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.v21i1.8752

Dispositivos de sombreamento fotovoltaico na descarbonização de edificações ao longo do ciclo de vida: estudo de caso do LabZero–UnB

Photovoltaic Shading Devices in Building Decarbonization over the Life Cycle: A Case Study of LabZero–UnB

Lucas Júnior Ferreira
Universidade de Brasília - UnB | Brasília | Brasil | lucasj.ferreira.unb@gmail.com
Joára Cronemberger Ribeiro Silva
Universidade de Brasília - UnB | Brasília | Brasil | joaracronemberger@unb.br
Cláudia Naves David Amorim
Universidade de Brasília - UnB | Brasília | Brasil | clamorim.unb@gmail.com
Lucas Rosse Caldas
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ | Rio de Janeiro | Brasil | lucas.caldas@fau.ufrj.br

Resumo
Este artigo analisou, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a contribuição de dispositivos de sombreamento fotovoltaico (DSFV) para a redução das emissões de carbono do LabZero–UnB, um edifício de balanço energético quase nulo (nZEB). Foram avaliados três cenários: (1) sem proteção solar; (2) com DSFV; e (3) com *brises* de alumínio. No cenário 1, as emissões incorporadas e operacionais foram de 7,19 e 6,50 kg CO_2-eq/m².ano, totalizando 13,69 kg CO_2-eq/m².ano. No cenário 2, esses valores foram de 8,48 e 2,48 kg CO_2-eq/m².ano, totalizando 10,96 kg CO_2-eq/m².ano. No cenário 3, foram obtidos 8,07 e 2,82 kg CO_2-eq/m².ano, totalizando 10,89 kg CO_2-eq/m².ano. Os resultados evidenciam a predominância das emissões incorporadas em edificações de alta eficiência energética e o potencial dos DSFV para reduzir em cerca de 60% as emissões operacionais em climas tropicais.

Palavras-chave: Carbono incorporado. Carbono operacional. BIPV. Edifícios de Balanço Energético Nulo. ACV.

Abstract
This study analyzed, through Life Cycle Assessment (LCA), the contribution of photovoltaic shading devices (PVSDs) to reducing the carbon emissions of LabZero–UnB, a nearly zero energy building (nZEB). Three scenarios were evaluated: (1) without solar shading; (2) with PVSDs; and (3) with aluminum louvers. In Scenario 1, embodied and operational emissions were 7.19 and 6.50 kg CO_2-eq/m²·year, totaling 13.69 kg CO_2-eq/m²·year. In Scenario 2, these values were 8.48 and 2.48 kg CO_2-eq/m²·year, totaling 10.96 kg CO_2-eq/m²·year. In Scenario 3, emissions were 8.07 and 2.82 kg CO_2-eq/m²·year, totaling 10.89 kg CO_2-eq/m²·year. The results highlight the predominance of embodied emissions in highly energy-efficient buildings and the potential of PVSDs to reduce operational emissions by approximately 60% in tropical climates.

Keywords: Embodied carbon. Operational carbon. BIPV. Zero Energy Buildings (ZEB). LCA.

FERREIRA, L. J.; SILVA, J. C. R.; AMORIM, C. N. D.; CALDAS, L. R. Dispositivos de sombreamento fotovoltaico na descarbonização de edificações ao longo do ciclo de vida: estudo de caso do LabZero–UnB. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO

A emissão de gases de efeito estufa (GEE) é um dos principais fatores responsáveis pelas mudanças climáticas, destacando-se a contribuição do setor da construção civil para as emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) associadas à energia [1]. Em 2024, as edificações responderam por 32% da demanda energética mundial e 34% das emissões de CO_2, evidenciando seu papel estratégico na mitigação das mudanças climáticas. No Brasil, esse impacto decorre tanto do consumo energético operacional quanto das emissões incorporadas à produção de materiais, como cimento e aço [2].

Diante do crescimento urbano, torna-se essencial adotar soluções que conciliem desenvolvimento e sustentabilidade, com ênfase na eficiência energética e no uso de fontes renováveis [3]. Nesse contexto, edificações de balanço energético nulo ou quase nulo (ZEB/nZEB) destacam-se por integrar estratégias passivas e sistemas de geração renovável [4][5]. Edifícios institucionais e universitários apresentam elevado potencial para aplicação dessas estratégias devido à sua demanda energética e ao seu papel na difusão de soluções sustentáveis. No Brasil, a predominância da geração hidrelétrica reforça a necessidade de diversificação da matriz energética, especialmente por meio da energia solar [2].

Com o avanço de edificações mais eficientes, como os nZEB, reduz-se a participação das emissões operacionais e aumenta a relevância das incorporadas. A descarbonização da matriz elétrica tende a diminuir os impactos operacionais ao longo do tempo, ao passo que, em edifícios nZEB, as emissões incorporadas podem representar cerca de 69% do total, enquanto as operacionais correspondem a 31% [6] [7]. De forma consistente, estudos realizados no contexto europeu indicam que as emissões incorporadas representam entre 20% e 25% das emissões totais em edificações convencionais, podendo ultrapassar 40% a 50% em edifícios altamente eficientes [8].

Os sistemas fotovoltaicos integrados à edificação representam uma das principais estratégias para viabilizar edifícios nZEB, contribuindo para a redução das emissões de carbono associadas ao uso de energia [9]. Entre suas aplicações, destacam-se os dispositivos de sombreamento fotovoltaico (DSFV), que combinam controle solar e geração de eletricidade, podendo reduzir cargas térmicas e o consumo energético, sobretudo em climas tropicais [10]. Estudos recentes demonstram que avanços tecnológicos podem reduzir as emissões incorporadas em até 38% até 2033, além de indicar que a energia gerada ao longo da vida útil supera as emissões associadas à produção [11].

Nesse contexto, *benchmarks* de carbono incorporado são utilizados para contextualizar resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e apoiar metas de descarbonização [12] [13] [14]. Em geral, indicam valores entre 6,6 e 15,2 kg CO_2-eq/m².ano para edifícios de escritório, embora haja variações metodológicas e regionais. Muitos não incluem a fase operacional (B6), reforçando a necessidade de abordagens integradas. Assim, a ACV destaca-se como metodologia central na avaliação de edificações eficientes, nas quais as emissões incorporadas assumem papel predominante.

Apesar desses benefícios, a literatura ainda carece de estudos que avaliem de forma integrada o desempenho energético e os impactos ambientais dos DSFV ao longo da vida útil da edificação. Essa lacuna é particularmente relevante em edificações nZEB localizadas em climas tropicais, onde as condições climáticas influenciam simultaneamente a demanda energética e o potencial de geração fotovoltaica. Além disso, permanece pouco explorada a relação entre o aumento das emissões incorporadas decorrentes da instalação desses sistemas e a redução das emissões operacionais proporcionada por sua utilização.

Nesse sentido, a ACV, conforme a ABNT NBR ISO 14040 [15], ISO EN 15978:2011 [16] e EN 15804:2019 [17], constitui-se como uma metodologia adequada para quantificar os potenciais impactos ambientais associados às diferentes etapas da edificação, com destaque para o potencial de aquecimento global (PAG). Assim, este artigo tem como objetivo analisar a contribuição dos sistemas DSFV aplicados ao LabZero–UnB, um edifício universitário demonstrativo de balanço energético quase nulo (nZEB), para a redução das emissões de GEE ao longo do ciclo de vida, ampliando as evidências sobre o desempenho ambiental desses sistemas em edificações localizadas em clima tropical.

MÉTODO

Esta seção apresenta a caracterização do objeto de análise — a edificação demonstrativa nZEB, LabZero – UnB, e os procedimentos metodológicos adotados para a pesquisa: 1) definição dos cenários analisados, e 2) a aplicação da ACV.

CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO:

O edifício LabZero–UnB, resultante da Chamada PROCEL/EDIFICA (2020), consiste em uma construção demonstrativa de alta eficiência energética, projetada para operar com balanço energético anual próximo de zero. Em fase de construção, o edifício estará localizado no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB), onde funcionará como *living lab*, abrigando laboratórios e grupos de pesquisa [4]. Sua proposta é demonstrar, em escala real, uma edificação com elevado conforto ambiental, alta eficiência e autossuficiência energética.

O LabZero–UnB apresenta uma demanda anual de energia (EUI) de 34,32 kWh/m².ano [4], valor significativamente inferior à média de 132 kWh/m².ano observada em edifícios de escritórios convencionais em Brasília [18]. Esse desempenho resulta da integração de estratégias passivas, ativas e tecnológicas. Construtivamente, o edifício adota estrutura metálica, lajes mistas *steel deck* e sistemas de vedação leves, combinados a um envelope com elevada resistência térmica, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1: Representação das principais estratégias ativas e passivas do LabZero - UnB.



Fonte: Lacam, 2026.

A climatização segue uma abordagem hierarquizada, priorizando estratégias passivas, como ventilação natural e noturna, resfriamento evaporativo e chaminé solar, complementadas por sistema mecânico de alta eficiência (bomba de calor geotérmica), quando necessário. A geração de energia é atendida por dois sistemas fotovoltaicos formados por módulos convencionais de silício monocristalino: (1) instalados sobre a cobertura (6,15 kWp) e (2) instalados na forma de dispositivos de sombreamento fotovoltaico (5,75 kWp) na fachada, ambos orientados para o norte.

A geração anual de eletricidade no local (16.250 kWh) supera o consumo previsto do edifício (7.106 kWh), dos quais cerca de 60% são atendidos por autoconsumo (4.284 kWh/ano). Devido ao horário de operação até as 22 horas, sem disponibilidade de radiação solar, parte do consumo é suprida pela rede (2.822 kWh/ano). O excedente (11.966 kWh/ano) é exportado para a rede para compensação de outros consumos da instituição. Essa configuração corresponde ao projeto original do LabZero–UnB, adotado como cenário 2 neste estudo, cujo balanço energético anual é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Balanço energético do LabZero – UnB – equivalente ao cenário 2.

Parâmetro	Valor (kWh.ano)
Consumo energético total	7.106
Geração energia solar fotovoltaica	16.250
Autoconsumo fotovoltaico	4.284
Energia consumida da rede	2.822
Energia excedente injetada na rede	11.966

Fonte: Lacam, 2026.

DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS

Para a ACV, foram definidos três cenários que consideraram diferentes estratégias de proteção solar e geração de energia no LabZero–UnB, nos quais as variações no consumo energético decorreram do impacto térmico da proteção solar nas janelas da fachada norte sobre a demanda de climatização:

- Cenário 1: corresponde ao LabZero–UnB como modelo de referência, sem sombreamento nas janelas e sem geração local de eletricidade. As emissões incorporadas consideraram apenas os materiais dos sistemas construtivos, enquanto as operacionais (B6) foram integralmente associadas ao consumo da rede, que totalizou 7.445 kWh/ano;
- Cenário 2: trata-se do projeto original do LabZero–UnB, que incluiu DSFV na fachada norte, integrando controle solar e geração de energia, além do sistema fotovoltaico na cobertura. As emissões incorporadas abrangeram também esses sistemas, enquanto as operacionais resultaram da combinação entre rede e autoconsumo, com consumo anual de 7.106 kWh/ano;
- Cenário 3: caracteriza-se pela adoção de proteção solar em *brises* de alumínio com a mesma geometria do cenário 2, mantendo apenas o sistema fotovoltaico da cobertura. As emissões incorporadas incluíram os *brises*, enquanto as operacionais resultaram da combinação entre a geração na cobertura e o consumo complementar da rede, totalizando 7.106 kWh/ano.

AVALIAÇÃO AMBIENTAL: METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A ACV foi adotada para quantificar os impactos ambientais do edifício LabZero–UnB ao longo do ciclo de vida, considerando a complexidade de edificações nZEB em clima tropical e a integração de tecnologias fotovoltaicas. A abordagem permitiu avaliar, de forma sistêmica, as emissões de GEE desde a produção dos materiais até o fim de vida, incluindo a fase operacional.

Para a realização da ACV, utilizou-se a ferramenta “LCA *tool* + EPD’s”, desenvolvida no âmbito da IEA SHC *Task* 70 / EBC *Annex* 90 e estruturada em *Excel*, com base nas normas ISO EN 15978:2011 [16] e EN 15804:2019 [17]. A ferramenta estimou o PAG, expresso em kg CO_2-eq, a partir de parâmetros padronizados, organizados em quatro abas: (1) parâmetros gerais, (2) quantitativos, (3) base de dados e (4) cálculo dos resultados por área. O escopo abrangeu as etapas A1–A3 (extração e processamento de matérias-primas, transporte e fabricação dos materiais), A4 (transporte dos materiais para o canteiro de obras), A5 (processo construtivo e instalação dos componentes), B4 (substituição de materiais durante a vida útil), B6 (consumo operacional de energia) e C1–C4 (desmontagem, transporte, processamento de resíduos e disposição final). Os resultados foram normalizados por área (m²), considerando uma vida útil de 50 anos, sendo apresentados em base anual para facilitar a comparação com a literatura.

Na Aba 1, definiram-se parâmetros gerais como fator de emissão da matriz energética, área construída em m², consumo energético anual e vida útil. Na Aba 2, levantaram-se os quantitativos dos materiais dos sistemas construtivos do LabZero–UnB, incluindo

fundação, estrutura, pisos, paredes, esquadrias, cobertura e fachada, além dos componentes dos sistemas fotovoltaicos (DSFV e módulos da cobertura). Os dados foram obtidos de desenhos técnicos, memoriais e fornecedores, com estimativas baseadas em propriedades geométricas quando necessário, garantindo a consistência do inventário.

Na Aba 3, foram inseridos os fatores de emissão de cada material levantado referentes às etapas A1–A3 e C4, obtidos a partir de Declarações Ambientais de Produto (DAP) e da base de dados *Ecoinvent*, adotando-se a categoria GWP fóssil (*Global Warming Potential*) e dando prioridade, sempre que possível, para produtos do contexto brasileiro. Esses fatores permitiram converter os quantitativos dos materiais em uma unidade comum (kg CO_2-eq/unidade). Componentes para os quais não foram encontrados dados compatíveis, como impermeabilizantes, cobogós cerâmicos, pisos de cimento queimado e tintas, não foram considerados na análise, reconhecendo-se as incertezas associadas. Na Aba 4, os cálculos seguiram as normas ISO EN 15978:2011 [16] e EN 15804:2019 [17]. A fase operacional (B6) foi estimada pela multiplicação do consumo energético anual simulado para cada cenário pelos respectivos fatores de emissão da matriz elétrica brasileira, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Fator de carbono no Brasil.

Fonte de eletricidade	Fator de carbono (kg CO_2-eq/kWh)	Fonte
Fotovoltaica	0,000015	[19]
Rede elétrica	0,182	[20]

Fonte: os autores, 2026.

Essa abordagem permitiu avaliar de forma integrada o desempenho ambiental da edificação, em termos de emissões de GEE, considerando tanto as emissões incorporadas quanto as operacionais, além de possibilitar a comparação entre diferentes cenários de projeto e *benchmarks* da literatura. A metodologia apresenta consistência com práticas internacionais de ACV e fornece subsídios relevantes para a análise do potencial de descarbonização de estratégias arquitetônicas e tecnológicas aplicadas a edificações de alto desempenho energético.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados consolidados dos três cenários são apresentados na Tabela 3. O cenário 1, sem proteção solar, apresentou as maiores emissões totais (13,69 kg CO_2-eq/m².ano), enquanto os cenários 2 e 3, com DSFV e *brises* de alumínio, registraram 10,96 e 10,89 kg CO_2-eq/m².ano, respectivamente.

Tabela 3: Quadro geral de emissões incorporadas e operacionais totais.

Cenário	Emissões incorporadas (kg CO_2-eq/m².ano)		Emissões operacionais (kg CO_2-eq/m².ano)	Emissões totais (kg CO_2-eq/m².ano)
	Sistemas construtivos	Sistemas fotovoltaicos		
1	7,19	/	6,50	13,69

2	7,48	1,0	2,48	10,96
3	7,57	0,5	2,82	10,89

Fonte: os autores, 2026.

No cenário 1, as emissões incorporadas e operacionais corresponderam a 7,19 e 6,50 kg CO_2-eq/m².ano, representando respectivamente 52% e 48% do total. Nos cenários 2 e 3, as emissões incorporadas aumentaram para 8,48 (77%) e 8,07 kg CO_2-eq/m².ano (74%), nessa ordem, devido à inclusão dos sistemas de proteção solar e geração fotovoltaica. Em contrapartida, as emissões operacionais foram reduzidas para 2,48 kg CO_2-eq/m².ano (23%) no cenário 2 e 2,82 kg CO_2-eq/m².ano (26%) no cenário 3, em função da geração local de eletricidade pelos sistemas fotovoltaicos. A análise da distribuição das emissões por etapa do ciclo de vida revelou que, em todos os cenários, a etapa A1–A3 destacou-se como principal *hotspot* ambiental, concentrando entre 29% e 38% das emissões totais.

No cenário 1, a etapa A1–A3 foi responsável por 3,97 kg CO_2-eq/m².ano (29%), seguida pela etapa de substituição (B4), com 1,70 kg CO_2-eq/m².ano (12%), e pela etapa de transporte dos materiais para o canteiro (A4), com 1,08 kg CO_2-eq/m².ano (8%).

No cenário 2, a etapa A1–A3 permaneceu como principal fonte de emissões, totalizando 4,10 kg CO_2-eq/m².ano (37%). As etapas A1–A3 e B4 dos sistemas fotovoltaicos apresentaram contribuições relevantes, refletindo os impactos associados à fabricação e substituição dos componentes. Em contrapartida, as emissões operacionais foram reduzidas para 2,48 kg CO_2-eq/m².ano devido à combinação entre autoconsumo fotovoltaico e consumo complementar da rede elétrica.

No cenário 3, observou-se comportamento semelhante, com predominância da etapa A1–A3 (4,10 kg CO_2-eq/m².ano; 38%) e contribuição relevante da etapa B4 (1,89 kg CO_2-eq/m².ano; 18%), em função do acréscimo incorporado dos *brises* de alumínio. Entretanto, a ausência de geração fotovoltaica na fachada aumentou a dependência da rede elétrica, elevando as emissões operacionais para 2,82 kg CO_2-eq/m².ano.

Os resultados evidenciaram a mudança de paradigma observada em edificações de alta eficiência energética, nas quais as emissões incorporadas passam a representar a maior parcela dos impactos ao longo do ciclo de vida [8]. Enquanto no cenário 1 as emissões incorporadas e operacionais totalizaram respectivamente 52% e 48% das emissões, nos cenários 2 e 3 a participação das emissões operacionais foi reduzida para 23% e 26%, em função da geração local de eletricidade de fonte solar fotovoltaica. Apesar do aumento das emissões incorporadas associado à fabricação e substituição dos sistemas fotovoltaicos, observou-se redução significativa das emissões operacionais globais, cerca de 60% quando comparadas ao cenário sem proteção solar, confirmando tendências reportadas para edificações nZEB [6] [8]. A diferença operacional entre os cenários 2 e 3 decorre da geração adicional dos DSFV, que reduz a dependência da rede elétrica, embora ainda exija importação de energia na ausência de geração solar. Esses resultados sugerem que sistemas de armazenamento podem ampliar os benefícios ambientais observados.

Em relação aos *benchmarks*, as emissões incorporadas dos três cenários — 7,19 (cenário 1), 8,48 (cenário 2) e 8,07 kg CO_2-eq/m².ano (cenário 3) — situaram-se na faixa reportada para edifícios de escritório (6,6 a 15,2 kg CO_2-eq/m².ano), reforçando a consistência dos resultados. Esses valores confirmaram que, em edificações de alta eficiência, as emissões incorporadas tendem a predominar [12] [13] [14].

Como limitações do estudo, destacam-se a exclusão de materiais sem dados ambientais compatíveis, citados anteriormente, e o uso de fatores médios anuais de emissão da matriz de energia elétrica brasileira, que podem não refletir as variações temporais da intensidade de carbono da rede, resultando em possíveis subestimações ou superestimações das emissões operacionais. Nesse sentido, fatores de emissão dinâmicos poderiam representar com maior precisão as condições reais de operação da edificação. Além disso, por se tratar de uma edificação ainda em fase de construção, os resultados energéticos e operacionais baseiam-se em simulações sujeitas às incertezas inerentes à fase de projeto. Apesar dessas limitações, a metodologia adotada permitiu comparar consistentemente os cenários avaliados e identificar tendências relevantes para a descarbonização de edificações nZEB em clima tropical.

CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou que a integração de dispositivos de sombreamento fotovoltaico (DSFV) tem potencial para reduzir significativamente as emissões operacionais em edificações de balanço energético quase nulo (nZEB), com diminuição de cerca de 60%, de 6,50 kg CO_2-eq/m².ano para aproximadamente 2,48 kg CO_2-eq/m².ano, por meio do autoconsumo, ao mesmo tempo em que desloca o foco da análise para as emissões incorporadas, que passaram de 52% para até 77% do total. Os resultados confirmam a mudança de paradigma na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), indicando que, com o aumento da eficiência energética, as emissões associadas aos materiais tendem a predominar.

O cenário 2 apresentou o melhor desempenho global, com emissões totais de 10,96 kg CO_2-eq/m².ano, ao equilibrar a geração de energia com a redução das emissões operacionais, mesmo com o impacto incorporado inicial de materiais. Os valores obtidos mostraram-se consistentes com *benchmarks* internacionais (6,6 a 15,2 kg CO_2-eq/m².ano), reforçando a robustez do estudo. Em climas tropicais, o trabalho evidencia o potencial dos DSFV como solução integrada ainda pouco explorada e contribui para o avanço das pesquisas em edificações nZEB.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à realização deste trabalho.

DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Durante a preparação deste artigo, o primeiro autor utilizou a ferramenta *ChatGPT,* desenvolvida pela *OpenAI,* para a revisão, melhoria de coesão e interpretação de dados do texto. Após a utilização da ferramenta os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global status report for buildings and construction 2024/2025: not just another brick in the wall – the solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast.** Paris: UNEP, 2025. Disponível em: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/47214. Acesso em: 27 mai. 2026.

[2] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço energético nacional 2025: ano base 2024.** Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025. Acesso em: 27 mai. 2026.

[3] GODINHO, C. **A importância das comunidades de energia renovável na descarbonização.** Porto: Instituto Politécnico do Porto (ISCAP), 2023.

[4] AMORIM, C. N. D. et al. **ZEB – Zero Energy Brasília: plano estratégico de eficiência energética para parque construído de balanço energético nulo.** Brasília, DF, 2020.

[5] D'AGOSTINO, D.; MAZZARELLA, L. What is a nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions**. Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 200–212, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.019.

[6] ASDRUBALI, F. et al. Dynamic life cycle assessment modelling of a NZEB building. **Energy**, v. 191, p. 116489, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116489.

[7] PALOMAR-TORRES, A. et al. A novel life cycle assessment methodology for transitioning from nZEB to ZEB: case-study. **Journal of Building Engineering**, v. 97, p. 110868, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110868.

[8] ROCK, M. et al. Embodied GHG emissions of buildings – the hidden challenge for effective climate change mitigation. **Applied Energy**, v. 258, p. 114107, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107.

[9] YAN, X. Challenges and research needs in life cycle analysis of building-integrated photovoltaic. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 556, p. 012053, 2019. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/556/1/012053.

[10] CHIVELET, N. M.; KAPSIS, C.; FRONTINI, F. **Building-integrated photovoltaics: a technical guidebook.** 1. ed. New York: Routledge, 2024. DOI: https://doi.org/10.1201/9781003432241.

[11] POPP, C.; UHLIG, C.; ENGELMANN, M. Prospective life cycle analysis of a BIPV façade – life cycle assessment of greenhouse gas emissions using future projections for a case study**. Energy and Buildings,** v. 330, p. 115336, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115336.

[12] ROCK, M. et al. **Towards embodied carbon benchmarks for buildings in Europe: setting the baseline – a bottom-up approach.** Brussels: Ramboll, 2022.

[13] BENKE, B. et al. **The embodied carbon benchmark report: embodied carbon budgets and analysis of 292 buildings in the US and Canada.** [S.l.]: Carbon Leadership Forum, 2025.

[14] ONE CLICK LCA LTD. **Embodied carbon benchmarks for European buildings: according to EN 15978:2011 & Level(s) framework.** [S.l.]: One Click LCA, 2021.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040:2009: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

[16] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15978: Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method.** Brussels: CEN, 2011.

[17] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15804:2012+A2:2019: Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products.** Brussels: CEN, 2019.

[18] COSTA, J. F. W. et al. **Retrofit guidelines towards the achievement of net zero energy building for office building in Brasília.** Brasil, 2020.

[19] ECOINVENT ASSOCIATION. **ecoinvent database: Electricity, low voltage {RoW} – electricity production, photovoltaic, 3 kWp slanted-roof installation, single-Si, laminated, integrated (cut-off, U).** Versão 3.11. Zürich, 2026.

[20] ECOINVENT ASSOCIATION. **ecoinvent database: Electricity, medium voltage {BR} – market group for electricity, medium voltage (cut-off, U).** Versão 3.11. Zürich, 2026.