XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8593

Fluxos BIM–LCSA em edificações: revisão sistemática e proposta de estrutura integrada

BIM–LCSA workflows in buildings: a systematic review and proposal of an integrated framework

Diana Schrok Bezerra
Instituto Militar de Engenharia| Rio de Janeiro | Brasil | diana.schrok@ime.eb.br
Thiago Araújo Fernandes do Nascimento
Instituto Militar de Engenharia| Rio de Janeiro |Brasil| nascimento.thiago@ime.eb.br
Rafael Barbosa Otranto
Instituto Militar de Engenharia| Rio de Janeiro | Brasil | rafael.otranto@ime.eb.br
Paulo César Pellanda
Instituto Militar de Engenharia| Rio de Janeiro | Brasil | pellanda@ime.eb.br
Filipe Almeida Corrêa do Nascimento
Instituto Militar de Engenharia| Rio de Janeiro | Brasil | filipe.nascimento@ime.eb.br
Marcelo de Miranda Reis
Instituto Militar de Engenharia| Rio de Janeiro | Brasil | marceloreis@ime.eb.br
Giuseppe Miceli Junior
Instituto Militar de Engenharia| Rio de Janeiro | Brasil | giuseppe.miceli@ime.eb.br

Resumo

A integração entre BIM e LCSA é promissora para apoiar decisões sustentáveis nas fases iniciais de projeto, mas ainda é limitada por fragmentação metodológica, baixa interoperabilidade e automação parcial. Este estudo mapeia ferramentas e workflows BIM–LCSA por meio de revisão sistemática segundo o protocolo PRISMA, abrangendo publicações de 2020 a 2025 e 47 estudos primários. Os resultados indicam predomínio de abordagens ambientais, dependência de plataformas proprietárias, automação parcial por programação e escassez de bases sociais regionalizadas. Como contribuição, propõe-se um fluxo BIM–LCSA em oito etapas para organizar os workflows analisados e orientar pesquisas futuras.

Palavras-chave: BIM. LCSA. Tripé da Sustentabilidade. Automação. Interoperabilidade.

Abstract

The integration of BIM and LCSA is promising for supporting sustainable decision-making in the early design stages, but it remains limited by methodological fragmentation, low interoperability, and partial automation. This study maps BIM–LCSA tools and workflows through a systematic review conducted according to the PRISMA protocol, covering publications from 2020 to 2025 and 47 primary studies. The results indicate a predominance of environmental approaches, dependence on proprietary platforms, partial automation through programming, and a scarcity of regionalized social databases. As a contribution, an eight-step BIM–LCSA workflow is proposed to organize the analyzed workflows and guide future research.

Keywords: BIM. LCSA. Triple Bottom Line. Automation. Interoperability.

INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO

Como citar:
BEZERRA, D. S. et al. Fluxos BIM–LCSA em edificações: revisão sistemática e proposta de estrutura integrada In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. Anais... Goiânia: ANTAC, 2026.

A construção civil tem contribuído significativamente para emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia e geração de resíduos [1]. Nesse cenário, a perspectiva de ciclo de vida tem se consolidado como abordagem sistêmica para avaliar impactos ambientais, econômicos e sociais das construções. A *Life Cycle Assessment* (LCA), normatizada pelas ISO 14040 e ISO 14044, quantifica impactos ambientais; a *Life Cycle Costing* (LCC), apoiada pela ISO 15686-5, estima custos ao longo da vida útil; e a *Social Life Cycle Assessment* (S-LCA) avalia efeitos sociais associados a diferentes stakeholders, embora ainda apresente menor harmonização metodológica. Sob a ótica da *Life Cycle Sustainability Assessment* (LCSA), essas três vertentes são articuladas para apoiar decisões de sustentabilidade ao longo do ciclo de vida [2], [14]–[18]. Associado a essa abordagem, o *Building Information Modeling* (BIM) oferece um ambiente informacional capaz de organizar dados de projeto e apoiar a simulação de alternativas desde as fases iniciais [3].

Apesar desse potencial, a integração entre BIM e avaliações de sustentabilidade baseadas no ciclo de vida ainda apresenta limitações operacionais, fragmentação metodológica e baixa interoperabilidade [4]–[8]. Estudos recentes têm buscado superar esses entraves por meio de abordagens como o uso de IFC para favorecer a interoperabilidade [4] e o desenvolvimento de plug-ins BIM para a extração de dados, o mapeamento de bases ambientais, a otimização e a agregação de resultados [5]. Também se observa o avanço de técnicas de programação, aprendizado de máquina (ML) e otimização multiobjetivo (MOO) aplicadas à análise paramétrica e à seleção de alternativas de projeto [7], [8]. Contudo, essas contribuições permanecem dispersas entre ferramentas específicas, dimensões isoladas da sustentabilidade e etapas particulares do processo avaliativo [4]–[8]. Assim, ainda há compreensão limitada sobre a articulação entre ferramentas digitais, interoperabilidade, automação e métodos de apoio à decisão nos fluxos BIM–LCSA voltados ao planejamento e ao projeto [4]–[8].

Nesse contexto, este estudo realiza uma revisão sistemática da literatura com os objetivos de: (i) identificar as ferramentas digitais empregadas em workflows BIM–LCSA; (ii) classificar os workflows quanto às suas etapas, formatos de interoperabilidade e dependência de softwares específicos; (iii) mapear os níveis de automação em cada etapa; e (iv) analisar lacunas e limitações recorrentes.

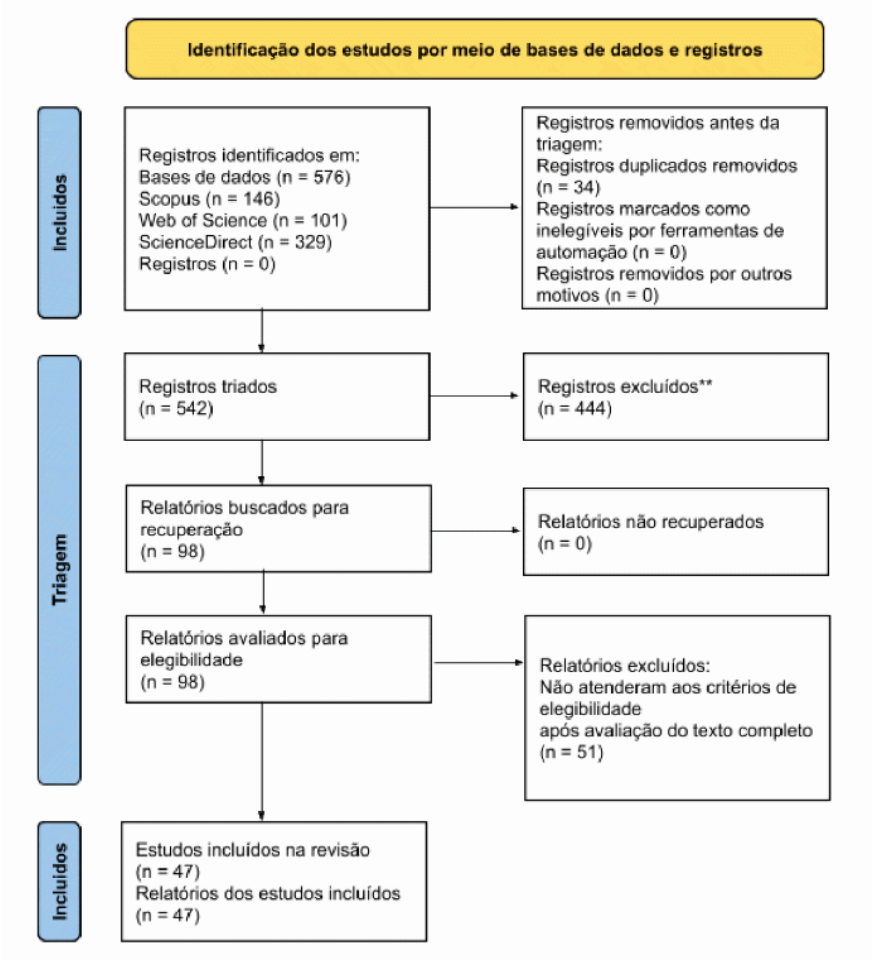
MÉTODO

A metodologia adotada consiste em uma revisão sistemática da literatura, conduzida com base no protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA).

As questões de pesquisa que orientaram a revisão foram: (1) Quais os desafios para uma abordagem holística das três dimensões da sustentabilidade? (2) De que forma se estabelece a integração entre o BIM e a LCSA? (3) Quais as ferramentas de modelagem BIM priorizadas nos processos LCSA? (4) Existem no mercado ferramentas

digitais disponíveis para a avaliação integrada das três dimensões da sustentabilidade ao longo do ciclo de vida? (5) Quais os principais mecanismos ou técnicas de automação de plugins ou workflows?

Figura 1 - Fluxograma do Protocolo PRISMA



Fonte: adaptado de https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-flow-diagram.

Para respondê-las, foram consultadas bases internacionais de indexação, com buscas realizadas em 13 de setembro de 2025, considerando artigos científicos publicados entre 2020 e 2025. Esse recorte temporal justifica-se pela rápida evolução de softwares, formatos de interoperabilidade e técnicas computacionais aplicadas à integração entre BIM e avaliações baseadas em ciclo de vida.

COLETA DE DADOS

As buscas foram realizadas nas bases Scopus, Web of Science e ScienceDirect, utilizando a *string "sustainability" AND ("BIM" OR "Building Information Modeling") AND ("application" OR "plugin")*.

A definição da *string* foi precedida por buscas exploratórias com termos específicos de avaliações baseadas em ciclo de vida, como LCA, LCC, S-LCA e LCSA; contudo, essas combinações retornaram um conjunto restrito de estudos, insuficiente para responder às questões de pesquisa. Consequentemente, adotou-se o termo *"sustainability"* como descritor abrangente, capaz de recuperar estudos associados às dimensões

ambiental, econômica, social e energética da sustentabilidade em ambiente BIM. A sensibilidade da busca inicial foi, portanto, ampliada, enquanto a especificidade da seleção foi assegurada na triagem e elegibilidade, mantendo-se apenas estudos que utilizassem ou desenvolvessem ferramenta digital para avaliação de pelo menos uma dimensão da sustentabilidade ao longo do ciclo de vida.

Em todas as bases, a busca foi restrita à área de engenharia e ao tipo de publicação artigo. Como resultado, foram identificados 146 artigos na Scopus, 101 na Web of Science e 329 na ScienceDirect, totalizando 576 artigos.

TRIAGEM DOS DADOS

Após a coleta inicial, foi realizada uma triagem de duplicados no Rayyan, que identificou 68 artigos possivelmente duplicados e, após análise caso a caso, foram removidos 34 duplicados, resultando em 542 artigos a serem analisados mais profundamente.

Foi realizada uma análise qualitativa dos artigos, inicialmente pelos títulos e resumos, resultando em uma exclusão inicial de 444 artigos. Fez-se necessária a leitura integral de 98 artigos para a exclusão de outros 51, totalizando 495 trabalhos excluídos. Permaneceram, portanto, 47 artigos selecionados para as etapas subsequentes da revisão. Os critérios de exclusão adotados encontram-se descritos no Quadro 1.

Item	Quantidade	Critério de exclusão	Justificativa
1	158	Artigos de revisão.	Apenas artigos primários.
2	18	Artigos baseados em entrevistas.	Apenas artigos primários.
3	13	BIM não usado na metodologia	Não utilizaram BIM na metodologia.
4	190	Não aborda, utiliza ou desenvolve ferramenta digital de LCSA, LCA, LCC ou S-LCA..	Não usaram na metodologia ferramentas digitais de avaliação ao longo do ciclo de vida de pelo menos uma das dimensões da sustentabilidade.
5	66	Não aborda a fase de planejamento ou projeto.	Não abordaram a fase de planejamento ou projeto.
6	26	Aborda reforma ou recuperação ou retrofit.	O estudo limita-se a novas edificações.
7	24	Não envolve edificações.	Artigos que tratam de obras de infraetrutura ou obras de arte.

Quadro 1 - Critérios de exclusão de artigos

Fonte: os autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cabe destacar que, para tornar essa avaliação viável, foram considerados estudos que abordam ferramentas digitais relacionadas a pelo menos uma das três dimensões da sustentabilidade ao longo do ciclo de vida: a ambiental, a econômica ou a social. Essa decisão metodológica justifica-se pelo número ainda reduzido de estudos dedicados especificamente à integração completa da LCSA, tendo sido identificados apenas oito estudos na triagem realizada.

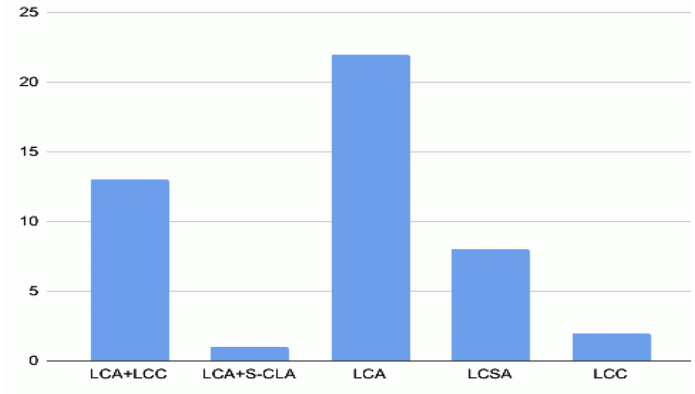
Nesse contexto, a expressão integração BIM–LCSA é aqui adotada em sentido abrangente, compreendendo estudos voltados à avaliação de uma ou mais dimensões

da sustentabilidade ao longo do ciclo de vida, incluindo LCA, LCC, S-LCA, combinações como LCA+LCC e avaliações energéticas ao longo do ciclo de vida.

VISÃO GERAL DAS DIMENSÕES DE SUSTENTABILIDADE

O gráfico apresentado na Figura 2 demonstra a frequência de ocorrência das abordagens de avaliação de ciclo de vida identificadas nos estudos analisados. Observa-se a predominância isolada da Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental (LCA), com o maior número de ocorrências (22 artigos), seguida pela combinação LCA + LCC (13 artigos), evidenciada em estudos como Zhuang et al., Santos et al. e Uddin et al. [6], [9], [10]. O grupo LCSA (8 artigos), que representa a abordagem completa de sustentabilidade (ambiental, econômica e social), aparece em terceiro lugar, com aplicações como as de Llatas et al., Soust-Verdaguer et al., Liu et al. e Khan et al. [4], [5], [7], [8]. Já as combinações LCA + S-LCA (1 artigo) e LCC isolada (2 artigos) apresentam ocorrência reduzida, conforme observado em Di Santo et al., Altaf et al. e Triana et al. [11]–[13].

Figura 2 - Distribuição das dimensões de sustentabilidade por artigos



Fonte: os autores.

A predominância da LCA reflete a maturidade normativa das normas ISO 14040 e ISO 14044 [14], [15], bem como a ampla disponibilidade de bases de dados ambientais e ferramentas computacionais que favorecem sua aplicação. Em segundo lugar, a combinação LCA + LCC indica o avanço da integração entre desempenho ambiental e econômico, embora a LCC raramente apareça de forma isolada, por depender da estrutura de fluxos e processos fornecida pela LCA. Nesse sentido, o acoplamento entre ambas representa uma etapa intermediária importante em direção à sustentabilidade integrada.

Por outro lado, a dimensão social ainda permanece incipiente, em razão da escassez de dados consolidados e de metodologias harmonizadas. Assim, embora a presença da LCSA ainda seja limitada, ela sinaliza um amadurecimento progressivo das abordagens integradas, apoiado pelas diretrizes da UNEP/SETAC [16], [17] e pela articulação entre as normas ISO 14040/44 [14], [15] e ISO 15686-5 [18]. Em conjunto, os resultados revelam uma assimetria metodológica: enquanto a LCA já dispõe de normas, bases de dados e ferramentas consolidadas, a integração LCSA permanece

limitada pela baixa operacionalização da dimensão social e pela dificuldade de compatibilizar indicadores ambientais, econômicos e sociais em um mesmo workflow.

INTEGRAÇÃO BIM–LCSA

Neste estudo, a integração BIM–LCSA é entendida como o processo de vinculação entre dados do modelo BIM e avaliações de sustentabilidade baseadas em ciclo de vida. A estrutura proposta foi derivada da comparação transversal dos 47 estudos selecionados, por meio do agrupamento das atividades recorrentes segundo sua função no processo avaliativo. Assim, foram consolidadas oito etapas: definição de objetivo e escopo, extração de dados BIM, mapeamento com bases de dados, consolidação de inventário, geração de indicadores, integração, agregação e interpretação dos resultados. As variações observadas entre os estudos, como uso manual ou automatizado, diferentes softwares e formatos de interoperabilidade, foram tratadas como alternativas de execução dentro dessas etapas. Portanto, o fluxo apresentado na Figura 3 e no Quadro 2 não representa uma solução vinculada a software específico, mas uma estrutura analítica para comparar e organizar workflows BIM–LCSA.

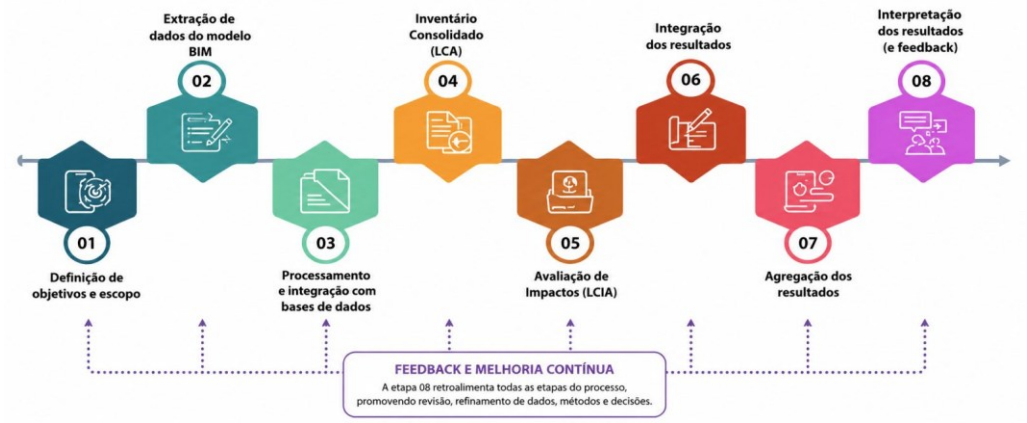
Quadro 3 - Fluxo de integração BIM–LCSA

Item	Etapa	Descrição	Observação
1	Definição de objetivo e escopo	Define-se o propósito da avaliação, a unidade funcional, as fronteiras de sistema e o nível de informação do modelo BIM.	Fase manual.
2	Extração de dados do modelo BIM	Realiza-se a extração das *Bill of Quantities* (BoQ) e *Bill of Materials* (BoM) a partir do modelo BIM.	Essa etapa pode ser manual ou automatizada, dependendo do software e do nível de maturidade do modelo.
3	Mapeamento e integração com bases de dados	Os dados extraídos de BoM são vinculados às bases ambientais, econômicas e sociais.	Etapa executada de maneira manual ou automaticamente pelos softwares existentes ou como parte do fluxo de uma ferramenta digital criada.
4	Consolidação dos Inventários (LCI)	Consolida-se o inventário de dados com o mapeamento e os dados de BoQ.	Etapa executada de maneira manual ou automaticamente pelos softwares existentes ou como parte do fluxo de uma ferramenta digital criada.
5	Visualização dos resultados (LCIA)	Os dados consolidados do inventário são processados nos métodos de avaliação de impacto para gerar indicadores ambientais, econômicos e sociais.	Etapa executada de maneira manual ou automaticamente pelos softwares existentes ou como parte do fluxo de uma ferramenta digital criada.
6	Integração dos resultados	Consiste na análise integrada dos resultados de LCA, LCC e S-LCA, voltada à identificação de *trade-offs*, sinergias e hotspots entre as dimensões da sustentabilidade.	Foca na interpretação cruzada entre domínios. Etapa executada de maneira manual ou automaticamente pelos softwares existentes ou como parte do fluxo de uma ferramenta digital criada.
7	Agregação dos resultados	Etapa opcional e quantitativa, que transforma os resultados das três dimensões em pontuações únicas (*single scores*) ou *rankings*. Utiliza métodos de Análise de Decisão Multicritérios (MCDA), aplicando normalização, ponderação e cálculo de sensibilidade.	Recomendada, mas não obrigatória. Etapa executada de maneira manual ou automaticamente pelos softwares existentes ou como parte do fluxo de uma ferramenta digital criada.
8	Interpretação dos resultados	Etapa iterativa que permeia todas as fases anteriores. Análise crítica e validação dos resultados integrados e/ou agregados. Visa compreender o significado dos resultados, avaliar sua robustez e formular conclusões e recomendações.	Depende predominantemente de julgamento humano.

Fonte: os autores.

Figura 3 - Fluxo de integração BIM–LCSA

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8593



Fonte: os autores.

As etapas 1 a 6 e 8 são necessárias ao processamento de um fluxo integrado BIM–LCSA, enquanto a etapa 7, embora recomendada para apoio à decisão, é opcional. As etapas 1 e 8 dependem da atuação humana e, portanto, não são passíveis de automação. A distinção entre as etapas 5 e 6 reside no grau de correlação dos resultados: na etapa 5, os indicadores permanecem isolados por dimensão; na etapa 6, ocorre sua integração, com identificação de sinergias, trade-offs e hotspots, de forma manual ou automatizada. As etapas 6 e 7, embora concebidas para integrar as três dimensões da sustentabilidade, também podem ser aplicadas a estudos unidimensionais. A diferença essencial entre ambas é que a etapa 6 promove a combinação e comparação qualitativa dos resultados, podendo incluir processos de otimização, enquanto a etapa 7 os normaliza e sintetiza em uma pontuação única por meio de técnicas de MCDA, permitindo definir a alternativa mais adequada.

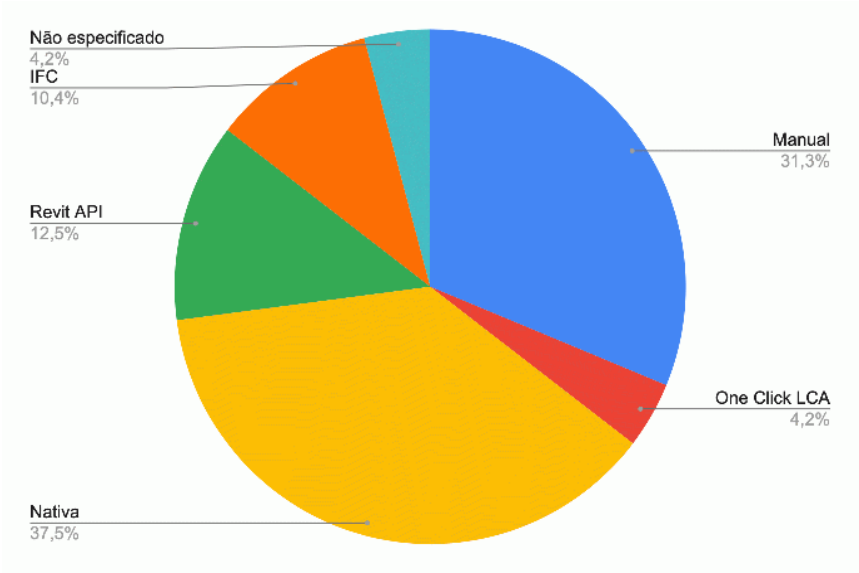
Em síntese, a etapa 6 gera um conjunto de soluções integradas a serem interpretadas na etapa 8, ao passo que a etapa 7 busca convergir para a solução mais adequada. A etapa 8, por sua vez, deve permear todo o processo, com observação contínua dos dados e procedimentos para permitir retroalimentação, revisão de parâmetros e eventual redefinição de escopo.

EXTRAÇÃO DE DADOS DO MODELO

A extração dos dados para a integração entre BIM e LCSA foi predominantemente nativa (37,5%), sobretudo por meio do uso do Dynamo no Revit, enquanto a integração manual ainda apresentou participação elevada (31,4%), evidenciando limitações de interoperabilidade. O uso do Revit API também foi relevante nos fluxos com programação em C#, ao passo que o IFC, embora central para o *openBIM*, apareceu de forma incipiente.

Por se tratar de uma revisão sistemática, a análise da interoperabilidade foi limitada às evidências presentes nos estudos selecionados. Neles, as abordagens openBIM identificadas restringiram-se, em geral, ao uso de arquivos IFC, sem exploração consistente de iniciativas complementares de interoperabilidade semântica, como *Information Delivery Specification* (IDS) e *buildingSMART Data Dictionary* (bSDD).

Figura 4 - Extração de dados do modelo para a integração de BIM–LCSA

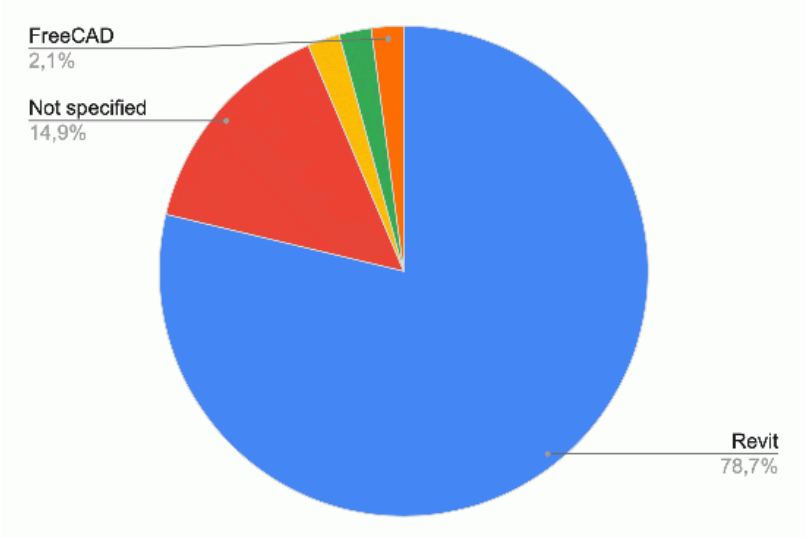


Fonte: os autores.

MODELAGEM BIM

A modelagem BIM foi amplamente dominada pelo Autodesk Revit, presente em 78,7% dos artigos analisados. Esse predomínio não indica apenas preferência dos autores por uma plataforma específica, mas evidencia uma dependência estrutural do ecossistema Autodesk nos workflows BIM–LCSA. Tal centralidade está associada à ampla difusão do Revit, à disponibilidade de uma API consolidada, à integração nativa com o Dynamo e à compatibilidade com ferramentas recorrentes de avaliação ao longo do ciclo de vida, como Tally, One Click LCA e Green Building Studio. Outras plataformas, como Glodon, Rhinoceros 3D e FreeCAD, apareceram de forma pontual, como observado em Li et al., Ullah et al. e Yang et al. [19]–[21]. A presença de alternativas como FreeCAD, associada a fluxos baseados em IFC, indica o potencial de abordagens *openBIM*; entretanto, sua baixa ocorrência mostra que esses fluxos ainda não se consolidaram como padrão operacional na literatura analisada.

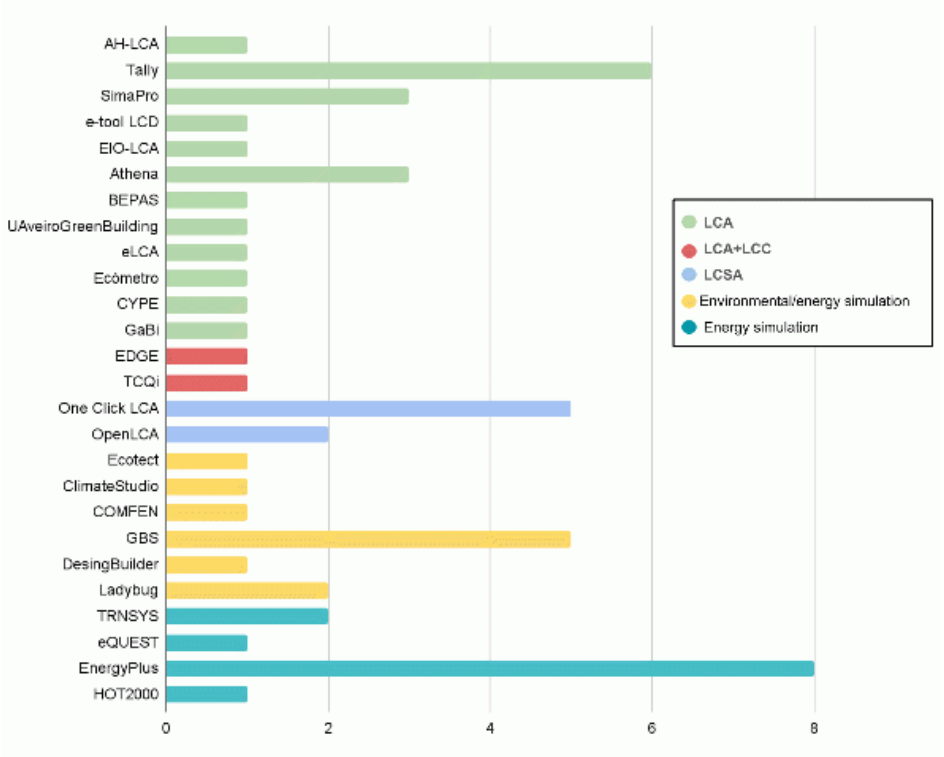
Figura 5 - Gráfico do uso de ferramentas de modelagem BIM



Fonte: os autores.

FERRAMENTAS DIGITAIS EXISTENTES PARA AVALIAÇÃO DAS DIMENSÕES DA SUSTENTABILIDADE

Figura 6 - Ferramentas digitais



Fonte: os autores.

A análise das ferramentas digitais utilizadas nos fluxos dos 47 artigos indica que a automação disponível ainda é parcial, concentrando-se principalmente entre as etapas 3 e 5 da estrutura para integração BIM–LCSA, isto é, no mapeamento de dados, na consolidação de inventários e na geração de indicadores. Nenhuma das ferramentas identificadas cobre integralmente as etapas 1 a 8; a etapa 7 ainda não aparece implementada de forma nativa, enquanto as etapas 1 e 8 permanecem dependentes de intervenção humana ou de recursos externos. Esse resultado reforça que a lacuna central não está apenas na existência de ferramentas, mas na ausência de soluções interoperáveis, transparentes e metodologicamente completas para operacionalizar a integração BIM–LCSA, como evidenciado nos usos parciais de ferramentas como One Click LCA, EDGE, TCQi, Tally e Green Building Studio nos estudos analisados [9], [10], [22]–[24]. A Figura 6 sintetiza esse panorama e evidencia três gargalos estruturais: concentração em ferramentas proprietárias, baixa interoperabilidade semântica entre modelos BIM e bases de ciclo de vida, e ausência de bases sociais regionalizadas.

USO DE PROGRAMAÇÃO PARA AUTOMAÇÃO DE WORKFLOW OU DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DIGITAL

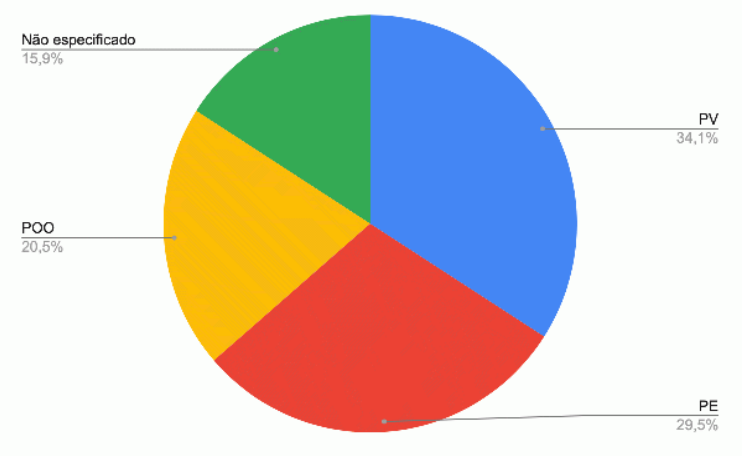
A automação dos workflows BIM–LCSA dependeu fortemente de programação, seja para automatizar etapas específicas, seja para desenvolver ferramentas completas. Os

resultados mostram predominância de soluções vinculadas ao ecossistema Revit, especialmente para superar limitações de interoperabilidade e automatizar a extração de dados do modelo.

LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

A programação visual (PV) foi a abordagem mais frequente, seguida pela programação estruturada (PE) e pela programação orientada a objetos (POO), com destaque para Dynamo, Python, MATLAB, C# e VBA. O Dynamo predominou sobretudo na automação da etapa 2, enquanto Python e MATLAB se associaram mais a rotinas analíticas e de ML, e o C# se destacou no desenvolvimento de ferramentas mais completas.

Figura 7 - Gráfico das linguagens de programação

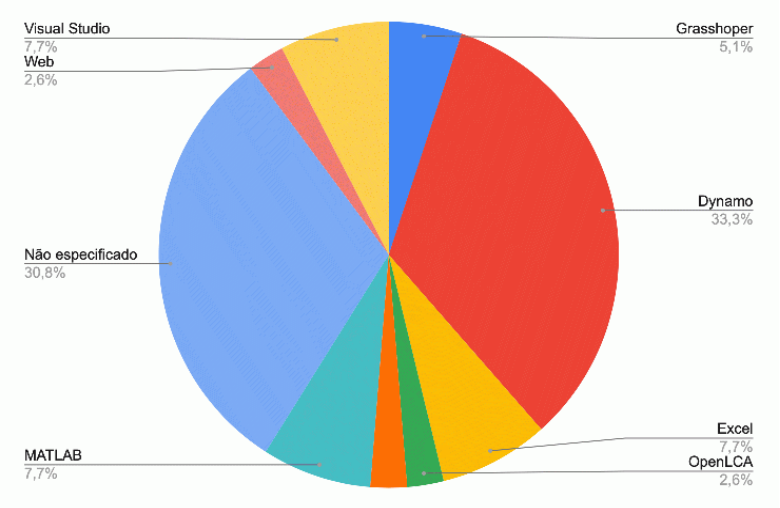


Fonte: os autores.

AMBIENTE DE PROGRAMAÇÃO

O Dynamo foi também o ambiente de programação mais utilizado, seguido de forma distante por Grasshopper, Visual Studio, Excel e MATLAB. A concentração nesses ambientes reforça a dependência do ecossistema Autodesk e, em menor escala, do Rhinoceros 3D para o desenvolvimento dos workflows BIM–LCSA.

Figura 8 - Gráfico do ambiente de programação

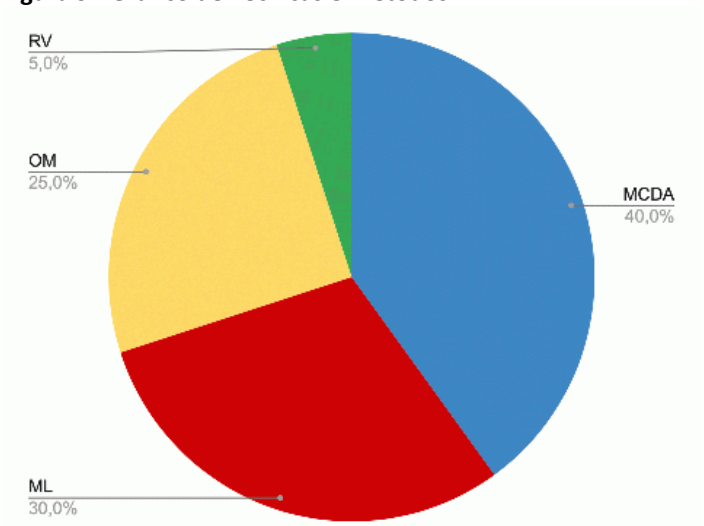


Fonte: os autores.

TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO

Entre as técnicas empregadas, destacaram-se os métodos MCDA, o ML e a MOO, aplicados em estudos como Soust-Verdaguer et al., Khan et al., Liu et al., Abdolvand et al., Yang et al., Zhou et al. e Gu et al. [5], [7], [8], [21], [25], [26], [27].

Figura 9 - Gráfico de Técnicas e Métodos



Fonte: os autores.

O MCDA foi a principal abordagem associada à etapa 7, voltada à agregação dos resultados por meio de normalização, ponderação e ranqueamento de alternativas para apoio à decisão. O ML foi aplicado sobretudo às etapas 3, 4 e 6, com ênfase em mapeamento, geração de inventário e identificação de padrões; e a MOO concentrou-se na etapa 6, especialmente por meio do NSGA-II, para geração de soluções e análise de trade-offs. Embora ML, MOO e MCDA ampliem o potencial de automação, seu uso ainda ocorre de forma fragmentada, associado a etapas específicas do workflow, sem configurar uma solução integrada para a LCSA em ambiente BIM.

RESPOSTA ÀS QUESTÕES DE PESQUISA

A seguir, sintetizam-se as respostas às questões de pesquisa, com base nos estudos selecionados, nos workflows identificados e nas ferramentas e técnicas analisadas.

(1) Quais os desafios para uma abordagem holística das três dimensões da sustentabilidade?

A literatura concentra-se majoritariamente na dimensão ambiental, seguida por integrações entre LCA e LCC, enquanto a dimensão social permanece pouco explorada. Os principais desafios envolvem a menor maturidade metodológica da S-LCA e da própria LCSA, a limitada cobertura das ferramentas digitais e a escassez de bases de dados sociais consolidadas e regionalizadas.

(2) De que forma se estabelece a integração entre o BIM e a LCSA?

A integração entre BIM e LCSA ainda não se configura como um fluxo digital contínuo entre modelo, inventário, avaliação e decisão; na literatura analisada, ela ocorre por arranjos híbridos organizáveis em oito etapas, da definição de objetivo e escopo à interpretação dos resultados. As automações observadas concentram-se principalmente na extração de dados e na agregação dos resultados, frequentemente por meio de rotinas de programação desenvolvidas nos próprios estudos, uma vez que ainda não há ferramentas consolidadas capazes de automatizar integralmente essas etapas. A necessidade de reduzir extrações manuais e superar limitações de interoperabilidade explica o uso recorrente de IFC, integrações nativas, Revit API e ambientes de programação como estratégias para viabilizar maior automação dos workflows.

(3) Quais as ferramentas de modelagem BIM priorizadas nos processos LCSA?

A literatura evidencia forte predominância do Autodesk Revit nos processos BIM–LCSA. Essa centralidade se relaciona à disponibilidade de API consolidada, à integração com o Dynamo e à compatibilidade com ferramentas como Tally e One Click LCA. Embora existam alternativas baseadas em openBIM, como o uso de IFC com FreeCAD, essas aplicações ainda são pontuais.

(4) Existem no mercado ferramentas digitais disponíveis para a avaliação integrada das três dimensões da sustentabilidade ao longo do ciclo de vida?

Apenas o One Click LCA foi identificado como ferramenta com capacidade de integrar LCA, LCC e S-LCA em uma mesma plataforma; contudo, nos estudos analisados, essa capacidade não foi explorada de forma completa. As demais ferramentas cobrem dimensões específicas, principalmente a ambiental e, em menor medida, a econômica. Assim, a limitação não está apenas na disponibilidade de softwares, mas na dificuldade de operacionalizar a LCSA completa de modo transparente, interoperável e reproduzível.

(5) Quais os principais mecanismos ou técnicas de automação de plugins ou workflows?

A automação dos workflows BIM–LCSA dependeu fortemente de programação, com predominância de soluções vinculadas ao ecossistema Revit para automatizar a extração de dados do modelo e reduzir limitações de interoperabilidade. Entre as técnicas computacionais, destacam-se ML, MOO e MCDA, aplicados ao mapeamento, à geração de soluções e à agregação dos resultados; entretanto, seu uso ainda é pontual e não elimina a dependência de escolhas manuais, validação humana e interoperabilidade entre plataformas.

CONCLUSÕES

Os resultados mostram que a integração entre BIM e avaliações de ciclo de vida ainda é desigual entre as dimensões da sustentabilidade. Predominam estudos centrados em LCA, enquanto LCA+LCC e, sobretudo, a LCSA completa permanecem menos frequentes. A baixa presença de S-LCA indica que a dimensão social ainda não está consolidada, e a automação dos workflows segue limitada, concentrando-se principalmente na extração de dados do modelo BIM.

Este estudo contribui ao sistematizar os workflows BIM–LCSA da literatura recente, classificando níveis de automação, formas de integração e ferramentas digitais empregadas. A análise evidenciou o predomínio de arranjos híbridos, baseados na combinação de diferentes softwares e rotinas personalizadas, além do uso crescente de MOO, ML e MCDA no apoio à decisão nas fases iniciais de projeto.

As principais lacunas identificadas incluem a ausência de bases sociais regionalizadas, a escassez de ferramentas capazes de integrar simultaneamente LCA, LCC e S-LCA, a baixa automação das etapas intermediárias e a forte concentração dos workflows no ecossistema Revit. Soma-se a isso o caráter fechado de muitas ferramentas comerciais, que reduz a transparência e dificulta integrações mais amplas.

Como limitação, os resultados dependem da qualidade das informações metodológicas descritas nos artigos selecionados, o que restringe a comparação entre níveis de automação, bases de dados e etapas cobertas. Pesquisas futuras devem avançar na interoperabilidade entre plataformas, em abordagens *openBIM* para além do IFC, no desenvolvimento de bases sociais regionalizadas e na automação de etapas intermediárias.

REFERÊNCIAS

[1] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Global Status Report for Buildings and Construction 2024–2025. Nairobi: UNEP, 2024. Disponível em: https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025. Acesso em: 15 jun. 2026.

[2] PIHKOLA, H. et al. LCSA Handbook (D2.9). European Union's Horizon 2020 Project ORIENTING, Grant Agreement No. 958231, 2024. Disponível em: https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e50bf7e2c5&appId=PPGMS. Acesso em: 15 jun. 2026.

[3] NAJJAR, M.; FIGUEIREDO, K.; PALUMBO, M.; HADDAD, A. 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, v. 14, p. 115–126, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.10.005.

[4] LLATAS, C.; SOUST-VERDAGUER, B.; HOLLBERG, A.; PALUMBO, E.; QUIÑONES, R. BIM-based LCSA application in early design stages using IFC. Automation in Construction, v. 138, art. 104259, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104259.

[5] SOUST-VERDAGUER, B.; GUTIÉRREZ MORENO, J. A.; CAGIGAS, D.; HOXHA, E.; LLATAS, C. Supporting sustainability assessment of building element materials using a BIM-plug-in for multi-criteria decision-making. Journal of Building Engineering, v. 97, art. 110818, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110818.

[6] ZHUANG, D.; ZHANG, X.; LU, Y.; WANG, C.; JIN, X.; ZHOU, X.; SHI, X. A performance data integrated BIM framework for building life-cycle energy efficiency and environmental optimization design. Automation in Construction, v. 127, art. 103712, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103712.

[7] LIU, Y.; LI, T.; XU, W.; WANG, Q.; HUANG, H.; HE, B.-J. Building information modelling-enabled multi-objective optimization for energy consumption parametric analysis in green buildings design using hybrid machine learning algorithms. Energy and Buildings, v. 300, art. 113665, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113665.

[8] KHAN, A. M.; ALALOUL, W. S.; MUSARAT, M. A.; FAYYAZ, A. M. Optimizing sustainable alternatives in value engineering Decision-Making through BIM-Integrated plugin automation for buildings. Ain Shams Engineering Journal, v. 16, art. 103373, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103373.

[9] SANTOS, R.; COSTA, A. A.; SILVESTRE, J. D.; VANDENBERGH, T.; PYL, L. BIM-based life cycle assessment and life cycle costing of an office building in Western Europe. Building and Environment, v. 169, art. 106568, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106568.

[10] UDDIN, M. N.; WEI, H. H.; CHI, H. L.; NI, M.; ELUMALAI, P. Building information modeling (BIM) incorporated green building analysis: an application of local construction materials and sustainable practice in the built environment. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, v. 6, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s41024-021-00106-5.

[11] DI SANTO, N.; GUANTE HENRIQUEZ, L.; DOTELLI, G.; IMPERADORI, M. Holistic Approach for Assessing Buildings' Environmental Impact and User Comfort from Early Design: A Method Combining Life Cycle Assessment, BIM, and Active House Protocol. Buildings, v. 13, art. 1315, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings13051315.

[12] ALTAF, M.; JAFFARI, R.; ALALOUL, W. S.; MUSARAT, M. A.; AMMAD, S. Developing automated strategy of life cycle cost analysis (LCCA) with building information modeling (BIM) integration for building projects. Results in Engineering, v. 25, art. 104179, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104179.

[13] TRIANA, M. A.; E SILVA MACHADO, R. M.; MARTINS KAMIMURA, A.; KÖRBES BRACHT, M.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Energy efficiency strategies for Brazilian social housing considering a life cycle perspective: Optimisation between thermal autonomy, energy consumption and costs. Energy and Buildings, v. 295, art. 113254, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113254.

[14] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva: ISO, 2006. Disponível em: https://www.iso.org/standard/37456.html. Acesso em: 15 jun. 2026.

[15] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14044:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva: ISO, 2006. Disponível em: https://www.iso.org/standard/38498.html. Acesso em: 15 jun. 2026.

[16] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME; SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. Paris: UNEP, 2009. Disponível em: https://www.unep.org/resources/report/guidelines-social-life-cycle-assessment-products. Acesso em: 15 jun. 2026.

[17] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME; SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: making informed choices on products. Paris: UNEP, 2011. Disponível em: https://www.unep.org/resources/report/towards-life-cycle-sustainability-assessment-making-informed-choices-products. Acesso em: 15 jun. 2026.

[18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15686-5:2017: Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing. Geneva: ISO, 2017. Disponível em: https://www.iso.org/standard/61148.html. Acesso em: 15 jun. 2026.

[19] LI, X.; XIE, W.; XU, L.; LI, L.; JIM, C. Y.; WEI, T. Holistic life-cycle accounting of carbon emissions of prefabricated buildings using LCA and BIM. Energy and Buildings, v. 266, art. 112136, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112136.

[20] ULLAH, H.; ZHANG, H.; HUANG, B.; GONG, Y. BIM-Based Digital Construction Strategies to Evaluate Carbon Emissions in Green Prefabricated Buildings. Buildings, v. 14, art. 1689, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings14061689.

[21] YANG, R. J.; IMALKA, S. T.; WIJERATNE, W. M. P.; AMARASINGHE, G.; WEERASINGHE, N.; JAYAKUMARI, S. D. S.; ZHAO, H.; WANG, Z.; GUNARATHNA, C.; PERRIE, J.; LIU, C.; WAKEFIELD, R. Digitalizing building integrated photovoltaic (BIPV) conceptual design: A framework and an example platform. Building and Environment, v. 243, art. 110675, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110675.

[22] SAJID, Z. W.; KHAN, S. A.; HUSSAIN, F.; ULLAH, F.; KHUSHNOOD, R. A.; SOLIMAN, N. Assessing economic and environmental performance of infill materials through BIM: a life cycle approach. Smart and Sustainable Built Environment, 2024. DOI: https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2023-0341.

[23] FELICIONI, L.; CASALONE, L.; MARCHI, L.; GASPARI, J. Integrating life cycle assessment and cost analysis in decision making: Optimising design choices in a public building case study. Energy and Buildings, v. 347, art. 116399, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116399.

[24] SOUST-VERDAGUER, B.; GARCÍA-MARTÍNEZ, A.; REY-ÁLVAREZ, B.; DE DIEGO, B.; DE LA FUENTE, A.; RÖCK, M. Data infrastructure for whole-life carbon emissions baselines of buildings in Spain. Energy and Buildings, v. 347, art. 116307, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116307.

[25] ABDOLVAND, M.; NEZHAD, A.; BAMBACH, M.; DIAS-DA-COSTA, D. Integrated climate-responsive thermal load ML model and cost/embodied energy estimate from a preliminary building design. Energy and Buildings, v. 304, art. 113837, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113837.

[26] ZHOU, Y.; TAM, V. W. Y.; LE, K. N. Developing a multi-objective optimization model for improving building's environmental performance over the whole design process. Building and Environment, v. 246, art. 110996, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110996.

[27] GU, X.; CHEN, C.; FANG, Y.; MAHABIR, R.; FAN, L. CECA: An intelligent large-language-model-enabled method for accounting embodied carbon in buildings. Building and Environment, v. 272, art. 112694, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112694.