



Análise das estratégias de avaliação do ciclo de vida e eficiência energética em habitação social: uma revisão sistemática

Analysis of life cycle assessment and energy efficiency strategies in social housing: a systematic review

Monday LUKA^{1*}, Isaac S. A. BRITO¹, Emilia R. Kohlman RABBANI¹, Mahmoud SHAKOURI², Maria Helena de SOUSA³

¹ Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, PE, Brasil.

² Boise State University (BSU), Idaho, Estados Unidos da América.

³ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, Brasil.

* E-mail de contato: lm@poli.br

Artigo recebido em 3 de dezembro de 2024, versão final aceita em 22 de julho de 2025, publicado em 22 de dezembro de 2025.

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise sistemática da literatura sobre a avaliação do ciclo de vida (ACV) e eficiência energética em habitação social, com foco na interação desses aspectos com a rede elétrica. O estudo avalia diferentes metodologias de ACV aplicadas a projetos habitacionais, considerando as variações nos parâmetros construtivos, no desempenho energético, no contexto climático e nas escolhas metodológicas. A revisão revelou lacunas importantes nas abordagens existentes, especialmente no que tange à ausência de uma metodologia padronizada para a avaliação dos impactos ambientais além das emissões de carbono e do consumo de energia. As principais questões abordadas no artigo foram: (i) estratégias de mitigação para a eficiência energética em habitação social (RQ1), que destacam o uso operacional de energia como o principal responsável pelo impacto ambiental durante o ciclo de vida das habitações sociais; (ii) alternativas de design para habitação social com foco em eficiência energética (RQ2), que evidenciam a importância do contexto climático, da tipologia do edifício e do sistema de isolamento para a eficiência energética; e (iii) estratégias de intervenção material (RQ3), que discutem os impactos incorporados de materiais de isolamento, ressaltando a importância de considerar esses efeitos na avaliação de alternativas de materiais e técnicas construtivas. A revisão conclui que, embora as alternativas de design e os materiais de construção tenham um impacto significativo na eficiência energética, a falta de uma avaliação abrangente que considere todos os aspectos do

ciclo de vida limita a capacidade de tirar conclusões definitivas sobre as melhores práticas. O artigo enfatiza a necessidade de adotar uma metodologia integrada e abrangente de avaliação ambiental que contemple não apenas as emissões de carbono e o consumo de energia, mas também outros impactos ambientais relevantes. A implementação de uma abordagem mais sistêmica é essencial para avançar na construção de habitação social mais sustentável, atendendo aos princípios de economia circular e promovendo a transição para sistemas de eletricidade de baixo carbono.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); eficiência energética; habitação social; materiais de construção; impactos ambientais

ABSTRACT This article presents a systematic review of the literature on life cycle assessment (LCA) and energy efficiency in social housing, focusing on the interaction of these aspects with the electrical grid. The study evaluates different LCA methodologies applied to housing projects, considering variations in construction parameters, energy performance, climate context, and methodological choices. The review revealed important gaps in existing approaches, especially regarding the absence of a standardized methodology for assessing environmental impacts beyond carbon emissions and energy consumption. The main issues addressed in the article were: (i) mitigation strategies for energy efficiency in social housing (RQ1), which highlight operational energy use as the main contributor to environmental impact during the life cycle of social housing; (ii) design alternatives for social housing with a focus on energy efficiency (RQ2), which highlight the importance of the climatic context, building typology, and insulation system for energy efficiency; and (iii) material intervention strategies (RQ3), which discuss the embodied impacts of insulation materials, emphasizing the importance of considering these effects when evaluating alternative materials and construction techniques. The review concludes that, although design alternatives and construction materials have a significant impact on energy efficiency, the lack of a comprehensive assessment that considers all aspects of the life cycle limits the ability to draw definitive conclusions about best practices. The article emphasizes the need to adopt an integrated and comprehensive environmental assessment methodology that considers not only carbon emissions and energy consumption but also other relevant environmental impacts. The implementation of a more systemic approach is essential to advance the construction of more sustainable social housing, meeting the principles of the circular economy and promoting the transition to low-carbon electricity systems.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); energy efficiency; social housing; building materials; environmental impacts

1. Introdução

O crescimento populacional global tem impulsionado uma demanda crescente por energia, cujos impactos ambientais tornam-se cada vez mais evidentes (Ascione *et al.*, 2024a). Em resposta, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, especificamente o Objetivo n.º 7, estabelecem a meta de aumentar a taxa global de melhoria da eficiência energética de 1,3% ao ano para 2,7% ao ano no período de 2015 a 2030 (Dahiya

& Laishram, 2024). De forma complementar, na Europa, a Agência Internacional de Energia (AIE) delimitou uma meta ambiciosa de reduzir em 80% as emissões globais até 2050, incentivando os países europeus a priorizarem ações voltadas à eficiência energética (Passer *et al.*, 2016). Nesse contexto, o setor da construção civil desponta como elemento estratégico para alcançar tais objetivos, sendo responsável por cerca de 40% do consumo global de energia e 30% das emissões anuais de gases de efeito estufa (UNEP, 2009). As características de

design dos edifícios como tipologia, tamanho e forma têm papel determinante no impacto ambiental, influenciando a energia incorporada, o consumo operacional e a vida útil das edificações (Bertoli *et al.*, 2024). Dada sua relevância, o setor apresenta grande potencial para mitigar questões ambientais e energéticas contemporâneas (Pannier *et al.*, 2021).

Nesse sentido, a habitação social emerge como um mecanismo essencial para promover eficiência energética, especialmente por meio de projetos padronizados de habitações compactas voltadas para populações de baixa renda (Bertoli *et al.*, 2024). Na Inglaterra, por exemplo, o estoque de moradias sociais soma 4,4 milhões de unidades, das quais 2,8 milhões pertencem a provedores privados registrados e 1,6 milhão são de propriedade de governos locais (Grainne Cuffe, 2022). Paralelamente, nos países em desenvolvimento, os déficits habitacionais e os baixos níveis de industrialização destacam-se como desafios prementes. No Equador, em 2015, o déficit habitacional atingiu 587.110 unidades, representando 13,4% do estoque total (Macias *et al.*, 2017). No Brasil, em 2019, o déficit habitacional somava 5,8 milhões de unidades, sendo as famílias de baixa renda as mais afetadas (MDR, 2018). Em ambos os casos, programas de habitação social têm sido implementados para mitigar a escassez habitacional (Macias *et al.*, 2017). No Reino Unido, o padrão técnico *Decent Homes Standard* avalia a adequação das habitações públicas. Durante o ano fiscal de 2020–2021, 8% das propriedades administradas por conselhos locais foram classificadas como inadequadas, enquanto esse índice foi de apenas 0,4% entre provedores privados registrados, caindo para 0,3% no ano seguinte (Grainne Cuffe, 2022). Contudo, evidências indicam que muitas habitações sociais ainda não atendem aos padrões mínimos de eficiência energética, representando um

desafio significativo para famílias de baixa renda (Bertoli *et al.*, 2024; Dalbem *et al.*, 2019; Flamant *et al.*, 2022; Macias *et al.*, 2017). Assim, o design construtivo e o uso de energia são fatores críticos para garantir segurança energética e mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Song *et al.*, 2018).

Diante desse cenário, o setor da construção tem intensificado esforços para implementar estratégias que promovam a conservação de energia em edifícios, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável (Kalangos, 2017). Essas iniciativas visam abordar questões ambientais enquanto minimizam o consumo de materiais e energia ao longo do ciclo de vida das edificações (Rosa *et al.*, 2014). A avaliação do ciclo de vida (ACV) destaca-se como uma ferramenta robusta para quantificar os impactos ambientais associados às construções, permitindo uma análise abrangente desde a produção de materiais até a demolição e descarte (Ingrao *et al.*, 2018).

2. Avaliação do ciclo de vida anterior de medidas de eficiência energética em edifícios residenciais

Investigações recentes têm enfatizado a importância de estratégias de eficiência energética em edificações, abordando aspectos relacionados ao ciclo de vida dos materiais e às operações energéticas. Tetley, Dadoo e Gustavsson (2019) exploraram os efeitos da energia primária ao longo do ciclo de vida de um edifício residencial, destacando que a integração da seleção de materiais estruturais com o projeto de edificações de baixa energia e sistemas operacionais eficientes é crucial para reduzir significativamente o consumo energético. Complementando essa análise, Monteiro, Freire e Soares (2021)

investigaram o impacto ambiental e energético de três alternativas de projeto para residências no sul da Europa, observando que proporções maiores de janelas em relação a paredes aumentam a energia incorporada, especialmente devido ao uso de janelas com caixilhos de alumínio e vidros duplos. Cusenza *et al.* (2022) empregaram a ferramenta *BEM/TRNSYS* para modelar o desempenho energético de dois cenários de isolamento térmico, com e sem sistemas de armazenamento de bateria, avaliando as emissões operacionais de carbono. Da mesma forma, Hasik *et al.* (2019) utilizaram Python para simular o consumo energético de diversos projetos de escritórios, destacando que o tipo de fonte energética pode superar as considerações tradicionais de eficiência energética em termos de impacto ambiental. Sharif e Hammad (2019b), por sua vez, aplicaram redes neurais artificiais (ANNs) para otimizar cenários de retrofit energético considerando custos, consumo de energia e impactos ambientais. No âmbito da ecoeficiência, Tadeu *et al.* (2022) propuseram uma estratégia integrando a avaliação do ciclo de vida (ACV) com análises de custo-efetividade para priorizar medidas de conservação de energia (ECMs) em *retrofit* de edificações. Estudos como os de Kneifel *et al.* (2018), baseados no Banco de Dados Residencial de Baixo Consumo de Energia (BIRD), indicam que avanços em eficiência energética reduzem o consumo operacional, mas frequentemente aumentam a energia incorporada devido à maior utilização de materiais. Zhan *et al.* (2018) corroboraram esses achados utilizando uma abordagem híbrida de ACV para mensurar energia e emissões de CO₂ em edifícios residenciais urbanos na China. Para a Europa, Gulotta *et al.* (2021) introduziram o método *BOHEEME (Bottom-up Harmonized Energy-Environmental Models for Europe)*, que combina modelagem *bottom-up*,

simulação dinâmica de energia e ACV para avaliar estratégias de renovação de estoques residenciais. Resultados demonstram que melhorias no envelope vertical podem reduzir emissões de carbono associadas à demanda de aquecimento e resfriamento em até 20%. Ajayi, Oyedele e Ilori (2019) abordaram a crescente relevância do carbono incorporado, observando que, enquanto a fase operacional influencia significativamente emissões de edificações baseadas em combustíveis fósseis, impactos incorporados podem atingir até 60% do total em projetos de alta eficiência energética. Além disso, Dixit e Singh (2018) identificaram fatores críticos que afetam a eficiência energética em edificações, incluindo limites de sistema, métodos de análise e localização geográfica. Para contextos insulares, Kylili, Ilic e Fokaides (2017) demonstraram que o uso de materiais isolantes em paredes contribui positivamente para a eficiência energética sem aumento significativo na energia total incorporada. Em climas mediterrâneos, Stephan e Stephan (2020) propuseram soluções para alcançar emissões líquidas zero em edifícios de apartamentos, incluindo redução de consumo elétrico e uso de sistemas fotovoltaicos com baterias, apesar do impacto inicial de emissões associadas à instalação. Em termos metodológicos, Mahlan *et al.* (2024) desenvolveram a abordagem integrada ILES (*Integrated Life Cycle and Energy Simulation*) para investigar sistemas de paredes em residências na Índia e Austrália. Najjar *et al.* (2019) utilizaram otimização matemática combinada com *Building Information Modeling* (BIM) e ACV para avaliar o impacto do envelope de edificações no consumo energético, destacando a influência de paredes externas e janelas em residências no Rio de Janeiro. Essas abordagens revelam um panorama abrangente das interações entre eficiência energética, energia incorporada e impactos ambientais,

reforçando a necessidade de considerar o ciclo de vida completo das edificações em estratégias de design, retrofit e construção sustentável.

2.1. Avaliação do ciclo de vida passado da eficiência energética em habitação social

Estudos anteriores apontam que a avaliação do ciclo de vida (ACV) aplicada a habitações sociais ainda é limitada, especialmente no contexto da eficiência energética. Por exemplo, Macias *et al.* (2017) analisaram três métodos construtivos no Equador forma de confirmação isolada, parede de suporte de carga e alvenaria confinada. Os resultados demonstraram que o consumo de energia durante a fase operacional varia de 81,1% a 97,0%, enquanto a energia incorporada contribui com 3,0% a 18,9%. Essa discrepância reflete os padrões inadequados de isolamento térmico em habitações de baixa renda. Bertoli *et al.* (2024), utilizando ACV e análise de custo do ciclo de vida, avaliaram o desempenho térmico de habitações unifamiliares no Brasil, demonstrando que melhorias no envelope do edifício podem reduzir em 20% o consumo anual de energia, com diminuições de 12% nas emissões de aquecimento global e de 17% na demanda energética cumulativa. No Chile, Flamant *et al.* (2022) analisaram modernizações energéticas sob diferentes condições climáticas, constatando que a energia incorporada responde por até 60% das emissões de carbono durante as reformas, enquanto a operação energética contribui com cerca de 2/3 do impacto total.

Esses achados são reforçados por Pombo, Rivela e Neila (2019), que destacam a relevância do Pensamento do Ciclo de Vida para formular políticas de sustentabilidade e desenvolver soluções eficazes

de retrofit. Sartori e Calmon (2019) investigaram as fases pré-operacional e operacional de medidas de retrofit em dois bairros típicos, observando consumo energético entre 19,8 GJ/m² e 21,0 GJ/m², e emissões de gases de efeito estufa entre 917,7 kgCO₂/m² e 938,4 kgCO₂/m². Shrestha (2021) conduziu uma análise comparativa de sistemas construtivos em regiões montanhosas do Nepal, demonstrando que materiais como blocos interligados e terra estabilizada comprimida possuem menor consumo de energia (15.150 MJ-eq/m² e 923 kgCO₂-eq/m², respectivamente) em comparação com tijolos queimados (24.877 MJ-eq/m² e 1.560 kgCO₂-eq/m²). Esses dados ilustram o impacto de escolhas materiais na eficiência energética e emissões ao longo do ciclo de vida das edificações. Embora a literatura aborde aspectos pontuais da eficiência energética em habitações sociais, a integração sistemática dessas análises em políticas habitacionais e diretrizes construtivas ainda é escassa. A meta de atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU até 2030 exige maior foco na aplicação da ACV para identificar estratégias que reduzam a pegada energética de habitações sociais (Dahiya & Laishram, 2024).

Uma revisão sistemática da literatura oferece uma visão abrangente e estruturada sobre um tema específico, possibilitando a identificação de tendências e lacunas relevantes no conhecimento (Sartori *et al.*, 2014). Enquanto estudos recentes, como o conduzido por Dahiya e Laishram (2024), investigaram o ciclo de vida energético de edificações para desenvolver estratégias de redução da pegada energética no setor da construção, ainda não há uma revisão sistemática focada na contribuição da habitação social para minimizar a pegada energética. Essa ausência na literatura representa uma lacuna significativa que justifica esta investigação. Esta

revisão sistemática tem como objetivo documentar e analisar estratégias que utilizam a ACV para minimizar a pegada energética de habitações sociais nos últimos 10 anos. A investigação concentra-se nas seguintes questões de pesquisa:

1. Quais são as principais estratégias de importância para um projeto de habitação social eficiente em termos de consumo energético?

2. Qual é a alternativa de projeto mais apropriada para habitações sociais considerando eficiência energética, impactos ambientais e integração com a rede elétrica?

3. Como incorporar as melhores intervenções materiais para construir habitações sociais com menores emissões de carbono e maior eficiência energética, considerando possíveis mudanças na matriz elétrica?

3. Metodologia

A metodologia desta análise seguiu três fases principais. Na primeira fase, as publicações acadêmicas foram coletadas por meio de pesquisas extensas nos bancos de dados *Scopus* e *Web of Science*, que são amplamente reconhecidos por sua relevância no campo da análise energética de edifícios (Dahiya & Laishram, 2024). Foi empregada uma frase de pesquisa booleana abrangente, combinando termos como “LCA” OR “Life Cycle Assessment” AND “Social housing” OR “Social dwellings” OR “Social buildings” OR “Public housing” OR “Low-income housing” AND “Energy efficiency” AND “Electricity grid mix”. Essa abordagem permitiu a identificação de uma ampla gama de artigos relevantes e revisados por pares, publicados entre 2015 e 2024.

Na segunda fase, a literatura coletada foi examinada usando critérios rigorosos de inclusão e

exclusão. Os artigos foram incluídos se abordassem as questões de pesquisa de forma quantitativa ou qualitativa ou apresentassem discussões fundamentadas sobre o assunto (Mirabella *et al.*, 2018). Uma análise bibliométrica orientou o processo de filtragem. Os materiais excluídos incluíam publicações que não estavam em inglês, literatura cinzenta, rascunhos de artigos e comentários, devido a preocupações com o rigor da revisão por pares e a viabilidade da tradução. A triagem foi realizada em três etapas: revisão do título, revisão do resumo e análise do texto completo. Essa abordagem está alinhada com a metodologia adotada por Dahiya e Laishram (2024).

Na terceira fase, os artigos selecionados foram analisados quanto às aplicações relevantes da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) no contexto de habitações sociais e edifícios residenciais. A ênfase foi colocada na eficiência energética, no desempenho do edifício e na influência do mix da rede elétrica nas emissões de carbono e no consumo de energia. A pesquisa inicial produziu 7.948 títulos de artigos. Após a remoção de duplicatas, um processo de filtragem estruturado resultou na seleção preliminar de 438 artigos. Após um refinamento adicional com base em palavras-chave e objetivos específicos, um conjunto final de 67 artigos foi selecionado para uma análise detalhada.

A Figura 1 apresenta um fluxograma que ilustra a metodologia passo a passo dessa revisão sistemática da literatura.

4. Resultados e discussão

4.1. Análise bibliométrica

A Tabela 1 fornece uma compilação dos 20 artigos mais frequentemente referenciados de pes-

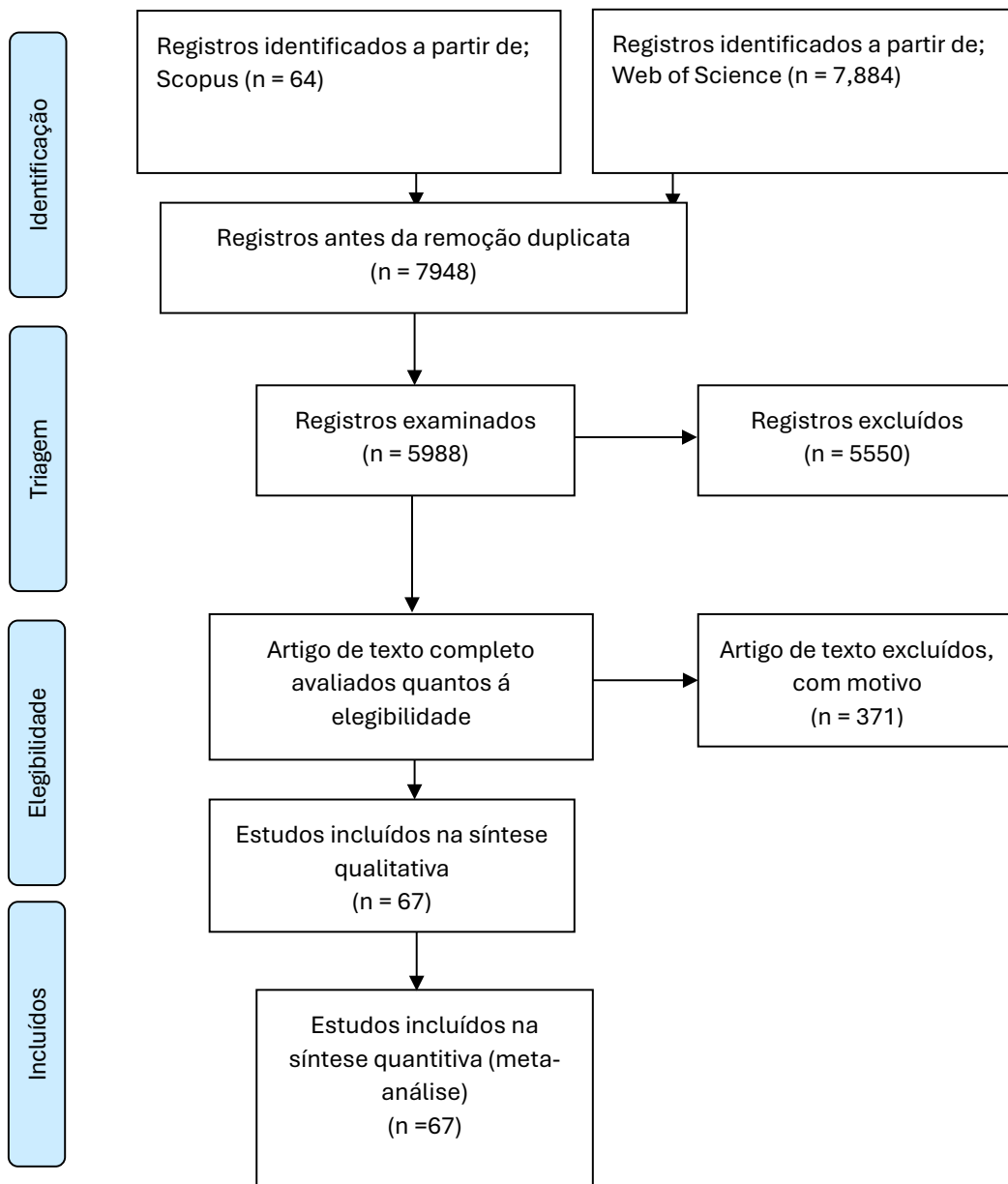


FIGURA 1 – Diagrama do Método PRISMA.

FONTE: Elaborado pelos autores (2024).

TABELA 1 – Compilação dos 20 artigos mais frequentemente referenciados em pesquisas anteriores.

Fontes de periódicos	Título do artigo	Citações	Referência dos autores
Construção e Meio Ambiente	Avaliação do ciclo de vida e custo do ciclo de vida de habitações unifamiliares baseadas em contentores no Canadá: um estudo de caso	46	Dara, Hachem-Vermette, & Assefa (2019)
Revista de Engenharia de Construção	Mudança de significado da energia incorporada: Um estudo comparativo de especificações de materiais e fontes de energia de construção	47	Ajayi, Oyedele, & Ilori (2019)
Energia e Construção	Qual é a solução ambiental robusta e econômica ideal para a renovação de edifícios? Não é a usual	47	Galimshina <i>et al.</i> (2021)
Energia e Construção	Análise do ciclo de vida na reabilitação de edifícios como prática de intervenção na poupança energética	49	Nicolae & George-Vlad (2015)
Energia Aplicada	Atingir zero emissões de gases com efeito de estufa e energia primária no ciclo de vida de edifícios de apartamentos num clima mediterrânico	50	Stephan & Stephan (2020)
Conservação de recursos e reciclagem	Avaliação do ciclo de vida (ACV) de uma casa passiva da zona climática subtropical	51	Kylili, Ilic, & Fokaides (2017)
Edifícios	Estratégias para melhorar o desempenho energético dos edifícios: Uma revisão do seu impacto no ciclo de vida	52	Mirabella <i>et al.</i> (2018)
Revista de Produção Mais Limpa	Consumo de energia do ciclo de vida e emissões de gases de efeito estufa de edifícios residenciais urbanos na cidade de Guangzhou	57	Zhan <i>et al.</i> (2018)
Energia e Edifícios	Avaliação do ciclo de vida de edifícios e bairros urbanos comparando demolição e reconstrução com reforma	59	Weiler, Harter, & Eicker (2017)
Energia e Edifícios	Quantificação da energia incorporada em edifícios na China usando um modelo LCA híbrido baseado em entrada-saída	60	Guan, Zhang, & Chu (2016)
Construção e Meio Ambiente	Avaliação do ciclo de vida de sombreamentos de janelas externas em edifícios residenciais em diferentes zonas climáticas	66	Babaizadeh <i>et al.</i> (2015)

Revista de Produção Mais Limpa	Uma abordagem integrada de LCA e simulação energética habilitada por BIM: A solução otimizada para o desenvolvimento sustentável	70	Tushar <i>et al.</i> (2021)
Automação na Construção	Abordagem modular para otimização ambiental multiobjetivo de edifícios	86	Kiss & Szalay (2020)
Energia e Edifícios	O impacto dos cenários futuros nas estratégias de renovação de edifícios para edifícios de energia positiva	91	Passer <i>et al.</i> (2016)
Revista de Engenharia de Construção	Otimização multiobjetivo baseada em simulação de reforma de edifícios institucionais considerando consumo de energia, custo do ciclo de vida e avaliação do ciclo de vida	101	Sharif & Hammad (2019a)
Energia Aplicada	Otimização integrada com modelagem de informações de construção e avaliação do ciclo de vida para geração de edifícios com eficiência energética	105	Najjar <i>et al.</i> (2019)
Construção e Meio Ambiente	Desafios metodológicos e desenvolvimentos na ACV de edifícios de baixo consumo energético: Aplicação à avaliação do carbono biogênico e do aquecimento global	135	Fouquet <i>et al.</i> (2015)
Revista de Engenharia de Construção	Desenvolvimento de ANN substituto para seleção de métodos de renovação energética de edifícios quase ótimos, considerando consumo de energia, LCC e LCA	142	Sharif & Hammad (2019b)
Revista de Produção Mais Limpa	Como o pensamento do ciclo de vida pode dar suporte à sustentabilidade de edifícios? Investigando aplicações de avaliação do ciclo de vida para eficiência energética e desempenho ambiental	148	Ingrao <i>et al.</i> (2018)

FONTE: Elaborado pelos autores (2024).

quisas anteriores, juntamente com os periódicos de publicação associados.

Os dados apresentados na Tabela 1 evidenciam uma concentração significativa de publicações nos periódicos *Energy and Buildings* e *Journal of Building Engineering*. Essa tendência reflete tanto as

preferências dos autores quanto a relevância desses periódicos no campo da análise energética de edificações. O destaque desses periódicos é consistente com o foco crescente na análise do ciclo de vida energético de edifícios e no desempenho energético, tópicos centrais das publicações analisadas.

Conforme ilustrado na Figura 2, a maior parte das publicações sobre o ciclo de vida energético de edifícios é proveniente da Europa, seguida pela Ásia e pela América do Norte.

Entre os países analisados, os Estados Unidos lideram em número de estudos publicados, seguidos por China e Austrália. O crescimento das publicações na Europa pode ser atribuído a iniciativas como a *Estratégia Europeia para Materiais de Construção e Produtos de Construção*, que inclui regulamentações, diretivas e outras ações voltadas à sustentabilidade no setor da construção (Kylili & Fokaides, 2017). Esse aumento é consistente com as conclusões de revisões anteriores, como a de Asdrubali *et al.* (2024), que destacaram o impacto das políticas europeias na produção acadêmica relacionada à eficiência energética e à sustentabilidade em edificações.

4.2. Análise quantitativa

Com base nas descobertas qualitativas, a análise realizada com o *VOSviewer* demonstra de forma eficaz as principais escolas temáticas de pensamento entre os autores, destacando as inter-relações entre os diferentes temas abordados. Essa abordagem permite identificar as conexões estruturais entre os tópicos e fornece uma visão abrangente sobre as tendências no uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em edifícios. Os resultados indicam que a ACV constitui uma área de conhecimento dinâmica e em rápida evolução, com potencial para gerar avanços significativos em um curto período. A Figura 3 ilustra as diversas perspectivas adotadas pelos autores por meio de uma estrutura de classificação em clusters, frequentemente associada às aplicações da ACV em edificações, no período de 2015 a 2024. Cada cluster reflete um núcleo temático distinto,

incluindo tópicos como eficiência energética, impacto ambiental, materiais de construção, *retrofit* e políticas de sustentabilidade.

A análise dos clusters temáticos identificados no *VOSviewer* permitiu a seleção dos termos mais relevantes para cada grupo, ponderados de acordo com sua importância no contexto das questões de pesquisa. Essa abordagem revelou três tópicos primários de discussão, representados por nuvens de palavras, nas quais o tamanho das palavras reflete sua relevância dentro de cada cluster. O primeiro cluster está centrado na eficiência energética e inclui termos-chave como “energia incorporada”, “eficiência”, “consumo”, “emissões de carbono” e “impactos”. Esses termos indicam que as investigações acadêmicas sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em edificações têm focado em estratégias para reduzir a energia incorporada a fim de mitigar impactos ambientais e climáticos adversos. Esse fenômeno pode ser atribuído ao aumento significativo no consumo anual de materiais e energia durante a vida útil dos edifícios, conforme apontado por Song *et al.* (2018). O cluster reflete a importância crescente de adotar práticas que minimizem os efeitos ambientais negativos ao longo do ciclo de vida das construções.

O segundo cluster aborda diretamente a “avaliação do ciclo de vida” e inclui termos como “otimização”, “consumo de energia”, “sustentabilidade”, “construção” e “edifício”. Esse grupo destaca o papel da ACV na promoção do desenvolvimento sustentável, especialmente por meio da avaliação do desempenho ambiental das edificações (Asdrubali *et al.*, 2024). Além disso, evidencia a necessidade de otimização no setor da construção, responsável por mais de 40% do consumo global de energia (Ata-Ali *et al.*, 2021), para melhorar a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais (Kiss &

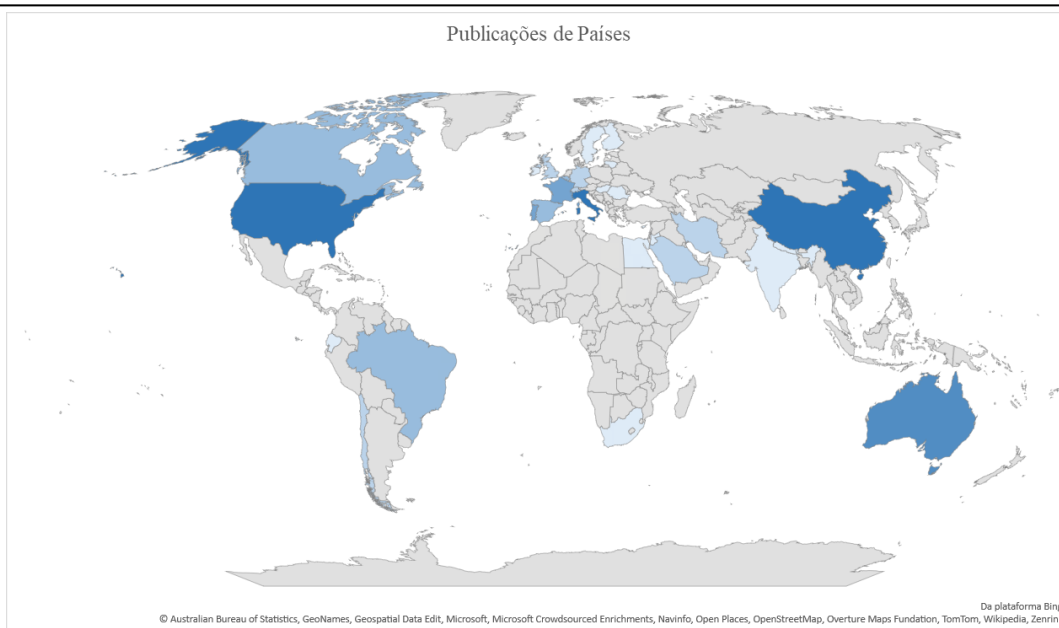


FIGURA 2 – Publicações de países.
FONTE: Elaborado pelos autores (2024).

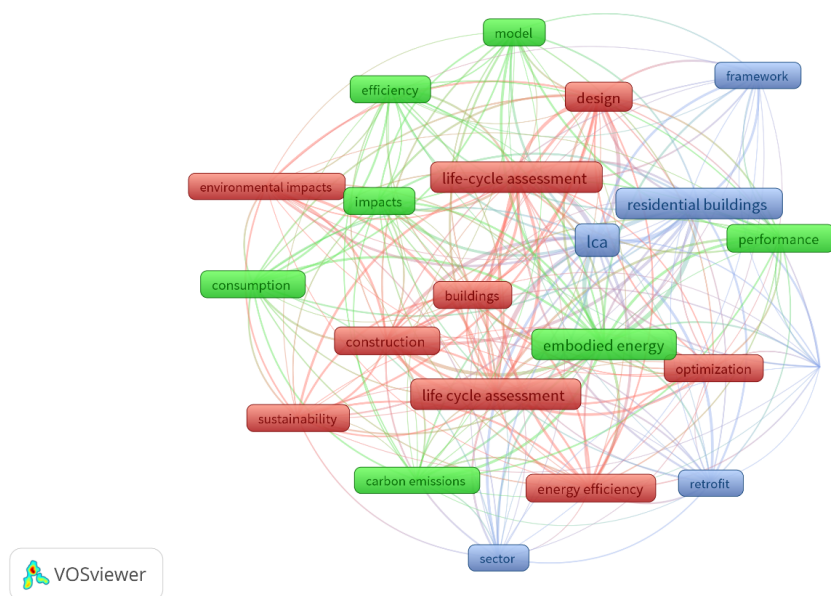


FIGURA 3 – Diversas aplicações comumente associadas à ACV em edificações, com base na análise bibliométrica.
FONTE: Elaborado pelos autores (2024).

TABELA 2 – Palavras-chave identificadas por meio de análise bibliométrica

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Palavras-chave	Palavras-chave	Palavras-chave
Energia incorporada	Avaliação do ciclo de vida	Edifício residencial
Eficiência	Otimização	Design
Consumo	Consumo de energia	Custo
Emissões de carbono	Sustentabilidade	Estrutura e BIM
Impactos	Construção e edificação	Simulação e impactos ambientes
Energia operacional	Concreto	Emissões
Energia do ciclo de vida	Desafios	Avaliação do ciclo de vida

FONTE: Elaborado pelos autores (2024).

Szalay, 2020; Najjar *et al.*, 2019). A interseção entre sustentabilidade, consumo de energia e construção reflete um foco em integrar práticas ambientalmente responsáveis na indústria. O terceiro cluster explora as áreas de aplicação e o progresso das investigações científicas relacionadas à ACV na construção civil. Termos como “edifício residencial”, “design”, “custo”, “estrutura”, “BIM”, “simulação” e “impactos ambientais” destacam as ferramentas e metodologias empregadas no setor. Esses termos apontam para o uso crescente de tecnologias como o *Building Information Modeling* (BIM) e simulações para avaliar e mitigar os impactos ambientais das construções (Dauletbek & Zhou, 2022; Nemat-choua *et al.*, 2022). A ênfase na análise de custos e estruturas também reflete a relevância da ACV em orientar decisões econômicas e sustentáveis no design e operação de edifícios. Conforme ilustrado na Tabela 2, a análise bibliométrica revela vários grupos. Esses três clusters revelam uma estrutura de pesquisa interdisciplinar que conecta eficiência energética, sustentabilidade e inovação tecnológica. Cada cluster contribui para uma compreensão mais abrangente das aplicações da ACV na construção civil e reforça sua relevância no contexto de políti-

cas globais voltadas para a mitigação das mudanças climáticas e o uso responsável de recursos naturais.

A Tabela 2 ilustra os vários clusters e palavras-chave identificados por meio de uma análise bibliométrica, revelando vários grupos distintos.

4.2.1. Tipologias de construção

Entre as 67 publicações analisadas, 52 estudos de caso destacaram a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) com foco na eficiência energética em diferentes países e tipologias de edifícios. Notavelmente, mais de três quartos desses estudos concentraram-se em edifícios de apartamentos múltiplos, evidenciando uma tendência significativa na literatura. Essa predominância é corroborada por trabalhos como os de Kiss e Szalay (2020), Najjar *et al.* (2019), Pombo, Rivela e Neila (2019), e Tettey, Doodoo e Gustavsson (2019). A alta representatividade dessa tipologia reflete o foco predominante em países europeus, conforme discutido em revisões anteriores, como a de Mirabella *et al.* (2018). Esse padrão pode ser atribuído à relevância de edifícios multifamiliares em áreas urbanas densamente po-

voadas, onde estratégias de eficiência energética têm maior impacto devido à escala e ao consumo concentrado. A Tabela 3 ilustra os diversos estudos de tipologia de edificações e seus respectivos autores. Além disso, os contextos regulatórios e as políticas voltadas para edificações sustentáveis na Europa reforçam a importância de investigar e otimizar o desempenho energético dessas estruturas. Esses fatores destacam a relevância de edifícios de apartamentos como uma área prioritária para estudos de eficiência energética baseados na ACV.

Os estudos de caso revisados apresentam uma ampla gama de soluções e estratégias técnicas destinadas a melhorar a eficiência energética de diferentes tipos de edifícios. Essas estratégias abrangem intervenções em materiais, sistemas construtivos e tecnologias aplicadas ao ciclo de vida das edificações. A Tabela 4 sintetiza vinte dessas estratégias selecionadas, detalhando as áreas de piso dos edifícios correspondentes, a vida útil considerada nos estudos e os materiais avaliados. Essas estratégias incluem desde a utilização de materiais com baixa energia incorporada até a implementação de sistemas de isolamento térmico e tecnologias de geração de energia renovável. Também foram abordadas melhorias nos envelopes dos edifícios, como a substituição de janelas por modelos mais eficientes, o uso de painéis solares e a aplicação de técnicas de retrofit para redução de emissões operacionais.

Além disso, a integração de metodologias como o *Building Information Modeling (BIM)* e simulações computacionais para prever o desempenho energético ao longo da vida útil das construções foi destacada. A compilação na Tabela 4 demonstra não apenas a diversidade de abordagens técnicas, mas também a interdependência entre as escolhas de materiais e o impacto energético ao longo do ciclo de vida dos edifícios. A análise dessas estra-

tégias fornece um panorama das melhores práticas e aponta para o potencial de aplicação de soluções inovadoras no setor da construção, alinhadas aos objetivos globais de eficiência energética e sustentabilidade.

A análise das estratégias de eficiência energética revela que a maioria das intervenções está associada a edificações com áreas de piso aquecido superiores a 100 m². No entanto, estudos de menor escala, como os de Song *et al.* (2018), indicam que unidades habitacionais com áreas inferiores a 50 m² representam cerca de 39,41% do total em Macau, enquanto aquelas entre 50 e 99 m² constituem a maior parcela, correspondendo a 44,58%. Esses dados destacam a predominância de unidades habitacionais compactas em contextos urbanos densos. Macias *et al.* (2017) complementam essas observações, enfatizando que a categoria residencial geralmente inclui estruturas unifamiliares e multifamiliares com até quatro andares e áreas superiores a 60 m². Em contraste, moradias sociais frequentemente apresentam áreas inferiores a 60 m², refletindo restrições econômicas e de design. Essas diferenças topológicas são cruciais para compreender a distribuição da energia operacional em diferentes usos finais (Li *et al.*, 2021). Entre os estudos de caso revisados, foi comum o uso de 1 m² de área de piso aquecido ou resfriado como unidade funcional para análises comparativas. Essa abordagem permite avaliar o desempenho energético e ambiental de diferentes estratégias de eficiência energética, como evidenciado nos trabalhos de Najjar *et al.* (2019), Norouzi *et al.* (2022), Pakdel, Ayatollahi e Sattary (2021), Pombo, Rivela e Neila (2019) e Shrestha (2021). Essa prática padronizada facilita a comparação entre edificações de diferentes tipologias e escalas, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias otimizadas e adaptáveis a diversos contextos climáticos e socioeconômicos.

TABELA 3 – Tipos de tipologias arquitetônicas examinadas nos estudos de caso.

Autores	Topologias	Áreas de piso
Pombo <i>et al.</i> (2019)	Residencial - Edifício com vários apartamentos	49m ² e 64m ²
Najjar <i>et al.</i> (2019)	Residencial - Edifício com vários apartamentos	1558m ²
Mahlan <i>et al.</i> (2024)	Residencial - Edifício com vários apartamentos	154m ²
Motalebi <i>et al.</i> (2022)	Residencial - Edifício com vários apartamentos	776m ²
Stephan & Stephan (2020)	Residencial - Edifício com vários apartamentos	154m ²
Bertoli <i>et al.</i> (2024)	Edifício residencial unifamiliar	46m ²
Fouquet <i>et al.</i> (2015)	Edifício residencial unifamiliar	122m ²
Dara <i>et al.</i> (2019)	Moradia unifamiliar residencial prédio	119m ²
Kylili <i>et al.</i> (2017)	Edifício unifamiliar	185m ²
Sartori & Calmon (2019)	Edifício residencial multifamiliar	59m ²
Conci <i>et al.</i> (2019)	Edifício residencial multifamiliar	45m ²
Tadeu <i>et al.</i> (2022)	Edifício residencial multifamiliar	100m ²
Kylili <i>et al.</i> (2017)	Edifício multifamiliar	185m ²
Tushar <i>et al.</i> (2021)	Moradia residencial isolada	230m ²
Babaizadeh <i>et al.</i> (2015)	Moradia residencial isolada	130m ²
Shrestha (2021)	Moradias isoladas	52m ²
Alsaqabi <i>et al.</i> (2023)	Moradias residenciais	49,8 m ²
Flamant <i>et al.</i> (2022)	Habitação social	67m ² e 76m ²
Cusenza <i>et al.</i> (2022)	Prédio geminado	152m ²
Dauletбек & Zhou, (2022)	Residência estudantil	3762m ²
Pakdel <i>et al.</i> (2021)	Casa de hóspedes residencial	66m ²

FONTE: Elaborado pelos autores (2024).

TABELA 4 – Estratégias selecionadas adotadas pelos autores e edifícios correspondentes, áreas de piso e materiais avaliados.

Autores	Estratégias de eficiência energética	Áreas de piso	Topologias de construção	Vida útil do edifício (anos)	Material avaliado
Pakdel, Aiatolá, & Sattary (2021)	Melhoria do envelope com materiais terrestres	66m ²	Casa de hóspedes residencial	35	Adobe, palha, lama, tijolo queimado e vidros duplos
Bertoli <i>et al.</i> (2024)	Aprimoramento de envelope	46m ²	Edifício residencial unifamiliar	50	Tijolos cerâmicos, armações de aço, ladrilhos cerâmicos e lajes de concreto

Shrestha (2021)	Seleção de materiais e sistemas de construção	52m ²	Moradias isoladas	50	de concreto armado, blocos interligados e bloco de terra estabilizada comprimida
Conci <i>et al.</i> (2019)	Integração da geração local de energia a partir de fontes renováveis	45m ²	Edifício residencial multifamiliar	100	Parede de subestrutura de concreto e metal isolada, bloco de concreto, concreto armado, lã de rocha, poliestireno, extrudado
Alsaqabi <i>et al.</i> (2023)	Melhoria no isolamento	49,8 m ²	Moradias residenciais		Poliestireno extrudado, poliestireno expandido, lã de rocha e lã de vidro
Sartori & Calmon (2019)	Aprimoramento de envelope	59m ²	Edifício residencial multifamiliar	50	Telhado verde, painel de vidro refletivo, concreto, tijolos cerâmicos, PVC, telha cerâmica
Flamant <i>et al.</i> (2022)	Melhoria no isolamento do envelope	67m ² e 76m ²	Habitação social	50	Polietileno, Poliestireno Exp., ladrilho cerâmico, lã de vidro, estrutura de aço, aço de reforço
Pombo, Rivela, & Neila (2019)	Utilização da técnica da casa Passivhaus	49m ² e 64m ²	Edifício residencial multi-apartamento	50	Poliestireno Expandido, Poliestireno Extrudado, Lã Mineral, Alumínio e PVC
Najjar <i>et al.</i> (2019)	Otimização do desenho das paredes exteriores e janelas	1558m ²	Edifício residencial multi-apartamento	30	Parede de bloco de concreto, parede de cavidade de tijolo duplo, tijolo isolado e parede de gesso leve
Tushar <i>et al.</i> (2021)	Otimização de teto e paredes	230m ²	Moradia residencial isolada	60	Teto de concreto ou telha de barro, teto de madeira, bloco de concreto, madeira compensada

Cusenza <i>et al.</i> (2022)	Utilização de fibras de celulose e sistemas de armazenamento de baterias	152m ²	Prédio geminado	60	Poliestireno expandido extrudado, fibras de celulose, sistema fotovoltaico
Motalebi, Rashidi, & Nasiri (2022)	Instalação de painéis solares, isolamento de envoltório de edifícios, substituição de aparelhos ineficientes	776m ²	Edifício residencial multi-apartamento	50	Poliestireno expandido, lâ de rocha, fibra de celulose, lâ de vidro, telhado plano de fibra de vidro
Tadeu <i>et al.</i> (2022)	Substituição de sistemas energéticos existentes com baixa eficiência	100m ²	Edifício residencial multifamiliar	30	Ladrilho cerâmico, poliestireno extrudado, bloco cerâmico, alvenaria de tijolo perfurado
Babaizadeh <i>et al.</i> (2015)	Utilização de sistemas de sombreamento exterior	130m ²	Moradia residencial isolada	40	madeira, alumínio e cloreto de polivinila (PVC)
Kylili, Ilic, & Fokaides (2017)	Incorporação de camadas espessas de materiais isolantes no sistema de paredes do edifício	185m ²	Edifício unifamiliar multifamiliar	50	Concreto, ladrilhos, compensado, gesso cartonado, poliestireno, polietileno, lâ mineral e aço
Fouquet <i>et al.</i> (2015)	Aumento do envelope e incorporação de energias renováveis	122m ²	Edifício residencial unifamiliar	100	Estrutura de madeira concreto moldado e cavidade de bloco de concreto
Dauletbek & Zhou (2022)	Redução da espessura da camada de isolamento, utilizando janelas de policloreto de vinila (PVC)	3762m ²	Residência estudantil	50	Poliestireno expandido, Placa de poliestireno extrudado
Stephan & Stephan (2020)	com guarda-sóis móveis Uso de matriz solar fotovoltaica, reduzindo a demanda de eletricidade do aparelho	154m ²	Edifício residencial multi-apartamento	50	Isolamento de poliestireno expandido, coletor solar térmico, utilização de iluminação LED, energia fotovoltaica

Mahlan <i>et al.</i> (2024)	Melhorando o isolamento dos sistemas de paredes	154m ²	Edifício residencial multi-apartamento	50	Poliestireno extrudado, tijolos de cinzas volantes, alvenaria de argila de cavidade isolada, bloco aerado autoclavado
Dara, Hachem-Vermette, & Assefa (2019)	Aprimoramento de envelope	119m ²	Moradia unifamiliar residencial prédio	50	Recipiente, recipiente de madeira leve, recipiente melhorado e madeira leve melhorada

FONTE: Elaborado pelos autores (2024).

Esses achados sublinham a influência das características topológicas na eficiência energética e destacam a importância de considerar a escala e a função das áreas construídas ao projetar soluções para melhorar o desempenho energético de edifícios.

4.2.2. Vida útil da edificação

A incerteza associada à vida útil dos edifícios é amplamente documentada na literatura, refletindo variações significativas entre os tipos de edificações e as práticas regionais de construção ao redor do mundo. Essa variabilidade foi apontada por Dahiya e Laishram (2024), que atribuíram essas diferenças aos contextos regionais e às características dos edifícios analisados. A maior parte dos estudos revisados adota 50 anos como referência para a vida útil das edificações, como ilustrado no gráfico de dispersão apresentado na Figura 4. A vida útil dos edifícios desempenha um papel fundamental tanto no consumo de energia operacional quanto na energia incorporada. Conforme discutido por Pakdel, Ayatollahi e Sattary (2021), em países co-

mo o Irã, onde a vida útil média das construções é relativamente curta, observa-se um impacto mais significativo da energia incorporada. Isso ocorre porque uma menor durabilidade tende a demandar mais materiais ao longo do tempo, aumentando o impacto energético e ambiental das edificações.

Adicionalmente, à medida que estratégias de eficiência energética são implementadas, a energia incorporada nos materiais e sistemas adicionados se torna um fator crítico. Kneifel *et al.* (2018) destacam que a busca por eficiência energética frequentemente resulta em maior uso de materiais, o que pode aumentar a energia incorporada, especialmente em contextos onde a renovação ou substituição de edifícios é mais frequente. Essas observações sublinham a importância de considerar a vida útil como uma variável-chave nas análises de ciclo de vida. Ela influencia diretamente a proporção entre energia operacional e energia incorporada, afetando a sustentabilidade geral das edificações. Políticas e práticas construtivas devem, portanto, buscar equilibrar a durabilidade dos edifícios com a eficiência energética e o impacto ambiental, promovendo soluções mais resilientes e sustentáveis.

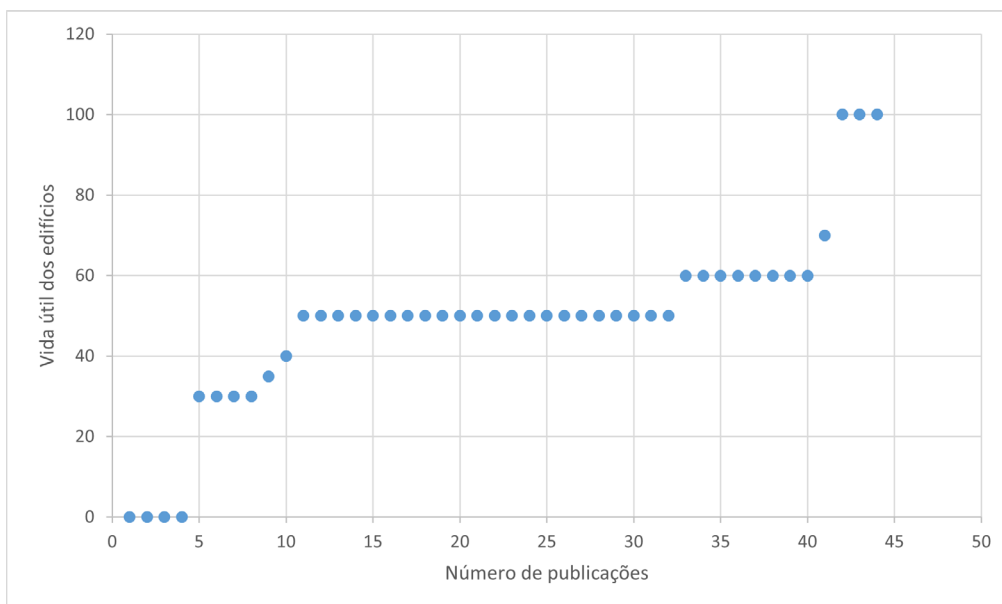


FIGURA 4 – Vida útil examinada dos edifícios dentro dos estudos de caso analisados.

FONTE: Elaborado pelos autores (2024).

4.3. Questões da pesquisa

4.3.1. Quais as estratégias de importância para eficiência energética em habitação social?

Nesta seção, foram abordados os desafios enfrentados pela habitação social, especialmente em relação à eficiência energética, e as estratégias de mitigação discutidas na literatura revisada. A análise dos diferentes estudos de caso revelou que a fase operacional é, de fato, a mais impactante em termos de consumo de energia e impacto ambiental no ciclo de vida de edifícios, com a maior parte da energia consumida durante a operação dos edifícios. Vários estudos oferecem uma visão abrangente sobre como a avaliação do ciclo de vida (ACV) pode ser aplicada para mitigar os impactos ambientais dessa fase. Macias *et al.* (2017) anali-

saram as metodologias de construção em climas costeiros e de terras altas, observando que a fase operacional das habitações sociais é responsável por 81,1% a 91,0% dos impactos totais do ciclo de vida. Os pesquisadores sugeriram a utilização de concreto isolado como uma solução potencial para reduzir os impactos dessa fase. Li *et al.* (2021), por sua vez, investigaram as emissões do ciclo de vida de edifícios residenciais na região de Victoria, Austrália, utilizando uma estrutura de baixo para cima. Seus resultados mostraram uma diminuição significativa na energia operacional das habitações recém-construídas, graças aos avanços tecnológicos e às regulamentações de economia de energia. Para residências mais antigas, a energia incorporada aumentou substancialmente, destacando a necessidade de considerar tanto a energia operacional quanto a energia incorporada ao avaliar o ciclo de vida de edificações. O estudo de Sartori e Calmon (2019),

realizado no Brasil, focou em estratégias de retrofit sustentável para bairros em Vitória, Espírito Santo. A pesquisa revelou que as principais soluções para reduzir o uso de energia e as emissões de gases de efeito estufa foram a modificação da absorção e a implementação de fachadas ventiladas. Esses ajustes ajudaram a melhorar a eficiência energética e reduzir o impacto ambiental. Flamant *et al.* (2022) avaliaram as soluções de retrofit de energia para habitação social em massa no Chile, considerando três cenários distintos de desempenho (moderado, alto e estendido) em diferentes condições climáticas. O estudo concluiu que melhorar o isolamento do envelope do edifício, reduzir perdas por infiltração de ar e implementar sistemas de ventilação controlados pode levar a uma redução substancial da demanda de aquecimento, com uma diminuição de até 84% em algumas cidades climáticas.

Finalmente, Bertoli *et al.* (2024) conduziram uma análise de desempenho térmico e impacto ambiental em uma casa unifamiliar no Brasil, comparando diferentes cenários de construção. O estudo revelou que, independentemente do sistema de construção utilizado, a fase de uso é responsável por mais de 55% da demanda total de energia. O cenário que utilizou estrutura de aço e telha termoacústica apresentou o menor impacto em termos de consumo de energia e potencial de aquecimento global (GWP), destacando a importância de soluções inovadoras no desempenho energético de habitações sociais. Esses estudos demonstram que a eficiência energética na habitação social depende de uma abordagem integrada que leve em consideração tanto a energia incorporada quanto a energia operacional, e que as soluções tecnológicas para melhorar o desempenho térmico dos edifícios têm um papel crucial na mitigação dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das edificações.

4.3.2. Quais as alternativas de projeto para habitação social com eficiência energética?

Bertoli *et al.* (2024) destacam que melhorar o envelope do edifício pode reduzir significativamente o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Seus achados indicam que a melhoria do *envelope* pode levar a uma redução de 20% no consumo anual de energia e 12% nas emissões de Potencial de Aquecimento Global (PAG). Além disso, a mudança para uma rede elétrica mais limpa pode resultar em uma redução de 25% no impacto ambiental. O estudo também sugere que, dado o ciclo de vida estendido dos edifícios, é fundamental integrar potenciais mudanças futuras na rede elétrica durante as avaliações de construção. Conci *et al.* (2019) realizaram uma análise semelhante, com foco em edifícios multifamiliares na Alemanha. Seus resultados indicam que a adoção de estratégias convencionais tem um impacto limitado nas metas climáticas, sugerindo que a integração de energia renovável local pode ser mais eficaz. A pesquisa revelou que a adoção de estratégias de baixo impacto ambiental, como a utilização de fontes renováveis de energia, tem um efeito significativo sobre o potencial de aquecimento global, contribuindo para alcançar metas climáticas. Newberry, Harper e Norman (2023), por meio de um estudo de caso no Reino Unido, avaliaram o impacto de carbono incorporado e operacional em um projeto habitacional de 60 anos de vida útil, considerando diferentes materiais de isolamento e diferentes cenários de energia. Os resultados destacam que o carbono incorporado representa a maior parte das emissões totais, com uma participação de 59% a 80%, enquanto o carbono operacional responde por 20% a 41%. O estudo sugere que as escolhas de

design e a proporção de energias renováveis na rede elétrica têm um impacto substancial nas emissões operacionais, o que pode ser um desafio para as decisões de projeto. Kiss e Szalay (2020), em seu estudo de um edifício residencial na Hungria, utilizaram uma abordagem paramétrica para otimizar o design de um edifício de apartamentos com foco em vários materiais de isolamento.

Eles concluíram que uma forma compacta, com janelas amplas voltadas para o sul e sombreamento adequado, combinada com altos níveis de isolamento, pode resultar em uma redução de 60-80% nos impactos ambientais. Esse estudo reforça a importância de considerar tanto os impactos operacionais quanto os incorporados para uma solução otimizada em termos de eficiência energética. Monteiro, Freire e Soares (2021), ao avaliarem uma casa unifamiliar em Portugal, descobriram que a energia incorporada supera a energia operacional, especialmente quando a forma do edifício não é compacta e quando há uma maior relação janela-parede (WWR). Reduzir a área de janelas pode mitigar os impactos ambientais, especialmente em casas com padrões operacionais mais baixos, o que sublinha a importância do design arquitetônico na eficiência energética. Norouzi *et al.* (2022), em sua investigação sobre edifícios passivos na Irlanda do Norte, observaram que a fase operacional é a principal responsável pelos impactos ambientais, superando outros estágios do ciclo de vida do edifício.

O estudo indicou que a adoção de padrões passivos poderia reduzir significativamente os impactos ambientais, com uma redução de até 50% quando comparado a edifícios de baixo consumo de energia. Cusenza *et al.* (2022), ao avaliar um edifício de energia líquida zero em Roma, observaram que o uso de fibras de celulose como material de isolamento térmico, juntamente com

um sistema fotovoltaico integrado, levou a uma redução de 18% na demanda global de energia e 34% nas emissões de mudança climática. A pesquisa mostrou que o uso de materiais ecológicos, como as fibras de celulose, pode ser uma solução eficaz para reduzir os impactos ambientais e melhorar a eficiência energética. Esses estudos mostram que, para melhorar a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais no ciclo de vida dos edifícios, é crucial adotar uma abordagem integrada que considere tanto a eficiência operacional quanto a energia incorporada. Além disso, as escolhas de design, o uso de materiais sustentáveis, a adoção de energias renováveis e a consideração das mudanças futuras nas redes elétricas desempenham papéis fundamentais na minimização do impacto ambiental e no aumento da sustentabilidade dos edifícios.

4.3.3. Quais são as estratégias de intervenção material para habitação social com eficiência energética?

A revisão sistemática da literatura revela uma diversidade de estudos focados na avaliação do impacto ambiental e energético de diferentes sistemas de construção e materiais, com ênfase na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Contudo, é notável a escassez de pesquisas que abordam o custo do ciclo de vida (CCV) de maneira integrada com a ACV ambiental, o que representa uma lacuna importante na literatura, conforme apontado em revisões anteriores (Mirabella *et al.*, 2018). Gulotta *et al.* (2021), em sua análise de 672 arquétipos de construção que representam 28 estoques de construção da União Europeia, enfocaram tanto as casas unifamiliares quanto as multifamiliares construídas antes de 2010. Utilizando a abordagem metodológi-

ca *Bottom-up Harmonized Energy-Environmental Models for Europe* (BOHEEME), a pesquisa avaliou diversos materiais de isolamento, como fibra de celulose, lã de rocha, cortiça e painéis de madeira. Os resultados indicaram que as construções mais antigas, especialmente as erigidas antes de 1970, são responsáveis por aproximadamente 72% das emissões de CO₂ na União Europeia. Além disso, a fibra de celulose se destacou como o material de isolamento com maior capacidade de mitigar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida, superando outros materiais, exceto em termos de toxicidade humana e esgotamento de recursos não renováveis, onde a lã de rocha apresentou um desempenho superior. Estes achados sugerem que a escolha do material de isolamento pode ter um impacto significativo na sustentabilidade ambiental dos edifícios, especialmente em relação à mitigação de mudanças climáticas. Alsaqabi *et al.* (2023) realizaram uma avaliação do desempenho de vários materiais de isolamento no contexto de climas quentes e áridos, especificamente na Arábia Saudita, utilizando um estudo de caso na Universidade *Qassim*, que compreende 288 vilas residenciais.

A pesquisa seguiu uma metodologia do berço ao portão e demonstrou que o poliestireno expandido (EPS), com uma espessura de 110 mm, resultou nas menores cargas de resfriamento, enquanto o poliestireno extrudido (XPS), com espessura de 50 mm, apresentou as maiores. Além disso, o estudo revelou que o XPS teve o maior potencial de aquecimento global, com emissões de 5,28 kg de CO₂ equivalente, seguido pela lã de vidro (GW) com 3,2 kg de CO₂ equivalente, 63%a menores. O EPS foi o terceiro, com emissões de 2,9 kg de CO₂ equivalente, enquanto a lã de rocha (RW) teve as menores emissões, com 1,3 kg de CO₂ equivalente, 123% menores que as de GW. Esses resultados

destacam a importância da seleção do material de isolamento no desempenho térmico e na redução das emissões de carbono, especialmente em regiões com climas extremos. O estudo de Shrestha (2021) focou na comparação do consumo de energia e das emissões de carbono em diferentes sistemas de construção, incluindo o concreto armado (RCC), bloco de terra estabilizada comprimida (CSEB) e bloco intertravado (IB).

O estudo cobriu os estágios de produção de material, transporte, construção, operação e fim de vida útil. Os resultados mostraram que o sistema de alvenaria de tijolos queimados foi o que gerou o maior consumo de energia e emissões de CO₂, com um total de 24.877 MJ-eq por m² e 1560 kg de CO₂ equivalente por m², respectivamente. Em contraste, o sistema de blocos intertravados apresentou o menor impacto, com 15.150 MJ-eq por m² de consumo de energia e 931 kg de CO₂ equivalente por m² de emissões. Esses achados indicam que, ao considerar o ciclo de vida completo, sistemas construtivos mais eficientes em termos de consumo energético e emissões podem ser escolhidos para reduzir o impacto ambiental dos edifícios. A pesquisa de Pakdel, Aya-tollahi e Sattary (2021) comparou os impactos ambientais de uma casa de hóspedes de 66 m² em *Yazd*, Irã, utilizando dois sistemas construtivos distintos: o sistema convencional e o sistema sustentável utilizando técnicas e materiais tradicionais (TTM). O estudo revelou que o TTM gerou 43% menos energia incorporada e 48% menos emissões de carbono em comparação com o sistema convencional. Outrossim, o consumo de energia operacional foi 88% menor no TTM, resultando em uma redução de 81% nas emissões de carbono. Esses resultados sugerem que a adoção de técnicas de construção sustentáveis pode reduzir significativamente tanto os impactos ambientais quanto os custos operacionais

dos edifícios. Ata-Ali *et al.* (2021) realizaram uma análise do impacto ambiental de vários materiais de fachada ventilada, como lã de rocha, cortiça natural e cortiça reciclada, em diferentes regiões climáticas da Espanha. Utilizando uma abordagem do berço ao túmulo, o estudo revelou que a cortiça reciclada apresentou o menor impacto ambiental entre os materiais analisados, destacando-se como uma alternativa superior em termos de isolamento térmico e redução de impactos ambientais. Em contraste, a lã de rocha, embora amplamente utilizada na Espanha, demonstrou ter um impacto ambiental mais elevado, além de apresentar riscos à saúde, o que sugere que sua substituição por materiais mais sustentáveis, como a cortiça reciclada, poderia não só diminuir os impactos ambientais, mas também melhorar a saúde pública.

Finalmente, Bertoli *et al.* (2024) realizaram uma avaliação do desempenho térmico e do impacto ambiental de diferentes sistemas de construção em uma casa unifamiliar localizada na região climática mais fria do Brasil. O estudo comparou sistemas convencionais e inovadores, levando em consideração a mistura da rede elétrica e utilizando tanto a demanda cumulativa de energia quanto o potencial de aquecimento global. As descobertas indicaram que o sistema convencional, com tijolo cerâmico e laje de concreto, gerou as maiores emissões de CO₂, enquanto o envelope inovador, com estrutura de aço e revestimento termoacústico, apresentou uma redução de 17% nas emissões de carbono. A análise também mostrou que a combinação de sistemas inovadores pode resultar em uma redução significativa no consumo de energia operacional e nas emissões de carbono, destacando a importância de considerar soluções mais sustentáveis no projeto de edifícios.

Em resumo, os estudos revisados indicam que a escolha de materiais e sistemas de construção pode influenciar substancialmente os impactos ambientais e energéticos dos edifícios ao longo de seu ciclo de vida. Embora a avaliação do ciclo de vida (ACV) seja uma ferramenta valiosa para medir esses impactos, a integração do custo do ciclo de vida (CCV) com a ACV ainda é uma área pouco explorada, mas essencial para o desenvolvimento de soluções de construção mais sustentáveis e economicamente viáveis.

5. Conclusão

Este artigo apresenta uma visão geral detalhada e estruturada da literatura científica sobre o uso da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) na promoção da eficiência energética em habitações sociais, com atenção especial à sua integração com a rede elétrica. A análise revela que, embora existam muitas metodologias e estudos de caso, compará-los é um desafio devido à variedade de parâmetros envolvidos, como tipologias de edifícios, desempenho energético, condições climáticas e diferentes métodos de LCA.

Uma descoberta importante é a falta de uma abordagem padronizada e abrangente para avaliar os impactos ambientais além do uso de energia e das emissões de carbono. Essa inconsistência metodológica dificulta a obtenção de conclusões universais e ressalta a necessidade de uma estrutura robusta e integrada que considere todos os estágios do ciclo de vida de um edifício.

Com relação às estratégias de importante para eficiência energética (RQ1), a fase operacional continua a ser a principal fonte de impacto ambiental,

chegando a 81,1% do total em alguns estudos. Isso enfatiza a importância de priorizar melhorias nas operações do edifício.

As alternativas de projeto (RQ2) são fortemente influenciadas pelas condições climáticas, tipologia de construção, sistemas de isolamento e layout do edifício. Edifícios compactos e bem planejados com envelopes de alto desempenho têm melhor desempenho em termos de eficiência energética.

Quanto às estratégias de intervenção material (RQ3), embora os materiais de isolamento desempenhem um papel importante, seus impactos incorporados são geralmente menores em comparação com os dos materiais estruturais. Ainda assim, à medida que os edifícios se tornam mais eficientes, o peso relativo da energia incorporada aumenta, exigindo maior atenção às escolhas de materiais sustentáveis.

De modo geral, o estudo destaca a necessidade urgente de uma abordagem mais holística e sistêmica para a avaliação ambiental que vá além das emissões e da energia, abrangendo outras categorias de impacto e princípios de economia circular. A Tabela 5 apresenta um resumo das conclusões e implicações do estudo, bem como as principais conclusões.

Com base nas respostas às perguntas da pesquisa, as seguintes conclusões são sintetizadas a partir do conjunto da literatura existente;

RQ1: Quais são as principais estratégias de importante para um projeto de habitação social com eficiência energética?

As estratégias de mitigação se concentram principalmente na redução do uso operacional de energia, que continua sendo o principal contribuinte para o impacto ambiental. As principais abordagens incluem o aprimoramento dos envelopes dos edifícios, a integração de recursos de design passivo e

a aplicação de soluções de *retrofit* para reduzir as demandas de aquecimento e resfriamento.

RQ2: Qual é a alternativa de projeto mais adequada para habitações sociais, considerando a eficiência energética, os impactos ambientais e a integração com a rede elétrica?

As alternativas de projeto mais eficazes são edifícios compactos e adaptados ao clima, com sistemas de isolamento aprimorados, orientação otimizada e estratégias passivas. A incorporação de sistemas de energia renovável e a previsão de mudanças no mix de eletricidade fortalecem ainda mais seu desempenho.

RQ3: Como podemos incorporar as melhores intervenções materiais para construir habitações sociais com menos emissões de carbono e maior eficiência energética?

As melhores práticas envolvem o uso de materiais de baixo impacto, de origem local e recicláveis. Além disso, a avaliação dos impactos incorporados juntamente com a eficiência operacional é fundamental para evitar a compensação dos benefícios da economia de energia em edifícios altamente eficientes. Isso é fundamental para a transição para soluções habitacionais mais sustentáveis e com baixo teor de carbono.

TABELA 5 – Principais conclusões e implicações observadas no estudo.

Principais conclusões	Implicações
Não existe uma metodologia padronizada para avaliar os impactos ambientais além das emissões	Dificulta a comparabilidade e o desenvolvimento de melhores práticas
A energia operacional é a fase dominante no impacto do ciclo de vida das habitações sociais	As intervenções de eficiência energética devem priorizar essa fase
A tipologia do edifício, o isolamento e o clima influenciam fortemente o desempenho do projeto	Incentiva estratégias de design específicas ao contexto
A energia incorporada se torna mais relevante em edifícios altamente eficientes	Exige uma seleção de materiais mais inteligente e uma integração mais profunda da LCA
Os princípios da economia circular são subutilizados nos aplicativos atuais de LCA	A integração desses fatores contribui para a sustentabilidade de longo prazo dos sistemas habitacionais

FONTE: Elaborado pelos autores (2024).

Agradecimento

Agradecemos o apoio e a assistência financeira da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil, pelo financiamento da pesquisa.

Referências

Ajayi, S. O.; Oyedele, L. O.; Ilori, O. M. Change in the importance of embodied energy: A comparative study of building material specifications and energy sources. *Journal of Building Engineering*, 23, 324-333, 2019. doi: [10.1016/j.jobbe.2019.02.008](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.02.008)

Alsaqabi, Y. *et al.* Citation: Technical-environmental assessment of insulation materials in Saudi Arabia: Integrating thermal performance and LCA. 2023. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings>

Ascione, F. *et al.* Energy demand and air quality in social housing buildings: A novel critical review. *Energy and Buildings*, 319, 2024. doi: [10.1016/j.enbuild.2024.114542](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114542)

Asdrubali, F. *et al.* LCA and energy efficiency in buildings: Mapping more than twenty years of research, *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, 15, 2024. doi: [10.1016/j.enbuild.2024.114684](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114684)

Ata-Ali, N. *et al.* Recycled versus non-recycled insulation alternatives: LCA analysis for different climate conditions in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 2021. doi: [10.1016/j.resconrec.2021.105838](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105838)

Babaizadeh, H. *et al.* Life cycle assessment of exterior window shadings in residential buildings in different climate zones. *Building and Environment*, 90, 168-177, 2015. doi: [10.1016/j.buildenv.2015.03.038](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.038)

Bertoli, G. *et al.* Integrated life cycle analysis of the thermal, environmental, and cost performance of building envelope systems: Case study of a small house considering the change in network mix in Brazil. *Energy and Buildings*, 310, 2024. doi: [10.1016/j.enbuild.2024.114096](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114096)

Conci, M. *et al.* Trade-off between the economic and environmental impact of different decarbonization strategies for residential buildings. *Building and Environment*, 155, 137-144, 2019. doi: [10.1016/j.buildenv.2019.03.051](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.051)

- Cusenza, M. A. *et al.* An integrated energy simulation and life cycle assessment to measure the operational and embodied energy of a net-zero energy Mediterranean building. *Energy and Buildings*, 254, 2022. doi: [10.1016/j.enbuild.2021.111558](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111558)
- Dahiya, D.; Laishram, B. Energy analysis of the life cycle of buildings: A systematic review. *Building and Environment* Elsevier Ltd, 15, 2024. doi: [10.1016/j.buildenv.2024.111160](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111160)
- Dalbem, R. *et al.* Optimization of social housing for southern Brazil: From basic performance standards to the passive house concept. *Energy*, 167, 1278-1296, 2019. doi: [10.1016/j.energy.2018.11.053](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.053)
- Dara, C.; Hachem-Vermette, C.; Assefa, G. Life cycle assessment and life cycle cost of container-based single-family homes in Canada: A case study. *Building and Environment*, 163, 2019. doi: [10.1016/j.buildenv.2019.106332](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106332)
- Dauletбек, A.; Zhou, P. BIM-based LCA as a comprehensive method for the refurbishment of existing dwellings considering environmental compatibility, energy efficiency, and profitability: A case study in China. *Journal of Building Engineering*, 46, 2022. doi: [10.1016/j.jobee.2021.103852](https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103852)
- Dixit, M. K.; Singh, S. Embodied energy analysis of higher education buildings using an input-output-based hybrid method. *Energy and Buildings*, 161, 41-54, 2018. doi: [10.1016/j.enbuild.2017.12.022](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.022)
- Flamant, G. *et al.* Thermal and environmental evaluation of mid-rise social housing retrofit under different climate conditions. *Journal of Building Engineering*, 46, 2022. doi: [10.1016/j.jobee.2021.103724](https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103724)
- Fouquet, M. *et al.* Methodological challenges and developments in LCA of low-energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. *Building and Environment*, 90, 51-59, 2015. doi: [10.1016/j.buildenv.2015.03.022](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.022)
- Galimshina, A. *et al.* What is the best robust and cost-effective environmental solution for building renovation? It is not the usual one. *Energy and Buildings*, 251, 2021. doi: [10.1016/j.enbuild.2021.111329](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111329)
- Grainne Cuffe. *Inside Housing - Insight - Annual sector data returns for 2021-22: five key findings*. Available at: <https://www.insidehousing.co.uk/insight/the-sectors-annual-data-returns-2021-22-five-key-takeaways-78707>. Accessed on: Nov. 3, 2024.
- Guan, J.; Zhang, Z.; Chu, C. Quantification of building embodied energy in China using an input-output-based hybrid LCA model. *Energy and Buildings*, 110, 443-452, 2016. doi: [10.1016/j.enbuild.2015.11.032](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.032)
- Gulotta, T. M. *et al.* A bottom-up harmonized energy-environmental models for Europe (BOHEEME): A case study on the thermal insulation of the EU-28 building stock. *Energy and Buildings*, 231, 2021. doi: [10.1016/j.enbuild.2020.110584](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110584)
- Hasik, V. *et al.* Whole building life cycle environmental impacts and costs: A sensitivity study of design and service decisions. *Building and Environment*, 163, 2019. doi: [10.1016/j.buildenv.2019.106316](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106316)
- Ingrao, C. *et al.* How can life cycle thinking support building sustainability? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance *Journal of Cleaner Production* Elsevier Ltd, 201, 556-569, 2018. doi: [10.1016/j.jclepro.2018.08.080](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.080)
- Kalangos, C. International Journal of Energy Economics and Policy Barriers and Policy Drivers to Energy Efficiency in Energy Intensive Turkish Industrial Sectors. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(3), 110-120, 2017. Available at: <http://www.econjournals.com>
- Kiss, B.; Szalay, Z. Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings. *Automation in Building*, 111, 2020. doi: [10.1016/j.autcon.2019.103044](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103044)
- Kneifel, J. *et al.* An exploration of the relationship between improvements in energy efficiency and life-cycle energy and carbon emissions using the BIRDS low-energy residential database. *Energy and Buildings*, 160, 19-33, 2018. doi: [10.1016/j.enbuild.2017.11.030](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.030)
- Kylili, A.; Fokaides, P. A. Policy trends for the sustainability assessment of construction materials: A review. *Sustainable Cities and Society*, 35, 280-288, 2017. doi: [10.1016/j.scs.2017.08.013](https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.013)

- Kylili, A.; Ilic, M.; Fokaides, P. A. Whole-building Life Cycle Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 169-177, 2017. doi: [10.1016/j.resconrec.2016.10.010](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.010)
- Li, S. *et al.* Multi-scale life cycle energy analysis of residential buildings in Victoria, Australia - A typology perspective. *Building and Environment*, 195, 2021. doi: [10.1016/j.buildenv.2021.107723](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107723)
- Macías, J. *et al.* Assessment of embodied and operational energy of different construction methods used in social housing in Ecuador. *Energy and Buildings*, 151, 107-120, 2017. doi: [10.1016/j.enbuild.2017.06.016](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.016)
- Mahlan, S. *et al.* An integrated life cycle assessment and energy simulation framework for residential building wall systems. *Building and Environment*, 257, 2024. doi: [10.1016/j.buildenv.2024.111542](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111542)
- MDR. Ministry of Regional Development (MDR) and João Pinheiro Foundation. *Housing deficit in Brazil*, 2013-2014, 2018. Available at: <http://novosite.fjp.mg.gov.br/deficit-habitacional-no-brasil>. Accessed on: Nov. 2024.
- Mirabella, N. *et al.* Strategies to improve the energy performance of buildings: A review of their impact on the life cycle. *Buildings MDPI AG*, 12, 2018. doi: [10.3390/buildings8080105](https://doi.org/10.3390/buildings8080105)
- Monteiro, H.; Freire, F.; Soares, N. Life cycle assessment of a southern European house addressing construction design options for orientation, window sizing, and building shape. *Journal of Building Engineering*, 39, 2021. doi: [10.1016/j.jobbe.2021.102276](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102276)
- Motalebi, M.; Rashidi, A.; Nasiri, M. M. Optimization and integration of BIM-based life cycle assessment for energy efficiency retrofitting of buildings. *Journal of Building Engineering*, 49, 2022. doi: [10.1016/j.jobbe.2022.104022](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104022)
- Najjar, M. *et al.* Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy-efficient buildings. *Applied Energy*, 250, 1366-1382, 2019. doi: [10.1016/j.apenergy.2019.05.101](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.101)
- Nematchoua, M. K. *et al.* Analysis of environmental impacts and costs of a residential building over its entire life cycle to achieve nearly zero energy and low emission objectives. *Journal of Cleaner Production*, 373, 2022. doi: [10.1016/j.jclepro.2022.133834](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133834)
- Newberry, P.; Harper, P.; Norman, J. Carbon assessment of building shell options for eco self-build community housing through the integration of building energy modeling and life cycle analysis tools. *Journal of Building Engineering*, 70, 2023. doi: [10.1016/j.jobbe.2023.106356](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106356)
- Nicolae, B.; George-Vlad, B. Life cycle analysis in refurbishment of the buildings as intervention practices in energy saving. *Energy and Buildings*, 86, 74-85, 2015. doi: [10.1016/j.enbuild.2014.10.021](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.021)
- Norouzi, M. *et al.* Low-energy buildings in combination with grid decarbonization, life cycle assessment of passive house buildings in Northern Ireland. *Energy and Buildings*, 261, 2022. doi: [10.1016/j.enbuild.2022.111936](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111936)
- Pakdel, A.; Ayatollahi, H.; Sattary, S. Embodied energy and CO₂ emissions of life cycle assessment (LCA) in the traditional and contemporary Iranian construction systems. *Journal of Building Engineering*, 39, 2021. doi: [10.1016/j.jobbe.2021.102310](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102310)
- Pannier, M. L. *et al.* Multidisciplinary post-occupancy evaluation of a multifamily house: An example combining sociological, energy, and LCA studies. *Journal of Building Engineering*, 37, 2021. doi: [10.1016/j.jobbe.2020.102139](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102139)
- Passer, A. *et al.* The impact of future scenarios on building refurbishment strategies towards plus energy buildings. *Energy and Buildings*, 124, 153-163, 2016. doi: [10.1016/j.enbuild.2016.04.008](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.008)
- Pombo, O.; Rivela, B.; Neila, J. Life cycle thinking towards sustainable development policy-making: The case of energy retrofits. *Journal of Cleaner Production*, 206, 267-281, 2019. doi: [10.1016/j.jclepro.2018.09.173](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.173)
- Rosa, A. D. La *et al.* Environmental impacts and thermal insulation performance of innovative composite solutions for building applications. *Construction and Building Materials*, 55, 406-414, 2014. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2014.01.054](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.054)

- Sartor, M. *et al.* International purchasing offices: Literature review and research directions. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 20(1), 1-17, 2014. doi: [10.1016/j.pursup.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.pursup.2013.09.002)
- Sartori, T.; Calmon, J. L. Analysis of the impacts of retrofit actions on the life cycle energy consumption of typical neighborhood dwellings. *Journal of Building Engineering*, 21, 158-172, 2019. doi: [10.1016/j.jobe.2018.10.009](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.009)
- Sharif, S. A.; Hammad, A. Simulation-Based Multi-Objective Optimization of institutional building renovation considering energy consumption, Life-Cycle Cost, and Life-Cycle Assessment. *Journal of Building Engineering*, 21, 429-445, 2019a. doi: [10.1016/j.jobe.2018.11.006](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.11.006)
- Sharif, S.A. Development of a surrogate ANN to select near-optimal building energy renovation methods considering energy consumption, LCC, and LCA. *Journal of Building Engineering*, 25, 1, 2019b. doi: [10.1016/j.jobe.2019.100790](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100790)
- Shrestha, J. K. Assessment of energy demand and greenhouse gas emissions in low-rise building systems: A case study of five building systems constructed after the Gorkha earthquake in Nepal. *Journal of Building Engineering*, 34, 2021. doi: [10.1016/j.jobe.2020.101831](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101831)
- Song, Q. *et al.* Characterizing the essential materials and energy performance of city buildings: A Case study of Macau. *Journal of Cleaner Production*, 194, 263-276, 2018. doi: [10.1016/j.jclepro.2018.05.148](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.148)
- Soust-Verdaguer, B.; Llatas, C.; García-Martínez, A. Critical review of BIM-based LCA method for buildings. *Energy and Buildings*, 136, 110-120, 2017. doi: [10.1016/j.enbuild.2016.12.009](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009)
- Stephan, A.; Stephan, L. Achieving net zero life cycle primary energy and greenhouse gas emissions apartment buildings in a Mediterranean climate. *Applied Energy*, 280, 2020. doi: [10.1016/j.apenergy.2020.115932](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115932)
- Tadeu, S. *et al.* Eco-efficiency to support the selection of energy conservation measures for buildings: A life cycle approach. *Journal of Building Engineering*, 61, 2022. doi: [10.1016/j.jobe.2022.105142](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105142)
- Tettey, U. Y. A.; Doodoo, A.; Gustavsson, L. Effect of different frame materials on the primary energy use of a multi-story residential building in a life cycle perspective. *Energy and Buildings*, 185, 259-271, 2019. doi: [10.1016/j.enbuild.2018.12.017](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.017)
- Tushar, Q. *et al.* An integrated BIM-enabled LCA and energy simulation approach: The optimized solution for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 289, 2021. doi: [10.1016/j.jclepro.2020.125622](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125622)
- UNEP. United Nations Environmental Program. *UNEP SBCI, Sustainable Buildings & Climate Initiative*. Paris: Available at: <https://www.unep.org/topics/cities/buildings-and-construction/sustainable-buildings>. Accessed on: Dec. 2024
- Weiler, V.; Harter, H.; Eicker, U. Life cycle assessment of buildings and city quarters comparing demolition and reconstruction with refurbishment. *Energy and Buildings*, 134, 319-328, 2017. doi: [10.1016/j.enbuild.2016.11.004](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.004)
- Zhan, J. *et al.* Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of urban residential buildings in Guangzhou City. *Journal of Cleaner Production*, 194, 318-326, 2018. doi: [10.1016/j.jclepro.2018.05.124](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.124)