrada de dados, mas pela forma como analisam o ciclo de vida dos componentes da construção. Os autores destacam que isso ocorre pela finalidade das duas ferramentas, sendo este um fator a ser analisado no momento da definição do software que será utilizado no projeto.

As avaliações de ciclo de vida são fortemente dependentes da representatividade da fonte dos dados ambientais. Portanto, é preciso verificar se os dados utilizados são condizentes com o material que está sendo aplicado na obra e a flexibilidade destes bancos de dados (SANTOS *et al.*, 2020a). Além disso, é necessário atentar para a qualidade dos dados de entrada da ACV, as incertezas inerentes a eles, e a disponibilidade de bancos que incluam materiais alternativos (RÖCK *et al.*, 2018).

Apesar de muitas ferramentas proporem a automatização da avaliação ambiental, observa-se que em todas

elas os usuários devem obter os impactos ambientais dos elementos com antecedência, seja por meio de bancos de dados ou Declarações Ambientais do Produto. O segundo, pode reduzir potencialmente os impactos ambientais da construção civil, ao se ter a clareza dos impactos associados aos materiais utilizados no seu contexto. A localização do material pode ter interferência significativa na sua forma de extração e produção, interferindo nos impactos associados ao componente e, por consequência, no resultado da ACV (FENG *et al.*, 2020).

Com relação a essa problemática, LU; LE; SONG (2017) propõem um framework para conversão de dados globais, gerado pela base Ecoinvent, para a realidade de países asiáticos. Os autores destacam que, dessa forma, se tem um método otimizado para aplicação de bancos genéricos em um contexto local, promovendo a utilização de materiais de construção mais sustentáveis.

A utilização de bancos de dados genéricos pode também limitar o uso de soluções inovadoras na análise (CAVALLIERE *et al.*, 2019). Para reduzir esses problemas, propõem-se uma mescla de diferentes inventários. Os fabricantes de materiais também devem ser incentivados a fornecer as informações específicas de seus produtos, para que possam ser inseridas nos modelos BIM, dispensando a aquisição de licenças pagas (SANTOS *et al.*, 2019b).

Honic *et al.* (2019) salientam, porém, que a utilização de diferentes bases de dados pode ser uma tarefa demorada e que exige conhecimentos específicos do responsável pela avaliação. Para minimizar esse obstáculo, os autores propõem uma estrutura de gerenciamento de dados e partes interessadas.

Outra solução proposta para minimizar os problemas com os bancos de dados está relacionada a machine learning (aprendizagem de máquina), na qual as ferramentas de ACV “aprendem” com dados de projetos anteriores, fazendo suposições a partir deles. No entanto, para isso se efetivar, seria necessário um grande banco de dados de edificações as built, realidade ainda distante devido ao baixo número de edificações certificadas em relação ao total construído (HOLLBERG; GENOVA; HABERT, 2020).

A ausência de uma base de dados de impactos sociais, econômicos e ambientais é outra lacuna identificada. Para solução, Llatas; Soust-Verdaguer; Passer (2020) propõem um banco de dados Triple Bottom Line, que organiza as Declarações de Sustentabilidade do Produto dos itens mais significativos utilizados no setor da construção.

Por fim, recomendam a integração de tecnologias como big data e a Internet of Things (IoT) para obtenção de bancos de dados dinâmicos. Com uma plataforma big data, se poderia ter uma referência regional. Assim como, “os sistemas IoT em edifícios podem monitorar e registrar dados de operação continuamente, fornecendo dados mais precisos para avaliações dinâmicas” (SU *et al.*, 2020).

A interoperabilidade é outro problema recorrente,

que tem impacto pela perda de dados, incompatibilidade de software, e incompatibilidade de dados BIM com o banco de dados ACV. Em função disso, muitos processos se tornam manuais e consomem muito tempo para processamento e correspondência dos dados (SAFARI; AZARIJAFARI, 2021). A perda de dados se apresenta tanto entre softwares BIM e de análise de energia operacional, quanto entre o modelo BIM e inventários ou ferramentas de ACV (YANG *et al.*, 2018).

Entre os estudos analisados, a possibilidade de estruturar a parametrização dos componentes para qualquer software BIM teve como barreira a interoperabilidade, uma vez que esses parâmetros precisam ser exportados ou importados no lugar certo, para serem úteis em um modelo compartilhado (CAVALLIERE *et al.*, 2018). Da mesma forma, a falta de interoperabilidade entre ACV e ferramentas BIM é uma das maiores desvantagens para os especialistas no processo (SEYIS, 2020).

Um item importante quando se trata da utilização do BIM em apoio a ACV é que os dois sistemas tenham uma linguagem convencionada, apesar de existirem sistemas para organização das informações, como o OmniClass, Uniclass, Uniformat, etc., nenhum deles é padronizado internacionalmente. Röck *et al.* (2018), em função disso, sugerem a adição de parâmetros às respectivas categorias de objeto, para hospedar valores de código específicos que indicam a classe de elemento de construção, no modelo BIM do Autodesk Revit.

Santos *et al.* (2019) testaram a utilização do esquema IFC para minimizar os problemas de interoperabilidade. Apesar de avanços, os autores destacam que as propriedades ainda estão centradas no nível elemento, carecendo de detalhes nos níveis de material e projeto para uma análise completa ACV/CCV. Outro avanço necessário, seria a criação de um Ifcvalue para cada categoria de impacto ambiental, para armazenar as informações correspondentes, tendo em vista que os dados são gerados apenas em unidades de massa ou energia.

Bueno; Fabricio (2018) indicam como uma solução para as falhas de interoperabilidade dos softwares a utilização do Tally™, que funciona como um plug-in direto ao Autodesk Revit. Apesar dessa vantagem, destaca-se as limitações do software quanto a simplificações das análises ambientais realizadas sobre os componentes. Su *et al.* (2020), por sua vez, direcionam pesquisas futuras para utilizar a inteligência artificial a fim de eliminar a manipulação manual de dados.

3.3. QS2: Quais são as dificuldades processuais para implementação do BIM no apoio a avaliação ambiental?

A implementação do BIM como ferramenta de avaliação ambiental demanda por alterações de processos que envolvem todos os profissionais participantes do projeto. Diante disso, algumas das pesquisas analisadas buscam melhorias frente as dificuldades encontradas nos

processos atuais. Seyis (2020), identifica em seu estudo a falta de padronização dos processos de ACV como a segunda maior desvantagem entre os especialistas e literatura pesquisadas, sendo relevante aprofundar o tema.

Considerando o BIM como um potencial repositório de dados ambientais e econômicos, Santos *et al.* (2019) propuseram um mapa do processo do manual de entrega de informação para avaliação BIM-ACV/CCV. Nesse processo, o gerente BIM seria responsável por selecionar quais modelos serão enviados para o especialista em ACV/CCV e quais especialidades serão analisadas, além de mesclar os modelos e excluir elementos duplicados.

O especialista, por sua vez, teria como responsabilidade inserir as informações ambientais e econômicas no modelo, contatando os fornecedores para obter a declaração ambiental do produto, ou então identificar componentes semelhantes em bancos de dados. Para Santos *et al.* (2019), esse processo possibilitaria que cada empresa tivesse uma biblioteca de objetos BIM adequada aos seus projetos.

Santos *et al.* (2020b) destacam que a adoção do BIM para avaliação ambiental seria mais demorada nos estágios iniciais, mas ao longo do processo, reduziria o tempo gasto nas análises, além de reduzir erros humanos. Após a extração desses dados, o papel do especialista é ressaltado por Safari e Azarijafari (2021), na interpretação dos dados, considerando que o profissional precisa ter conhecimento científico e experiência, para analisar os resultados fornecidos pelas ferramentas BIM e ACV. Alwan *et al.* (2021) destacam que a adoção mais ampla das ferramentas BIM, nesse cenário, pode ser um desafio de aprendizado semelhante a ruptura dos projetos 3D.

Quanto aos indicadores considerados, muitas pesquisas limitaram seu campo de atuação apenas a uma etapa do ciclo de vida da edificação, o que impossibilita uma avaliação global dos impactos ambientais de um edifício. Nizam, Zhang e Tian (2018) verificaram que a ferramenta proposta em seu estudo, foi eficiente para uma avaliação ambiental automática da fase de construção do edifício, considerando a energia incorporada inicial. Todavia, apresentou limitações quanto à análise da fase de operação, bem como na capacidade de fornecer diferentes cenários construtivos.

Eleftheriadis; Mumovic; Greening (2017) destacam a importância de analisar um projeto de engenharia de forma holística, não considerando os subsistemas em separado, sendo essa a forma de conciliar o desempenho funcional, econômico, energético e ambiental. Todavia, essas abordagens ainda são pouco desenvolvidas, devido ao conservadorismo e fragmentação do setor, que prejudicam o desenvolvimento da tecnologia de forma integrada.

Quanto às avaliações de energia incorporada inicial e recorrente, cabe salientar que uma opção por elementos de menor impacto incorporado inicial pode acarretar

um aumento de gastos de energia ao longo da operação. Com isso, é crucial que a análise seja integrada considerando todo o ciclo de vida do edifício. Röck *et al.* (2018) observaram que apesar de seu modelo de análise de energia facilitar a decisão por materiais com menor impacto de energia incorporada, estes poderiam resultar em desvantagens operacionais. Outro ponto relevante é o tempo considerado para a avaliação operacional, que interfere, por exemplo, na substituição de alguns componentes (FENG *et al.*, 2020).

A fim de identificar um equilíbrio ótimo, entre a energia incorporada e de operação de um edifício, Abbasi e Noorzai (2021) propuseram um framework que combina diferentes softwares BIM. A análise conjunta permitiu identificar que pequenos aumentos de energia incorporada, dados pela utilização de materiais que promovem fontes de energia renovável, podem ter um alto impacto de redução da energia de operação. Da mesma forma, algumas soluções podem acarretar impactos altos na energia incorporada, sem trazer grandes benefícios para consumo ao longo do uso. Com isso, fica evidente a necessidade da análise multifatores.

Outro fator determinante verificado está relacionado à definição dos limites de análise, destacando que a maioria dos trabalhos estudados não aborda todos os estágios do ciclo de vida da edificação, seja pela falta de dados, pressuposição de resultados, ou pela simplificação da avaliação. Além disso, devido ao complexo processo de construção e comportamento dos usuários, há muitas incertezas para previsões a longo prazo. Um exemplo a ser citado é a negligência quanto a vida útil dos componentes de substituíveis da edificação, impactos de transporte, equipamentos técnicos, abastecimento de água e distribuição de energia elétrica (SAFARI; AZARIJAFARI, 2021).

Segundo Honic *et al.* (2019), outro tema relevante são os papéis da indústria e órgão reguladores nesse processo. O primeiro, com responsabilidade sobre a padronização dos dados fornecidos. O segundo, com papel de incentivar a adoção de conceitos de reciclagem de resíduos de construção, e um melhor monitoramento dos materiais, por meio de Passaportes de Materiais, que trariam um benefício duradouro para as taxas de reciclagens de resíduos.

Com base nas discussões realizadas, foram analisadas as questões gerais e específicas. A partir disso, as questões estatísticas são apresentadas nos próximos tópicos.

3.4. QE1: Quais as principais ferramentas de computação utilizadas para avaliação ambiental de edificações da construção civil?

Santos *et al.* (2020) avaliam que a seleção da abordagem ou ferramenta mais adequada para a avaliação ambiental depende de fatores como a localização do projeto, finalidade do estudo, e disponibilidade de dados para a região geográfica do projeto. Para Llatas; Soust-Verdaguer;

Passer (2020), a escolha deve considerar disponibilidade de dados, interoperabilidade de software e dados, e o método de trabalho do projetista.

Analisando os artigos selecionados na pesquisa, verificou-se resultados semelhantes de Safari e Azarijafari (2021), sendo o Revit o software mais utilizado. O que está de acordo com as metodologias observadas, de extração de quantitativos a partir de um modelo 3D. A Figura 4 apresenta os demais softwares utilizados nos artigos estudados.

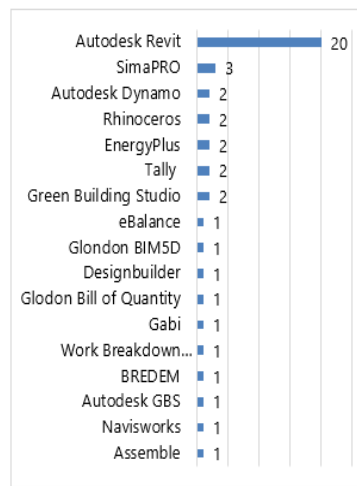


Figura 4 - Softwares e plug-ins utilizados pelas pesquisas
Fonte - Autores (2022).

Abanda, Oti e Tah (2017), salientam que a maioria dos modelos matemáticos para energia incorporada e cálculos de CO₂ existem isoladamente, sendo necessário adaptar modelos computacionais existentes. Com o apoio do BIM, se pode desenvolver um sistema de modelos computacionais generalizados para energia incorporada e CO₂. Os autores propuseram um sistema que funciona de forma que as quantidades são extraídas de um modelo de edifício elaborado no Revit, e colocadas nos diferentes conceitos da norma utilizada no Reino Unido. Então, os volumes dos componentes são extraídos, sendo calculados a massa do item do material, energia incorporada e valores de CO₂, automaticamente.

Röck *et al.* (2018) avaliaram um link automatizado entre o banco de dados ACV (disponível no MS Excel) e o modelo BIM (Autodesk Revit), por meio de um script personalizado, que foi desenvolvido utilizando um software de script visual (Autodesk Dynamo). Os autores também executaram uma visualização por cores dos elementos com maior impacto, para que o tomador de decisão identifique facilmente os elementos de maior potencial negativo na construção, bem como, aqueles com maior potencial de melhoria, a partir dos testes de diferentes opções.

3.5. QE2: Quais as principais estruturas de bancos de dados que suportam a avaliação ambiental de edificações da construção civil?

Abanda, Oti e Tah (2017) analisaram em seu estudo cinco diferentes bancos de dados. Os autores relatam que os dados se estruturam de forma diferente em cada um deles, sem utilizar um método de medição padrão. Além disso, os bancos contêm apenas dados não geométricos, sendo necessário combinar essas informações com os dados geométricos do edifício. Esse fato, além de consumir tempo adicional, está sujeito a erros de cálculo.

Nos artigos analisados neste estudo, foram identificados dezenove bancos de dados ambientais ou fontes alternativas de dados, como entrevistas, dados de literatura e registros de obra. O Ecoinvent se destacou nos resultados pela utilização em pesquisas de diferentes países, localizados na América, Ásia e Europa, demonstrando ser uma referência mundial de dados ambientais de diferentes produtos.

O Inventário de Banho de Carbono e Energia (ICE) desenvolvido na Universidade de Bath, Reino Unido também se destacou, sendo utilizado em quatro pesquisas. Os demais, englobam diferentes fontes regionais como o KBOB, da Suíça, ou então registros próprios da empresa e declarações ambientais de produto. A Figura 5 apresenta os resultados obtidos nessa etapa da pesquisa.



Figura 5: Fontes de dados ambientais utilizados nos artigos pesquisados
Fonte: Autores (2022).

Concluindo essa etapa, o próximo tópico apresenta os periódicos de publicação das pesquisas.

3.6. QE3: Em quais periódicos os resultados foram publicados?

Quanto aos periódicos de publicação dos artigos, obteve-se resultados em nove revistas científicas diferentes, cujo fator de impacto varia entre 3.379 e 12.110. A Figura 6 apresenta a distribuição dos artigos por periódico.



Figura 6: Periódico da publicação dos resultados
Fonte: Autores (2022).

Observa-se, na Figura 6, que o periódico com o maior número de publicações foi o Journal of Cleaner Production (Cite Score 13.1 e fator de impacto 7.246), com destaque também para Building and Environment (Cite Score 9.7 e fator de impacto 4.971), com 6 artigos. Além desses, o Journal of Building Engineering (Cite Score 5.5 e fator de impacto 3.379) e Automation in Construction (Cite Score 12 e fator de impacto 5.669), com 4 artigos cada.

3.7. QE4: Qual é a origem das pesquisas?

Analisando a questão estatística sobre os países de origem dos estudos, identificou-se que a China e Reino Unido tiveram o maior número de contribuições, 6 e 4 respectivamente. Cabendo destacar a contribuição do Brasil, com 2 artigos.

Alguns fatores podem justificar esses resultados. Quanto à China, o país apresenta um acelerado desenvolvimento da economia, que leva a extensas e complexas obras de construção civil, e causa problemas complexos que podem ser suportados pelas tecnologias BIM (ZHANG; NIZAM; TIAN, 2018). Ainda, uma parcela considerável da construção mundial está concentrada no país, que passa por uma transformação orientada ao uso do BIM (YANG *et al.*, 2018).

Por outro lado, no Reino Unido há uma destacada política pública para a utilização do BIM em projetos de construção civil, além de estratégias para a redução de 50% das emissões da construção até 2025, como parte da

Lei de Mudanças Climáticas, de 2008 (ABANDA; OTI; TAH, 2017). A Figura 7 apresenta a distribuição dos estudos.

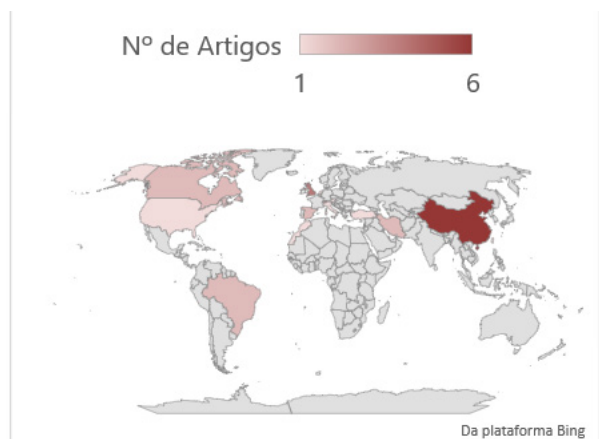


Figura 7: Países de desenvolvimento dos artigos selecionados nas pesquisas
Fonte: Autores (2022)

A partir dessas premissas, pode-se constatar que o investimento em tecnologia por parte da indústria da construção é necessário para impulsionar seu crescimento, como se observa na China. Além disso, o investimento em pesquisas para melhorar as condições ambientais dos projetos também está diretamente ligado à exigência governamental, como é o caso do Reino Unido.

3.8. QE5: Quantas foram as publicações por ano?

Por fim, a última questão específica analisou o ano de publicação dos estudos, os resultados apresentados na Figura 8.

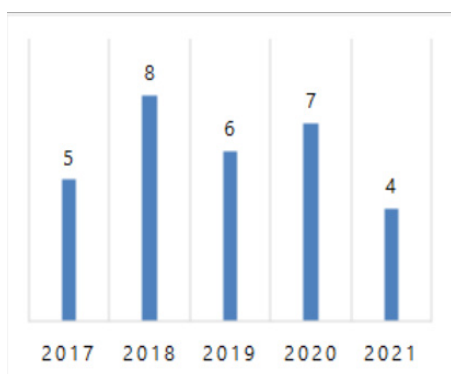


Figura 8: Número de artigos publicados por ano com relação ao tema
Fonte: Autores (2022).

Verifica-se na Figura 8 que o ano com o maior número de publicações foi 2018, com 8, seguido por 2020, com 7. Apesar dos dados terem sido coletados no mês de junho de 2021, observam-se 4 publicações já neste ano, demonstrando a atualidade do tema da pesquisa.

4. CONCLUSÃO

Esse artigo teve como objetivo verificar quais os potenciais de utilização do BIM para apoiar as ferramentas de avaliação ambiental na construção civil. Com foco nas abordagens de avaliação ambiental de energia incorporada e da produção dos materiais, operação e fim de vida,

identificaram-se as lacunas de desenvolvimento e os softwares e bancos de dados mais utilizados nas pesquisas.

Diante disso, o principal alvo das pesquisas é facilitar os processos integrando bancos de dados e modelos BIM. Analisando diferentes alternativas que minimizem os impactos ambientais da construção, torna-se o processo mais amigável aos profissionais da indústria AEC. Verificou-se ainda, que as pesquisas apresentam dificuldades principais na seleção de softwares e bancos de dados, bem como, na interoperabilidade entre sistemas.

Quanto às questões estatísticas, o Revit foi o software mais utilizado nos estudos analisados, da mesma forma que o Ecoinvent, quando se trata de inventários de dados ambientais. A China foi o país com maior número de publicações, o Journal of Cleaner Production o periódico mais citado e, por fim, o maior número de publicações ocorreu em 2018.

Observou-se, a partir dos artigos analisados, que os processos de avaliação ambiental por meio do BIM têm se desenvolvido ao longo dos anos, deixando de ser utilizado apenas como uma ferramenta de extração de quantitativos. Assim, passa a ser um banco de dados completo da construção, disponível para que usuários e gerenciadores realizem as atualizações necessárias ao longo de sua vida útil.

Apesar disso, a maioria dos estudos de caso são realizados de forma isolada, utilizando apenas uma ou duas disciplinas (arquitetônico e estrutural), e deixando instalações hidráulicas, elétricas e de refrigeração de lado. Observa-se uma grande concentração de pesquisas nas fases iniciais do projeto, sendo um grande desafio tornar as avaliações nos estágios iniciais mais precisas, uma vez que, nessa fase, os custos com alteração do projeto são menores.

Verifica-se que o sucesso da realização da avaliação ambiental por meio do BIM ainda está intimamente ligado à fonte de dados utilizada, ao nível de detalhamento do modelo da construção, além da interoperabilidade entre os sistemas utilizados, para que se evite a perda de dados durante a análise. Como dificuldades, se observa uma carência de dados regionalizados sobre os materiais e produtos da construção, que são essenciais para resultados de qualidade.

Quanto à essa problemática, alguns autores incentivam a participação dos fornecedores na disponibilização de informações ambientais sobre seus produtos, a fim de facilitar a inserção desses dados no modelo BIM. Todavia, cabe ressaltar a importância da autenticação de tais dados, para que as análises correspondam ao verdadeiro impacto dos materiais utilizados. Nesse sentido, o Brasil possui uma biblioteca nacional de objetos BIM, que não exige informações ambientais sobre os elementos, o que seria um avanço importante para facilitar avaliações automatizadas e padronizadas.

Como estudos futuros, se verifica a necessidade de explorar melhor a avaliação completa do ciclo de vida da construção, englobando os aspectos de fim de vida, seja por meio da demolição, reaproveitamento ou reciclagem. Além disso, são necessários estudos que sistematizem a gestão dos componentes do empreendimento, garantindo uma maior eficiência ao longo de sua operação, do ponto de vista ambiental. Por fim, cabe ressaltar que apenas um dos estudos levou em consideração a esfera social da sustentabilidade, mesmo que tenham em muitos casos considerado o aspecto econômico, sendo um campo de pesquisas futuras.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ABANDA, F. H.; OTI, A. H.; TAH, J. H.M. Integrating BIM and new rules of measurement for embodied energy and CO₂ assessment. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 12, n. October 2016, p. 288–305, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.06.017>.

ABBASI, Saman; NOORZAI, Esmatullah. The BIM-Based multi-optimization approach in order to determine the trade-off between embodied and operation energy focused on renewable energy use. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 281, p. 125359, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125359>.

AKINADE, Olugbenga O. *et al.* BIM-based deconstruction tool: Towards essential functionalities. **International Journal of Sustainable Built Environment**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 260–271, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijjsbe.2017.01.002>.

ALWAN, Zaid *et al.* Framework for parametric assessment of operational and embodied energy impacts utilising BIM. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], p. 102768, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102768>.

BUENO, Cristiane; FABRICIO, Márcio Minto. Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 90, n. March, p. 188–200, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.028>.

CARVAJAL-ARANGO, D. *et al.* Relationships between lean and sustainable construction: Positive impacts of lean practices over sustainability during construction phase. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 234, p. 1322–1337, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.216>.

CAVALLIERE, Carmine *et al.* Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 211, p. 941–952, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.247>.

CAVALLIERE, Carmine *et al.* Life cycle assessment data structure for building information modelling. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 199, p. 193–204, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.149>.

CHEN, Po Han; NGUYEN, Thanh Chuong. A BIM-WMS integrated decision support tool for supply chain management in construction. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 98, n. November 2018, p. 289–301, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.019>.

EBERHARDT, Leonora Charlotte Malabi; BIRGISDÓTTIR, Harpa; BIRKVED, Morten. Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 47, n. 6, p. 666–680, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1517458>.

EDWARDS, Rodger E. *et al.* Sustainability-led design: Feasibility of incorporating whole-life cycle energy assessment into BIM for refurbishment projects. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 24, n. February, p. 100697, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.027>.

ELEFThERIADIS, S.; DUFFOUR, P.; MUMOVIC, D. BIM-embedded life cycle carbon assessment of RC buildings using optimised structural design alternatives. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 173, p. 587–600, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.042>.

ELEFThERIADIS, Stathis; MUMOVIC, Dejan; GREENING, Paul. Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 67, p. 811–825, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.028>.

FENG, Haibo *et al.* BIM-based life cycle environmental performance assessment of single-family houses: Renovation and reconstruction strategies for aging building stock in British Columbia. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 250, p. 119543, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119543>.

GANIYU, Sikiru Abiodun *et al.* BIM competencies for delivering waste-efficient building projects in a circular economy. **Developments in the Built Environment**, [s. l.], v. 4, n. June, p. 100036, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100036>.

GUERRA, Beatriz C. *et al.* BIM-based automated construction waste estimation algorithms: The case of concrete and drywall waste streams. **Waste Management**, [s. l.], v. 87, p. 825–832, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.010>.

HOLLBERG, Alexander; GENOVA, Gianluca; HABERT, Guillaume. Evaluation of BIM-based LCA results for

- building design. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 109, n. May 2019, p. 102972, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102972>.
- HONIC, Meliha *et al.* Data- and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 23, n. November 2018, p. 341–350, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.017>.
- LLATAS, Carmen; SOUST-VERDAGUER, Bernardette; PASSER, Alexander. Implementing Life Cycle Sustainability Assessment during design stages in Building Information Modelling: From systematic literature review to a methodological approach. **Building and Environment**, [s. l.], v. 182, n. June, p. 107164, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107164>.
- LU, Kun *et al.* Integration of life cycle assessment and life cycle cost using building information modeling: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 285, p. 125438, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125438>.
- LU, Yujie; LE, Van Hieu; SONG, Xiangnan. Beyond Boundaries: A Global Use of Life Cycle Inventories for Construction Materials. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 156, p. 876–887, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.010>.
- NAJJAR, Mohammad *et al.* Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 14, n. October, p. 115–126, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.10.005>.
- NIZAM, Raja Shahmir; ZHANG, Cheng; TIAN, Lu. A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 170, p. 1–14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.067>.
- PRISMA. **TRANSPARENT REPORTING of SYSTEMATIC REVIEWS and META-ANALYSES**. Disponível em: <http://www.prisma-statement.org/PRISMAStatement/CitingAndUsingPRISMA.aspx>.
- REZAEI, Farzaneh; BULLE, Cécile; LESAGE, Pascal. Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages. **Building and Environment**, [s. l.], v. 153, n. February, p. 158–167, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.034>.
- RÖCK, Martin *et al.* LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. **Building and Environment**, [s. l.], v. 140, n. December 2017, p. 153–161, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.006>.
- SAFARI, Kaveh; AZARIJAFARI, Hessam. Challenges and opportunities for integrating BIM and LCA: Methodological choices and framework development. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 67, n. September 2020, p. 102728, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102728>.
- SANTOS, Rúben *et al.* BIM-based life cycle assessment and life cycle costing of an office building in Western Europe. **Building and Environment**, [s. l.], v. 169, n. April 2019, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106568>.
- SANTOS, Rúben *et al.* Development of a BIM-based Environmental and Economic Life Cycle Assessment tool. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 265, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121705>.
- SANTOS, Rúben *et al.* Informetric analysis and review of literature on the role of BIM in sustainable construction. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 103, n. November 2018, p. 221–234, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.022>.
- SANTOS, Rúben *et al.* Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 103, n. February, p. 127–149, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.011>.
- SEYIS, Senem. Mixed method review for integrating building information modeling and life-cycle assessments. **Building and Environment**, [s. l.], v. 173, n. January, p. 106703, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106703>.
- SOUST-VERDAGUER, Bernardette; LLATAS, Carmen; GARCÍA-MARTÍNEZ, Antonio. Critical review of bim-based LCA method to buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 136, p. 110–120, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>.
- SU, Shu *et al.* BIM-DLCA: An integrated dynamic environmental impact assessment model for buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 183, n. May, p. 107218, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107218>.
- WANG, Jiayuan *et al.* Combining life cycle assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: A case study. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 172, p. 3154–3166, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.087>.
- YANG, Xining *et al.* Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 183, p. 729–743, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.070>.
- ZHANG, Cheng; NIZAM, Raja Shahmir; TIAN, Lu. BIM-based investigation of total energy consumption in delivering

building products. **Advanced Engineering Informatics**, [s. l.], v. 38, n. August, p. 370–380, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.08.009>.

AUTORES

ORCID: 0000-0002-7535-8897

JORDANA DE OLIVEIRA |UNISINOS | PPG em Engenharia Civil | Novo Hamburgo, RS, Brasil | Correspondência para: R. Osvaldo Aranha, 445, ap. 502 - Pátria Nova, Novo Hamburgo - RS, 93410-060 |
E-mail: eng.jordanaoliveira@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7088-2502

REGINA CÉLIA ESPINOSA MODOLO, Dra. |UNISINOS| PPG Engenharia Civil e PPG Engenharia Mecânica | São Leopoldo, RS, Brasil | Correspondência para: Av. Unisinos 950, C01 318, Cristo Rei, São Leopoldo - RS, 93022-750 |
E-mail: reginaem@unisinos.br

ORCID: 0000-0002-1975-0026

MARCO AURÉLIO STUMPF GONZÁLEZ, DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL | UNISINOS | PPG em Engenharia Civil e PPG em Arquitetura e Urbanismos | São Leopoldo, RS, Brasil | Correspondência para: Av. Unisinos 950, C01 318, Cristo Rei, São Leopoldo - RS, 93022-750 | E-mail: MGONZALEZ@unisinos.br

COMO CITAR ESTE ARTIGO

DE OLIVEIRA, Jordana; MODOLO, Regina Célia Espinosa; GONZÁLEZ, Marco Aurélio Stumpf. . Bim Como Suporte À Avaliação Do Ciclo De Vida De Edifícios: Uma Revisão Sistemática . **MIX Sustentável**, [S.l.], v. 8, n. 4, p. 45-58, ago. 2022. ISSN 24473073. Disponível em:<<http://www.nexus.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: dia mês. ano. doi:<https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2021.v8.n4.49-62>.

DATA DE ENVIO: 03/11/2021

DATA DE ACEITE: 22/05/2022

PUBLICADO EM: 01/09/2022

EDITOR RESPONSÁVEL: Aguinaldo dos Santos

Registro da contribuição de autoria:

Taxonomia CRediT (<http://credit.niso.org/>)

JO: Conceituação, Curadoria, Análise formal, Aquisição de financiamento, Investigação, Metodologia, Administração de projetos, Validação, Visualização, Escrita - rascunho original, Escrita - revisão e edição

RCEM: Conceituação, Metodologia, Validação, Visualização, Escrita - rascunho original, Escrita - revisão e edição;

MASG: Conceituação, Metodologia, Validação, Supervisão, Visualização, Escrita - rascunho original, Escrita - revisão e edição

Declaração de conflito: nada foi declarado.