



Universidade De Brasília
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

**Contribuição de sistemas de sombreamento fotovoltaico para a
descarbonização de edificações ao longo do ciclo de vida: estudo de caso do
LabZero – UnB**

Lucas Júnior Ferreira

Brasília – DF

2026

Lucas Júnior Ferreira

Contribuição de sistemas de sombreamento fotovoltaico para a descarbonização de edificações ao longo do ciclo de vida: estudo de caso do LabZero – UnB

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, na Área de Concentração de Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade (TAS), Linha de Pesquisa: Sustentabilidade, Qualidade e Eficiência do Ambiente Construído.

Orientador (a): Prof^ª. Dr^ª. Joára Cronemberger Ribeiro Silva (Universidade de Brasília - UnB)

Coorientador (a): Prof. Dr. Lucas Rosse Caldas (Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ).

Banca Examinadora:

Examinador Interno / Prof^ª. Dr^ª. Juliana Andrade Borges de Sousa

Universidade de Brasília (UnB)

Examinador Externo / Prof^ª. Dr^ª. Maria Andrea Triana

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Universidade de Brasília

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Ata Nº: 176

Os nove dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e seis, instalou-se a banca examinadora de Dissertação de Mestrado do aluno LUCAS JÚNIOR FERREIRA, matrícula 241105544. A banca examinadora foi composta pelos professores Dra. MARIA ANDREA TRIANA (membro externo, pesquisadora do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina - LABEEE/UFSC), Dra. JULIANA ANDRADE BORGES DE SOUSA (membro interno, docente do Programa de Pós-graduação da FAU-UnB), Dr. GUSTAVO DE LUNA SALES (membro suplente, docente da FAU-UnB) e Dra. JOÁRA CRONEMBERGER RIBEIRO SILVA (orientadora, presidente). Registra-se a presença do professor coorientador, Dr. LUCAS ROSSE CALDAS (PROARQ-UFRJ). O discente apresentou o trabalho intitulado CONTRIBUIÇÃO DE SISTEMAS DE SOMBREAMENTO FOTOVOLTAICO PARA A DESCARBONIZAÇÃO DE EDIFICAÇÕES AO LONGO DO CICLO DE VIDA: ESTUDO DE CASO DO LABZERO UNB. Concluída a exposição, procedeu-se a arguição do(a) candidato(a), e após as considerações dos examinadores o resultado da avaliação do trabalho foi (X) Pela aprovação do trabalho; () Pela aprovação do trabalho, com revisão de forma, indicando o prazo de até 30 dias para apresentação definitiva do trabalho revisado; () Pela reformulação do trabalho, indicando o prazo de (Nº DE MESES) dias para nova versão; () Pela reprovação do trabalho, conforme as normas vigentes na Universidade de Brasília. Conforme os Artigos 33, 39 e 40 da Resolução 0080/2021 - CEPE, o(a) candidato(a) não terá o título se não cumprir as exigências acima.

Dra. MARIA ANDREA TRIANA, UFSC
Examinadora Externa à Instituição

Dr. GUSTAVO DE LUNA SALES, UnB
Examinador Externo ao Programa

Dra. JULIANA ANDRADE BORGES DE SOUSA, UnB
Examinadora Interna

Dra. JOARA CRONEMBERGER RIBEIRO SILVA, UnB
Presidente

LUCAS JÚNIOR FERREIRA
Mestrando



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Júnior Ferreira, Usuário Externo**, em 11/06/2026, às 12:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Juliana Andrade Borges de Sousa, Professor(a) de Magistério Superior da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo**, em 12/06/2026, às 08:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Joara Cronemberger Ribeiro Silva, Professor(a) de Magistério Superior da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo**, em 12/06/2026, às 10:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **MARIA ANDREA TRIANA, Usuário Externo**, em 15/06/2026, às 07:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.unb.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **14109358** e o código CRC **8FFD09D3**.

“O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”

AGRADECIMENTOS

Minha jornada na academia não teve um começo fácil. Cheguei muito inexperiente, sem conhecer os caminhos da pesquisa e com muitas dificuldades para me adaptar a esse novo ambiente. Houve momentos de incerteza, desafios que pareciam maiores do que eu e obstáculos que exigiram muito esforço, dedicação e persistência para serem superados.

Ao longo dessa trajetória, aprendi que o crescimento acontece justamente nos momentos mais difíceis. Cada erro se transformou em aprendizado, cada desafio contribuiu para minha formação e cada conquista foi resultado de muito trabalho e do apoio de pessoas que acreditaram em mim.

Por isso, deixo aqui minha profunda gratidão a todos que fizeram parte dessa caminhada. Agradeço aos professores de todas as disciplinas cursadas ao longo destes quase três anos de mestrado, cujos ensinamentos contribuíram de forma significativa para minha formação acadêmica e profissional. Aos meus orientadores, profa. Joára Cronemberger e prof. Lucas Rosse, expresso minha especial admiração e reconhecimento pela dedicação, confiança e generosidade com que me acompanharam em cada etapa deste percurso, guiando-me com excelência e contribuindo decisivamente para meu desenvolvimento como pesquisador.

Aos colegas e amigos que conquistei ao longo dessa jornada, agradeço pela convivência, pelas trocas de conhecimento e pelos momentos compartilhados, que tornaram esse caminho mais leve e enriquecedor. Aos meus familiares, especialmente aos meus pais, José Marcos e Meiry Márcia, deixo minha mais profunda gratidão por todo o amor, apoio e incentivo. Agradeço também ao meu companheiro de vida, João Júnior, sua presença constante, seu carinho, sua paciência e seu apoio incondicional foram fundamentais ao longo desta trajetória. Obrigado por me proporcionarem as condições necessárias para perseguir meus sonhos e por acreditarem em mim mesmo nos momentos em que eu próprio duvidei.

Nenhuma conquista é construída de forma isolada. Este trabalho é também reflexo do apoio, da confiança e da contribuição de cada pessoa que esteve ao meu lado ao longo dessa trajetória. Por isso, sou imensamente grato a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta conquista.

Declaração de uso de ferramentas de Inteligência Artificial Generativa - IAG

A ferramenta de inteligência artificial *ChatGPT*, desenvolvida pela *OpenAI*, foi utilizada com o apoio na redação desta dissertação, contribuindo para o aprimoramento da clareza, da organização textual e da correção gramatical, sobretudo por meio da reformulação de trechos com vistas a melhorar a legibilidade do texto.

Todas as contribuições geradas com o auxílio da ferramenta foram cuidadosamente analisadas, revisadas e adaptadas pelo autor, que assume plena responsabilidade pela precisão, integridade e confiabilidade das informações apresentadas.

Esta declaração está em conformidade com a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq (Portaria CNPq N° 2.664, de 6 de março de 2026).

RESUMO

A construção civil é um dos principais setores responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), devido tanto ao carbono incorporado nos materiais quanto ao consumo energético na operação das edificações. Nesse contexto, estratégias de eficiência energética e integração de fontes renováveis são essenciais para a descarbonização do setor, destacando-se os dispositivos de sombreamento fotovoltaico (PVSD), que aliam geração de energia e proteção solar. Este estudo investiga a contribuição desses dispositivos para as emissões de carbono ao longo do ciclo de vida das edificações, tendo como estudo de caso o LabZero–UnB. Foram analisados três cenários: sem proteção solar, com PVSD e com proteção passiva. O desempenho termoenergético foi simulado no *software DesignBuilder*, e a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) foi aplicada conforme normas internacionais, abrangendo as etapas A1–A3, A4, A5, B4, B6 e C1–C4. O inventário do ciclo de vida foi elaborado com base em Declarações Ambientais de Produto (DAP) e complementado por dados secundários da base *Ecoinvent*. Os resultados indicaram que as estratégias de sombreamento reduziram os ganhos solares externos ao longo dos meses entre 20% e 55%, resultando na redução da demanda de anual de resfriamento de aproximadamente 2.970 kWh/ano (sem proteção) para 2.420 kWh/ano (PVSD) e 2.484 kWh/ano (proteção passiva). Do ponto de vista energético, o Cenário com PVSD apresentou maior geração anual (16.250 kWh/ano) em relação ao sistema PV na cobertura (10.624 kWh/ano), além de maior excedente (11.966 kWh/ano), embora com limitação de autoconsumo devido ao descompasso entre geração e demanda. Na análise ambiental, o Cenário sem proteção apresentou emissões incorporadas e operacionais de 7,19 e 6,50 kg CO₂eq/m².ano (52% e 48%), totalizando 13,69 kg CO₂eq/m².ano. Nos cenários com sombreamento, os valores foram de 8,48 e 2,48 kg CO₂eq/m².ano (77% e 23%) para o Cenário com PVSD, totalizando 10,96 kg CO₂eq/m².ano, e de 8,07 e 2,82 kg CO₂eq/m².ano (74% e 26%) quando com a proteção passiva, totalizando 10,89 kg CO₂eq/m².ano. O balanço de carbono evidenciou diferenças significativas entre os cenários, com 13,69 kg CO₂eq/m².ano no Cenário sem proteção, 1,55 kg CO₂eq/m².ano no Cenário passivo e –3,32 kg CO₂eq/m².ano no Cenário com PVSD. Esse último apresentou o melhor desempenho ao longo do ciclo de vida de 50 anos, reduzindo as emissões operacionais em mais de 60%, em comparação a 55% no Cenário passivo. Os resultados desse estudo sugerem que os dispositivos de sombreamento fotovoltaico podem ser incluídos entre as estratégias de descarbonização em edificações nZEB localizadas em clima tropical.

Palavras-chave: Dispositivos de Sombreamento Fotovoltaico; Descarbonização; Avaliação do Ciclo de Vida; Edifícios de Balanço Energético Nulo.

ABSTRACT

The construction sector is one of the main contributors to greenhouse gas (GHG) emissions due to both embodied carbon in building materials and energy consumption during operation. In this context, energy efficiency measures and the integration of renewable energy sources are essential for building decarbonization. Among these strategies, photovoltaic shading devices (PVSDs) combine solar protection with on-site electricity generation. This study investigates the contribution of PVSDs to life-cycle carbon emissions using the LabZero–University of Brasília (UnB) as a case study. Three scenarios were evaluated: (i) without solar shading, (ii) with PVSDs, and (iii) with passive shading devices. Thermal and energy performance were simulated using DesignBuilder, while the Life Cycle Assessment (LCA) followed international standards and covered stages A1–A3, A4, A5, B4, B6, and C1–C4. The life cycle inventory was developed from Environmental Product Declarations (EPDs) and supplemented with secondary data from the Ecoinvent database. The results showed that shading strategies reduced solar gains by 20–55%, decreasing the annual cooling demand from 2,970 kWh/year in the reference scenario to 2,420 kWh/year with PVSDs and 2,484 kWh/year with passive shading. The PVSD scenario achieved higher annual electricity generation (16,250 kWh/year) than the rooftop PV system (10,624 kWh/year), producing a larger energy surplus despite limitations in self-consumption. The reference scenario presented embodied and operational emissions of 7.19 and 6.50 kg CO₂eq/m²·year, respectively, totaling 13.69 kg CO₂eq/m²·year. In the PVSD and passive shading scenarios, total emissions were reduced to 10.96 and 10.89 kg CO₂eq/m²·year, respectively. The carbon balance revealed significant differences among scenarios, reaching 13.69 kg CO₂eq/m²·year for the reference case, 1.55 kg CO₂eq/m²·year for passive shading, and –3.32 kg CO₂eq/m²·year for PVSDs. Over a 50-year life cycle, PVSDs achieved the best performance, reducing operational emissions by more than 60%. These findings suggest that PVSDs can be an effective decarbonization strategy for nearly zero-energy buildings (nZEBs) in tropical climates.

Keywords: Photovoltaic Shading Devices; Decarbonization; Life Cycle Assessment; Net Zero Energy Buildings.

RESUMEN

El sector de la construcción es uno de los principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), debido tanto al carbono incorporado en los materiales como al consumo energético durante la operación de los edificios. En este contexto, las estrategias de eficiencia energética y la integración de fuentes renovables son fundamentales para la descarbonización del sector. Entre ellas, los dispositivos de sombreado fotovoltaico (PVSD) destacan por combinar generación de energía y protección solar. Este estudio investiga la contribución de estos dispositivos a las emisiones de carbono a lo largo del ciclo de vida de los edificios, utilizando el LabZero–Universidad de Brasilia (UnB) como caso de estudio. Se analizaron tres escenarios: (i) sin protección solar, (ii) con PVSD y (iii) con protección pasiva. El desempeño termoenergético se simuló mediante el software DesignBuilder, mientras que la Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) se realizó de acuerdo con normas internacionales, considerando las etapas A1–A3, A4, A5, B4, B6 y C1–C4. El inventario del ciclo de vida se elaboró a partir de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) y se complementó con datos secundarios de la base Ecoinvent. Los resultados mostraron que las estrategias de sombreado redujeron las ganancias solares entre un 20 % y un 55 %, disminuyendo la demanda anual de refrigeración de 2.970 kWh/año en el escenario de referencia a 2.420 kWh/año con PVSD y 2.484 kWh/año con protección pasiva. Desde el punto de vista energético, el escenario con PVSD presentó una generación anual de electricidad superior (16.250 kWh/año) a la del sistema fotovoltaico en cubierta (10.624 kWh/año), así como un mayor excedente energético, aunque con limitaciones de autoconsumo debido al desfase entre generación y demanda. En términos ambientales, las emisiones totales alcanzaron 13,69 kg CO₂eq/m²·año en el escenario sin protección, 10,96 kg CO₂eq/m²·año con PVSD y 10,89 kg CO₂eq/m²·año con protección pasiva. El balance de carbono evidenció diferencias significativas entre los escenarios, alcanzando 13,69 kg CO₂eq/m²·año en el escenario de referencia, 1,55 kg CO₂eq/m²·año en el escenario pasivo y –3,32 kg CO₂eq/m²·año en el escenario con PVSD. Este último presentó el mejor desempeño a lo largo de un ciclo de vida de 50 años, reduciendo las emisiones operacionales en más del 60 %. Los resultados sugieren que los dispositivos de sombreado fotovoltaico pueden incorporarse como una estrategia eficaz de descarbonización para edificios de energía neta casi nula (nZEB) en climas tropicales.

Palabras clave: Dispositivos de Sombreamiento Fotovoltaico; Descarbonización; Evaluación del Ciclo de Vida; Edificios de Energía Neta Casi Nula.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipologias de integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios	34
Figura 2: Sistemas fotovoltaicos integrados às edificações (BIPV) como telhado solar	34
Figura 3: Fachada com sistemas fotovoltaicos integrados às edificações (BIPV)	35
Figura 4: Edifício <i>com</i> sistemas fotovoltaicos integrados às edificações (BIPV) em janelas	35
Figura 5: Telhas e persianas <i>com</i> sistemas fotovoltaicos integrados às edificações (BIPV)	36
Figura 6: Tipos de dispositivos PVSD	38
Figura 7: Estrutura da Avaliação de Ciclo de Vida	41
Figura 8: Estrutura da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para edifícios	43
Figura 9: Fluxograma metodológico da pesquisa	58
Figura 10: Fluxograma metodológico das diretrizes PRISMA	60
Figura 11: Localização do LabZero - UnB em relação com Campus Darcy Ribeiro	64
Figura 12: Planta baixa do LabZero – UnB	65
Figura 13: Representação esquemática das principais estratégias ativas e passivas do LabZero – UnB	66
Figura 14: Disposição dos sistemas fotovoltaicos do LabZero – UnB	66
Figura 15: Fluxograma conceitual da estrutura de funcionamento da planilha de ACV	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: <i>Benchmarks</i> de carbono incorporado para edifícios de escritório na América do Norte	53
Tabela 2: Média de <i>benchmarks</i> de carbono incorporado para edifícios de escritório no continente Europeu	53
Tabela 3: Média de <i>benchmarks</i> de carbono incorporado para edifícios de escritório por região da Europa	54
Tabela 4: Busca inicial da revisão sistemática de literatura	61
Tabela 5: Buscas complementares da revisão de literatura	61
Tabela 6: Artigos complementares	62
Tabela 7: Características dos sistemas fotovoltaicos	67
Tabela 8: Configurações originais do modelo no <i>DesignBuilder</i>	71
Tabela 9: Propriedade das superfícies de proteção	73
Tabela 10: Aba de descrição geral da planilha de ACV	76
Tabela 11: Dados de entrada, levantamento quantitativo do sistema construtivo do LabZero – UnB	77
Tabela 12: Dados de entrada, levantamento quantitativo dos materiais dos sistemas fotovoltaicos do LabZero – UnB	81
Tabela 13: Aba de base de dados	83
Tabela 14: Fator de emissão de carbono brasileiro	89
Tabela 15: Consumo total esperado	100
Tabela 16: Principais resultados para a ACV dos três cenários	101

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Emissão de CO ₂ globais no setor da construção	22
Gráfico 2: Participação dos setores no perfil das emissões brasileiras em 2023	31
Gráfico 3: Média de temperaturas máximas no Distrito Federal	69
Gráfico 4: Média de temperaturas mínimas no Distrito Federal	69
Gráfico 5: Autoconsumo, injeção à rede e consumo da rede anuais do Cenário 2	93
Gráfico 6: Autoconsumo, injeção à rede e consumo da rede anuais do Cenário 3	95
Gráfico 7: Balanço térmico com as principais fonte de calor do LabZero – UnB	96
Gráfico 8: Ganhos solares externos nos três cenários analisados do LabZero – UnB	97
Gráfico 9: Demanda de energia para ar-condicionado para os três cenários	99
Gráfico 10: Resultados das emissões incorporadas e operacionais totais para o Cenário 1	103
Gráfico 11: Emissões incorporadas e operacionais por etapa de ciclo de vida para o Cenário 1	103
Gráfico 12: Resultados das emissões incorporadas e operacionais totais para o Cenário 2	105
Gráfico 13: Emissões incorporadas e operacionais por etapa de ciclo de vida para o Cenário 2	106
Gráfico 14: resultados das emissões incorporadas e operacionais totais para o Cenário 3	107
Gráfico 15: Emissões incorporadas e operacionais por etapa de ciclo de vida para o Cenário 3	108
Gráfico 16: Participação dos principais materiais na etapa (A1-A3) de maior influência no ciclo de vida dos três cenários	110
Gráfico 17: Balanço de carbono evitado do LabZero – UnB	111

Gráfico 18: Balanço de carbono final	112
Gráfico 19: Evolução do balanço de carbono evitado ao longo de 50 anos	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de Ciclo de vida
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaic</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CECarbon	Construção Eficiente em Carbono
Codeplan	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
CO₂	Gás Carbônico
COP	Conferência das Nações Unidas
DAP	Declarações Ambientais de Produto
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPBT	<i>Energy Payback Time</i>
EPD	<i>Environmental Product Declarations</i>
ERF	<i>Energy Return Factor</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP/PAG	<i>Global Warming Potential</i> / Potencial de Aquecimento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICS	Instituto de Clima e Sociedade
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IES	Instituições de Ensino Superior
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KWH	Quilowatt-hora
KWP	Quilowatt-pico
LACAM	Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética

LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
M²	Metro quadrado
NZEB	<i>Nearly Zero Energy Building</i>
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
PVSD	<i>Photovoltaic Shading Devices</i>
SCOPUS	Base de dados científica internacional
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SHC	<i>Solar Heating and Cooling Programme</i>
SIDAC	Sistema de Informações de Desempenho Ambiental da Construção
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNB	Universidade de Brasília
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i>
ZEB	<i>Zero Energy Building</i>

Sumário

Capítulo I - Introdução

1.	Introdução	22
1.1.	Objetivos	27
1.1.1.	Objetivo geral	27
1.1.2.	Objetivos específicos	27
1.2.	Estrutura da dissertação	28

Capítulo II - Referencial teórico

2.1.	Mudanças climáticas e Gases de Efeito Estufa (GEE) no Brasil	30
2.2.	Redução de carbono no entorno construído	31
2.3.	Edifícios de Balanço Energético Nulo ou Quase Nulo (ZEB ou nZEB)	32
2.4.	Sistemas Fotovoltaicos Integrados às Edificações (BIPV)	33
2.5.	Sistemas Fotovoltaicos Integrados às Edificações (BIPV) como Dispositivos Fotovoltaicos de Sombreamento (PVSD)	37
2.6.	Sistemas fotovoltaicos e seus efeitos no desempenho térmico e energético	39
2.7.	Métodos de avaliação de Gases de Efeito Estufa (GEE) incorporados às edificações	40
2.7.1.	Diretrizes para implementação da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) no Brasil	40
2.7.2.	Sistema de Informação de Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC)	45
2.7.3.	Calculadora de Consumo Energético e Emissões de Carbono em Edificações (CECarbon)	47
2.7.4.	Declaração Ambiental de Produto (DAP) ou <i>Environmental Product Declarations</i> (EPDs)	48
2.7.5.	Ecoinvent	49
2.7.6.	Contribuição das emissões incorporadas e operacionais na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de edifícios nZEB	50
2.7.7.	Balanço de carbono evitado	51
2.7.8.	<i>Benchmarks</i> de carbono incorporado em edifícios de escritório	52

Capítulo III - Materiais e método

3.1.	Método de pesquisa	57
------	--------------------------	----

3.2.	Fase 1 – Revisão Sistemas de Literatura	60
3.3.	Fase 2 – Caracterização do objeto de estudo	62
3.3.1.	O LabZero – UnB	63
3.3.2.	Geração local de fonte solar.....	66
3.3.3.	Aspectos climáticos e disponibilidade de irradiação solar	68
3.3.4.	Definição dos cenários de análise.....	70
3.4.	Fase 3 – Simulações e cálculos.....	70
3.4.1.	Avaliação do impacto termoenergético dos Dispositivos de Sombreamento Fotovoltaico (PVSD) na edificação	70
3.5.	Avaliação ambiental: emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).....	74
3.5.1.	Ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).....	74
3.5.2.	Cálculo operacional e fator de carbono	88
3.5.3.	Cálculo de balanço de carbono evitado	90

Capítulo IV - Resultados e discussão

4.1.	Resultados para o impacto termoenergético	93
4.1.1.	Geração local de fonte solar fotovoltaica	93
A.	Configuração com sistemas fotovoltaicos na cobertura e PVSD	93
B.	Configuração com sistemas fotovoltaicos apenas na cobertura	95
4.1.2.	Impacto térmico dos dispositivos de sombreamento fotovoltaico (PVSD).....	96
4.2.	Resultados para avaliação ambiental: emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)	100
4.2.1.	Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).....	100
4.2.2.	Resultado do Cenário 1 – edificação sem proteção solar	102
4.2.3.	Resultado do Cenário 2 – edificação com proteção solar ativa	105
4.2.4.	Resultado do Cenário 3 – edificação com proteção solar passiva	107
4.2.5.	Participação dos principais materiais nas emissões para os três cenários analisados.	109
4.2.6.	Balanço de carbono evitado.....	111
4.2.7.	Implicações projetuais da adoção de estratégias de sombreamento	114

Capítulo V - Considerações Finais

5.	Conclusão	117
----	-----------------	-----

6.	Bibliografia.....	121
	Apêndices.....	133

01

Capítulo 01

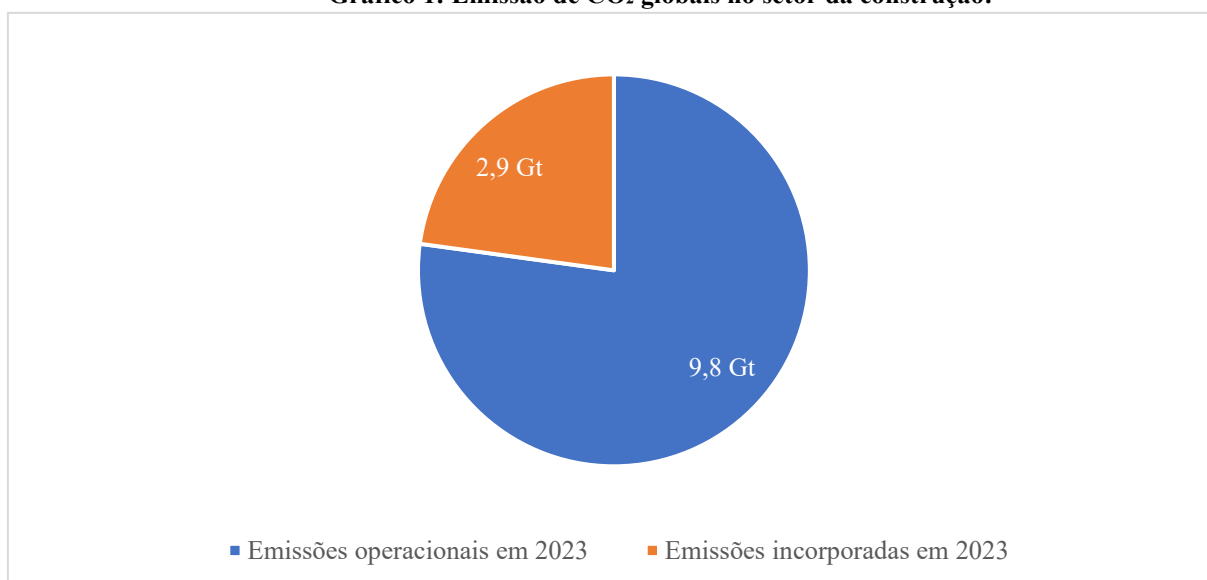
Introdução

1. Introdução

A liberação expressiva de gases de efeito estufa (GEE), responsável por alterações significativas na atmosfera, constitui uma das principais ameaças ambientais enfrentadas pela humanidade. A produção e o consumo de energia estão entre os principais fatores que impulsionam o crescimento dessas emissões. No início de 2025, conforme dados do *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2025), o setor da construção civil, incluindo o carbono incorporado nos materiais, ainda enfrenta o desafio de sua elevada contribuição para as emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) associadas à energia.

A produção de energia a partir de combustíveis fósseis é a principal fonte de contaminação do ar, da água e do solo. Esses combustíveis representam um dos principais fatores do aquecimento global, uma vez que emitem CO₂ e outros GEE, que retêm calor na atmosfera (Godinho, 2023). Em 2023, as edificações foram responsáveis por 32% da demanda global de energia e por 34% das emissões de CO₂ (UNEP, 2025). As emissões operacionais, geradas durante a operação da edificação ao longo de sua vida útil, alcançaram 9,8 Gt, enquanto o carbono incorporado, proveniente das etapas de produção dos materiais e da construção das edificações, somou cerca de 2,9 Gt (Gráfico 1).

Gráfico 1: Emissão de CO₂ globais no setor da construção.



Fonte: Adaptado, UNEP (2025).

Embora o panorama global indique elevada participação do setor de edificações no consumo de energia e nas emissões de CO₂, o contexto brasileiro apresenta especificidades relevantes. A matriz elétrica nacional é predominantemente renovável, o que resulta em menores fatores de emissão associados ao consumo de eletricidade durante a fase operacional

das edificações. Nesse contexto, as emissões incorporadas aos materiais de construção assumem importância crescente na avaliação do desempenho ambiental.

No Brasil, a construção civil exerce impacto ambiental significativo, tanto pelo elevado consumo de energia associado à operação das edificações quanto pelas emissões de GEE decorrentes da produção de materiais construtivos, especialmente cimento e aço, conforme dados recentes da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), com base no Balanço Energético Nacional (EPE, 2025). O setor da construção assume, portanto, papel estratégico na mitigação climática, em razão de sua forte interdependência com os setores de energia e processos industriais, bem como de seu potencial de redução de emissões ao longo de todo o ciclo de vida das edificações (EPE, 2025).

Diante desse cenário, impõe-se o desafio de estabelecer um equilíbrio entre o crescente aumento da demanda por energia, impulsionado pelo desenvolvimento urbano e tecnológico, e os impactos associados ao setor da construção civil, especialmente no que se refere às emissões de GEE. Considerando as intensas mudanças climáticas, torna-se indispensável adotar práticas mais sustentáveis e buscar formas eficientes de geração de energia que minimizem seus impactos ambientais (Godinho, 2023).

A crescente conscientização ambiental tem impulsionado o uso de fontes de energia renovável, que se destacam como estratégias eficazes para a redução do consumo de combustíveis fósseis. Como consequência, essas fontes contribuem para a diminuição da poluição atmosférica e para o enfrentamento das mudanças climáticas (Dassi *et al.*, 2015). No setor da construção civil, os Edifícios de Balanço Energético Nulo (*Zero Energy Building* – ZEB) e os Edifícios de Balanço Energético Quase Nulo (*Nearly Zero Energy Building* – nZEB) são vistos como estratégias para a redução do consumo energético, ao combinarem soluções de eficiência energética com a geração local de energia a partir de fontes renováveis (Amorim *et al.*, 2020). Esse tipo de edificação tem potencial para contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas, além de promover benefícios como o aumento da resiliência e da segurança energética em contextos urbanos e institucionais (Agostino; Mazzarella, 2019).

No Brasil, a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), coordenada pelo Inmetro no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), vem passando por mudanças importantes que afetam, direta e indiretamente, as emissões de CO₂ (INMETRO, 2022). A etiqueta avalia a envoltória e os sistemas prediais, como iluminação e condicionamento de ar,

com o objetivo de reduzir o consumo de energia da rede e incentivar o uso de fontes renováveis no próprio local. Com menor consumo de eletricidade e gás, a edificação também reduz seu impacto associado aos GEE. A meta principal é alcançar o padrão nZEB até 2035, a partir de 2027, a ENCE deverá se tornar obrigatória de forma gradual no licenciamento de novas edificações públicas e privadas (BRASIL, 2025). As diretrizes da Instrução Normativa para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), aprovadas pela Portaria Inmetro nº 309/2022, incluem um procedimento específico para a quantificação das emissões de CO₂ da edificação em comparação com um modelo de referência (INMETRO, 2022). Esse procedimento também considera a geração local de energia renovável, como a energia solar fotovoltaica, permitindo contabilizar a redução das emissões associadas à eletricidade demandada da rede.

A relevância dessa abordagem está diretamente relacionada às características da matriz elétrica brasileira, de acordo com a EPE (2025), aproximadamente 88,0% da eletricidade brasileira é composta por fontes renováveis, sendo a maior parte proveniente de usinas hidrelétricas de grande porte, cuja implantação está associada a elevados impactos ambientais. A diversificação da matriz energética por meio da eletricidade solar pode trazer diversas vantagens, como maior segurança energética, redução de custos, estímulo à inovação e proteção ambiental. O recurso solar no Brasil é abundante, estável e disponível em quase todo o território nacional, permitindo a instalação de sistemas de geração distribuída (GD) no próprio ponto de consumo e promovendo redução de custos com energia, maior autonomia energética e benefícios ambientais (Cronemberger; Martín, 2020). Nos últimos anos, a fonte solar, especialmente na modalidade de oferta interna de energia, tem apresentado crescimento proporcional expressivo na matriz elétrica brasileira, consolidando-se como um dos principais vetores da transição energética no país (EPE, 2025). Para Maka e Alabid (2022), a energia solar se destaca como uma das tecnologias renováveis mais relevantes, por ser ambientalmente amigável, representar uma fonte abundante de energia e contribuir significativamente para o desenvolvimento sustentável. Essa contribuição ocorre, sobretudo, por sua operação isenta de poluentes, pela baixa exigência de manutenção e pela longa vida útil dos sistemas.

Nesse contexto, de acordo com Yan (2019), os sistemas fotovoltaicos integrados em edifícios (*Building Integrated Photovoltaic* – BIPV) apresentam grande potencial para suprir parcela significativa das demandas por eletricidade das edificações. Além disso, esses sistemas auxiliam na mitigação de desafios associados à expansão da energia solar convencional, como a ocupação do solo. Diante desses benefícios, observa-se um crescimento progressivo da adoção

de sistemas BIPV, os quais se configuram como uma estratégia eficaz para a redução das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida das edificações (Yan, 2019).

Entre as diversas aplicações arquitetônicas dos sistemas BIPV, os dispositivos fotovoltaicos de sombreamento (*Photovoltaic Shading Devices* – PVSD), também denominados *brises* fotovoltaicos, destacam-se como uma solução particularmente versátil e adequada para climas tropicais. Esses elementos associam estratégias passivas de controle solar à geração ativa de energia elétrica, bloqueando a incidência de radiação solar direta sobre as aberturas e reduzindo as cargas térmicas de refrigeração dos ambientes internos, ao mesmo tempo em que produzem eletricidade (Chivelet; Kapsis; Frontini, 2024; Cronemberger; Martín, 2020). Sua aplicação oferece benefícios energéticos adicionais ao ampliar a área útil de geração de energia nas fachadas, indo além das tradicionais instalações em coberturas. Além disso, representa uma oportunidade estética e formal, dada a facilidade de integração arquitetônica.

Os benefícios ambientais decorrentes da redução das emissões de CO₂ proporcionados pela geração de energia solar são amplamente reconhecidos. Entretanto, quando se trata de sistemas BIPV e/ou PVSD, o debate ainda é limitado, uma vez que envolve condicionantes adicionais, como os efeitos térmicos sobre a demanda energética, a vida útil das edificações, os aspectos operacionais e a relação temporal entre geração e consumo de energia, entre outros fatores.

Para compreender os reais impactos ambientais desses sistemas aplicados a edificações ZEB ou nZEB, torna-se necessário o emprego de metodologias robustas de avaliação, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). De acordo com a ABNT NBR ISO 14040 (2009), a ACV é uma metodologia que permite avaliar os potenciais impactos ambientais associados a todas as etapas do ciclo de vida de um produto, sistema ou construção, desde a extração de matérias-primas, passando pela produção, transporte ao canteiro de obras, instalação, substituição, uso operacional de energia e descarte final.

Portanto, a principal questão que norteia esta pesquisa é: **a integração de dispositivos PVSD em edificações nZEB configura-se como uma estratégia eficaz para a redução das emissões de CO₂ ao longo de todo o ciclo de vida?**

Nessa perspectiva, as instituições de ensino superior (IES) possuem papel fundamental na gestão de impactos ambientais em diferentes frentes, incluindo a condução de estudos e o desenvolvimento de pesquisas; a educação e a conscientização da comunidade acadêmica; a implementação de práticas operacionais sustentáveis; e a influência política e social (Silva *et*

al., 2019). Uma importante iniciativa da Universidade de Brasília (UnB) nessa direção é a construção do LabZero-UnB, uma edificação nZEB cujos resultados de monitoramento servirão como base de dados para o desenvolvimento de uma política nacional voltada à implementação desse tipo de edificação no país. Altamente eficiente em termos de produção e demanda de energia (Amorim *et al.*, 2020), o projeto adota o conceito de fachada ativa multifuncional, utilizando dispositivos PVSD em sua fachada norte. Essas características justificam sua utilização como objeto de estudo desta pesquisa.

Os resultados deste trabalho contribuirão, primeiramente, para duas pesquisas em desenvolvimento no Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética da Universidade de Brasília (LACAM/UnB): “ZEB – Zero *Energy* Brasília: Plano estratégico de eficiência energética para parque construído de balanço energético nulo” e “Envoltórias solares para edifícios de balanço energético nulo: desafios e perspectivas na climatologia brasileira”. Adicionalmente, considerando a necessidade de reduzir os impactos associados às emissões de CO₂ e outros GEE na atmosfera, bem como os benefícios inerentes aos sistemas fotovoltaicos, este trabalho busca contribuir para a elaboração de diretrizes e para a produção de dados que sustentem o avanço de pesquisas voltadas à implementação de medidas de eficiência energética em edificações. Além disso, visa avaliar os benefícios ambientais decorrentes da incorporação da geração de energia por meio de dispositivos PVSD, com ênfase especial em sua aplicação como *brises* em climas quentes.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é analisar a contribuição dos dispositivos PVSD do edifício demonstrativo LabZero – UnB para mitigar as emissões de GEE associadas à sua construção e operação, considerando sua dupla função como sistema ativo de geração de energia e como elemento passivo na redução da carga térmica dos ambientes.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Examinar o impacto termoenergético dos dispositivos PVSD na redução da carga térmica durante a fase operacional da edificação;
- Avaliar as emissões de GEE associadas a todas as etapas do ciclo de vida (A1-A3, A5, B4, B6, C1, C2, C3-C4) dos diversos sistemas construtivos do LabZero – UnB;
- Estimar o balanço de carbono evitado da edificação, considerando a geração de energia *in loco*.

1.2. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos.

O Capítulo 1 corresponde à introdução, na qual é apresentado o contexto do estudo, destacando a relevância do setor da construção civil no cenário atual de mudanças climáticas. São também discutidas estratégias de redução de emissões de carbono no setor, com ênfase em edifícios de balanço energético nulo e tecnologias de geração de energia. Além disso, destaca-se o uso da ACV para a quantificação das emissões de carbono incorporado e operacional.

O Capítulo 2 apresenta a revisão de literatura, estruturada no referencial teórico, que contextualiza a pesquisa a partir de estudos que fundamentam o método adotado. O conteúdo aborda temas relacionados às mudanças climáticas e às emissões de gases de efeito estufa, estratégias de redução de carbono no ambiente construído, o conceito de edificações nZEB, os sistemas BIPV e sua dupla função (PVSD), bem como a metodologia de ACV, incluindo diretrizes de cálculo e levantamento de dados.

O Capítulo 3 descreve a metodologia e os materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa. Nessa seção, são detalhados os *softwares* empregados para análises termoeenergética dos dispositivos PVSD e as equações de cálculo utilizadas para a obtenção dos resultados de ACV.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e a discussão, nos quais são analisados os resultados obtidos a partir dos métodos definidos, estabelecendo-se comparações com a literatura, com o objetivo de fortalecer a interpretação dos dados e identificar convergências e lacunas.

Por fim, o Capítulo 5, referente às considerações finais, sintetiza os principais resultados da pesquisa, discute as implicações para o setor da construção civil, apresenta as limitações do estudo e aponta direções para pesquisas futuras.

02

Capítulo 02

Referencial teórico

2. Referencial teórico

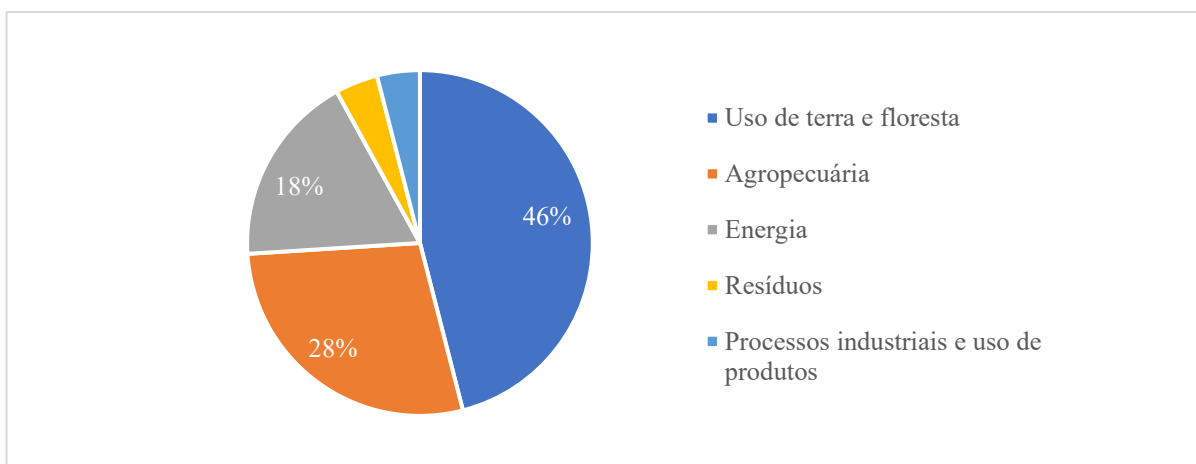
O presente capítulo apresenta os fundamentos teóricos dos principais temas explorados nesta pesquisa. São discutidos aspectos relacionados às mudanças climáticas e à emissão de GEE no Brasil, bem como estratégias de redução de carbono no setor da construção. São abordadas a integração dos sistemas BIPV como dispositivos PVSD como estratégias complementares de eficiência energética e conforto térmico.

Adicionalmente, são apresentados métodos de avaliação dos GEE incorporados em edificações, com base nas diretrizes das normas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044, que orientam a aplicação da ACV no Brasil. Também são exploradas ferramentas e sistemas de apoio, como o Sistema de Informações de Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC), as Declarações Ambientais de Produto (DAPs) e a plataforma *CECarbon*, que oferecem subsídios importantes para a quantificação dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das construções.

2.1. Mudanças climáticas e Gases de Efeito Estufa (GEE) no Brasil

As mudanças climáticas constituem um dos principais desafios contemporâneos, com impactos amplos sobre os sistemas ambientais, sociais e econômicos. De acordo com a *World Wide Fund for Nature* (2022), tais transformações decorrem, em grande medida, da intensificação das atividades humanas, sobretudo da queima de combustíveis fósseis e da mudança no uso da terra, que elevam as concentrações de GEE na atmosfera e contribuem para o aumento da temperatura média global.

No contexto brasileiro, as emissões brutas de GEE totalizam aproximadamente 2,3 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente em 2023, representando uma redução de 12% em relação a 2022 e configurando a maior queda registrada desde 2009. Essa diminuição decorre, principalmente, da expressiva redução das emissões associadas ao desmatamento na Amazônia, resultante da retomada de políticas de comando e controle ambiental. Ainda assim, as mudanças de uso da terra e florestas permanecem como a principal fonte de emissões no país, conforme o Gráfico 2, respondendo por 46% do total, seguidas pelos setores de agropecuária (28%), energia (18%), processos industriais e uso de produtos (4%) e resíduos (4%) (SEEG, 2024).

Gráfico 2: Participação dos setores no perfil das emissões brasileiras em 2023.

Fonte: Adaptado, SEEG (2024).

Apesar da queda nas emissões associadas ao uso da terra, os demais setores da economia apresentam crescimento em 2023, acompanhando a recuperação da atividade econômica nacional. O setor de energia, em particular, registra crescimento de 1,1%, alcançando cerca de 420 MtCO₂eq, o que reflete o aumento do consumo de combustíveis fósseis, especialmente no setor de transportes. Esse comportamento evidencia que, embora o controle do desmatamento seja decisivo para a redução das emissões nacionais, a trajetória de descarbonização do país depende, de forma crescente, de transformações estruturais nos setores energéticos e produtivos, incluindo aqueles diretamente associados à construção civil e ao ambiente construído (SEEG, 2024).

2.2. Redução de carbono no entorno construído

Com os dados apresentados anteriormente, quando comparados, o setor de edificações ainda recebe atenção relativamente limitada em iniciativas específicas de mitigação de emissões, apesar de sua relevância indireta no contexto energético e industrial do país.

Nas últimas duas décadas, observa-se um crescimento expressivo do consumo de energia em edificações, tanto residenciais quanto comerciais, impulsionado pela expansão do estoque construído e pela intensificação da demanda por serviços energeticamente intensivos, como a climatização artificial. Esse comportamento eleva, de forma consistente, a participação das edificações no consumo nacional de eletricidade, reforçando seu papel estratégico no debate sobre eficiência energética e redução de emissões associadas ao setor energético (SEEG, 2024). Do ponto de vista do consumo final, o setor residencial apresenta a maior participação na demanda energética das edificações, superando os setores comercial e público. Nesse contexto, a implementação de políticas públicas estruturadas de eficiência energética nas edificações

apresenta elevado potencial para mitigar impactos ambientais e reduzir as emissões de GEE associadas ao consumo de energia.

Nesse sentido, o Brasil vem estruturando, desde a década de 1980, uma base institucional voltada à eficiência energética, com destaque para a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), o estabelecimento de mecanismos regulatórios, como a Lei nº 9.991/2000, e, mais recentemente, a incorporação da eficiência energética ao planejamento estratégico nacional, por meio do Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEEf) e do Plano Nacional de Energia (PNE) 2050, consolidando-a como um dos principais instrumentos para a transição energética e a mitigação de emissões no país (MME, 2025).

No âmbito das estratégias de mitigação das emissões de CO₂ no ambiente construído brasileiro, destaca-se a iniciativa lançada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), com horizonte de implementação até 2029, voltada à redução das emissões de GEE no setor da construção civil. O projeto contempla, entre suas diretrizes, o incentivo à implantação de edificações nZEB, o fortalecimento de políticas públicas setoriais, a disseminação de boas práticas construtivas e a capacitação tecnológica, visando à ampliação da eficiência energética tanto em novas edificações quanto no parque edificado existente (MCTI, 2023).

Outra vertente para a redução de CO₂ está no papel das universidades e centros de pesquisa brasileiros, que desenvolvem estudos voltados à eficiência energética, um vetor essencial para a mitigação de GEE. Nesse contexto, destaca-se o LabZero – UnB, uma edificação demonstrativa de alta eficiência energética, com balanço próximo de zero (nZEB). Seu objetivo principal é investigar estratégias para aprimorar o desempenho energético e identificar oportunidades de redução do consumo em edifícios que adotam conceitos nZEB (Amorim *et al.*, 2020).

2.3. Edifícios de Balanço Energético Nulo ou Quase Nulo (ZEB ou nZEB)

Como visto, já existem iniciativas que têm como objetivo incentivar, no meio urbano, a eficiência energética e a redução de GEE. Nessa perspectiva, como alternativa para mitigar os impactos do parque construído, surge o conceito de edificações ZEB ou nZEB (Amorim *et al.*, 2020).

Um edifício ZEB ou nZEB é caracterizado por apresentar elevado desempenho energético, de modo que sua demanda anual de energia seja nula ou próxima de zero, sendo

suprida majoritariamente por fontes renováveis, seja por meio de geração local ou por fontes externas ao edifício (Palacios *et al.*, 2017). Segundo Agostino e Mazzarella (2019), esse tipo de edificação deve, prioritariamente, reduzir a demanda energética por meio de estratégias passivas, empregar sistemas ativos de alta eficiência e assegurar que a energia produzida seja equivalente ao consumo total do edifício ao longo de um período anual.

O conceito é adotado como referência em diretrizes nacionais de eficiência energética. O Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) em parceria com o PROCEL, constitui o principal instrumento nacional de avaliação do desempenho energético de edificações, por meio da atribuição da Etiqueta de Eficiência Energética (A a E), considerando a envoltória, os sistemas prediais e o consumo de energia (INMETRO, 2021).

Dessa forma, os conceitos de ZEB ou nZEB, aliados aos mecanismos nacionais de etiquetagem energética, configuram referenciais complementares para a promoção de edificações de baixo consumo energético e para a redução das emissões de GEE associadas ao ambiente construído no Brasil.

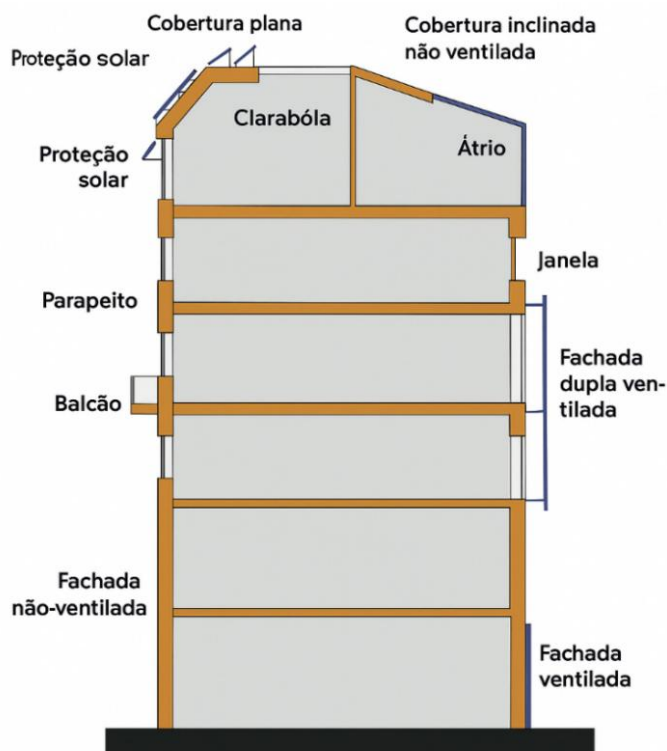
2.4. Sistemas Fotovoltaicos Integrados às Edificações (BIPV)

De acordo com Silva (2024), o conceito de BIPV desponta como uma resposta à busca por eficiência energética nas construções, visando integrar soluções sustentáveis e eficazes. Ao contrário dos sistemas fotovoltaicos convencionais, geralmente instalados nos formatos *on-grid* ou *off-grid*, o BIPV é concebido para se integrar diretamente à estrutura da edificação.

Segundo Silva (2024) o desenvolvimento do sistema BIPV teve início por volta da década de 1970, impulsionado principalmente pela crise do petróleo e pela necessidade urgente de buscar fontes alternativas de energia. No entanto, foi somente nas décadas de 1990 e 2000 que os avanços tecnológicos viabilizaram a produção de painéis solares com maior eficiência.

O BIPV obteve avanço nos últimos anos, impulsionado pelo aprimoramento das tecnologias de células solares e pela redução dos custos de produção, possibilitando uma implementação mais acessível em edifícios (Gonçalves *et al.*, 2019). Existem diversas configurações de sistemas BIPV, cada uma desenvolvida para integrar a elementos específicos das edificações, apresentando características próprias, como é possível observar na Figura 1 (Cronemberger, 2022).

Figura 1: Tipologias de integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios.



Fonte: Cronemberger (2022).

Segundo Malhotra e Schulz (2017), um dos modelos mais comuns é o BIPV aplicado em telhados (Figura 2), nos quais os módulos fotovoltaicos assumem a função das telhas, aproveitando-se do fato de serem superfícies diretamente expostas à radiação solar.

Figura 2: Sistemas fotovoltaicos integrados às edificações (BIPV) como telhado solar.



Fonte: Portal Solar. Disponível: <https://www.portalsolar.com.br/conheca-telha-solar-fotovoltaica>. Acesso: 23 de maio de 2025.

O BIPV aplicado em fachadas representa outra configuração relevante, por integrar-se à definição formal da linguagem arquitetônica da edificação. Essa aplicação deve ser cuidadosamente avaliada, uma vez que a disponibilidade de irradiação solar em superfícies verticais (Figura 3) é particularmente dependente da orientação (Malhotra; Schulz, 2017).

Figura 3: Fachada com sistemas fotovoltaicos integrados às edificações (BIPV).



Fonte: Portal Solar. Disponível: <https://www.portalsolar.com.br/paineis-solares-integrados-a-construcao-bipv.html>. Acesso: 23 de maio de 2025.

Outra aplicação da tecnologia BIPV ocorre por meio de janelas dotadas com vidros fotovoltaicos, capazes de gerar de energia elétrica sem comprometer a transparência ou a entrada de luz natural no ambiente (Figura 4). De maneira semelhante aos *brises* fotovoltaicos, os vidros fotovoltaicos representam uma solução inovadora que permite às esquadrias exercerem dupla função: além de vedar e proteger os ambientes, também contribuem para a geração de energia elétrica (Malhotra; Schulz, 2017).

Figura 4: Edifício com sistemas fotovoltaicos integrados às edificações (BIPV) em janelas.



Fonte: Portal Solar. Disponível: <https://canalsolar.com.br/energia-fotovoltaica-integrada-em-edificios-sistemas-bipv-de-a-a-z/>. Acesso: 26 de maio de 2025.

Embora ainda não sejam amplamente utilizadas, as telhas e persianas fotovoltaicas têm avançado em termos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Essas soluções buscam aliar estética e discrição à edificação, contribuindo de forma funcional tanto para o desempenho construtivo quanto para a geração de energia elétrica (Figura 5) (Malhotra; Schulz, 2017).

Figura 5: Telhas e persianas com sistemas fotovoltaicos integrados às edificações (BIPV).



Fonte: Ciclo Vivo. Disponível: <https://arquitetura.vivadecora.com.br/telha-solar/>. Acesso: 26 de maio de 2025.

Segundo Chivelet, Kapsis e Frontini (2024), a contribuição dos sistemas BIPV vai além da geração de energia elétrica, uma vez que esses sistemas possibilitam a substituição de materiais convencionais da construção civil, potencialmente reduzindo as emissões de carbono associadas às edificações. De forma complementar, Malhotra e Schulz (2017) ressaltam que o BIPV também contribui para a diminuição significativa dos custos operacionais dos edifícios, ao gerar energia localmente e reduzir a dependência de fontes externas.

A integração do BIPV em estratégias de renovação do estoque edificado é aprofundada por Aguacil *et al.* (2024), que avaliam cenários de reabilitação de edifícios residenciais sob a perspectiva da ACV. Os resultados indicam que soluções com BIPV podem alcançar metas energéticas e climáticas de 2050, apresentando períodos de retorno entre 14 e 18 anos.

Entretanto, segundo Cronemberger (2014), a incorporação da energia fotovoltaica na indústria da construção civil ainda representa um grande desafio para arquitetos e engenheiros, sobretudo devido ao alto custo inicial e à escassez de técnicos qualificados para a instalação. No caso dos sistemas BIPV, a dificuldade pode ser ainda maior, uma vez que a sua implementação exige conhecimentos interdisciplinares, envolvendo arquitetos, engenheiros eletricistas e especialistas em *design* sustentável (Gonçalves *et al.*, 2019). Mesmo diante dos desafios, o BIPV apresenta potencial para se consolidar como uma solução padrão nas construções nas próximas décadas, impulsionado pela redução dos custos da tecnologia fotovoltaica e pelo crescente nível de conscientização acerca dos impactos ambientais, especialmente no que se refere à mitigação da pegada de carbono no setor da construção civil (Silva, 2024).

2.5. Sistemas Fotovoltaicos Integrados às Edificações (BIPV) como Dispositivos Fotovoltaicos de Sombreamento (PVSD)

No âmbito dos sistemas BIPV, os dispositivos PVSD configuram uma aplicação específica que reúne, de forma integrada, duas funções complementares: a geração de energia elétrica, caracterizada como um sistema ativo, e o controle solar por sombreamento, que atua de maneira passiva sobre a envoltória da edificação (Goksu; Gedik, 2023). Espera-se que essas tecnologias reduzam a demanda energética para resfriamento no período de verão, enquanto o sistema fotovoltaico produz energia elétrica ao longo do ano, contribuindo, assim, para a redução do consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis e para a mitigação dos impactos ambientais (Goksu; Gedik, 2023).

Em grandes metrópoles, caracterizadas por elevados índices de adensamento populacional, a limitação de áreas disponíveis em coberturas pode comprometer a eficiência dos sistemas fotovoltaicos convencionais, tornando as fachadas uma alternativa estratégica para a geração de energia solar integrada ao edifício. Santos e Costa (2021) argumentam que esses sistemas podem constituir uma solução eficaz para a geração de energia em grandes centros urbanos.

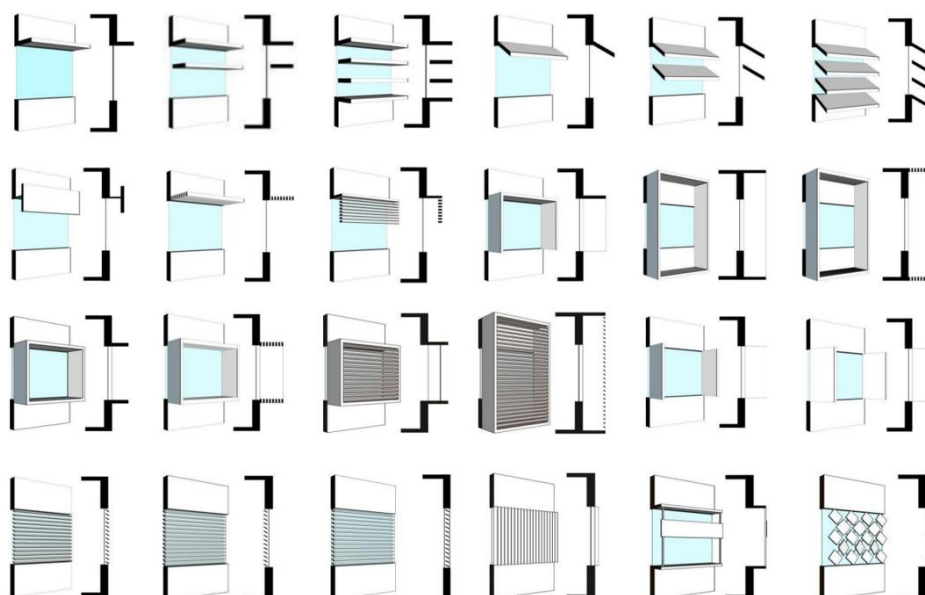
No que se refere especificamente aos dispositivos PVSD, diversos estudos demonstram reduções significativas na demanda energética de resfriamento. Goksu e Gedik (2023) avaliam o uso de PVSD com tecnologia CIS como elemento de sombreamento e verificam reduções de 24,82% a 41,05% no consumo energético líquido em climas amenos e de 35,21% a 56,18% em climas quentes. Além disso, os autores demonstram que a energia gerada ao longo da vida útil pode ser 6,5 a 9,1 vezes superior à energia incorporada na fabricação do sistema, evidenciando desempenho positivo sob a perspectiva energética ao longo do ciclo de vida.

De modo semelhante, Yoo e Choi (2021) mostram que a aplicação de módulos bifaciais como elementos de sombreamento pode reduzir entre 27,5% e 34% a carga de resfriamento, além de contribuir para o controle da irradiância efetiva nas superfícies envidraçadas. Ogbeba e Hoskara (2019), ao avaliarem uma habitação unifamiliar no Chipre, indicam reduções de até 50% no consumo energético em determinados períodos do ano, reforçando o potencial da estratégia em contextos de clima quente. Para Zhang *et al.* (2018), os dispositivos PVSD apresentam maior eficiência técnica em comparação a outros tipos de sistema BIPV. Os autores destacam que esses sistemas exercem diversas funções, com ênfase na capacidade de converter, de forma eficiente e local, a radiação solar indesejada em energia elétrica.

Comparados aos sistemas de sombreamento convencionais, que desperdiçam grande parte do potencial da radiação solar direta, os dispositivos PVSD se destacam por serem projetados e posicionados com orientação e inclinação ideais. Essa configuração permite não apenas bloquear a luz solar indesejada, reduzindo o superaquecimento e o ofuscamento nos ambientes internos, mas também aproveitar essa radiação para a geração de energia, promovendo um uso mais eficiente e sustentável dos recursos solares (Zhang *et al.*, 2018).

No que se refere à geometria e orientação de módulos fotovoltaicos, Shi *et al.* (2022) demonstram que a largura, o posicionamento e a inclinação dos módulos exercem influência sobre a eficiência energética global, especialmente quando considerados os efeitos de sombreamento entre pavimentos em edifícios multiandares. Yang *et al.* (2023) reforçam que parâmetros como *U-value* e *SHGC* são determinantes na otimização do desempenho térmico em diferentes zonas climáticas. Na pesquisa realizada por Goksu e Gedik (2023) sobre o impacto do BIPV como dispositivo PVSD no desempenho energético e na edificação, observa-se que os estudos apresentam padrões semelhantes em diferentes localidades do mundo, variando, em geral, os dados solares específicos de cada região e o *design*. Segundo os autores, essa tecnologia encontra-se teoricamente disponível em, pelo menos, 24 configurações distintas (Figura 6).

Figura 6: Tipos de dispositivos PVSD.



Fonte: ZHANG *et al.* (2018).

Assim, a adoção de dispositivos PVSD em envoltórias envidraçadas pode representar uma estratégia eficiente, ao melhorar o desempenho energético da edificação e,

simultaneamente, contribuir para a geração de energia elétrica, reduzindo os impactos ambientais associados (Zhang *et al.*, 2018).

2.6. Sistemas fotovoltaicos e seus efeitos no desempenho térmico e energético

A instalação de sistemas fotovoltaicos tem sido amplamente investigada não apenas como estratégia de geração de energia, mas também como elemento que influencia a modificação do desempenho térmico interno das edificações. Nesse contexto, destaca-se o papel dos módulos fotovoltaicos, capazes de alterar significativamente as trocas térmicas entre a envoltória e o ambiente externo (Albatayneh *et al.*, 2022).

No estudo elaborado por Albatayneh *et al.* (2022), observa-se que sistemas fotovoltaicos instalados em coberturas atuam como uma barreira física à radiação solar, reduzindo os ganhos térmicos diretos no elemento construtivo. Os autores destacam que essa configuração pode resultar em reduções expressivas no ganho de calor, especialmente em climas quentes, contribuindo para a diminuição da demanda por resfriamento. Os resultados indicam uma redução de aproximada de 10,87% no ganho térmico durante o verão, evidenciando a eficácia do sombreamento promovido pelos módulos.

Entretanto, o impacto dos sistemas fotovoltaicos não se limita à redução das cargas térmicas. A presença dos painéis também altera o balanço energético da cobertura, podendo influenciar negativamente o desempenho em períodos frios. No mesmo estudo, identifica-se um aumento de 3,8% nas perdas de calor durante o inverno, indicando que o efeito de sombreamento pode ser desfavorável em condições nas quais o ganho solar é desejável (Albatayneh *et al.*, 2022).

Por outro lado, no estudo desenvolvido por Brown *et al.* (2020), verifica-se que os sistemas fotovoltaicos podem gerar efeitos térmicos adversos, especialmente quando associados a coberturas de alta refletância. Nesse sentido, os autores identificam que a presença de sistemas fotovoltaicos pode, em alguns casos, aumentar a carga de resfriamento dos edifícios. Tal comportamento ocorre porque os painéis reduzem a capacidade da cobertura de dissipar calor para o céu por meio da radiação de onda longa, funcionando como uma barreira parcial à perda térmica. Além disso, como apenas uma parte da radiação solar incidente é convertida em eletricidade, a fração remanescente é transformada em calor, contribuindo para o aquecimento do sistema. Como resultado, pode haver aumento na demanda por resfriamento, gerando uma penalidade energética que pode atingir até 11,2% da energia produzida pelos próprios módulos. Adicionalmente, os autores observam que a instalação de módulos

fotovoltaicos pode impactar o microclima urbano. Com o aumento da emissão de calor pelas superfícies fotovoltaicas, especialmente durante o período diurno, há uma possível contribuição para o aquecimento do ambiente urbano, em contraste com coberturas refletivas convencionais.

Apesar dos avanços apresentados, os estudos analisados ainda evidenciam limitações importantes, revelando lacunas importantes na literatura. De modo geral, observa-se que as pesquisas tendem a avaliar condições específicas, como climas áridos ou semiáridos, e soluções construtivas particulares, como coberturas altamente refletivas, o que limita a generalização dos resultados para fachadas, por exemplo. Diante disso, verifica-se que os sistemas fotovoltaicos em coberturas apresentam uma dupla função: atuam como geradores de energia e como elementos de modificação térmica. Contudo, seus efeitos são complexos e, por vezes, contraditórios, podendo resultar tanto em benefícios quanto em penalidades energéticas.

2.7. Métodos de avaliação de Gases de Efeito Estufa (GEE) incorporados às edificações

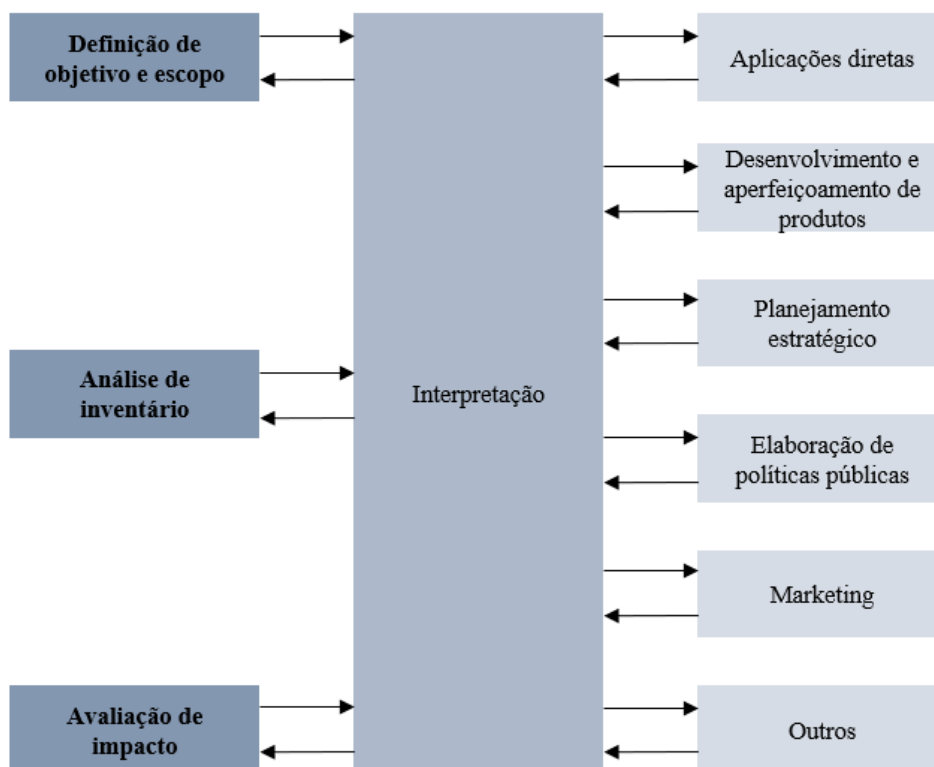
Para a avaliação das emissões de GEE incorporadas às edificações, que abrangem todas as etapas do ciclo de vida, estão disponíveis diversas metodologias de análise.

2.7.1. Diretrizes para implementação da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) no Brasil

A ACV é uma metodologia eficaz para compreender os aspectos e impactos ambientais associados a produtos, tecnologias, sistemas e edificações. Sua abordagem permite avaliar as consequências geradas no meio ambiente ao longo de todo o ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até as etapas de uso e fim de vida (EN 15804:2019).

De acordo com a ABNT NBR ISO 14040 (2009), a ACV é uma das diversas metodologias de gestão ambiental, sendo complementar a métodos como a avaliação de riscos, a avaliação de desempenho ambiental, a auditoria ambiental e a avaliação de impacto ambiental. Entretanto, sua aplicação deve ser analisada caso a caso, uma vez que a mesma pode não ser apropriada para todas as situações ou finalidades. De modo geral, a ACV é dividida em quatro fases, conforme a Figura 7:

Figura 7: Estrutura da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).



Fonte: ABNT NBR ISO 14040 (2009).

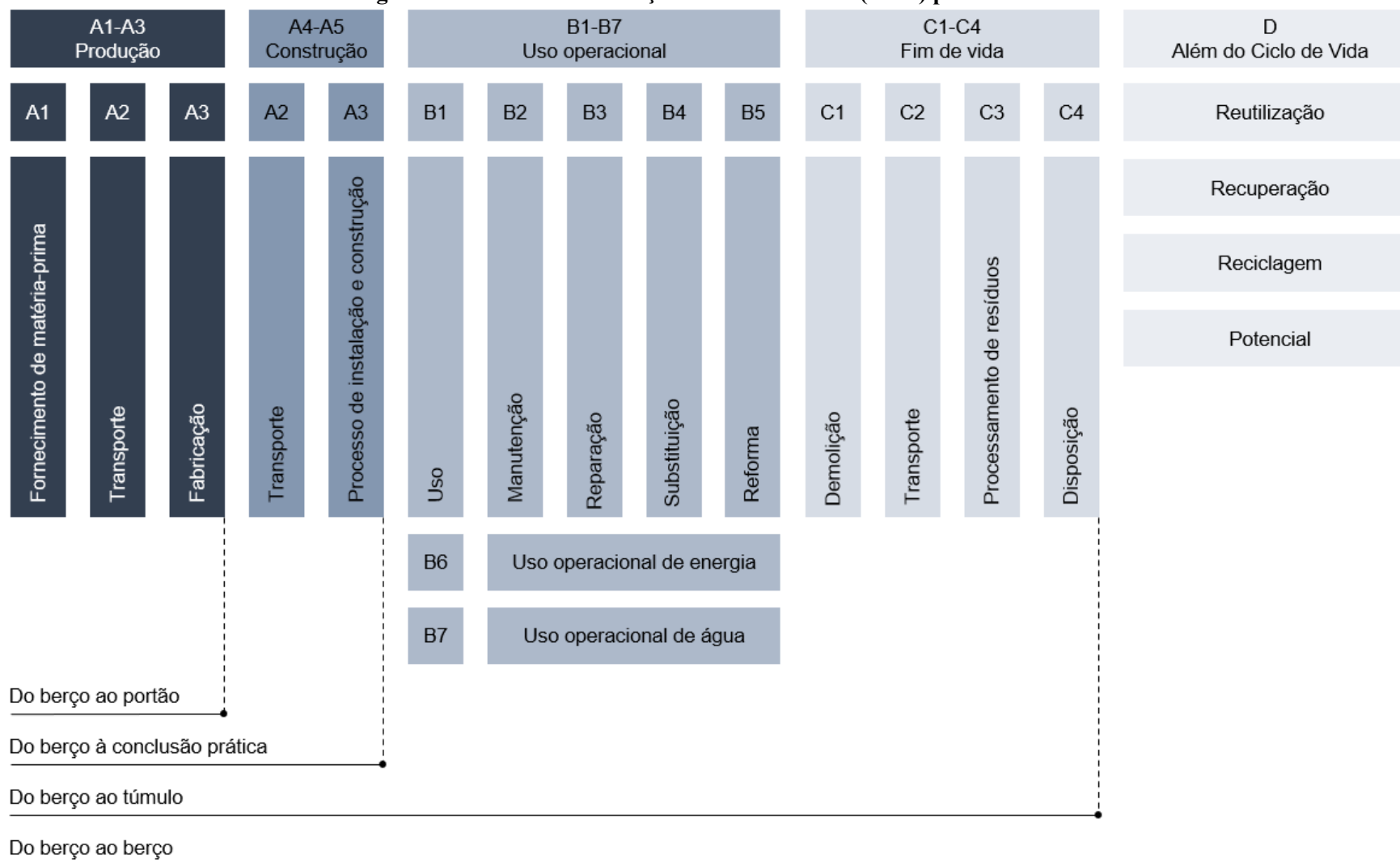
- Definição de objetivo e escopo: etapa na qual são estabelecidos os objetivos do estudo e os limites da análise, orientando as decisões metodológicas e o detalhamento do escopo;
- Análise de inventário do ciclo de vida: fase destinada à coleta de dados sobre materiais, processos e fluxos, bem como à quantificação das entradas (recursos) e saídas (emissões e resíduos) associadas ao sistema analisado;
- Avaliação de impacto do ciclo de vida: etapa que utiliza os dados do inventário para identificar e avaliar como as entradas e saídas de recursos contribuem para diferentes categorias de impacto ambiental;
- Interpretação do ciclo de vida: etapa final em que os resultados são analisados de forma integrada, permitindo a identificação de pontos críticos e subsidiando a tomada de decisão para a melhoria da sustentabilidade do sistema avaliado.

Ao percorrer essas quatro fases, a ACV contribui para a identificação de oportunidades de redução dos impactos ambientais. Nesse sentido, a metodologia pode subsidiar o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de produtos, o planejamento estratégico orientado à sustentabilidade, a formulação de políticas públicas e regulamentações ambientais, bem como

ações de *marketing* voltadas à comunicação da otimização ambiental de produtos. Além disso, a ACV apresenta outras aplicações, como o apoio à gestão ambiental e à promoção da conscientização da sociedade (ABNT NBR ISO 14044, 2019).

Uma vez aplicada às edificações, a estrutura da ACV passa a considerar, de forma sistemática, todas as fases do ciclo de vida do edifício, desde a produção dos materiais até o fim de vida e os potenciais benefícios além do sistema avaliado. Essa estrutura (Figura 8) organiza os processos de maneira lógica e sequencial, permitindo identificar e quantificar as entradas de recursos, o consumo de energia e água, bem como as emissões e resíduos gerados em cada etapa (EN 15804:2019).

Figura 8: Estrutura da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para edifícios.



Fonte: Adaptado, EN 15804:2019.

Para a estrutura do ciclo de vida de edificações, consideram-se as seguintes etapas:

- A1: extração e processamento de matéria-prima;
- A2: transporte para o fabricante;
- A3: fabricação.

As etapas A1, A2 e A3 podem ser agrupadas e declaradas como um módulo agregado de produção (A1-A3). Ainda assim, os três estágios abrangem o fornecimento de todos os materiais, produtos e energia, além do processamento de resíduos até seu destino final ou descarte durante o estágio de produção (EN 15804:2019).

- A4: transporte para o local da obra;
- A5: instalação no edifício.

De acordo com a EN 15804:2019, os estágios A4 e A5 correspondem aos impactos e aspectos relacionados à fase de construção, incluindo os processos desde a produção até o descarte de produtos, bem como perdas de materiais.

- B1: utilização do produto instalado;
- B2: manutenção;
- B3: reparo;
- B4: substituição;
- B5: reforma;
- B6: uso operacional de energia;
- B7: uso operacional de água.

Esse estágio B refere-se à fase em que o produto já foi instalado e está em uso, incluindo os processos e impactos associados à sua operação ao longo da vida útil. Vale ressaltar que B6 e B7 também abrangem o fornecimento e o transporte de materiais e produtos, assim como o consumo de energia e água e o descarte final durante o uso operacional (EN 15804:2019).

- C1: demolição;
- C2: transporte para processamento de resíduos;
- C3: reutilização, recuperação e/ou reciclagem;
- C4: descarte.

A etapa C corresponde à fase final do ciclo de vida do produto, na qual os impactos ambientais estão associados à demolição, ao transporte de resíduos e ao processamento final, que pode incluir reutilização, recuperação, reciclagem e/ou descarte.

- D: potencial de reaproveitamento, recuperação e reciclagem, considerando os impactos e benefícios líquidos.

Segundo a EN 15804:2019, o módulo D é um estágio adicional ao escopo da avaliação, que fornece informações complementares além das geradas no ciclo de vida. Seu uso é relevante em abordagens do tipo berço ao berço. Por fim, a inclusão de diferentes estágios do ciclo de vida pode ser obrigatória ou opcional, dependendo do tipo de abordagem adotada na ACV de um produto (EN 15804:2019). Na perspectiva desta pesquisa, são avaliadas as emissões incorporadas nas etapas de produção (A1-A3), transporte até o canteiro de obra e instalação (A4-A5), substituição (B4), emissões operacionais (B6) e disposição final (C1, C2 e C3-C4).

2.7.2. Sistema de Informação de Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC)

Nesse contexto, ao considerar a ACV como uma metodologia estruturada para avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de produtos, tecnologias, sistemas e edificações, torna-se fundamental dispor de bases de dados consistentes e representativas do contexto local.

No Brasil, uma das principais iniciativas voltadas a esse objetivo é o SIDAC, desenvolvido como um instrumento de apoio à aplicação da ACV no setor da construção civil, fornecendo dados ambientais alinhados aos princípios metodológicos das normas ISO 14040 e ISO 14044. Nesse sentido, a utilização do SIDAC contribui para reduzir incertezas associadas ao uso de bases de dados internacionais, além de ampliar a viabilidade de estudos de ACV em nível nacional (Faria, 2023).

A principal função do SIDAC é permitir o cálculo de indicadores de desempenho ambiental de materiais de construção fabricados no Brasil, especialmente a demanda de energia primária e as emissões de CO₂, considerando a etapa desde a extração das matérias-primas até a fabricação do produto. Esses indicadores baseiam-se em dados brasileiros verificados, o que representa um diferencial importante em relação ao uso de bases de dados internacionais tradicionais (Faria, 2023).

O SIDAC foi concebido para ser utilizado por diferentes *stakeholders* da construção civil, incluindo fabricantes de materiais, projetistas, construtoras, órgãos públicos e

pesquisadores. A plataforma possibilita que fabricantes cadastrem inventários de ciclo de vida de seus produtos, submetam essas informações à revisão por especialistas e publiquem indicadores ambientais, permitindo comparações entre produtos e decisões de compra ambientalmente mais informadas (MME, 2024).

Na sua primeira versão, o SIDAC disponibiliza dados genéricos a 86 produtos de construção, além de 40 insumos básicos, cujos indicadores ambientais abrangem principalmente energia incorporada e emissões de CO₂. A arquitetura da ferramenta também está preparada para incluir uma gama maior de produtos, indicadores adicionais (como demanda de água e geração de resíduos) e dados específicos de fabricantes, conforme estes forem sendo inseridos na base de dados. Isso indica que a plataforma tende a se tornar mais robusta, abrangente e representativa ao longo do tempo (Celere, 2022).

Além de atuar como ferramenta para o cálculo de indicadores ambientais, o SIDAC vem sendo incorporado a projetos e iniciativas de abrangência nacional. Nesse contexto, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) desempenha papel relevante ao articular governo, setor produtivo, academia e sociedade civil, promovendo a inclusão e a disseminação do SIDAC como instrumento de apoio à ACV no Brasil. Essa atuação reforça sua relevância como referência nacional de dados ambientais e amplia sua aplicabilidade em estudos, plataformas e políticas voltadas ao desempenho ambiental de edificações (MME, 2025).

Outra aplicação recente refere-se à adoção da base de dados do SIDAC na Plataforma BIPc (*Benchmark* Iterativo para Projetos de Baixo Carbono), lançada pela Caixa Econômica Federal em parceria com a Universidade de São Paulo (USP). A plataforma utiliza os dados do SIDAC para estimar o carbono incorporado em projetos de edificações, permitindo comparar o desempenho ambiental de diferentes empreendimentos e orientar estratégias de mitigação de impactos, com base em uma referência comparativa nacional (CBCS, 2026).

Em síntese, o SIDAC representa um avanço significativo no contexto brasileiro de ACV e da sustentabilidade aplicada à construção civil, ao oferecer uma base nacional de dados ambientais alinhada à lógica de ciclo de vida e compatível com metodologias internacionais. Sua evolução contínua, com a expansão de produtos, indicadores e integração a outras ferramentas e plataformas, indica seu potencial de consolidar-se como uma referência robusta para análises ambientais, formulação de políticas públicas, desenvolvimento de projetos acadêmicos e promoção de práticas construtivas mais sustentáveis no Brasil.

2.7.3. Calculadora de Consumo Energético e Emissões de Carbono em Edificações (*CECarbon*)

Embora o SIDAC desempenhe papel fundamental ao disponibilizar dados ambientais de materiais e produtos com base nos princípios da ACV, outras ferramentas vêm sendo desenvolvidas no Brasil com foco específico na quantificação das emissões associadas ao processo construtivo. Nesse contexto, destaca-se a *CECarbon*, uma ferramenta digital gratuita voltada ao contexto da construção civil brasileira, cujo objetivo é mensurar a pegada de carbono e o consumo energético incorporado nas edificações. A *CECarbon* foi idealizada pelo Comitê de Meio Ambiente do SindusCon-SP (Comasp), em parceria com a Secretaria Nacional de Habitação (SNH) do Ministério das Cidades, com apoio da Agência Alemã de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ) e patrocínio da *Saint-Gobain* (CECarbon, 2020).

A *CECarbon* permite a avaliação das emissões de GEE e do consumo de energia ao longo de todo o processo construtivo e gera relatórios detalhados, que podem ser utilizados tanto para inventários de obra quanto para inventários corporativos das empresas. A ferramenta segue a metodologia do *Greenhouse Gas Protocol* (GHG Protocol), referência internacional para inventários de emissões, o que confere maior consistência técnica aos resultados obtidos (SindusCon-SP, 2020).

De acordo com SindusCon-SP (2020), além da mensuração direta de emissões e consumo energético, a *CECarbon* pode servir como instrumento de apoio à tomada de decisão sustentável, pois seus resultados subsidiam escolhas de materiais e sistemas construtivos com menor impacto ambiental. Isso a torna uma ferramenta útil não apenas para construtoras e projetistas, mas também para órgãos públicos, instituições financeiras e pesquisadores que buscam integrar critérios de sustentabilidade e baixa emissão às práticas e políticas do setor da construção.

Conforme divulgado no portal *Click Petróleo e Gás* (2023), a *CECarbon* apresenta crescimento contínuo no número de usuários e na sua visibilidade no setor, sendo adotada em diferentes iniciativas no Brasil. Por exemplo, municípios como Campinas integram a ferramenta em seus planos locais de ação climática para monitorar e orientar escolhas mais sustentáveis em obras públicas e privadas. Sua adoção também vem sendo promovida por entidades como a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), em conjunto com o SindusCon-SP, com o objetivo de difundir a cultura de descarbonização entre pequenas e

médias empresas do setor (SindusCon-SP, 2020). A *CECarbon* vem evoluindo gradualmente em suas funcionalidades, com atualizações técnicas, como a integração de Declarações Ambientais de Produto (DAPs) de fabricantes como a *Saint-Gobain*, que ampliam a precisão dos dados e fortalecem sua utilidade para análise comparativa entre materiais (Placo Brasil, 2024).

Em suma, a *CECarbon* configura-se como uma resposta prática às necessidades de mensuração de impacto ambiental no setor da construção civil brasileiro, oferecendo uma ferramenta acessível e alinhada a padrões internacionais para apoiar a transição rumo a uma economia de baixo carbono e decisões construtivas mais sustentáveis.

2.7.4. Declaração Ambiental de Produto (DAP) ou *Environmental Product Declarations* (EPDs)

Enquanto o SIDAC e a *CECarbon*, na condição de ferramentas, fornecem bases de dados de referência e instrumentos de cálculo adequados ao contexto brasileiro, as DAPs representam um nível mais detalhado e específico de informação ambiental, por serem baseadas em dados primários e em ACVs específicas de produtos.

As DAPs, conhecidas internacionalmente como *Environmental Product Declarations* (EPD), consistem em documentos padronizados que fornecem informações quantitativas sobre os impactos ambientais de um produto ao longo de seu ciclo de vida. Elas seguem normas internacionais como a ISO 14025, que define os princípios e procedimentos para a comunicação ambiental de produtos, e são frequentemente usadas em conjunto com a ACV (ACV Brasil, 2020).

Uma DAP é desenvolvida a partir de uma ACV específica do produto e deve seguir uma Regra de Categoria de Produto (*Product Category Rule* – PCR), a qual estabelece critérios, premissas e parâmetros consistentes para cada categoria de produto. Esse procedimento assegura a comparabilidade entre diferentes DAPs, desde que sejam elaboradas sob a mesma categoria e conjunto de regras (ACV Brasil, 2020).

Segundo Faria (2023), o principal objetivo de uma DAP consiste em fornecer dados ambientais relevantes sobre um produto, como consumo de energia, emissões de GEE, consumo de recursos naturais e geração de resíduos, em uma linguagem padronizada e verificável por terceira parte. Dessa forma, elas auxiliam projetistas, engenheiros, compradores e tomadores de decisão na escolha de materiais e produtos com menor impacto ambiental.

A literatura evidencia esses avanços metodológicos importantes no uso de dados e inventários ambientais. Soust-Verdaguer *et al.* (2023) destacam o papel da DAP como fonte validada para ACV de edifícios, embora apontem limitações na disponibilidade e comparabilidade de dados em determinados contextos nacionais. Essa limitação metodológica impacta diretamente a robustez das análises de emissões incorporadas.

2.7.5. Ecoinvent

Assim como as DAPs fornecem informações quantitativas sobre os impactos ambientais de um produto, existem bancos de dados que também trabalham com essa quantificação, entre as quais se destaca o *ecoinvent*. Essa plataforma constitui uma das principais bases de dados de inventário do Ciclo de Vida (*Life Cycle Inventory* – LCI) utilizadas mundialmente em estudos de ACV. Desenvolvido inicialmente por instituições suíças no início dos anos 2000 e atualmente mantido pela *ecoinvent* Association, o banco de dados fornece informações padronizadas e transparentes sobre fluxos de materiais e energia, emissões para o meio ambiente e consumo de recursos associados a diferentes processos produtivos (Frischknecht *et al.*, 2005).

A base possui dados referentes a diversas etapas do ciclo de vida de produtos e serviços, contemplando setores como geração de energia, agricultura, construção civil, produção de materiais, transporte, tratamento de resíduos, produtos químicos, abastecimentos de água, matriz energética, entre outros. Cada conjunto de dados representa um processo específico, denominado processo unitário (*unit process*), descrevendo as entradas e saídas necessárias para a obtenção de um produto ou serviço de referência (Ecoinvent, 2026).

Uma das principais vantagens do *ecoinvent* é a utilização de critérios metodológicos consistentes e amplamente documentados, que garantem maior transparência e rastreabilidade dos processos modelados. Sua ampla adoção pela comunidade científica internacional também favorece a comparabilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos em estudos de ACV na literatura. Além disso, a base é atualizada periodicamente, incorporando melhorias metodológicas, expansão da cobertura geográfica e inclusão de novos processos, o que contribui para aumentar a representatividade e a confiabilidade dos resultados de ACV (Ecoinvent, 2026).

Para esse trabalho, o *ecoinvent* foi utilizado como base de dados complementar as DAPs, fornecendo inventários referentes aos materiais e, principalmente, à eletricidade considerados na avaliação ambiental. A utilização dessa base de dados justifica-se por sua ampla aceitação científica, abrangência geográfica e compatibilidade com as principais ferramentas de ACV.

2.7.6. Contribuição das emissões incorporadas e operacionais na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de edifícios nZEB

Aprofundando na metodologia de ACV, observa-se que a literatura recente demonstra um deslocamento claro da análise exclusiva do desempenho energético operacional para uma abordagem integrada, que considera conjuntamente os impactos incorporados e operacionais em edifícios de baixo carbono e sistemas fotovoltaicos. Nesse contexto, a ACV consolida-se como um método fundamental, ao ampliar a compreensão do desempenho ambiental para além do consumo energético operacional (Rock *et al.*, 2020).

Asdrubali *et al.* (2020) introduzem a modelagem de *Dynamic Life Cycle Assessment* (DLCA), demonstrando que a descarbonização progressiva da matriz elétrica altera significativamente os resultados de ACV em edifícios altamente eletrificados, como os nZEB. O estudo evidencia que a redução futura do fator de emissão da eletricidade diminui a relevância das emissões operacionais ao longo do tempo, aumentando, proporcionalmente, o peso das emissões incorporadas. Essa tendência é confirmada por Palomar-Torres *et al.* (2024), que analisam um edifício nZEB sob metodologia alinhada à EN 15978 e identificam que as emissões incorporadas representam 69% do total, superando as operacionais, que respondem por 31%. De modo semelhante, Maierhofer *et al.* (2022) verificam que, mesmo em edificações com conceito passivo, as emissões incorporadas correspondem a cerca de 33% das emissões totais do ciclo de vida, destacando a crescente relevância do estágio de produção e da escolha dos materiais.

Rock *et al.* (2020) destacam que, em edificações projetadas conforme regulamentações convencionais de desempenho energético, as emissões incorporadas de GEE representam, em média, cerca de 20% a 25% do total ao longo do ciclo de vida. Em contrapartida, em construções de alta eficiência energética, essa participação pode ultrapassar 40% a 50%, alcançando valores superiores a 90% em situações extremas, nas quais o consumo operacional é significativamente reduzido.

No campo específico dos sistemas BIPV, a literatura demonstra potencial significativo de mitigação de emissões ao longo do ciclo de vida. Popp *et al.* (2025) realizam uma análise prospectiva de fachadas BIPV, considerando cenários temporais e regionais de produção, evidenciando que avanços tecnológicos podem reduzir as emissões incorporadas entre 30% e 38% até 2033. Além disso, o estudo mostra que, em todos os cenários analisados, a quantidade

de emissões evitadas pela geração elétrica supera as emissões incorporadas do sistema ao longo da vida útil.

Diante desse panorama, observa-se que a literatura consolida o entendimento de que dispositivos fotovoltaicos integrados à envoltória podem reduzir significativamente as cargas térmicas e, conseqüentemente, as emissões operacionais dos edifícios. Nesse contexto, edificações nZEB tendem a apresentar emissões operacionais reduzidas, enquanto as emissões incorporadas passam a representar uma parcela significativa do impacto ao longo do ciclo de vida, principalmente associadas às etapas de produção e à escolha dos materiais. Apesar dos avanços dos estudos de ACV em edificações nZEB, algumas lacunas persistem, principalmente relacionadas à escassez de estudos aplicados ao contexto latino-americano e, particularmente, a edificações institucionais ou *campi* universitários. Além disso, métricas comparativas entre emissões incorporadas e operacionais nem sempre são aplicadas de forma integrada aos estudos de caso.

2.7.7. Balanço de carbono evitado

Paralelamente, no âmbito da ACV, observa-se um avanço na literatura no sentido de ampliar o escopo da análise ambiental dos edifícios. O estudo de Grinham *et al.* (2022) propõe uma abordagem integrada de balanço de carbono ao longo do ciclo de vida, considerando diferentes cenários futuros de intensidade de carbono da energia elétrica. Essa abordagem permite avaliar a capacidade do edifício de atingir emissões líquidas zero ao longo de sua vida útil, evidenciando que tal resultado depende não apenas do desempenho energético, mas também das premissas adotadas quanto à evolução da matriz elétrica e aos limites do sistema considerados na análise.

Em contraste com as emissões incorporadas, que se concentram em momentos específicos ao longo do ciclo de vida, como nas fases de construção e substituição de componentes, as emissões operacionais e os créditos de carbono associados a fontes renováveis, neste caso, a geração fotovoltaica, apresentam caráter contínuo ao longo da vida útil da edificação (Grinham *et al.*, 2022). Para o cálculo do balanço de carbono, os autores consideram o método clássico, no qual se somam as emissões incorporadas e operacionais e, posteriormente, subtraem-se as emissões evitadas pela geração de energia fotovoltaica. As conclusões do estudo sugerem que edificações de alto desempenho podem alcançar um balanço de carbono neutro ou até negativo ao longo de sua vida útil, desde que a geração de energia renovável seja suficiente para compensar as emissões acumuladas. Nesse contexto, o conceito

de balanço de carbono amplia a abordagem tradicional da ACV ao incorporar a dimensão temporal das emissões, a influência de cenários energéticos futuros e o papel das emissões evitadas, consolidando-se como um indicador fundamental para a avaliação do desempenho ambiental de edificações nZEB.

No estudo desenvolvido por Amaripadath *et al.* (2025), que investiga se edifícios nZEB podem ser considerados construções com emissões líquidas zero, os autores demonstram que a utilização de fatores de emissão de carbono baseados em médias anuais pode introduzir imprecisões significativas nos resultados do balanço de carbono. Nesse sentido, evidenciam que a adoção de fatores de emissão dinâmicos, com resolução temporal mais refinada, proporciona estimativas mais representativas das emissões operacionais, o que demonstra a relevância da dimensão temporal na avaliação do desempenho ambiental de edificações.

2.7.8. *Benchmarks* de carbono incorporado em edifícios de escritório

Como meio para atestar os principais resultados de uma ACV, os *benchmarks* de carbono incorporado em edifícios têm sido amplamente utilizados como referência para contextualizar resultados de ACV, permitindo comparar o desempenho ambiental de um edifício específico com valores típicos observados em estudos empíricos. Esses *benchmarks* são derivados de grandes bases de dados de ACV de edificações reais e representam intervalos estatísticos (como média, mediana ou percentis), sendo utilizados para definição de metas, regulamentações e avaliação de desempenho ambiental no setor da construção (CLF, 2025; Ramboll, 2022; One Click LCA, 2021).

No relatório do CLF (2025), que se baseia em 292 edifícios na América do Norte, incluindo os Estados Unidos e o Canadá, destaca-se que os *benchmarks* são fundamentais para “compreender a magnitude típica das emissões incorporadas” e orientar estratégias de descarbonização no setor. De forma semelhante, o estudo europeu de Ramboll (2022) e One Click LCA (2021) reforçam que o estabelecimento de valores de referência é essencial para compreender o estado atual do setor e definir trajetórias de redução de emissões. Os três relatórios analisados apresentam resultados consistentes quanto à ordem de grandeza das emissões de carbono incorporado em edifícios de escritório, apesar das diferenças metodológicas e regionais. No estudo conduzido pelo CLF (2025), os *benchmarks* de carbono incorporado são apresentados na forma de *embodied carbon budgets*, estruturados a partir de percentis (25%, 50% e 75%), que representam, respectivamente, níveis de desempenho baixo,

típico e alto. Essa abordagem permite posicionar um edifício em relação ao desempenho observado em uma amostra representativa de projetos reais.

Para edifícios de escritório, os valores de referência variam de acordo com dois fatores principais: (1) o escopo físico considerado, podendo incluir apenas estrutura e envoltória (*Structure and Enclosure* – SE) ou também os interiores (*Structure, Enclosure and Interiors* – SEI); e (2) as etapas do ciclo de vida analisadas, como A1–A3, A1–A5 ou o ciclo completo A–C. Dessa forma, o método permite avaliar não apenas o desempenho médio do setor, mas também estabelecer metas progressivas de redução de emissões com base em diferentes níveis de ambição. Considerando o escopo SEI, que abrange estrutura, envoltória e interiores, e que corresponde ao escopo adotado nesta pesquisa, a Tabela 1 apresenta os valores de *benchmark* para edifícios de escritório, organizados por percentis.

Tabela 1: Benchmarks de carbono incorporado para edifícios de escritório na América do Norte.

Tipo	Escopo de ACV	SEI (kg CO ₂ eq/m ² .ano)
25% (baixo)	A1-A3	7,2
	A1-A5	8,8
	A-C	10,6
50% (típico)	A1-A3	9,4
	A1-A5	11
	A-C	14
75% (alto)	A1-A3	11,4
	A1-A5	13,2
	A-C	15,2

Fonte: CLF (2025).

O estudo europeu de Ramboll (2022) adota uma abordagem fundamentada na definição de uma linha de base construída a partir da análise de 769 estudos de ACV provenientes de diferentes países. Para edificações não residenciais, incluindo escritórios, os valores de carbono incorporado ao longo do ciclo de vida completo (A1–C4) apresentam ampla variação, refletindo diferenças metodológicas, construtivas e contextuais entre os casos analisados. Ainda assim, observa-se um valor médio representativo, que constitui uma importante referência para comparações em escala internacional (Tabela 2).

Tabela 2: Média de benchmarks de carbono incorporado para edifícios de escritório no continente Europeu.

Tipo	Escopo de ACV	Faixa Média (kg CO ₂ eq/m ² .ano)	Média (kg CO ₂ eq/m ² .ano)
Não residenciais (inclui escritórios)	A1-C4	2-24	12

Fonte: Ramboll (2022).

No contexto europeu, o relatório destaca que os valores médios dependem fortemente da harmonização dos dados, devido às diferenças entre países quanto aos métodos, bases de dados e escopos de ACV. Nesse sentido, estudos com escopos mais abrangentes tendem a apresentar maiores valores de carbono incorporado, evidenciando a necessidade de cautela na comparação entre *benchmarks* internacionais (Ramboll, 2022).

O relatório desenvolvido pela One Click LCA (2021) apresenta *benchmarks* para edifícios europeus com base em uma ampla base de dados composta por mais de 3.700 edificações. O estudo utiliza uma base de dados harmonizada segundo os padrões da norma EN 15978, com o objetivo de fornecer valores médios representativos para diferentes tipologias de edifícios em escala europeia. Para edificações não residenciais, incluindo escritórios, os resultados indicam valores médios de carbono incorporado ao longo do ciclo de vida, variando de acordo com a região, considerando um escopo que abrange as etapas A1–A4, B4–B5 e C1–C4. Observa-se, na Tabela 3, que os valores são mais baixos no Norte da Europa e mais elevados em regiões do Leste Europeu, refletindo diferenças nas práticas construtivas e nos materiais empregados.

Tabela 3: Média de *benchmarks* de carbono incorporado para edifícios de escritório por região da Europa.

Região	Tipo	Escopo de ACV	Faixa (kg CO ₂ eq/m ² .ano)	Média (kg CO ₂ eq/m ² .ano)
Leste Europeu	Não residencial (inclui escritórios)	A1–A4, B4–B5, C1–C4	11,6 - 14	12,8
Oeste Europeu			10,2 - 12	11,1
Norte Europeu			6,2 - 7	6,6

Fonte: One Click LCA (2021).

Assim como nos demais relatórios, os resultados evidenciam que o carbono incorporado é fortemente influenciado pelo escopo da ACV, especialmente quanto à inclusão de sistemas, acabamentos e áreas externas, que nem sempre são considerados de forma consistente entre os estudos analisados. Além disso, destaca-se que a base de dados é composta por avaliações voluntárias, frequentemente associadas a projetos com maior desempenho ambiental, o que pode introduzir vieses nos valores apresentados.

De forma geral, os três relatórios analisados demonstram que os valores de carbono incorporado para edifícios de escritório apresentam significativa variabilidade, mas convergem para uma ordem de grandeza entre aproximadamente 6,6 e 15,2 kg CO₂eq/m² ao longo do ciclo de vida. Adicionalmente, destaca-se que os *benchmarks* analisados não incluem o módulo B6 (uso de energia operacional), principalmente devido à dificuldade de padronização e à limitação

de dados consistentes nos estudos de ACV disponíveis. Essa lacuna evidencia a necessidade de abordagens integradas que considerem simultaneamente emissões incorporadas e operacionais.

Nesse contexto, os *benchmarks* desempenham papel fundamental ao fornecer valores de referência que permitem contextualizar e validar os resultados obtidos em ACV, como no caso do LabZero – UnB, contribuindo para a análise crítica do desempenho ambiental.

03

Capítulo 03

Materiais e método

3. Materiais e método

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento da pesquisa, abrangendo desde a revisão de literatura até as etapas de análise do desempenho termoenergético da edificação. São descritas, ainda, a ferramenta utilizada para a ACV e a metodologia de cálculo do balanço de carbono evitado. Adicionalmente, inclui-se a caracterização do objeto de estudo, dos sistemas fotovoltaicos e do contexto climático do local de implantação do edifício LabZero – UnB.

A pesquisa possui natureza aplicada, uma vez que busca gerar conhecimento com finalidade prática, voltado à compreensão do impacto dos dispositivos PVSD nas emissões de edificações do tipo nZEB. Tal abordagem visa subsidiar a tomada de decisão no desenvolvimento de estratégias de mitigação de emissões no setor da construção.

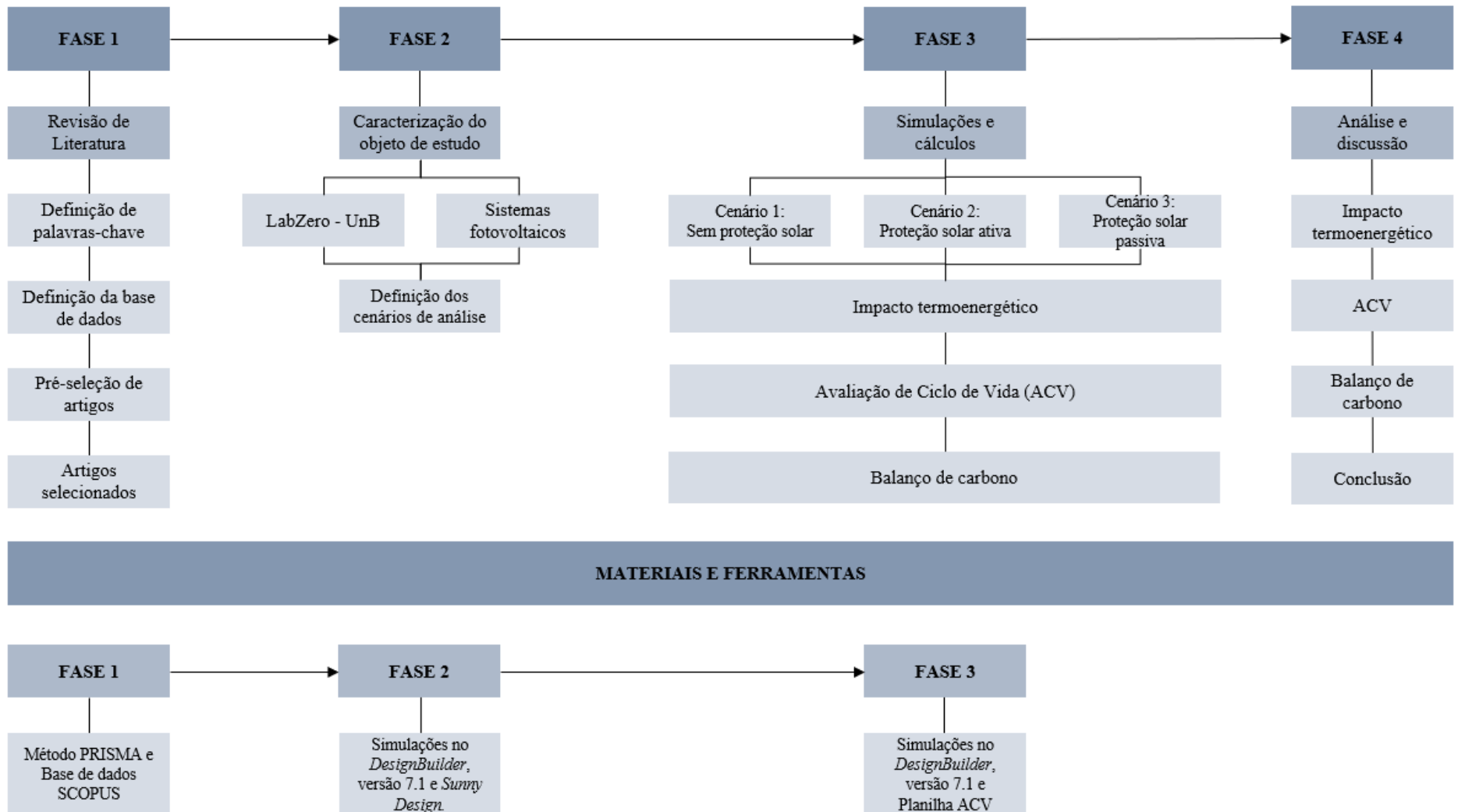
Quanto à abordagem metodológica, adota-se um caráter combinado quanti-qualitativo, partindo-se da análise de um problema geral para sua aplicação em um caso específico, utilizando o edifício LabZero – UnB como estudo de caso. A dimensão qualitativa está associada à revisão sistemática da literatura, à análise documental dos projetos, relatórios técnicos e estudos relacionados ao edifício, bem como à interpretação crítica dos resultados obtidos. Já a dimensão quantitativa compreende as simulações termoenergéticas realizadas nos *softwares DesignBuilder* e *Sunny Design*, o levantamento quantitativo dos materiais da edificação e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), utilizada para a quantificação das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida dos cenários analisados. Em relação aos objetivos, o estudo classifica-se como exploratória, ao proporcionar uma visão geral sobre o panorama das emissões de GEE em edificações, e também como explicativa, ao investigar os fatores que influenciam as diferentes fontes de emissões ao longo do ciclo de vida da edificação.

Do ponto de vista procedimental, o método envolveu levantamento documental, com base no projeto executivo da edificação, e simulações termoenergéticas, utilizadas para estimar o desempenho do edifício sob diferentes condições. Dessa forma, a abordagem adotada foi de natureza mista, integrando métodos qualitativos e quantitativos na análise dos resultados.

3.1. Método de pesquisa

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, o trabalho foi organizado em quatro fases sucessivas e encadeadas entre si. A Figura 9 apresenta o fluxo metodológico adotado.

Figura 9: Fluxograma metodológico da pesquisa.



Fonte: Autor, 2026.

A fase inicial deste estudo consistiu na realização de uma revisão sistemática de literatura, cujo principal objetivo foi identificar e compreender os requisitos fundamentais que embasariam as etapas subsequentes da pesquisa. Essa revisão possibilitou a reunião, a análise crítica e a síntese dos conhecimentos consolidados sobre o tema, constituindo o alicerce teórico-metodológico do trabalho. Para tanto, foram utilizadas bases de dados científicas, como a Scopus, além de trabalhos publicados em anais de eventos científicos da área de conhecimento e livros acadêmicos selecionados ao longo do curso, que contribuíram para o aprofundamento teórico e a ampliação do referencial bibliográfico.

Na segunda fase da pesquisa, procedeu-se à caracterização do objeto de estudo, o edifício LabZero – UnB, com ênfase na quantificação dos componentes dos sistemas construtivos. Destacaram-se, particularmente, os dispositivos PVSD, para os quais foi necessária a simulação do desempenho termoenergético, em razão de alterações ocorridas em relação ao projeto original, já incorporadas ao presente trabalho. Essa etapa teve como finalidade organizar e sistematizar as informações essenciais à definição dos cenários de análise, com base em dados técnicos do projeto e em referências consolidadas da literatura. A caracterização permitiu compreender as principais especificidades do edifício e dos sistemas fotovoltaicos, constituindo a base para a estruturação dos cenários. Dessa forma, foram definidos três cenários de análise: (1) o edifício sem proteção solar; (2) o edifício com proteção solar ativa, por meio dos dispositivos PVSD; e (3) o edifício com proteção solar passiva, composta por *brises* de alumínio convencionais. As simulações correspondentes a esses cenários foram realizadas utilizando os *softwares* *DesignBuilder*, versão 7.1 e *Sunny Design* (*SMA Solar Technology AG*).

A terceira etapa do trabalho foi dedicada às simulações e aos cálculos referentes aos três cenários previamente definidos. Inicialmente, estimaram-se os impactos térmicos e energéticos da edificação por meio de simulações realizadas nos *softwares* adotados. Paralelamente, foi conduzida uma ACV, a partir da coleta, organização e consolidação dos dados quantitativos dos materiais que compõem o sistema construtivo do LabZero – UnB, bem como dos sistemas de geração de energia *in loco*, incluindo os PVSD e os módulos fotovoltaicos convencionais instalados na cobertura, permitindo a estimativa do balanço de carbono evitado da edificação.

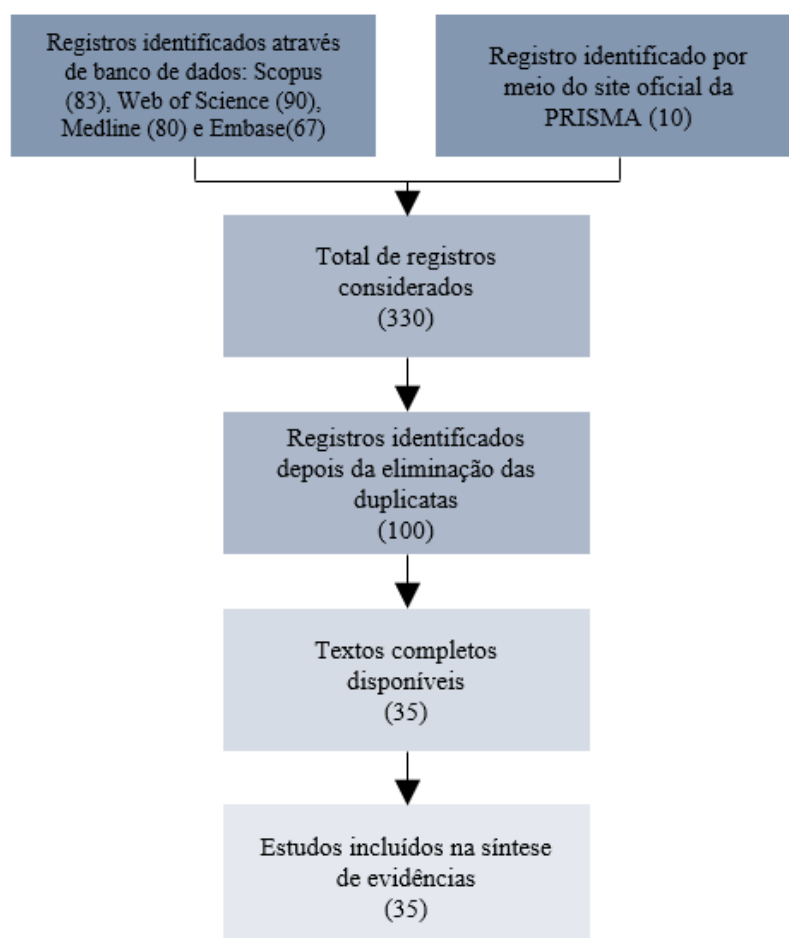
A quarta e última fase do trabalho concentrou-se na análise e discussão integrada dos resultados obtidos nas etapas anteriores. Nesse estágio, foram examinados, de forma articulada, os achados sobre os impactos termoenergéticos, os resultados da ACV, bem como o balanço de carbono evitado, os quais foram interpretados e relacionados à literatura científica pertinente.

Nas conclusões, apresentaram-se reflexões críticas sobre os principais resultados da pesquisa e relacionaram-se aos objetivos inicialmente propostos. Foram ressaltadas as principais contribuições da pesquisa, considerando as limitações encontradas, e apresentaram-se sugestões para trabalhos futuros relacionados aos temas aqui tratados.

3.2. Fase 1 – Revisão Sistemática de Literatura

A revisão de literatura desta pesquisa adotou as diretrizes PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que consistem em um conjunto de recomendações voltadas a assegurar a transparência, a qualidade metodológica e a reprodutibilidade das revisões sistemáticas. O fluxograma metodológico (Figura 10) contribuiu para o aprimoramento da qualidade da revisão, ao proporcionar maior transparência e seletividade em relação ao tema investigado, auxiliando na avaliação crítica dos estudos (Mishra, V.; Mishra, M. P., 2023).

Figura 10: Fluxograma metodológico das diretrizes PRISMA.



Fonte: Adaptado, Mishra, V.; Mishra, M. P. (2023).

Seguindo as diretrizes PRISMA, realizou-se uma busca inicial destinada a identificar a abrangência dos trabalhos relacionados à descarbonização de *campi* universitários, à ACV aplicada a sistemas BIPV e aos impactos ambientais associados. Para essa etapa, utilizou-se como base de dados a *Scopus (Elsevier)*, acessada por meio da plataforma Periódicos CAPES. Após a definição da base de dados, foram estabelecidas as palavras-chave. Inicialmente, com o intuito de orientar os próximos passos quanto à seleção dos termos e ao tipo de documentos encontrados, utilizaram-se as expressões *'life cycle assessment'*, *'carbon emission'* e *'photovoltaic systems'*, combinadas por meio do operador booleano "AND".

Para essa primeira análise, foram aplicados filtros de pesquisa para refinar os resultados obtidos. Dessa forma, delimitou-se o período de análise aos últimos cinco anos, com algumas exceções de referências pertinentes. Outra restrição imposta foi a exclusão de conteúdos provenientes de editoriais e outros tipos de publicações similares. Além disso, foram selecionados apenas documentos em inglês e com acesso aberto. Para delimitar ainda mais o escopo, após a recuperação dos resultados e a leitura inicial dos resumos dos artigos pré-selecionados, mantiveram-se apenas os documentos com maior aderência à proposta da revisão. A Tabela 4 apresenta o resultado dessa primeira triagem.

Tabela 4: Busca inicial da revisão sistemática de literatura.

	Palavras-Chave	Resultados	Pré-selecionados	Selecionados
Busca 01	<i>"life cycle assessment" AND "carbon emission" AND "photovoltaic systems"</i>	80	16	3

Fonte: Autor (2025).

Após a busca inicial, novas pesquisas foram conduzidas para aprofundar o embasamento teórico. Seguindo o mesmo procedimento metodológico adotado anteriormente e em conformidade com as diretrizes PRISMA, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Buscas complementares da revisão de literatura.

	Palavras-Chave	Resultados	Pré-selecionados	Selecionados
Busca 02	<i>"life cycle assessment" AND "photovoltaic" AND "nearly zero-energy"</i>	13	5	1
Busca 03	<i>"PV" AND "BIPV system" AND "energy efficiency" AND "shading"</i>	10	4	1
Busca 04	<i>"PV" AND "BIPV system" AND "shading"</i>	26	11	2

Busca 05	<i>"PV" AND "bipv" AND "shading devices"</i>	9	6	2
Busca 06	<i>"bipv" OR "pvds" AND "building" AND "lca"</i>	8	2	2
Busca 07	<i>"building" AND "thermal comfort" AND "bipv" OR "pvds"</i>	22	3	3
Busca 08	<i>"bipv" OR "pvds" AND "university" OR "building" AND "environmental impact"</i>	26	7	4

Fonte: Autor (2025).

Além do conteúdo obtido por meio da revisão sistemática da literatura, foram incorporados materiais adicionais, aqui denominados “artigos complementares”. Esses documentos foram selecionados a partir de indicações, palestras, apresentações de terceiros e outras atividades desenvolvidas ao longo do curso de mestrado, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Artigos complementares.

Artigos	Selecionados
Artigos complementares	24

Fonte: Autor (2025).

Por fim, a revisão de literatura abrangeu oito grupos de palavras-chave, resultando na recuperação de aproximadamente 194 artigos. Desses, 54 foram pré-selecionados para análise e, considerando o foco temático deste estudo, 18 artigos foram efetivamente selecionados. Somando-se a esses os chamados “artigos complementares”, obteve-se um total de 42 documentos utilizados como embasamento bibliográfico.

A revisão sistemática da literatura forneceu o referencial teórico essencial para a estruturação da metodologia adotada neste trabalho. A partir dela, foram identificados os principais indicadores de desempenho termoenergético aplicáveis a edificações, bem como as abordagens mais adequadas para a realização de estudos de ACV e balanço de carbono evitado. As referências analisadas orientaram a definição da categoria de impacto considerada, o Potencial de Aquecimento Global (PAG), e fundamentaram a escolha das ferramentas utilizadas, como a planilha em *Excel* para a ACV e os *softwares DesignBuilder* e *Sunny Design* para a análise do comportamento termoenergético do edifício.

3.3. Fase 2 – Caracterização do objeto de estudo

Para a caracterização do LabZero – UnB, realizou-se inicialmente a análise de artigos científicos previamente publicados sobre o edifício, tais como “Da pesquisa ao projeto: edifício

de balanço energético nulo – o caso LabZero – UnB”, “LabZero – UnB: simulação para o desempenho de edifício de balanço energético nulo em Brasília” e “Desafios arquitetônicos na integração fotovoltaica em edifícios de balanço energético nulo: o caso do LabZero”. Esses estudos forneceram subsídios para a compreensão do edifício como um demonstrador de nZEB, além de contribuírem para a definição dos parâmetros adotados nas análises. Em paralelo, foram examinados relatórios técnicos e documentos de pesquisa desenvolvidos no âmbito do Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética (LACAM/UnB), como o estudo “ZEB – Zero Energy Brasília: plano estratégico de eficiência energética para o parque construído de balanço energético nulo”. Esses materiais forneceram informações específicas sobre o desempenho térmico, a modelagem energética e a configuração dos sistemas prediais.

Adicionalmente, efetuou-se ao levantamento documental dos projetos básicos e executivos da edificação, incluindo plantas, cortes, fachadas e memoriais descritivos. Essa etapa possibilitou a identificação e a caracterização detalhada dos sistemas da edificação. Foram também analisados orçamentos, especificações técnicas e fichas de materiais, permitindo a obtenção de dados quantitativos indispensáveis à modelagem da ACV, tais como tipologia, quantidade, massa e composição dos materiais empregados.

No que se refere aos sistemas de geração de energia, foram caracterizados tanto os dispositivos PVSD, integrados à fachada, quanto os módulos fotovoltaicos convencionais instalados na cobertura. Para essas tecnologias, além das informações construtivas, consideraram-se dados técnicos de desempenho, como potência instalada, configuração dos módulos, orientação e inclinação, bem como parâmetros necessários à simulação da geração energética. Ressalta-se que, em função de ajustes e atualizações no projeto original, parte das informações foi revisada e compatibilizada com as condições adotadas neste trabalho, garantindo a consistência entre a caracterização do objeto de estudo e as etapas subsequentes de simulação e análise.

A caracterização do LabZero – UnB permitiu consolidar um conjunto de informações técnicas e quantitativas robustas, fundamentais para a definição dos cenários de análise e para o desenvolvimento integrado das simulações térmicas, energéticas e ambientais ao longo da pesquisa.

3.3.1. O LabZero – UnB

O conceito de ZEB ou nZEB surgiu como uma alternativa para reduzir os impactos do parque construído, a partir de iniciativas como a Agenda 2030 da ONU, a Nova Agenda Urbana

(Habitat III) e o Acordo de Paris. Diante desse contexto, como objeto de estudo desta dissertação, selecionou-se o LabZero – UnB, participante da chamada PROCEL/EDIFICA 2020. O edifício é caracterizado como uma construção demonstrativa de alto desempenho em eficiência energética, com balanço energético anual próximo de zero. A edificação destina-se a atividades em regime *living lab*, com o objetivo de abrigar laboratórios e grupos de estudo (Amorim *et al.*, 2020).

O LabZero – UnB está sendo construído no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB), próximo às vias de elevado fluxo L3 e L2 Norte (Figura 11). Inserida em um espaço de grande visibilidade, a edificação compreende ambientes como área de escritório, copa, banheiro e vestiário, área técnica e bicicletário. A estrutura apresenta aproximadamente 207 m² de área útil.

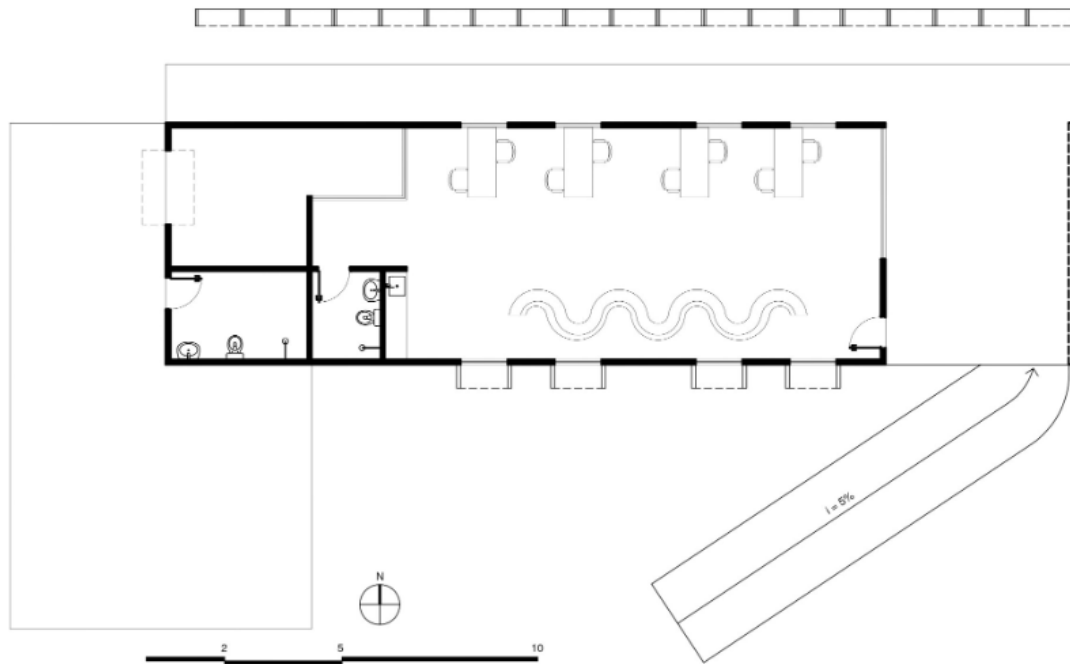
Figura 11: Localização do LabZero - UnB em relação com Campus Darcy Ribeiro.



Fonte: Adaptado, Google Earth (2025).

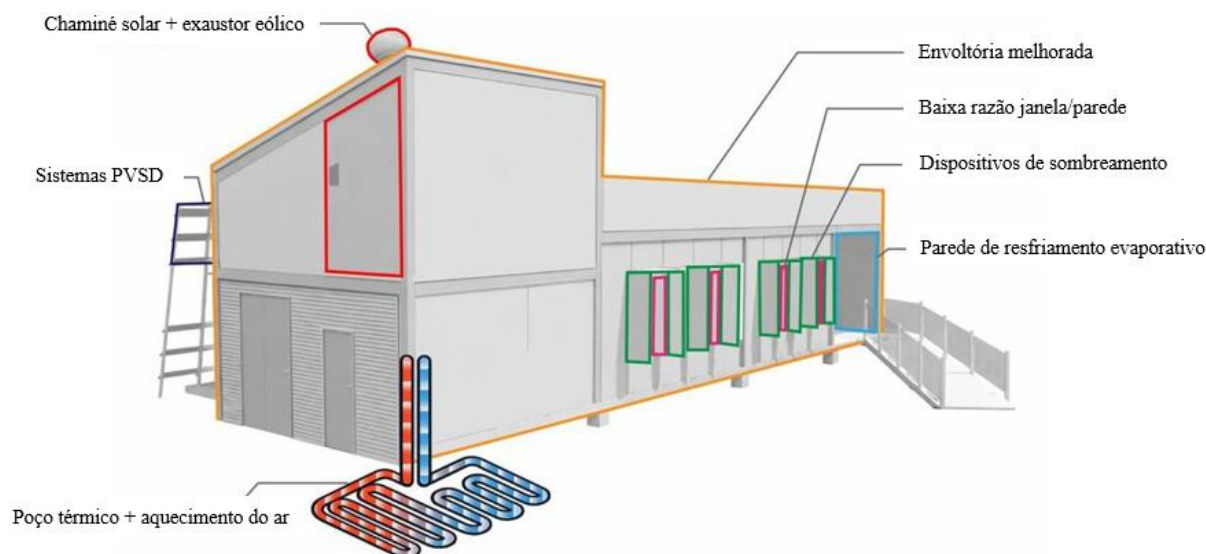
A proposta central do LabZero – UnB é servir como referência prática de edificação capaz de produzir *in loco* toda a energia que consome, promovendo a autossuficiência energética e a redução de impactos ambientais. De acordo com Amorim *et al.* (2020), o LabZero – UnB apresenta uma demanda anual de energia elétrica (*Energy Use Intensity* – EUI) de 30,78 kWh/m².ano, valor inferior à média de 132 kWh/m².ano registrada em edifícios de escritórios convencionais em Brasília (Costa *et al.*, 2020). Essa elevada eficiência energética é resultado das estratégias projetuais, tanto passivas quanto ativas, e das soluções tecnológicas adotadas na construção e na instalação dos sistemas. Nesse sentido, destacam-se a volumetria retilínea e compacta, que favorece a penetração de luz natural, a automação dos sistemas de climatização e iluminação elétrica, o uso de isolamentos térmicos e a adoção de aberturas com proteção solar (Figura 12).

Figura 12: Planta baixa do LabZero - UnB.



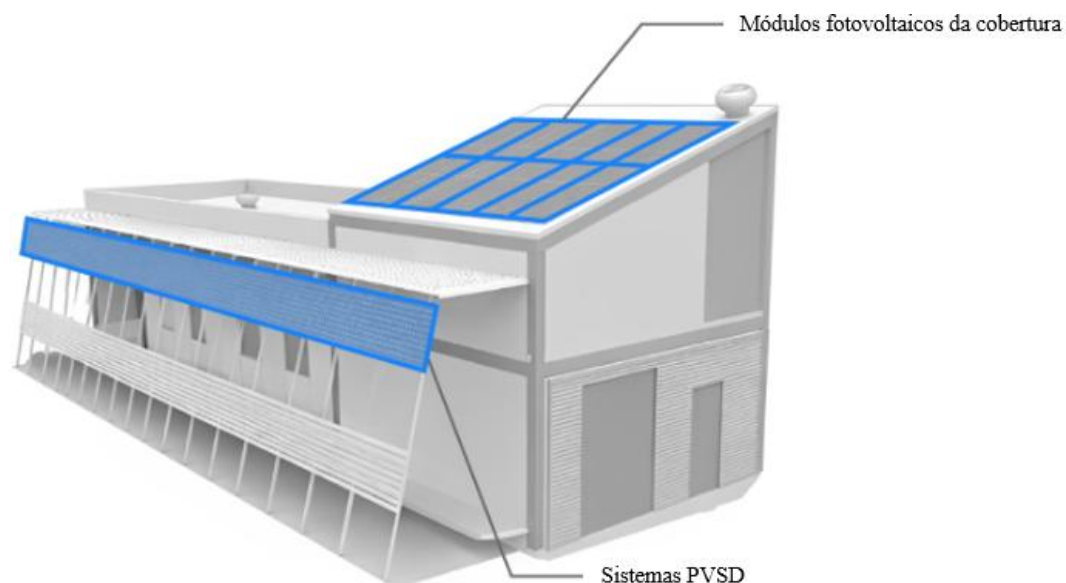
Fonte: LACAM (2026).

O edifício apresenta uma solução construtiva predominantemente composta por estrutura metálica, lajes mistas em sistema *steel deck* (aço–concreto) e elementos de vedação leves, associados a um envelope com elevada resistência térmica. O desempenho passivo é potencializado pelo emprego de isolamento térmico eficiente e superfícies de alta refletância. A estratégia de climatização é baseada em um sistema automatizado e hierarquizado, que prioriza, inicialmente, soluções passivas, como ventilação natural e noturna, resfriamento evaporativo e uso de chaminé solar, evoluindo, quando necessário, para o condicionamento mecânico por meio de bomba de calor geotérmica de alta eficiência (Figura 13).

Figura 13: Representação esquemática das principais estratégias ativas e passivas do LabZero - UnB.

Fonte: LACAM (2026).

A geração de energia é um elemento central no conceito de ZEB ou nZEB. No LabZero – UnB, essa demanda é atendida principalmente por sistemas fotovoltaicos, compostos por módulos instalados na cobertura e por dispositivos PVSD distribuídos na fachada norte (Figura 14).

Figura 14: Disposição dos sistemas fotovoltaicos do LabZero - UnB.

Fonte: LACAM (2026).

3.3.2. Geração local de fonte solar

Constatou-se que o projeto original dos sistemas fotovoltaicos do LabZero – UnB passou por mudanças relevantes, o que demandou a realização de novas simulações para estimar o desempenho energético da nova configuração. As alterações ocorreram por três razões: (1) o

aumento da eficiência dos módulos e células fotovoltaicas ao longo do período entre a elaboração do projeto submetido ao Edital PROCEL e sua execução; (2) a dificuldade de aquisição dos dispositivos PVSD, que seriam fabricados sob medida, customizados para essa edificação; e (3) a decisão de descontinuar o sistema *off-grid* com bancos de baterias, substituindo-o por uma solução baseada em *nobreaks* dedicados, na qual os excedentes de energia são destinados à eletromobilidade.

O sistema PVSD do LabZero – UnB é composto por *brises* horizontais integrados à fachada norte, conforme ilustrado na Figura 14, atuando simultaneamente como elemento de proteção solar e de geração de energia. A eletricidade produzida por esses dispositivos complementa o sistema fotovoltaico convencional instalado na cobertura, potencializando o aproveitamento da elevada radiação solar característica da região Centro-Oeste e contribuindo para a redução das cargas térmicas internas.

A edificação é modelada considerando operação integral com energia elétrica proveniente desses dois sistemas fotovoltaicos (Tabela 7), ambos orientados ao norte (azimute 0°). O arranjo da cobertura é constituído por 10 módulos com inclinação de 15°, enquanto os *brises* fotovoltaicos apresentam inclinação de 30°. Os módulos utilizados são bifaciais, com células de silício monocristalino. Contudo, nas simulações, considerou-se apenas a geração da face externa, desconsiderando a contribuição da face voltada ao interior. O sistema é equipado com inversor híbrido (*SMA Sunny Boy Smart Energy SBSE6.0-50*), possibilitando a futura integração com banco de baterias.

Tabela 7: Características dos sistemas fotovoltaicos.

Sistemas fotovoltaicos	Módulos fotovoltaicos	Azimute/inclinação	Quantidade (un)	Potência instalada (kWp)
Cobertura	<i>Mono-Si</i> 615 Wp	0°/15°	10	6,15
PVSD	Moni-Si Bifacial 575 Wp	0/30°	10	5,75

Fonte: Autor (2026).

Para a estimativa do potencial de geração fotovoltaica, foi utilizado o *software Sunny Design*, amplamente empregado no setor energético, operando no modo “Planejamento Detalhado”. Foram adotados dados climáticos provenientes da base *Solargis* (2025), considerando a estação meteorológica mais próxima da área de estudo. Os dados de consumo foram definidos a partir de um perfil de carga próprio, construído com base em séries horárias anuais (8.760 horas – TMY), obtidas por meio de simulações no *DesignBuilder*.

Adicionalmente, foi estimado o Fator de Simultaneidade (FS), definido como a razão entre a energia consumida no instante da geração e a energia total produzida ao longo de um ano. Esse indicador representa a fração da energia fotovoltaica autoconsumida instantaneamente na edificação, sem intercâmbio com a rede elétrica. Valores mais elevados de FS indicam maior aproveitamento local da energia gerada e menor exportação de excedentes. A expressão do FS é dada por:

$$FS = \frac{E_{gerada} - E_{injetada}}{E_{gerada}} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

FS: Fator de Simultaneidade;

Egerada: energia total gerada pelo sistema fotovoltaico (kWh/ano);

Einjetada: parcela da energia exportada para a rede elétrica (kWh/ano).

A interpretação do fator de simultaneidade requer a análise da curva de carga diária típica da edificação, que descreve a variação do consumo ao longo do dia. No caso do LabZero – UnB, cujo perfil de operação é compatível com edifícios de escritório (funcionamento entre 8h e 22h, de segunda a sexta-feira), espera-se um elevado nível de simultaneidade. Isso se deve à coincidência temporal entre a demanda energética e o período de geração fotovoltaica, favorecendo o autoconsumo e reduzindo a dependência da rede elétrica, sem impactos negativos no tempo de retorno do investimento.

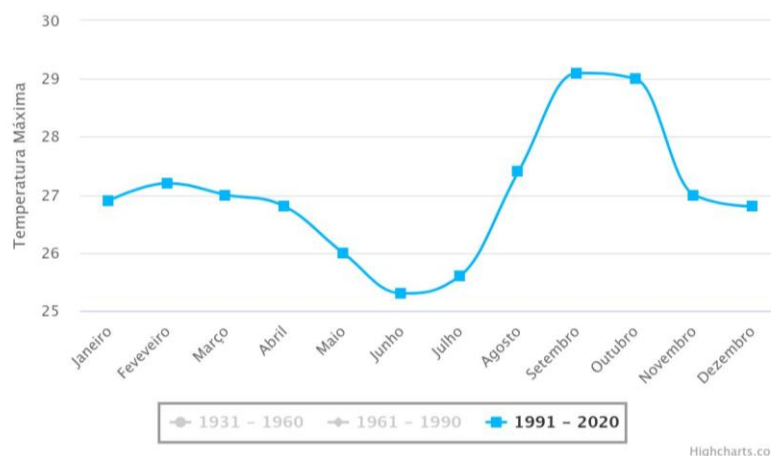
3.3.3. Aspectos climáticos e disponibilidade de irradiação solar

O LabZero – UnB está sendo construído na região Centro-Oeste do Brasil, em Brasília, no Distrito Federal. Segundo Codeplan (2020), o clima do DF é tropical, apresentando os seguintes tipos climáticos:

- Tropical (Aw): caracterizado por temperaturas superiores a 18 °C no mês mais frio, predominantemente em áreas de até 1.000 metros de altitude;
- Tropical de Altitude (Cwa): caracterizado por temperaturas inferiores a 18 °C no mês mais frio e médias superiores a 22 °C no mês mais quente, em altitudes entre 1.000 e 1.200 metros;
- Tropical de Altitude (Cwb): caracterizado por temperaturas inferiores a 18 °C no mês mais frio e também inferiores a 22 °C no mês mais quente, em regiões com altitude superior a 1.200 metros.

De modo geral, as temperaturas médias anuais na região variam entre 19 °C e 23 °C. O período mais quente ocorre entre setembro e outubro (Gráfico 3), quando são registradas as maiores temperaturas do ano, com máximas históricas próximas a 30 °C.

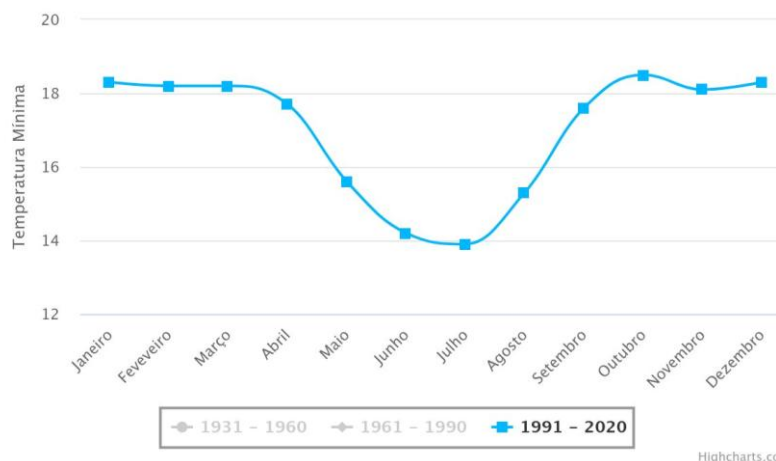
Gráfico 3: Gráfico comparativo temperatura máxima (°C) de Brasília.



Fonte: INMET, 2025. Disponível: <https://clima.inmet.gov.br/progt>. Acesso: 26 de abril de 2025.

Por outro lado, os meses de junho e julho correspondem ao período mais frio, quando as temperaturas mínimas podem atingir aproximadamente 13 °C (Gráfico 4) (INMET, 2025).

Gráfico 4: Gráfico comparativo temperatura mínimas (°C) de Brasília.



Fonte: INMET, 2025. Disponível: <https://clima.inmet.gov.br/progt>. Acesso: 26 de abril de 2025.

O Brasil apresenta elevado potencial para a geração de energia solar fotovoltaica, de modo que mesmo a região menos ensolarada do país é capaz de produzir mais eletricidade solar do que a região mais ensolarada da Alemanha (INPE, 2017). Brasília situa-se em uma das regiões mais privilegiadas sob esse aspecto, com irradiação global horizontal anual (soma das componentes direta e difusa) de aproximadamente 2020,1 kWh/m² (INPE, 2017). Esse valor confirma o elevado potencial solar da região, uma vez que índices acima de 1000 kWh/m² já são considerados favoráveis à geração de energia fotovoltaica. Além disso, as denominadas

horas de sol pleno (HSP) variam ao longo do ano entre 4 e 6 horas diárias, em média, o que representa condições altamente propícia para a conversão em eletricidade solar (INPE, 2017).

3.3.4. Definição dos cenários de análise

A multifuncionalidade é apontada como uma das principais vantagens dos sistemas fotovoltaicos integrados à edificação. Nesse sentido, Goksu e Gedik (2023) afirmam que os dispositivos PVSD possuem duas funções bem definidas: atuam como sistemas ativos de geração de energia e como estratégias passivas de sombreamento. De modo geral, esses componentes são projetados para reduzir a carga térmica de resfriamento interno, contribuindo para a diminuição do consumo energético, ao mesmo tempo em que geram eletricidade.

Assim, foram definidos três cenários de análise:

- Cenário 1 – edificação sem proteção solar: considerou-se o modelo do LabZero – UnB sem a adoção de qualquer estratégia de controle solar na fachada norte, configurando-se como caso base de comparação. Nesse cenário, não há produção de energia renovável;
- Cenário 2 – edificação com proteção solar ativa: correspondeu ao modelo conforme o projeto original, com a adoção de dispositivos PVSD, integrando simultaneamente a geração de energia e o controle solar na fachada norte. Nesse cenário, considerou-se a geração de energia proveniente tanto dos dispositivos PVSD quanto dos módulos fotovoltaicos instalados na cobertura da edificação;
- Cenário 3 – edificação com proteção solar passiva: correspondeu ao modelo do LabZero – UnB com a adoção de *brises* de alumínio convencionais como elemento de proteção solar da fachada norte, representando uma estratégia exclusivamente passiva. Nesse cenário, considerou-se a cobertura como a única fonte de geração de energia local.

3.4. Fase 3 – Simulações e cálculos

3.4.1. Avaliação do impacto termoenergético dos Dispositivos de Sombreamento Fotovoltaico (PVSD) na edificação

Para identificar o impacto dos PVSD como elemento de proteção solar no estudo de caso, foi utilizado o *software DesignBuilder*, versão 7.1. Para cada cenário, foram realizadas simulações com o objetivo de avaliar as cargas térmicas internas decorrentes da irradiação solar nas janelas e as demandas de eletricidade para climatização. Foram utilizadas as configurações

previamente realizadas (Tabela 8) por Góes *et al.* (2021), com variação no modelo apenas em relação à presença dos dispositivos PVSD e os *brises* convencionais.

Tabela 8: Configurações originais do modelo no *DesignBuilder*.

Categoria	Parâmetro	Configuração adotada
Propriedades ópticas e térmicas	Absortância superfícies claras	0,4
	Absortância superfícies escuras	0,7
	Piso e teto	Superfícies escuras
	Demais superfícies	Superfícies claras
	Vidros	Simples, transmitância luminosa 0,87
Envoltórias e paredes	Sistema construtivo	Fibrocimento + lâ de rocha
	Transmitância total	0,58 W/m ² K
	Cavidade ventilada	10 renovações/hora
Cargas internas	Equipamentos	Baseados no RTQ-C (default)
	Iluminação	Conforme projeto luminotécnico
Perfil de uso	Horário de operação	08h às 22h
	Dias de uso	5 dias/semana
Ventilação	Tipo predominante	Ventilação natural
	Modelo avançado	<i>Airflow Network</i> (zonas específicas)
	Zonas com <i>Airflow Network</i>	Banheiros, área técnica e varanda
	Taxa de abertura das esquadrias	88%
	Cobertura/torre d'água	10 renovações/hora
Condicionamento de ar	Zona atendida	<i>Coworking</i>
	<i>Setpoint</i> de temperatura	24°C
	<i>Setback</i>	Não aplicado
	COP do sistema	5
	Estratégias	Operação contínua (cenário conservador)
Iluminação artificial	<i>Setpoint</i> varanda	150 lux
	<i>Setpoint</i> <i>coworking</i>	300 lux
	Controle	Integração com iluminação natural
Abordagem do modelo	Tipo de cenário	Conservador
	Premissas	Uso contínuo de HVAC + cargas padrão
	Objetivo	Garantir validação do desempenho nZEB

Fonte: Góes *et al.* (2021).

O modelo energético do edifício LabZero – UnB foi estruturado com elevada fidelidade ao projeto arquitetônico e com base em parâmetros normativos brasileiros, utilizando arquivo climático horário de Ano Meteorológico Típico (TMY) do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) para Brasília. A adoção desse arquivo climático justifica-se pelo fato de ter sido o mesmo utilizado originalmente nas simulações do LabZero – UnB, desenvolvidas e validadas em estudos anteriores por Góes *et al.* (2021). Dessa forma, a manutenção do arquivo TMY SWERA permitiu preservar a consistência metodológica do

modelo e assegurar a comparabilidade dos resultados obtidos nesta pesquisa com aqueles reportados em trabalhos anteriores. Assim, eventuais diferenças observadas entre os cenários analisados podem ser atribuídas às estratégias de sombreamento e geração fotovoltaica avaliadas, e não às alterações decorrentes da base climática utilizada. A envoltória foi caracterizada por materiais com propriedades térmicas definidas conforme as normas ABNT NBR 15220 e ABNT NBR 15575, incluindo paredes leves com isolamento térmico e cobertura com cavidade ventilada. As cargas internas seguiram referências do RTQ-C, enquanto o perfil de uso considerou operação de segunda a sexta-feira, das 8h às 22h. A estratégia de ventilação priorizou o uso de ventilação natural, complementada por modelagem em *Airflow Network* para zonas específicas, com elevada taxa de abertura das esquadrias (88%). O condicionamento de ar foi aplicado apenas na área de *coworking*, com *setpoint* de 24 °C, operação contínua e coeficiente de performance (COP) igual a 5, configurando um cenário conservador. O sistema de iluminação artificial foi integrado à iluminação natural, com controle por níveis de iluminância (Góes *et al.*, 2021).

Para os dispositivos PVSD, a configuração foi implementada por meio do módulo *Shades and Reflects* do *software*, que permite a modelagem detalhada de elementos externos de sombreamento associados às superfícies da edificação. Nesse módulo, os dispositivos foram representados geometricamente de acordo com as dimensões e posicionamento definidos no projeto arquitetônico, sendo vinculados à fachada norte da edificação. A modelagem considera os efeitos de obstrução da radiação solar incidente sobre as superfícies envidraçadas e opacas da fachada, permitindo ao motor de cálculo do *EnergyPlus* determinar, em cada passo temporal da simulação, os efeitos do sombreamento sobre os ganhos solares e as cargas térmicas do edifício. Dessa forma, a presença dos dispositivos influencia diretamente a demanda energética para resfriamento e o desempenho termoenergético da edificação. Os mesmos foram configurados para operação contínua (24 horas por dia, 7 dias por semana).

No Cenário 1, caracterizado pela ausência de sombreamento, a modelagem consistiu na remoção completa desses dispositivos do modelo computacional. Já no Cenário 3, correspondente ao uso de proteção solar convencional, foram mantidas as configurações geométricas do Cenário 2, sendo alteradas apenas as propriedades dos materiais, de modo a representar *brises* de alumínio sem função de geração de energia.

Por fim, foram definidos os parâmetros físicos e ópticos associados às proteções solares dos cenários (Tabela 9). Para o Cenário 2, foram adotados parâmetros termofísicos de módulos fotovoltaicos com base no estudo de Albatayneh *et al.* (2022), ajustados às limitações do

ambiente de simulação do *DesignBuilder*, sobretudo no que se refere à simplificação das camadas constituintes dos módulos. Assim, a caracterização térmica do sistema foi realizada por meio de propriedades equivalentes de um elemento de proteção, considerando condutividade térmica de 1,80 W/m.K, calor específico de 500 J/kg.K e densidade de 3000 kg/m³. Essa abordagem permite representar, de forma simplificada, o comportamento térmico dos dispositivos PVSD, especialmente quanto à sua capacidade de absorção, armazenamento e transferência de calor.

Tabela 9: Propriedade das superfícies de proteção.

Parâmetro	Cenário 02 - (proteção solar ativa)	Cenário 03 - (proteção solar passiva)
Condutividade térmica (W/m.K)	1,8	230
Calor específico (J/kg.K)	500	880
Densidade (kg/m ³)	3000	2700
Absortância térmica (–)	0,84	0,3
Absortância solar (–)	0,23	0,2
Absortância visível (–)	0,23	0,2
Rugosidade	Muito suave (<i>very smooth</i>)	Suave (<i>Smooth</i>)

Fonte: Autor (2026).

No que se refere às propriedades superficiais, foram adotados valores de absortância térmica (emissividade) de 0,84, absortância solar de 0,23 e absortância visível de 0,23, além de rugosidade classificada como muito suave (*very smooth*). A adoção desses valores buscou representar as propriedades ópticas e térmicas dos elementos utilizados como referência para a modelagem dos PVSD. Esse conjunto de parâmetros caracteriza um material com elevada capacidade de emissão térmica e baixa absorção da radiação solar, contribuindo para a redução do aquecimento dos dispositivos e, conseqüentemente, para a mitigação dos ganhos térmicos na envoltória (Albatayneh *et al.*, 2022).

Para o Cenário 3, correspondente à utilização de proteção solar convencional, foram empregados os dados padrão do *EnergyPlus* disponíveis no *DesignBuilder*. Os brises de alumínio foram definidos com base em propriedades típicas desse material, adotando-se condutividade térmica de 230 W/m.K, calor específico de 880 J/kg.K e densidade de 2700 kg/m³. Em relação às propriedades superficiais, foram considerados valores de absortância térmica de 0,30, absortância solar de 0,20 e absortância visível de 0,20, além de rugosidade classificada como suave (*smooth*).

3.5. Avaliação ambiental: emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

3.5.1. Ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

A adoção da metodologia de ACV nesta pesquisa justifica-se pela complexidade inerente à análise dos impactos ambientais ao longo das diferentes etapas do ciclo de vida de uma edificação nZEB e de suas tecnologias associadas.

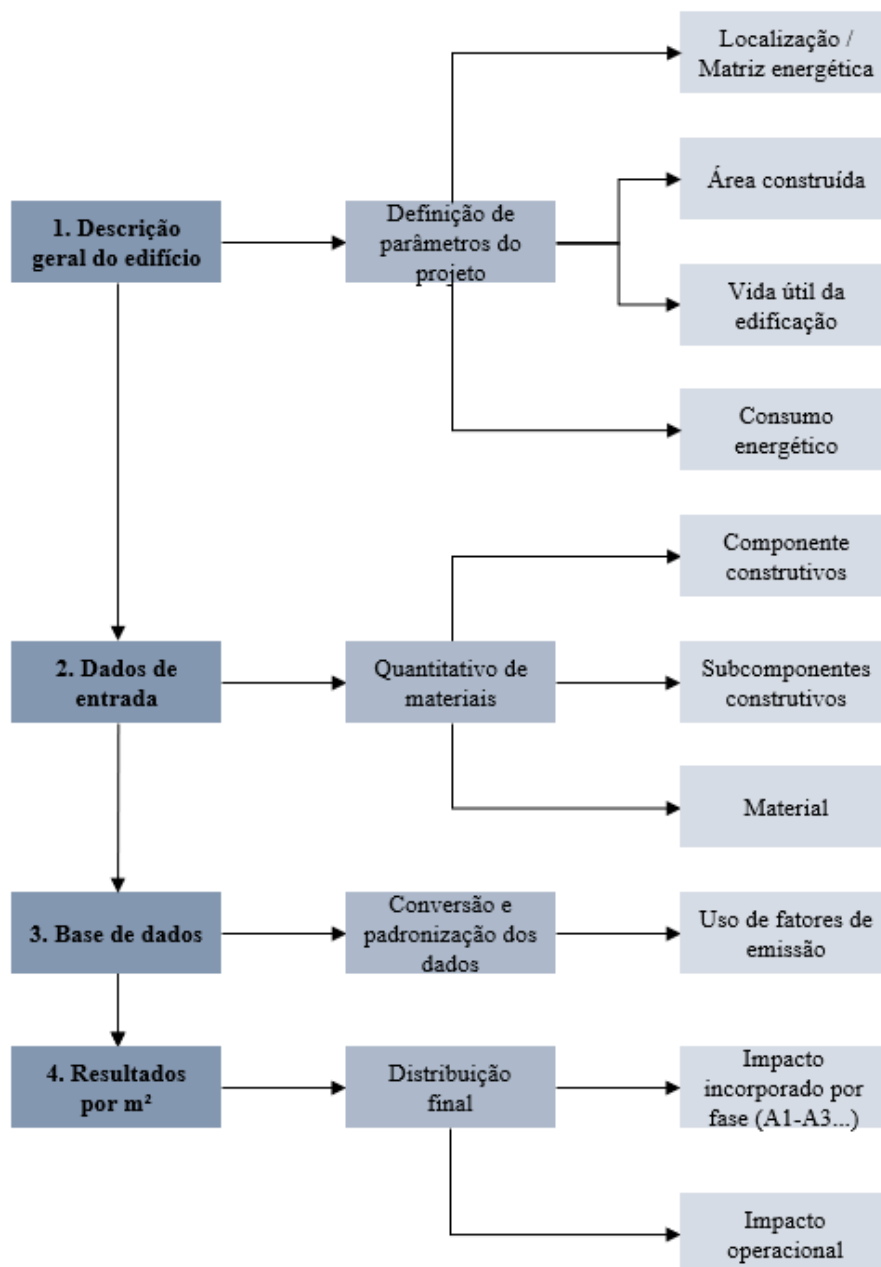
Para a ACV, foi utilizada a planilha “LCA tool + EPD’s”, proposta pela IEA SHC no âmbito da *Task 70 / EBC Annex 90 — Low Carbon, High Comfort Integrated Lighting*. A ferramenta, elaborada por Hoxha (2024), consiste em uma planilha em *Excel* destinada à estimativa do PAG de projetos arquitetônicos, a partir de hipóteses simplificadas e parâmetros previamente definidos. Sua estrutura metodológica está fundamentada nas normas EN 15978:2011 e EN 15804:2019, que orientam a avaliação ambiental de edificações e produtos da construção. A escolha dessa ferramenta justifica-se por sua adequação ao escopo da pesquisa, uma vez que permite a quantificação das emissões de carbono associadas tanto aos materiais construtivos quanto ao consumo operacional de energia, possibilitando a avaliação integrada dos impactos ao longo do ciclo de vida da edificação. Além disso, a ferramenta foi desenvolvida no contexto de uma iniciativa internacional voltada à redução das emissões de carbono em edificações, apresentando compatibilidade com os objetivos deste estudo. Sua utilização também favoreceu a padronização dos procedimentos de cálculo e a comparação dos resultados com pesquisas desenvolvidas no âmbito da IEA SHC *Task 70 / EBC Annex 90*, da qual integrantes do Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética (LACAM/UnB) participam como colaboradores.

A avaliação foi conduzida conforme os princípios da ACV aplicados a edificações, considerando a categoria de impacto Mudanças Climáticas, expressa em PAG, em kg CO₂eq. As fronteiras do sistema foram definidas segundo a abordagem “do berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*), contemplando as etapas de produção dos materiais (A1-A3), transporte até o canteiro de obras (A4), instalação (A5), substituição de componentes (B4), consumo operacional de energia (B6), demolição (C1), transporte de resíduos (C2) e processamento/disposição final (C3-C4), conforme estabelecido pelas normas EN 15978:2011 e EN 15804:2019. A unidade funcional adotada foi 1 m² de área construída ao longo da vida útil da edificação, definida em 50 anos.

A planilha organiza os dados necessários aos cálculos, contemplando os principais componentes da edificação, e está estruturada em diferentes abas de trabalho: descrição geral,

dados de entrada, base de dados e resultados normalizados por metro quadrado (m²). O fluxograma apresentado na Figura 15 ilustra a sequência de processos adotados para a realização da ACV na ferramenta.

Figura 15: Fluxograma conceitual da estrutura de funcionamento da planilha de ACV.



Fonte: Autor (2026).

Conforme ilustrado no fluxograma, o processo de cálculo da ACV iniciou-se na aba Descrição Geral (Tabela 10), na qual foram inseridas as informações básicas do objeto de estudo, como localização, área construída, consumo energético e vida útil da edificação. Esses dados funcionaram como parâmetros globais que alimentaram as etapas seguintes da planilha e foram essenciais para a normalização dos resultados, tanto por área quanto por tempo.

Tabela 10: Aba de descrição geral da planilha de ACV.

Descrição geral	Inputs	Unidade
Localização / fator de carbono da matriz energética	0,182	kg CO ₂ eq/kWh
Área da construção	207	m ²
Consumo energético	2.822	kWh/ano
Vida útil	50	anos

Fonte: Autor (2026).

A segunda aba, Dados de Entrada, correspondeu à etapa de levantamento dos quantitativos de materiais, constituindo a principal fonte de dados do modelo. Nessa seção, cada material foi descrito segundo três níveis de detalhamento: componente construtivo, subcomponente construtivo e material. Também foram incluídas informações complementares que influenciaram diretamente o cálculo de etapas específicas do ciclo de vida:

- A4 (transporte até o canteiro de obra): distância média (km) percorrida por material;
- B4 (substituição): número de substituições previstas durante a vida útil;
- C2 (transporte para o descarte): distância média (km) até o destino final.

Nessa etapa, a confiabilidade dos resultados está diretamente associada ao grau de detalhamento do levantamento quantitativo dos materiais que compõem o objeto avaliado. As informações necessárias puderam ser obtidas a partir de diferentes fontes, como DAPs fornecidas por fabricantes, bases de dados consolidadas — como a *Ecoinvent* —, revisões sistemáticas da literatura ou orçamentos vinculados ao projeto executivo da edificação.

Dessa forma, o levantamento dos materiais do sistema construtivo do LabZero – UnB foi realizado a partir da análise detalhada do projeto executivo da edificação, incluindo plantas arquitetônicas, cortes e, principalmente, dados de fornecedores da obra. Com base nesses documentos, realizou-se a quantificação dos principais componentes dos sistemas construtivos, considerando elementos como fundação, estrutura, pisos, paredes, esquadrias, cobertura e demais componentes relevantes para a análise, conforme ilustrado na Tabela 11.

Tabela 11: Dados de entrada, levantamento quantitativo do sistema construtivo do LabZero - UnB.

Componentes	Subcomponentes	Material	Quantidade	Unidade	Substituição (B4)	Transporte (km)	
						A4	C2
Fundação	Concretagem de estacas	Concreto	27,94	m³	0	500	30
	Blocos de coroamento						
	Forma em madeira	Madeira	0,46	m³	0	200	50
	Armaduras	Aço	561,7	kg	0	1200	150
	Impermeabilização	Poliéster	27,6	m²	0	200	30
Estrutura	Aço	Aço	876	kg	0	1200	150
	Fôrma de laje	Madeira	0,31	m³	0	200	50
	Concretagem baldrame	Concreto	8,46	m³	0	500	30
	Forma de viga baldrame	Madeira	1,89	m³	0	200	50
Estrutura metálica	Perfis metálicos estruturais	Aço	7.420	kg	0	1200	150
Paredes (internas)	Cobogó cerâmico	Cerâmica	19,6	m²	1	200	30
	Divisória em granilite	Granilite	2,81	m²	1	1200	30
	Parede de <i>drywall</i>	<i>Drywall</i>	181,59	m²	1	1200	80
	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	133,91	m²	1	1200	80
Paredes (fachada)	Sistema fibrocimento	Fibrocimento	83,57	m²	1	1200	30
	Lã de rocha	Lã de rocha	83,57	m²	1	1200	80
	Gesso	Gesso	83,57	m²	1	500	80
Esquadrias	Porta de alumínio	Alumínio	18,9	kg	1	1200	150
	Portas de madeiras	Madeira	17,64	m³	1	200	50
	Janela (11 unidades)	Alumínio	234,2	kg	1	1200	150
	Vidro laminado 4mm	Vidro	24,3	m²	1	1200	120
	Vidro 10mm	Vidro	6,93	m²	1	1200	120
Cobertura	Telha termoacústica	Aço	750	kg	1	1500	80
	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	98,28	m²	1	1200	150
	Trama de aço	Aço	750	kg	1	1200	50

Pisos	Piso cimento queimado	Cimento queimado	207,14	m ²	1	200	150
	Contrapiso	Argamassa	218,69	m ²	1	200	30
	Granilite	Granilite	11,55	m ²	1	1200	30
Pintura	Massa látex (paredes)	Massa acrílica	207	m ²	1	200	0
	Pintura paredes	Tinta	298,38	m ²	1	200	0
	Pintura metálica	Tinta	25	m ²	1	200	0
	Pintura madeira	Verniz	113,94	m ²	1	200	0
	Selador	Selador	298,38	m ²	1	200	0
	Pintura teto	Tinta	286	m ²	1	200	0
Brises linear	Brises linear	Alumínio extrudado	62,92	kg	1	1200	150
Estrutura de suporte (PVSD)	Barras de aço	Aço	352,6	kg	1	1200	150
Estrutura de suporte (Módulos fotovoltaico - cobertura)	Barras de alumínio	Alumínio	53,24	kg	1	1200	150

Fonte: Autor (2026).

Para cada subcomponente, foram identificados os materiais constituintes e suas respectivas quantidades em unidade (un). Esse procedimento permitiu a elaboração do quantitativo de materiais da edificação, que serviu como base para o cálculo das emissões de carbono incorporadas associadas às etapas de produção (A1-A3), transporte até o canteiro de obras (A4), instalação (A5), substituição (B4) e fim de vida (C1-C4). Os materiais destacados em vermelho não foram considerados no cálculo de ACV devido à ausência de DAPs e incertezas numéricas, o que impossibilitou a obtenção dos dados necessários para a alimentação do inventário.

Para o cálculo das estruturas de suporte dos módulos fotovoltaicos instalados na fachada norte e na cobertura, bem como dos *brises* lineares instalados na parte inferior da fachada, foi necessário realizar estimativas manuais, uma vez que os fornecedores disponibilizaram apenas as dimensões dos perfis e o tipo de material, sem a especificação detalhada dos componentes. Dessa forma, o cálculo foi realizado com base nas dimensões geométricas dos perfis e na densidade dos materiais utilizados, conforme especificado no projeto.

No caso da estrutura dos dispositivos PVSD e dos *brises*, considerou-se um perfil oco de aço com comprimento de 5,74 m, altura e largura de 0,5 m e espessura de 0,02 m. Inicialmente, foi determinada a área da seção transversal do perfil, obtida pela diferença entre a área externa e a área interna do elemento. A partir dessa área líquida, calculou-se o volume total de aço do perfil, multiplicando-se pela extensão da peça. Considerando a densidade do aço de 8000 kg/m³ (ABNT NBR 15980), estimou-se um peso aproximado de 17,63 kg por perfil. Como o sistema é composto por 20 barras de suporte, o peso total estimado da estrutura é de aproximadamente 352,6 kg.

Para a estrutura de suporte dos módulos instalados na cobertura, composta por perfis de alumínio, adotaram-se dimensões de 8 m de comprimento, 0,3 m de altura, 0,3 m de largura e espessura de 0,02 m. Aplicando o mesmo procedimento de cálculo utilizado para os perfis de aço e considerando a densidade do alumínio de 2700 kg/m³, conforme dados da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2022), estimou-se um peso aproximado de 4,84 kg por perfil. Como o sistema de suporte da cobertura é composto por 11 barras, o peso total estimado da estrutura é de 53,24 kg.

Em relação aos *brises*, o cálculo foi realizado a partir da multiplicação da área unitária do elemento (1,38 m²) pelo peso específico do alumínio (2,4 kg/m²), conforme dados fornecidos no catálogo do fabricante T-Sun Power. Dessa forma, estimou-se que cada unidade de *brise*

possui aproximadamente 3,3 kg. Considerando a instalação de 19 unidades, o peso total estimado do conjunto é de 62,92 kg.

Nesse levantamento, também foram consideradas as substituições dos materiais ao longo da vida útil da edificação, utilizando-se como referência padrões realistas de reposição observados em edificações públicas. Além disso, foram estimadas as distâncias de transporte, em quilômetros (km), para a avaliação das fases A4 e C2 do ciclo de vida. Para essa estimativa, consideraram-se o local de origem e produção dos materiais, bem como as etapas de distribuição até os pontos de comercialização, o transporte das lojas até a obra e, por fim, o encaminhamento para disposição final. Todo esse levantamento pode ser consultado nos dados apresentados no Apêndice A.

Para a elaboração do quantitativo de materiais dos sistemas fotovoltaicos do LabZero - UnB, utilizaram-se como referência as dimensões obtidas junto ao fornecedor da tecnologia e a DAP de um módulo fotovoltaico semelhante ao adotado no projeto. Na estimativa dos dispositivos PVSD e dos módulos fotovoltaicos instalados na cobertura, inicialmente, a área do módulo foi calculada com base em suas dimensões de comprimento e largura ($2,278 \text{ m} \times 1,134 \text{ m}$). Em seguida, esse valor foi multiplicado pela quantidade de módulos adotada em cada configuração, sendo considerados 10 módulos para os dispositivos PVSD e 10 módulos para a cobertura, conforme apresentado na Tabela 12.

Para essa quantificação, na DAP, os diferentes componentes constituintes dos módulos, como vidro, silício, moldura e demais materiais associados, já se encontram contabilizados de forma integrada no indicador ambiental do produto. Dessa forma, a contribuição dos materiais que compõem os módulos fotovoltaicos é incorporada em um único valor de impacto ambiental, evitando a contabilização individualizada de cada componente.

Tabela 12: Dados de entrada, levantamento quantitativo dos materiais dos sistemas fotovoltaicos do LabZero – UnB.

Componentes	Subcomponentes	Material	Quantidade	Unidade	Substituição (B4)	Transporte (km)		Transporte aquaviário (km)
						A4	C2	A4
Dispositivos de sombreamento fotovoltaico (PVSD)	Módulos fotovoltaicos	N/Type Monocristalina	25,7	m ²	1	1200	1000	18.000
		Vidro frontal 2mm						
		Vidro traseiro 2mm						
		Moldura poliuretano						
		Plástico						
Sistema fotovoltaico convencional (cobertura)	Módulos fotovoltaicos	N/Type Monocristalina	25,7	m ²	1	1200	1000	18.000
		Vidro frontal 2mm						
		Vidro traseiro 2mm						
		Moldura poliuretano						
		Plástico						

Fonte: Autor (2026).

De modo semelhante ao levantamento realizado para o sistema construtivo do LabZero – UnB, os sistemas fotovoltaicos também foram analisados quanto ao número de substituições de materiais ao longo da vida útil, bem como em relação às distâncias de transporte consideradas nas fases A4 e C2 do ciclo de vida. Nesse contexto, foi considerada a importação dos módulos fotovoltaicos, assumindo-se a fabricação na China, principal polo produtor mundial da tecnologia fotovoltaica. Para representar essa condição, adotou-se uma distância média de transporte aquaviário de aproximadamente 18.000 km entre o porto de origem e o Brasil, complementada por transporte rodoviário nacional até o local da obra. Todo o material levantado, assim como o anterior, pode ser consultado no Apêndice A.

A aba Base de Dados (Tabela 13) correspondeu à etapa de tratamento, verificação e padronização das informações inseridas na aba anterior. Nessa fase, os quantitativos levantados foram convertidos para uma unidade funcional comum, com base em fatores de emissão expressos em kg CO₂eq por unidade de material. Os fatores de emissão apresentados na Tabela 13 foram obtidos a partir de DAPs específicas dos produtos analisados ou, quando indisponíveis, de bases de dados internacionalmente reconhecidas, como a *Ecoinvent* v3.9. As fontes individuais de cada fator de emissão encontram-se identificadas no Apêndice B, permitindo a rastreabilidade e verificação dos dados utilizados na avaliação. A partir desses valores, foram aplicados fatores de caracterização referentes ao indicador GWP Fóssil nas fases A1-A3 e C4, os quais permitiram discriminar a contribuição de cada material nas diferentes etapas do ciclo de vida consideradas na avaliação, assegurando a coerência metodológica e a comparabilidade dos resultados.

Observa-se que alguns materiais apresentam valores negativos na etapa C4, como concreto e granilite. Esses valores representam créditos ambientais associados à reciclagem, recuperação de materiais ou substituição de matérias-primas em ciclos produtivos futuros. Nesses casos, os benefícios ambientais obtidos no fim de vida superam as emissões geradas pelos processos de tratamento e disposição final, resultando em saldo líquido negativo de emissões.

Tabela 13: Aba de base de dados.

Componentes	Subcomponentes	Material	Fator de emissão (GWP Fóssil)		Unidade
			A1-A3	C4	
Fundação	Concretagem de estacas	Concreto	293	-17,7	kg CO2eq/m³
	Blocos de coroamento				
	Fôrma em madeira	Madeira	207	33,6	kg CO2eq/m³
	Armaduras	Aço	1,88	0,0124	kg CO2eq/kg
	Impermeabilização	Poliéster	/	/	/
Estrutura	Aço	Aço	1,88	0,0124	kg CO2eq/kg
	Fôrma de laje	Madeira	207	33,6	kg CO2eq/m³
	Concretagem baldrame	Concreto	293	-17,7	kg CO2eq/m³
	Forma de viga baldrame	Madeira	207	33,6	kg CO2eq/m³
	Perfis metálicos estruturais	Aço	1,88	0,0124	kg CO2eq/kg
Estrutura metálica	Perfis metálicos estruturais	Aço	1,88	0,0124	kg CO2eq/kg
	Cobogó cerâmico	Cerâmica	/	/	/
	Divisória em granilite	Granilite	6,53	-0,333	kg CO2eq/m²
	Parede de <i>drywall</i>	<i>Drywall</i>	2,01	0,064	kg CO2eq/m²
Paredes (internas)	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	11,9	0,0313	kg CO2eq/m²
	Sistema fibrocimento	Fibrocimento	8,73	0,205	kg CO2eq/m²
	Lã de rocha	Lã de rocha	11,9	0,0313	kg CO2eq/m²
	Gesso	Gesso	2,01	0,064	kg CO2eq/m²
Paredes (fachada)	Porta de alumínio	Alumínio	4	0,14	kg CO2eq/kg
	Portas de madeiras	Madeira	207	33,6	kg CO2eq/m³
	Janelas	Alumínio	4	0,14	kg CO2eq/kg
	Vidro 4mm	Vidro	10,6	0,089	kg CO2eq/m²
	Vidro 10mm	Vidro	25	0,142	kg CO2eq/m²
Esquadrias	Telha termoacústica	Aço	1,88	0,0124	kg CO2eq/kg
	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	11,9	0,0313	kg CO2eq/m²
	Trama de aço	Aço	1,88	0,0124	kg CO2eq/kg
Cobertura	Telha termoacústica	Aço	1,88	0,0124	kg CO2eq/kg
	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	11,9	0,0313	kg CO2eq/m²
	Trama de aço	Aço	1,88	0,0124	kg CO2eq/kg
Pisos	Piso cimento queimado	Cimento queimado	/	/	/

	Contrapiso	Argamassa	1,31	0,0329	kg CO2eq/m²
	Granilite	Granilite	6,53	-0,333	kg CO2eq/m²
Pintura	Massa látex (paredes)	Massa acrílica	/	/	/
	Pintura paredes	Tinta	/	/	/
	Pintura metálica	Tinta	/	/	/
	Pintura madeira	Verniz	/	/	/
	Selador	Selador	/	/	/
	Pintura teto	Tinta	/	/	/
Brises linear	Brises linear	Alumínio extrudado	7,4	0,00065	kg CO2eq/kg
Estrutura de suporte (PVSD)	Barras de aço	Aço	1,88	0,0124	kg CO2eq/kg
Estrutura de suporte (Módulos fotovoltaico - cobertura)	Barras de alumínio	Alumínio	4	0,14	kg CO2eq/kg
Dispositivos de sombreamento fotovoltaico (PVSD)	Módulos fotovoltaicos	N/Type Monocristalina	93	0,108	kg CO2eq/m²
		Vidro frontal 2mm			
		Vidro traseiro 2mm			
		Moldura poliuretano			
		Plástico			
Sistema fotovoltaico convencional (cobertura)	Módulos fotovoltaicos	N/Type Monocristalina	93	0,108	kg CO2eq/m²
		Vidro frontal 2mm			
		Vidro traseiro 2mm			
		Moldura poliuretano			
		Plástico			
Transporte rodoviário	0,119				kg CO2eq/tkm
Transporte aquaviário	0,006549				kg CO2eq/tkm

Fonte: Autor (2026).

Os materiais destacados em vermelho não foram incluídos no cálculo final da ACV devido à indisponibilidade de DAPs compatíveis ou de dados ambientais suficientemente consistentes para a modelagem dos impactos ao longo do ciclo de vida.

Na aba Base de Dados, também foram definidos os fatores de emissão de carbono para o transporte, expressos em $\text{kg CO}_2\text{eq/t.km}$. Para sua aplicação, todos os quantitativos de materiais foram convertidos para toneladas, de modo a viabilizar os cálculos das etapas A4 (transporte até o canteiro) e C2 (transporte no fim de vida).

Por fim, na aba Resultados, os valores foram apresentados de forma normalizada por metro quadrado, contemplando cada etapa do ciclo de vida — A1–A3, A4, A5, B4, B6, C1, C2 e C3–C4 — para cada material, expressos em $\text{kg CO}_2\text{eq/m}^2$. A tabela correspondente a essa aba está disponível no Apêndice C. Para a obtenção dos resultados em $\text{kg CO}_2\text{eq/m}^2$, que complementaram os cálculos do PAG total incorporado na aba Resultados, foi necessário calcular o impacto de cada material em cada etapa do ciclo de vida. O procedimento adotado é descrito a seguir:

- Etapa A1–A3 (extração, processamento e produção): multiplicou-se a quantidade de material inserida na aba Dados de Entrada pelo fator de conversão correspondente, localizado na aba Base de Dados. Esse procedimento foi repetido para todos os materiais incluídos nesta etapa;
- Etapa A4 (transporte até o canteiro de obra): o cálculo foi realizado multiplicando-se a quantidade de material em toneladas (t), especialmente nessa fase, pela distância de transporte (km) informada na aba Dados de Entrada e pelo fator de emissão de transporte de carga ($\text{kg CO}_2\text{eq/t.km}$), disponível na aba Base de Dados;
- Etapa A5 (instalação): adotou-se uma estimativa padrão correspondente a 5% das emissões da etapa A1–A3, ou seja, multiplicou-se o valor obtido nessa etapa por 0,05. Esse percentual representa as emissões associadas às atividades de construção e montagem em obra, incluindo o uso de equipamentos, consumo de energia, perdas de materiais e insumos auxiliares durante a execução. Em razão da ausência de inventário detalhado do canteiro de obras do LabZero – UnB, optou-se pela utilização do valor padrão disponibilizado pela ferramenta de acordo com as normas EN 15978:2011 e EN 15804:2019;

- Etapa B4 (substituição): calculou-se a soma das emissões de todas as etapas (A1–A3, A4, A5, C1, C2 e C3–C4) e multiplicou-se o resultado pelo número de substituições do material ao longo da vida útil da edificação. Nessa etapa;
- Etapa C1 (demolição): considerou-se uma estimativa padrão de 2% das emissões da etapa A1–A3, ou seja, multiplicou-se o valor obtido nessa etapa por 0,02. Esse percentual representa o consumo energético e as emissões associadas às atividades de desmontagem, demolição e remoção dos componentes ao final da vida útil da edificação;
- Etapa C2 (transporte de resíduos): para essa fase, multiplicou-se a quantidade de material, expressa em toneladas (t) pela distância de transporte de resíduos (km) e pelo fator de emissão de transporte de carga. A distância considerada para essa etapa corresponde ao transporte dos resíduos da construção até instalações de tratamento, reciclagem ou disposição final, conforme estimativas apresentadas no Apêndice A;
- Etapas C3–C4 (processamento e disposição final): multiplicou-se a quantidade de material inserida na aba Dados de Entrada pelo fator de conversão da etapa C4, disponível na aba Base de Dados. Esses fatores representam cenários de fim de vida específicos para cada material, contemplando processos que podem abranger reciclagem, recuperação energética, aterro sanitário ou outras formas de disposição final previstas nas respectivas DAPs ou bases de dados utilizadas. Dessa forma, os valores das etapas C3-C4 refletem o balanço líquido das emissões associadas ao destino final dos materiais.

Com relação ao cálculo do transporte aquaviário para os sistemas fotovoltaicos, foi adotado o mesmo procedimento da etapa A4, diferindo apenas quanto à distância de transporte (km) e ao fator de emissão, que, nesse caso, correspondem a esse modal.

Após o cálculo individual de cada material em todas as etapas do ciclo de vida, os resultados foram somados para obtenção das emissões incorporadas totais (kg CO₂eq) e, em seguida, divididos pela área total (m²) do objeto avaliado, resultando no valor em kg CO₂eq/m². Além disso, para estimar a quantidade de CO₂eq emitida ao longo da vida útil, dividiu-se a soma dos valores em kg CO₂eq/m² obtidos para cada etapa do ciclo de vida pelo número de anos de vida útil definido na avaliação do objeto. Neste trabalho, adotou-se uma vida útil de 50 anos; contudo, os resultados foram anualizados (kg CO₂eq/m².ano), de modo a permitir melhor comparabilidade com a literatura.

A fórmula correspondente ao cálculo das emissões incorporadas anualizadas é apresentada na Equação:

$$\text{Incorporado (kg CO}_2\text{eq/m}^2\cdot\text{ano)} = \frac{\text{kg CO}_2\text{eq/m}^2}{\text{Vida útil}} \quad (2)$$

Onde:

kg CO₂eq/m².ano: emissões anuais por metro quadrado ano;

Σ (kg CO₂eq/m²): soma total das emissões incorporadas ao longo do ciclo de vida;

vida útil: período de análise do edifício.

Por fim, a avaliação das emissões incorporadas apresentou algumas limitações inerentes à disponibilidade e qualidade dos dados do inventário. Destaca-se a limitada disponibilidade de DAPs nacionais para materiais da construção civil, o que demandou a utilização de dados internacionais. Embora amplamente reconhecidas na literatura, esses dados podem não representar integralmente as condições produtivas, energéticas e logísticas do contexto brasileiro. Alguns materiais não puderam ser incluídos na avaliação, como impermeabilizantes, cobogó cerâmico, piso de cimento queimado e tintas, devido à ausência de dados ambientais compatíveis. Além disso, existem incertezas associadas à estimativa da frequência de substituição dos componentes na etapa B4, em razão da dificuldade de determinar com precisão o número de intervenções ao longo da vida útil da edificação. Essa incerteza é particularmente relevante em edificações públicas, uma vez que as substituições e manutenções dependem de fatores como disponibilidade orçamentária, políticas institucionais, planejamento de manutenção e capacidade técnica das equipes responsáveis pela operação e conservação do edifício. Também existem incertezas associadas às hipóteses adotadas para transporte (módulos A4 e C2), uma vez que as distâncias percorridas foram estimadas com base na localização dos fabricantes, centros de distribuição e destinos finais dos resíduos. Na prática, essas distâncias podem variar em função das rotas efetivamente utilizadas, da disponibilidade de fornecedores, dos modais de transporte empregados e das condições logísticas específicas de cada material. Adicionalmente, a modelagem adotou distâncias médias e fatores de emissão padronizados, não contemplando variações operacionais, como diferentes taxas de ocupação dos veículos, trajetos alternativos ou mudanças na cadeia de suprimentos ao longo do período de construção e operação da edificação.

3.5.2. Cálculo operacional e fator de carbono

Para cálculo das emissões da fase operacional (B6), adotou-se uma abordagem simplificada, consistindo na multiplicação do consumo anual de energia (kWh/ano) pelo fator de emissão da matriz elétrica do país onde a edificação está localizada (kg CO₂eq/kWh), conforme apresentado na Equação (3):

$$E_{op} \text{ (kg CO}_2\text{eq)} = C_{energia} \times FC \text{ (3)}$$

Onde:

E_{op} : emissões de GEE na fase operacional (kg CO₂eq/ano);

$C_{energia}$: consumo energético (kWh/ano);

FC : fator de emissão de carbono da matriz elétrica nacional (kg CO₂eq/kWh).

Para a determinação das emissões operacionais normalizadas por área (kg CO₂eq/m².ano), o valor total das emissões operacionais foi dividido pela área total da edificação, conforme expresso na Equação (4):

$$E_{op} \text{ (kg CO}_2\text{eq/m}^2\text{.ano)} = \frac{E_{op}}{A} \text{ (4)}$$

Onde:

E_{op} (kg CO₂eq/m².ano) = emissões operacionais por metro quadrado ano;

E_{op} = emissões operacionais anuais (kg CO₂eq/ano);

A = área total da edificação (m²);

Em seguida, para a determinação das emissões operacionais ao longo da vida útil da edificação, multiplica-se o valor anual em kg CO₂eq/m².ano pela vida útil considerada para o ciclo de vida da edificação, neste caso, 50 anos, conforme expresso na Equação (5):

$$E_{op, total} = E_{op, anual} \times \text{vida útil} \text{ (5)}$$

Onde:

$E_{op, total}$: emissões operacionais totais ao longo do ciclo de vida (kg CO₂eq/m².anos);

$E_{op, anual}$: emissões operacionais anualizadas (kg CO₂eq/m².ano);

Vida útil = período de análise da edificação (anos).

No entanto, assim como no caso das emissões incorporadas, os resultados operacionais finais foram apresentados de forma anualizada. Dessa forma, não foi necessário realizar essa multiplicação para a análise.

Com relação aos fatores de emissão de carbono, a Tabela 14 apresenta os valores adotados para o cálculo das emissões operacionais nos três cenários propostos.

Tabela 14: Fator de emissão de carbono brasileiro.

Fonte de eletricidade	Fator de emissão de carbono (kg CO ₂ eq/kWh)
Fotovoltaica	0,000015
Rede elétrica	0,182

Fonte: Autor, adaptado (Ecoinvent v3.11, 2026).

O fator de carbono adotado para a eletricidade fotovoltaica neste estudo foi de 0,000015 kg CO₂eq/kWh. Esse valor, obtido da base *Ecoinvent* v3.11 (2026), representa a intensidade de carbono da energia gerada por sistemas fotovoltaicos no contexto brasileiro. Ele incorpora emissões associadas ao ciclo de vida operacional da tecnologia, como atividades associadas à limpeza dos módulos, resultando em um valor significativamente reduzido.

Para a intensidade de emissões da rede elétrica brasileira, adotou-se o valor de 0,182 kg CO₂eq/kWh. Esse fator foi obtido a partir da mesma base de dados utilizada para o fator de emissão fotovoltaico, *Ecoinvent* v3.11 (2026). A adoção desse valor teve como objetivo garantir a consistência metodológica da avaliação, mantendo a uniformidade das premissas e procedimentos de modelagem para todas as etapas do ciclo de vida consideradas. A utilização de fatores de emissão provenientes de diferentes bases de dados poderia introduzir inconsistências metodológicas e comprometer a comparabilidade dos resultados. Dessa forma, optou-se por utilizar integralmente os fatores disponibilizados pela *ecoinvent*.

Ainda assim, o Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente renovável, com forte participação da geração hidrelétrica (EPE, 2025), a estimativa das emissões de GEE associadas à eletricidade apresenta algumas particularidades. Um aspecto relevante refere-se à modelagem das emissões de metano (CH₄), que difere do CO₂, uma vez que o CH₄ possui potencial de aquecimento global significativamente mais elevado, especialmente em horizontes temporais mais curtos. No contexto brasileiro, essa questão torna-se particularmente relevante devido às emissões de metano provenientes da decomposição anaeróbia de matéria orgânica em reservatórios hidrelétricos, as quais apresentam elevada variabilidade espacial e temporal. Dessa forma, a consideração adequada das emissões de CH₄ nas estimativas da matriz elétrica

mostrou-se fundamental para representar com maior precisão o balanço de carbono do setor elétrico. Além disso, a análise também contemplou os impactos associados às demais fontes de geração presentes na matriz elétrica, incluindo as etapas de instalação, operação, manutenção, limpeza e substituição de componentes ao longo do ciclo de vida dos sistemas energéticos. Assim, justificou-se a não utilização do fator de emissão da rede elétrica divulgado pelo MCTI.

3.5.3. Cálculo de balanço de carbono evitado

O cálculo do balanço de carbono evitado do LabZero – UnB foi realizado com base nas emissões incorporadas e operacionais da edificação, bem como nos fatores de emissão de carbono da eletricidade. Para isso, foram adotados os dois fatores de emissão provenientes da base de dados *Ecoinvent* v3.11, apresentados na Tabela 14. O procedimento de cálculo foi estruturado com base em Grinham *et al.* (2022), no qual os benefícios da geração de energia são considerados na forma de emissões evitadas.

Dessa forma, considerou-se a soma das emissões incorporadas e operacionais, subtraída das emissões evitadas oriundas da geração fotovoltaica, conforme expresso na Equação:

$$\text{Balanço} = E_{\text{incorporadas}} + E_{\text{operacionais}} - E_{\text{evitadas}} \quad (6)$$

Onde:

Balanço: balanço de carbono evitado da edificação (kg CO₂eq/m².ano);

Eincorporadas: emissões incorporadas ao longo do ciclo de vida (kg CO₂eq/m².ano);

Eoperacionais: emissões operacionais ao longo do ciclo de vida (kg CO₂eq/m².ano);

Eevitadas: emissões evitadas pela geração fotovoltaica (kg CO₂eq/m².ano).

Caso a aplicação da Equação (6) resulte em valor negativo, entende-se que o sistema fotovoltaico integrado à edificação compensou mais emissões do que aquelas associadas à sua construção e operação, indicando proximidade ou alcance da condição de edifício de carbono líquido zero.

O valor das emissões incorporadas foi obtido por meio da ACV do edifício LabZero – UnB. As emissões operacionais foram determinadas a partir do consumo energético da edificação, associado ao fator de emissão da matriz elétrica brasileira. As emissões evitadas, por sua vez, foram estimadas com base na geração fotovoltaica anual, considerando o FC da eletricidade da rede no cálculo. Esse procedimento permitiu quantificar o potencial de redução de emissões proporcionado pela geração local de energia, evidenciando a redução líquida de

carbono decorrente da substituição parcial da eletricidade da rede por energia solar no edifício LabZero – UnB.

O cálculo do balanço de carbono evitado apresenta algumas limitações metodológicas. Entre elas, destaca-se a adoção de um fator de emissão fixo para a matriz elétrica brasileira, o qual não considera as variações temporais e espaciais da intensidade de carbono da geração de eletricidade. Além disso, eventuais processos de descarbonização da matriz elétrica ao longo do tempo podem reduzir os benefícios ambientais atribuídos à geração fotovoltaica, alterando o potencial de emissões evitadas estimado neste estudo. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados à luz das simplificações e premissas inerentes ao método adotado.

04

Capítulo 04

Resultados e discussão

4. Resultados e discussão

A análise dos resultados foi estruturada com base nos três cenários previamente definidos na etapa metodológica, com o objetivo de possibilitar a comparação entre diferentes estratégias de proteção solar e suas implicações no desempenho da edificação. Além da avaliação do comportamento termoenergético, os cenários foram analisados quanto à sua contribuição para as emissões de GEE, considerando tanto as emissões incorporadas quanto as operacionais ao longo do ciclo de vida. Nesse contexto, a abordagem adotada permitiu examinar, de forma integrada, o impacto de cada solução no balanço de carbono evitado da edificação.

Dessa forma, o capítulo estabeleceu uma abordagem integrada entre desempenho térmico, eficiência energética e impactos ambientais, fornecendo subsídios para a compreensão das implicações das estratégias projetuais adotadas no LabZero – UnB, tanto do ponto de vista energético quanto das emissões de carbono ao longo do ciclo de vida.

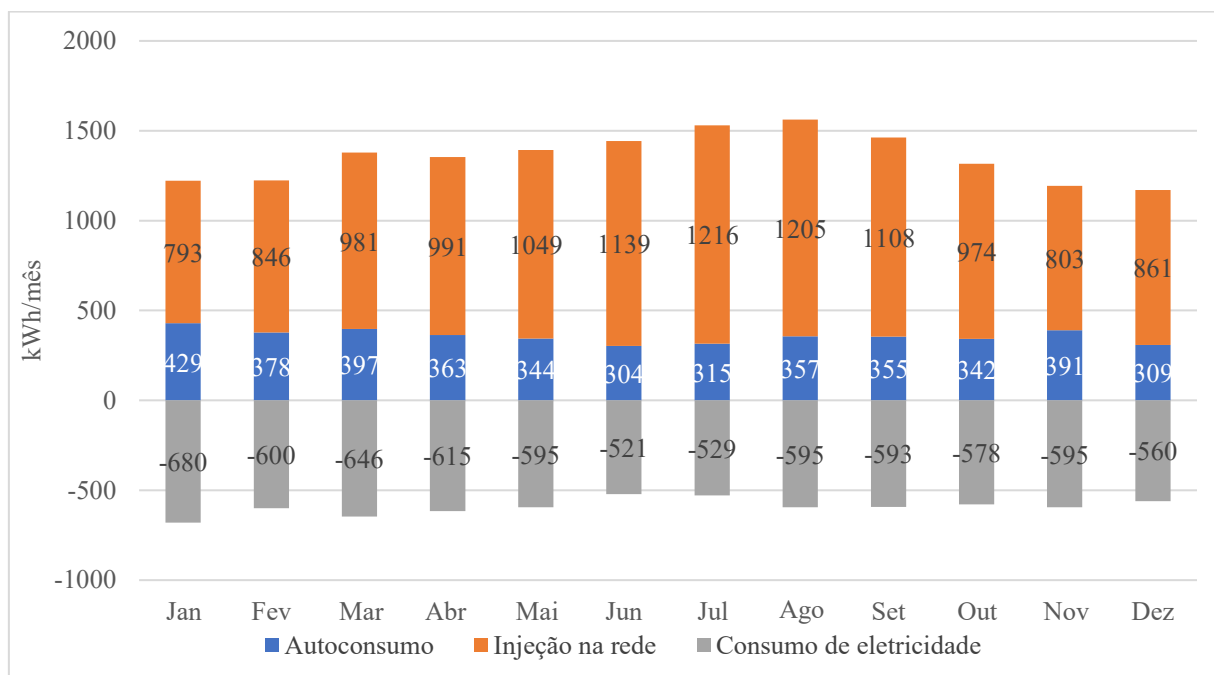
4.1. Resultados para o impacto termoenergético

4.1.1. Geração local de fonte solar fotovoltaica

A. Configuração com sistemas fotovoltaicos na cobertura e PVSD

Os sistemas fotovoltaicos apresentaram, em conjunto, uma potência instalada de 11,85 kWp, resultando, a partir das simulações, em uma geração anual estimada de 16.250 kWh. Em relação ao consumo anual da edificação, estimado em 7.106 kWh, o *software Sunny Design* indicou uma taxa de autonomia de 60,3%.

O valor obtido esteve diretamente associado ao perfil de uso da edificação, caracterizado pelo funcionamento em regime de escritório, com operação estendida até as 22h. Observou-se que o pico de consumo ocorreu a partir das 17h, período em que a geração fotovoltaica já se encontrava reduzida, em função da menor altitude solar e da consequente diminuição da irradiância incidente (Gráfico 5). Esse descompasso temporal entre geração e demanda limitou o aproveitamento instantâneo da energia produzida, reduzindo a taxa de autoconsumo.

Gráfico 5: Autoconsumo, injeção à rede e consumo da rede anuais do Cenário 2.

Fonte: Autor (2026).

Como consequência, verificou-se uma elevada parcela de energia excedente injetada na rede elétrica. A análise do balanço energético mensal evidenciou que, ao longo de todo o ano, ocorreram simultaneamente três fluxos energéticos: autoconsumo de 4.284 kWh/ano, injeção de excedentes à rede de 11.966 kWh/ano e consumo de energia da rede de 2.822 kWh/ano, refletindo a dinâmica de interação entre geração local e suprimento externo.

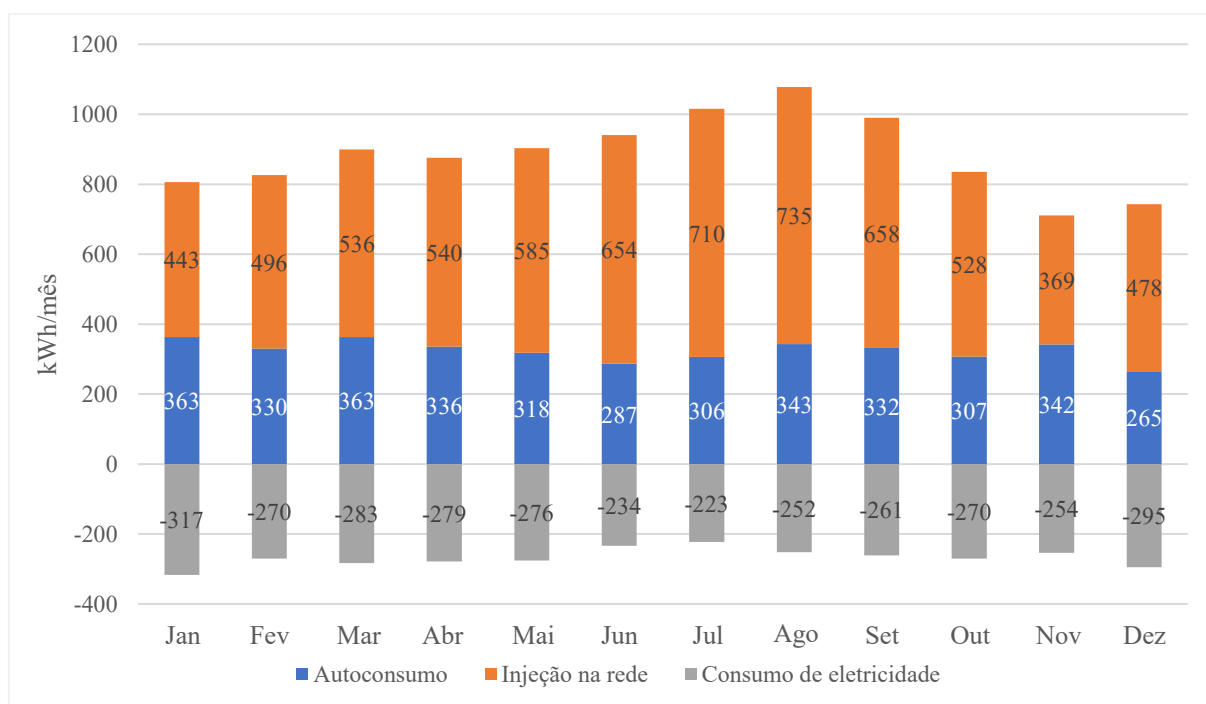
No Brasil, sistemas fotovoltaicos com potência inferior a 500 kW estão sujeitos à cobrança de tarifas pelo uso da rede elétrica ao injetarem energia excedente, conforme estabelecido pela Lei nº 14.300, cuja implementação ocorre de forma progressiva até 2029. Nesse contexto, quanto maior o volume de energia injetado na rede, maiores tendem a ser os encargos associados à utilização dos créditos energéticos gerados.

Diante disso, destaca-se a importância da determinação do Fator de Simultaneidade em projetos que utilizam geração local de energia renovável, uma vez que esse parâmetro influencia diretamente o tempo de retorno do investimento. Valores mais elevados de simultaneidade indicam maior autoconsumo da energia gerada, resultando em maior rentabilidade e redução do *payback*. Por outro lado, menores níveis de simultaneidade implicam maior dependência da rede e, consequentemente, aumento do tempo de retorno do investimento. Sob a perspectiva das emissões de carbono, a consideração desse fator permite maior precisão nas estimativas, ao possibilitar a diferenciação entre as fontes de energia efetivamente consumidas (MME, 2022).

B. Configuração com sistemas fotovoltaicos apenas na cobertura

Os módulos fotovoltaicos instalados na cobertura apresentaram potência instalada de 6,15 kWp e geração anual estimada de 10.624 kWh. Considerando o consumo energético anual da edificação, estimado em 7.106 kWh, o Gráfico 6 apresenta o balanço energético do Cenário 3, evidenciando a interação entre a geração fotovoltaica e a rede elétrica ao longo do ano.

Gráfico 6: Autoconsumo, injeção à rede e consumo da rede anuais do Cenário 3.



Fonte: Autor (2026).

Observou-se um autoconsumo anual de 3.891 kWh, correspondente à parcela da energia fotovoltaica utilizada diretamente pela edificação. Adicionalmente, 6.733 kWh foram excedentes injetados na rede elétrica, enquanto 3.215 kWh foram supridos pela rede para atender à demanda nos períodos em que a geração local foi insuficiente. Esses resultados evidenciam que, embora a geração fotovoltaica anual tenha sido superior ao consumo energético da edificação, a diferença temporal entre os perfis de geração e demanda resultou na necessidade de complementação energética pela rede elétrica.

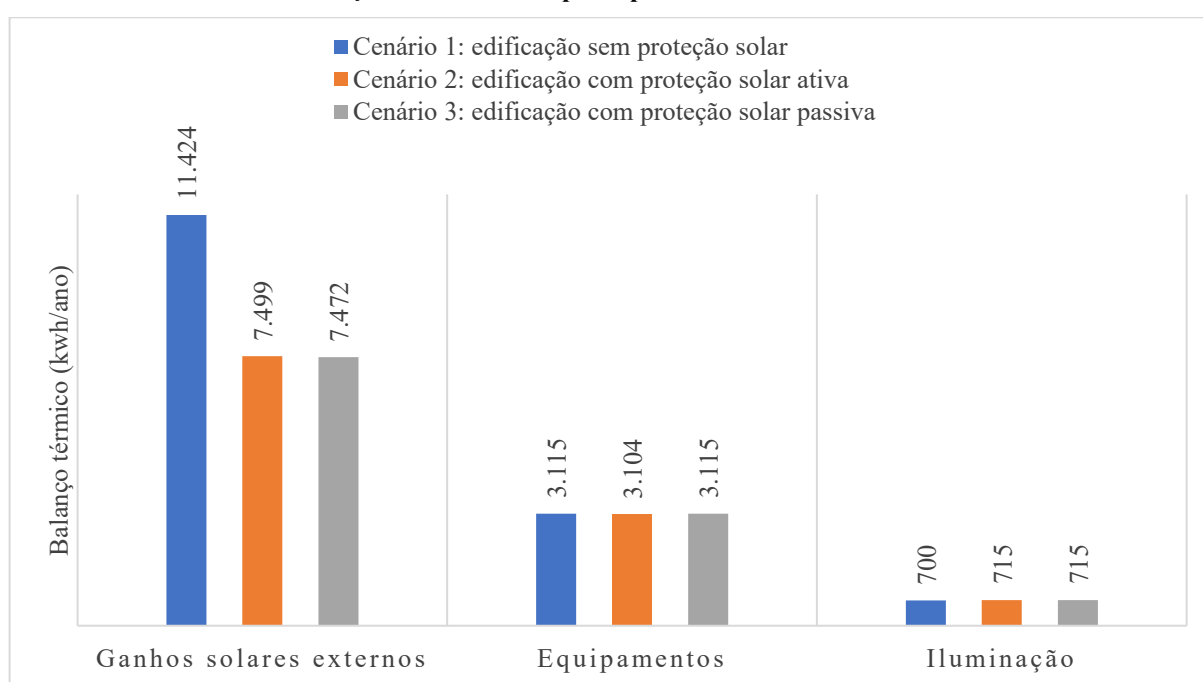
A partir das simulações realizadas no *software Sunny Design*, obteve-se uma taxa de autonomia de 54,8%. Esse indicador representa a parcela da demanda energética da edificação atendida diretamente pela energia gerada localmente, refletindo o grau de independência em relação à rede elétrica. Dessa forma, pouco mais da metade do consumo anual foi suprida

instantaneamente pela geração fotovoltaica, enquanto a parcela remanescente dependeu do fornecimento da rede em determinados períodos do dia.

4.1.2. Impacto térmico dos dispositivos de sombreamento fotovoltaico (PVSD)

No que se refere ao balanço térmico da edificação, entendido como a resultante das trocas de calor entre os ambientes interno e externo, foram identificadas três principais fontes de ganhos térmicos. Destacam-se os ganhos solares decorrentes da radiação incidente por meio das aberturas, e os ganhos internos, associados ao uso de equipamentos e sistemas de iluminação (Gráfico 7).

Gráfico 7: Balanço térmico com as principais fonte de calor do LabZero – UnB.



Fonte: Autor (2026).

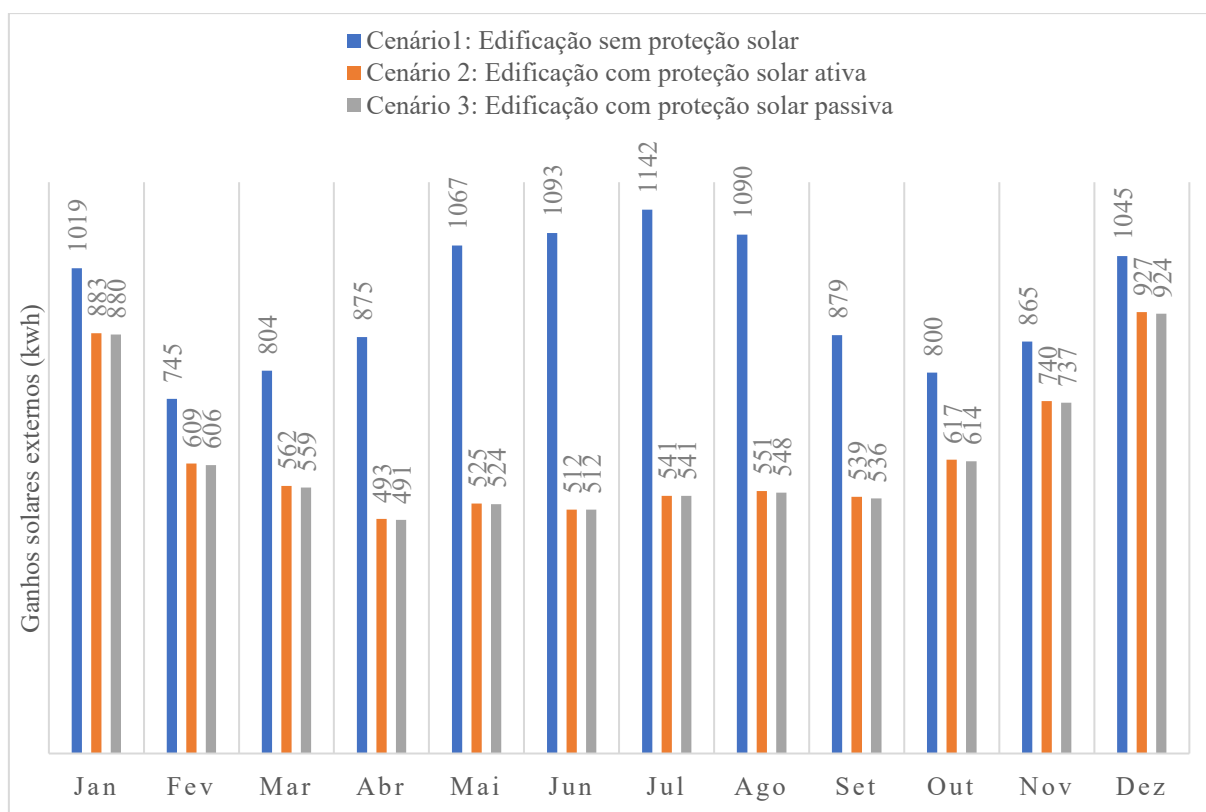
No gráfico apresentado, identificou-se a predominância dos ganhos solares externos como principal fonte de carga térmica na edificação. Observou-se que, em comparação ao Cenário 1 (sem proteção solar), a adoção de estratégias de sombreamento nos cenários 2 e 3 resultou em uma redução significativa desses ganhos, da ordem de aproximadamente 34%, tanto para os dispositivos PVSD quanto para a proteção solar passiva.

O Cenário 1 apresentou os maiores valores de ganhos solares externos ao longo do período analisado, indicando maior incidência de radiação solar direta e difusa por meio das superfícies envidraçadas. Esse comportamento contribuiu para o aumento da carga térmica interna e, conseqüentemente, para uma maior demanda potencial de resfriamento dos ambientes. Em comparação, os ganhos internos apresentaram menor variação entre os cenários,

uma vez que estão associados ao padrão de uso do edifício, permanecendo praticamente constantes ao longo das simulações. Essa análise evidencia o impacto significativo da adoção de estratégias de sombreamento no comportamento térmico da edificação ao longo do ano.

Com base nas simulações realizadas e nos dados obtidos por meio do *software DesignBuilder*, o Gráfico 8 apresenta os resultados mensais dos ganhos solares externos incidentes nas superfícies envidraçadas do LabZero – UnB, considerando os três cenários de análise.

Gráfico 8: Ganhos solares externos mensais dos três cenários analisados do LabZero – UnB.



Fonte: Autor (2026).

A comparação entre os cenários evidenciou o impacto significativo da adoção de estratégias de sombreamento no comportamento térmico da edificação ao longo do ano. Observou-se que o Cenário 1, apresentou os maiores valores de ganhos solares externos em todos os meses, com picos nos meses de inverno seco, como julho (1.142 kWh), e valores ainda elevados ao longo de todo o período analisado. Nos cenários 2 e 3, verificou-se uma redução expressiva desses ganhos ao longo de todo o ano. As reduções foram mais acentuadas nos meses de maior incidência solar, como entre maio e agosto, nos quais os ganhos foram reduzidos em aproximadamente 50% a 55% em relação ao Cenário sem proteção. Nos meses de menor intensidade de radiação, como fevereiro e outubro, as reduções foram menos expressivas,

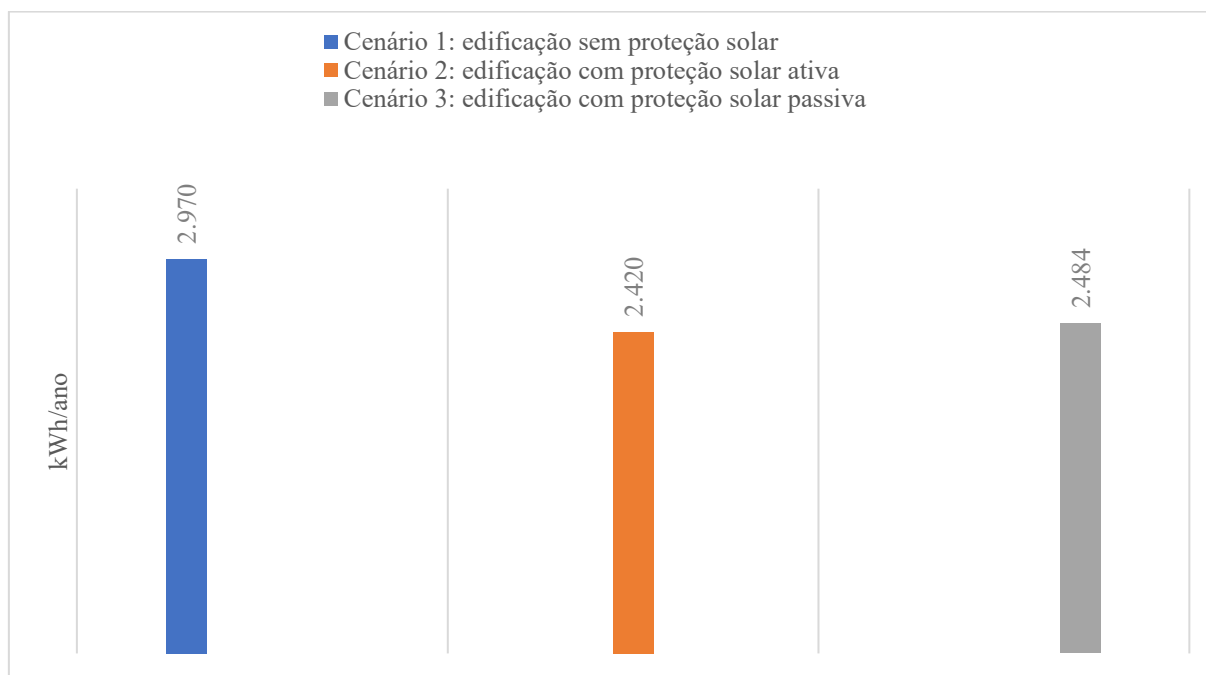
situando-se em torno de 20% a 25%, evidenciando a influência sazonal da radiação solar no desempenho das estratégias de sombreamento. Esse comportamento indica que a adoção dessas estratégias contribuiu diretamente para a redução da carga térmica incidente nas superfícies envidraçadas, o que tende a diminuir a demanda por resfriamento dos ambientes internos.

Observou-se que a diferença entre os cenários 2 e 3 foi pouco significativa ao longo de todo o período analisado, com valores de ganhos solares externos bastante próximos entre si. Essa pequena variação pode estar associada a diferenças nas propriedades termofísicas e ópticas atribuídas aos materiais das proteções solares, bem como às simplificações inerentes ao modelo adotado no *software DesignBuilder*. Ainda assim, do ponto de vista prático, essa diferença pode ser considerada pouco relevante, indicando que ambas as estratégias de sombreamento apresentaram desempenho térmico semelhante na redução dos ganhos solares.

A análise dos resultados obtidos neste estudo evidenciou que a adoção de estratégias de sombreamento resultou em reduções expressivas nos ganhos solares, da ordem de 20% a 55%, dependendo da época do ano. Esse comportamento está alinhado com a literatura que investiga a integração de sistemas fotovoltaicos como elementos de modificação do desempenho térmico de edificações.

Nesse sentido, Albatayneh *et al.* (2022) demonstram que a aplicação de sistemas fotovoltaicos pode contribuir para a redução dos ganhos solares; entretanto, os autores reportam reduções da ordem de 10,87% para sistemas aplicados em cobertura, valor inferior ao observado neste estudo. Entretanto, essa diferença pode ser atribuída, principalmente, à posição das estratégias analisadas, uma vez que, no caso avaliado, os dispositivos PVSD e os *brises* atuaram diretamente nas aberturas, promovendo um controle mais efetivo da radiação solar incidente.

Em relação à demanda anual de energia para ar-condicionado, realizou-se uma análise para os três cenários, a qual permitiu avaliar o impacto das estratégias de proteção solar no consumo energético para resfriamento. O Gráfico 9 apresenta esses resultados.

Gráfico 9: Demanda de energia para ar-condicionado para os três cenários.

Fonte: Autor (2026).

Observou-se que a demanda de energia para ar-condicionado variou conforme a estratégia de proteção solar adotada. No Cenário 1, registrou-se o maior consumo, totalizando 2.970 kWh/ano, equivalente a 14,21 kWh/m².ano, em decorrência dos elevados ganhos solares externos, que aumentaram a carga térmica interna e, consequentemente, a necessidade de resfriamento.

Nos Cenários 2 e 3, verificou-se uma redução dessa demanda, com valores de 2.420 (11,85 kWh/m².ano) e 2.484 kWh/ano (12,02 kWh/m².ano), correspondendo a reduções de aproximadamente 18,5% e 17,4%, respectivamente, em relação ao Cenário 1. Essa diminuição ocorreu devido ao bloqueio da radiação solar incidente, o que reduziu o aquecimento interno da edificação. A diferença entre os cenários 2 e 3 foi pouco significativa, indicando desempenho térmico semelhante entre as estratégias. A ligeira vantagem do Cenário com proteção ativa pode estar associada a um controle mais efetivo da radiação ao longo do tempo ou, ainda, às simplificações inerentes ao modelo de simulação.

Embora as reduções observadas neste estudo tenham sido inferiores às reportadas por Yoo e Choi (2021), que variaram entre 27,5% a 34%, os resultados apresentaram tendência semelhante, evidenciando o potencial dos dispositivos de sombreamento na redução da carga de resfriamento. As diferenças entre os valores podem estar relacionadas às características climáticas, ao tipo de sistema utilizado, à geometria da fachada ou às condições operacionais da edificação.

Assim, a ausência ou presença de estratégias de sombreamento resultou em diferenças no consumo anual de energia da edificação (Tabela 15).

Tabela 15: Consumo total esperado.

Cenário	Consumo total esperado (kWh/ano)	Consumo total esperado (kWh/m ² .ano)
1	7.455	36,01
2	7.106	34,32
3	7.106	34,32

Fonte: Autor (2026).

O consumo energético anual da edificação variou em função da estratégia de proteção solar adotada (Tabela 15). O Cenário 1 apresentou o maior consumo, totalizando 7.455 kWh/ano, o que corresponde a uma intensidade de uso de energia de 36,01 kWh/m².ano. Nos cenários 2 e 3, verificou-se uma redução do consumo para 7.106 kWh/ano, equivalente a 34,32 kWh/m².ano em ambos os casos. Esses resultados indicam que a incorporação de estratégias de sombreamento contribuiu para a diminuição da demanda energética da edificação, embora a diferença entre as soluções ativa e passiva tenha sido pouco significativa sob a perspectiva do consumo total de energia.

Ao comparar os resultados obtidos com valores de referência para edifícios de escritório convencionais em Brasília, observa-se um desempenho energético significativamente superior do LabZero–UnB. Segundo Costa *et al.* (2020), edificações de escritório apresentam consumo médio de aproximadamente 132 kWh/m².ano. Dessa forma, o Cenário 1, caso de maior consumo analisado neste estudo (36,01 kWh/m².ano), apresentou uma intensidade de uso de energia cerca de 73% inferior ao valor médio reportado para edifícios convencionais. Esse resultado evidencia a elevada eficiência energética da edificação, associada às estratégias passivas adotadas, ao desempenho da envoltória e à integração de sistemas voltados à redução da demanda energética.

4.2. Resultados para avaliação ambiental: emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

4.2.1. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

A ACV foi conduzida considerando um período de vida útil de 50 anos, com os resultados anualizados para CO₂eq/m².ano. Foram contempladas as principais fases do ciclo de vida definidas nas normas de ACV para edificações: produção dos materiais (A1–A3), transporte até o canteiro de obras (A4), processo construtivo (A5), substituição de componentes durante a fase de uso (B4), uso operacional de energia (B6), demolição da edificação (C1), transporte para destinação final (C2) e tratamento ou disposição final dos resíduos (C3–C4).

As emissões de carbono consolidadas para os três cenários analisados são apresentadas na Tabela 16, enquanto as contribuições específicas de cada fase para o sistema construtivo e para os sistemas de fotovoltaicos são discutidas nos tópicos subsequentes.

Tabela 16: Principais resultados para a ACV dos três cenários.

Cenário	Categoria de impacto	Emissões totais (kg CO ₂ eq/m ² .ano)	Percentual em relação ao total (%)
Cenário 1: edificação sem proteção solar	Emissões incorporadas - sistema construtivo	7,19	52%
	Emissões operacionais	6,50	48%
Cenário 2: edificação com proteção solar ativa	Emissões incorporadas - sistema construtivo	7,48	68%
	Emissões incorporadas - proteção solar ativa	1,0	9%
	Emissões operacionais - FC fotovoltaico	0,0003	0%
	Emissões operacionais – FC rede	2,48	23%
Cenário 3: edificação com proteção solar passiva	Emissões incorporadas - sistema construtivo	7,57	70%
	Emissões incorporadas - proteção solar passiva	0,5	4%
	Emissões operacionais - FC fotovoltaico	0,0002	0%
	Emissões operacionais – FC rede	2,82	26%

Fonte: Autor (2026).

O Cenário 1 correspondeu à avaliação do sistema construtivo do edifício LabZero – UnB, sem a adoção de estratégias de proteção solar. Nesse caso, as emissões incorporadas totalizaram 7,19 kg CO₂eq/m².ano, representando 52% das emissões totais, enquanto as emissões operacionais atingiram 6,50 kg CO₂eq/m².ano (48%). Esse resultado evidenciou que emissões incorporadas superaram as emissões operacionais ao longo do ciclo de vida anualizado.

Nos cenários 2 e 3, observou-se um aumento das emissões incorporadas totais, em decorrência da inclusão dos sistemas de sombreamento. No Cenário 2, com proteção solar ativa, as emissões incorporadas corresponderam a 7,48 kg CO₂eq/m².ano para o sistema construtivo e 1,0 kg CO₂eq/m².ano para o sistema de sombreamento da fachada e os módulos da cobertura, totalizando 77% das emissões totais. No Cenário 3, com o acréscimo da proteção solar passiva no sistema construtivo, as emissões incorporadas atingiram 7,57 kg CO₂eq/m².ano e 0,5 kg

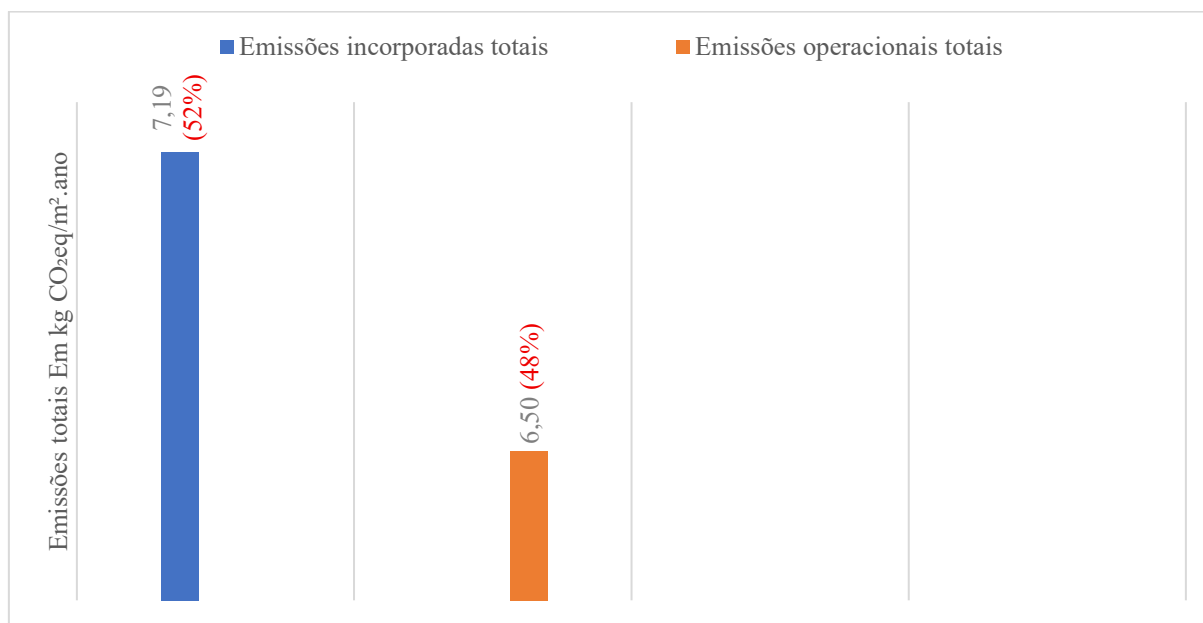
CO₂eq/m².ano referente aos módulos fotovoltaicos da cobertura, totalizando 74% das emissões totais.

Em contrapartida, verificou-se uma redução significativa das emissões operacionais nos cenários 2 e 3, em função da contribuição da geração fotovoltaica. No Cenário 2, as emissões operacionais associadas ao consumo da rede elétrica foram de 2,4 kg CO₂eq/m².ano (23%), enquanto, no Cenário 3, atingiram 2,8 kg CO₂eq/m².ano (26%). As emissões referentes à geração fotovoltaica apresentaram valores residuais (0,0003 e 0,0002 kg CO₂eq/m².ano, respectivamente), decorrentes do consumo energético e do fator de emissão associado à tecnologia, não sendo representativas no total.

De forma geral, os resultados indicaram uma mudança no perfil das emissões ao longo dos cenários analisados: enquanto o Cenário 1 apresentou maior contribuição das emissões operacionais, os Cenários 2 e 3 passaram a ser dominados pelas emissões incorporadas. Esse comportamento evidencia que a adoção de sistemas fotovoltaicos e estratégias de sombreamento, embora aumente as emissões iniciais associadas aos materiais, contribuiu para a redução das emissões operacionais, resultando em um melhor desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida.

4.2.2. Resultado do Cenário 1 – edificação sem proteção solar

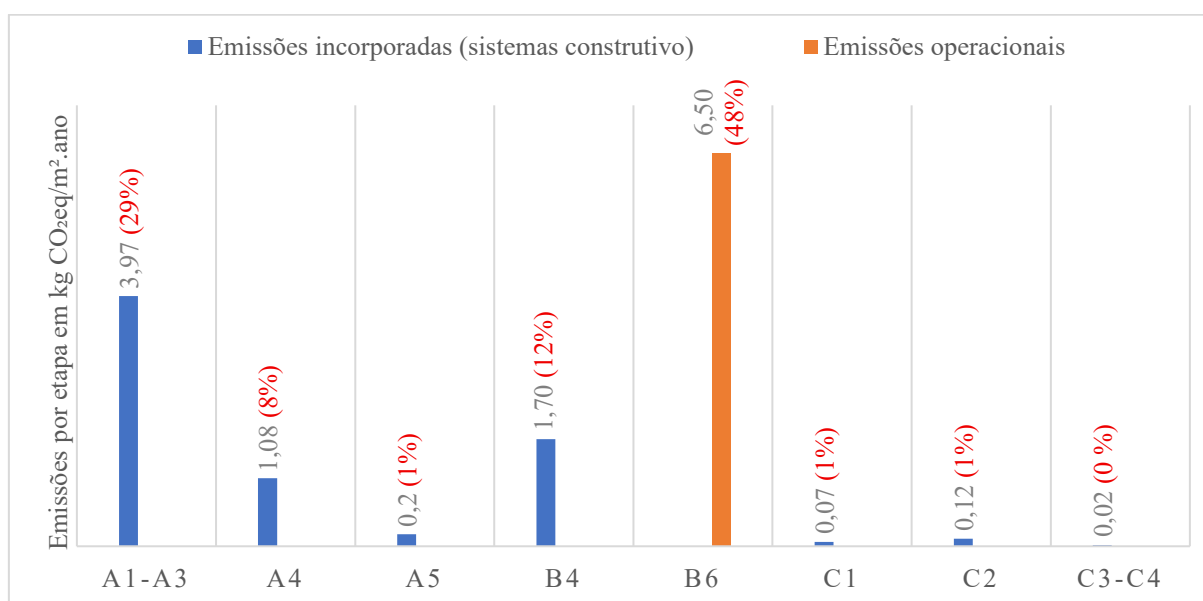
O Gráfico 10 apresenta as emissões totais incorporadas e operacionais para o Cenário 1, as emissões incorporadas totalizaram 7,19 kg CO₂eq/m², representando 52% das emissões totais ao longo de um ano.

Gráfico 10: Resultados das emissões incorporadas e operacionais totais para o Cenário 1.

Fonte: Autor (2026).

O uso operacional de energia (B6) representou a segunda maior fonte de emissões ao longo do ciclo de vida no Cenário 1. Nesse caso, o cálculo das emissões esteve associado ao fator de emissão da matriz elétrica brasileira (0,182 kg CO₂eq/kWh), que considera a participação de fontes renováveis e fósseis e esteve diretamente relacionado ao consumo energético anual da edificação, estimado em aproximadamente 7.455 kWh/ano.

O Gráfico 11 apresenta as emissões de GEE distribuídas por etapa do ciclo de vida, discriminando os resultados do sistema construtivo do edifício LabZero – UnB.

Gráfico 11: Emissões incorporadas e operacionais por etapa de ciclo de vida para o Cenário 1.

Fonte: Autor (2026).

Nota: produção dos materiais (A1–A3), transporte até o canteiro de obras (A4), processo construtivo (A5), substituição de componentes durante a fase de uso (B4), consumo operacional de energia (B6), demolição da edificação (C1), transporte para destinação final (C2) e tratamento ou disposição final dos resíduos (C3–C4).

a etapa A1–A3 (produção dos materiais) apresentou o maior impacto ambiental, totalizando 3,97 kg CO₂eq/m².ano (29%), provenientes dos processos de extração, processamento e fabricação dos materiais, os quais demandaram elevado consumo energético e estiveram diretamente relacionados à intensidade de carbono dos insumos utilizados. Essa etapa destacou-se como o principal *hotspot* da ACV, principalmente em função dos elementos estruturais.

Em seguida, a etapa A4 representou 1,08 kg CO₂eq/m².ano (8%), com emissões associadas ao transporte dos materiais desde o local de produção até o canteiro de obras, dependentes das distâncias percorridas e dos tipos de combustíveis utilizados. A etapa A5 totalizou 0,2 kg CO₂eq/m².ano (1%), abrangendo as emissões associadas à montagem, ao uso de equipamentos e aos insumos durante a execução da obra. A etapa B4 somou 1,7 kg CO₂eq/m².ano (12%), refletindo os impactos relacionados à manutenção e à substituição de materiais e equipamentos ao longo da vida útil. Por fim, as etapas finais do ciclo de vida representaram conjuntamente uma parcela reduzida das emissões totais.

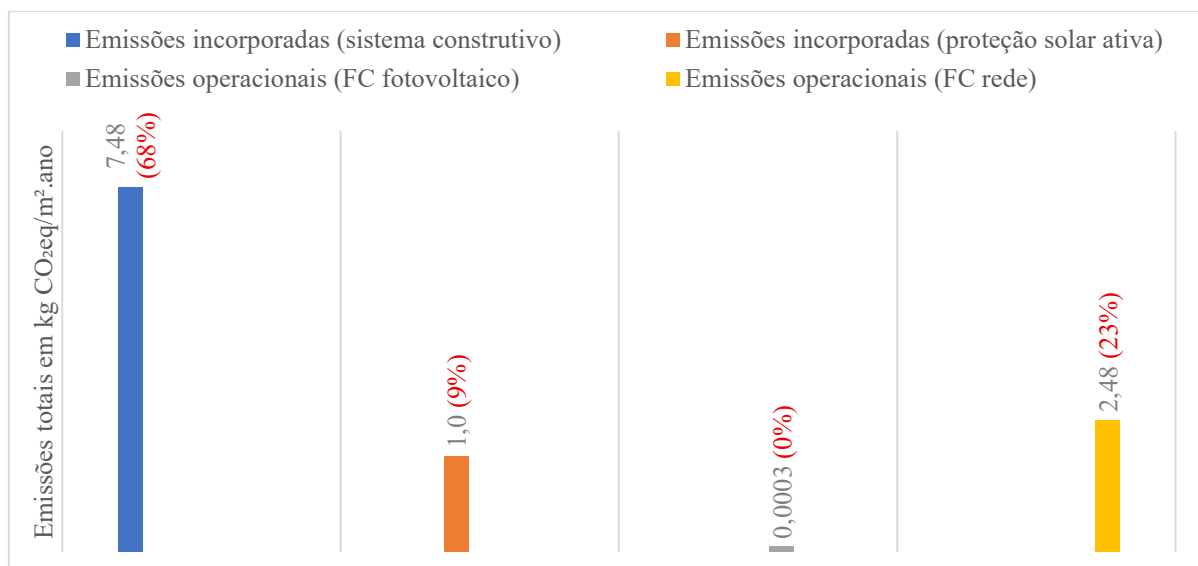
De forma geral, verificou-se que as emissões incorporadas foram superiores às operacionais. Esse comportamento está associado, principalmente, à baixa intensidade de carbono da matriz elétrica brasileira, que reduziu o impacto operacional, mesmo diante do consumo energético da edificação. Esses resultados estão em consonância com a literatura, especialmente com o estudo de Rock *et al.* (2020), que aponta que, em edificações de alto desempenho energético, a participação das emissões incorporadas tende a variar entre 40% e 50% do total ao longo do ciclo de vida.

Ao comparar os resultados obtidos com os valores de *benchmark* apresentados na revisão de literatura, observou-se que as emissões incorporadas do Cenário 1, equivalentes a 7,19 kg CO₂eq/m².ano, situaram-se dentro da média reportada para edifícios de escritório. Nos *benchmarks* analisados, os valores típicos variaram aproximadamente entre 6,6 e 15,2 kg CO₂eq/m².ano, conforme os relatórios do CLF (2025), Ramboll (2022) e One Click LCA (2021). Essa posição indicou que a edificação apresentou desempenho ambiental favorável, o que pode estar associado às características construtivas adotadas, à otimização do uso de materiais e ao escopo considerado na avaliação.

4.2.3. Resultado do Cenário 2 – edificação com proteção solar ativa

O Gráfico 12 mostra as emissões incorporadas e operacionais totais do sistema construtivo e dos sistemas fotovoltaicos do edifício LabZero – UnB para o Cenário 2.

Gráfico 12: Resultados das emissões incorporadas e operacionais totais para o Cenário 2.



Fonte: Autor (2026).

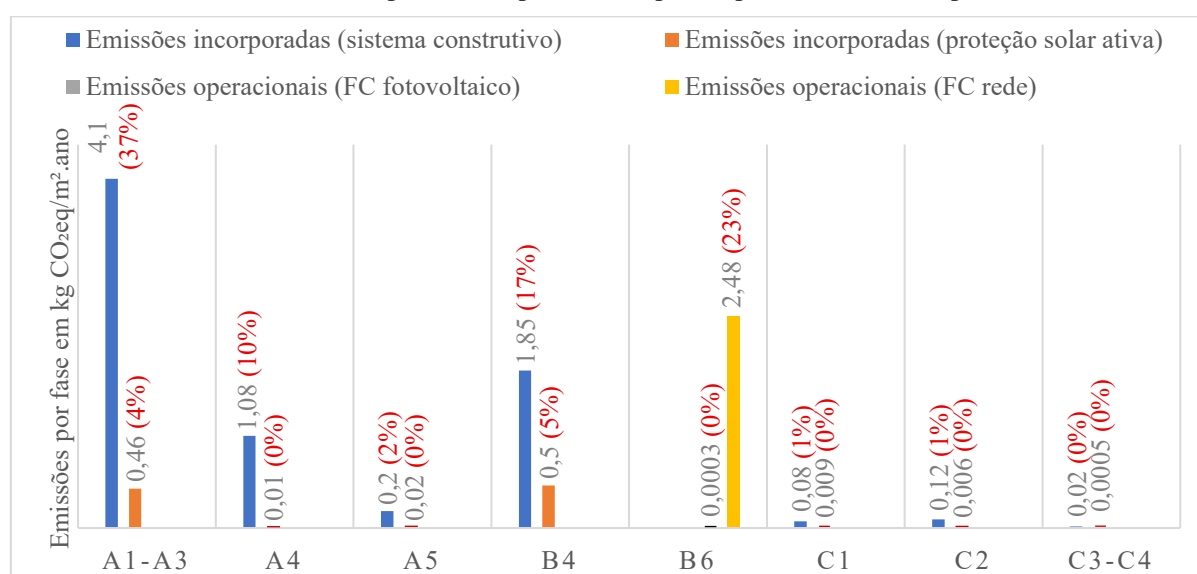
As emissões incorporadas totalizaram 8,48 kg CO₂eq/m², representando 77% das emissões totais ao longo de um ano. Deste total, 7,48 kg CO₂eq/m².ano (68%) correspondem ao sistema construtivo e 1,0 kg CO₂eq/m².ano (9%) aos sistemas fotovoltaicos, nesse sentido, aproximadamente 0,5 kg CO₂eq/m².ano correspondeu aos módulos integrados a fachada (PVSD) e 0,5 kg CO₂eq/m².ano aos módulos instalados na cobertura, visto que os dois sistemas fotovoltaicos possuem a mesma dimensão, quantidade e modelo. Essa distinção é significativa, pois evidência que parte do crescimento nas emissões incorporadas está associada à adição da tecnologia de sombreamento, enquanto a outra parcela decorre da geração fotovoltaica da cobertura.

Com relação às emissões operacionais, o LabZero – UnB possui duas fontes de energia: a geração fotovoltaica local e a oriunda da rede elétrica. Dessa forma, para o cálculo das emissões, foram considerados os dois fatores de carbono apresentados na Tabela 15. Os resultados indicaram que as emissões operacionais totalizaram, em conjunto, 2,4803 kg CO₂eq/m².ano (23%), sendo 0,0003 kg CO₂eq/m².ano (0%) associadas à geração fotovoltaica e 2,48 kg CO₂eq/m².ano (23%) provenientes do consumo de eletricidade da rede ao longo do ciclo de vida. Esse resultado considerou um autoconsumo anual de 4.284 kWh, enquanto a demanda atendida pela rede elétrica foi de aproximadamente 2.822 kWh/ano. Verificou-se,

portanto, que as emissões associadas à geração fotovoltaica foram desprezíveis quando comparadas às da rede elétrica. Esse valor extremamente reduzido está relacionado principalmente às atividades de operação, considerando, no modelo adotado, apenas as emissões associadas à limpeza, o que evidenciou o papel fundamental dos sistemas fotovoltaicos na redução das emissões operacionais e na melhoria do desempenho ambiental da edificação.

O Gráfico 13 apresenta a distribuição das emissões de GEE ao longo das diferentes etapas do ciclo de vida, detalhando os resultados totais encontrados.

Gráfico 13: Emissões incorporadas e operacionais por etapa de ciclo de vida para o Cenário 2.



Fonte: Autor (2026).

Nota: produção dos materiais (A1–A3), transporte até o canteiro de obras (A4), processo construtivo (A5), substituição de componentes durante a fase de uso (B4), consumo operacional de energia (B6), demolição da edificação (C1), transporte para destinação final (C2) e tratamento ou disposição final dos resíduos (C3–C4).

Assim como no Cenário 1, a fase A1–A3, no Cenário 2, apresentou a maior contribuição para as emissões incorporadas ao longo do ciclo de vida, com 4,1 kg CO₂eq/m².ano (37%). Esse resultado evidenciou a influência significativa da escolha e da quantidade de materiais nas emissões de carbono incorporado, considerando o conjunto total de materiais do cenário — incluindo os sistemas fotovoltaicos.

A fase B4 correspondeu a 1,85 kg CO₂eq/m².ano (17%), representando uma parcela relevante das emissões totais. As demais etapas do ciclo de vida do sistema construtivo apresentaram contribuições menos expressivas, como A4, com 1,08 kg CO₂eq/m².ano (10%),

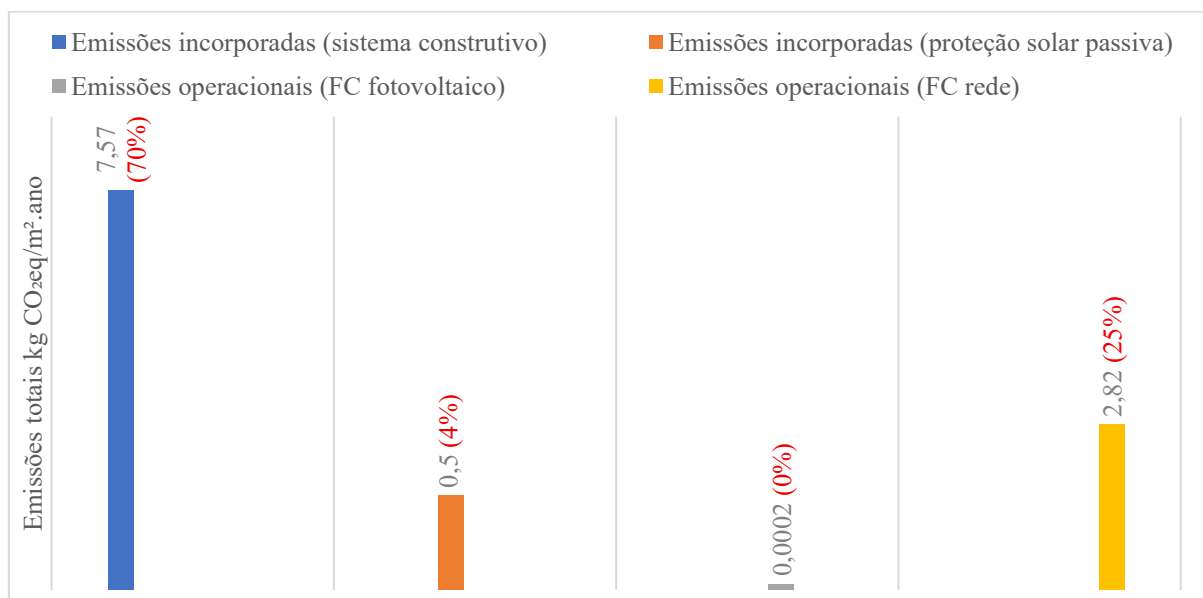
A5, com 0,2 kg CO₂eq/m².ano (2%), e fim de vida (C1–C4), com soma de 0,22 kg CO₂eq/m².ano (2%).

No que se refere aos sistemas fotovoltaicos — considerando, em conjunto, a proteção solar ativa (PVSD) e os módulos instalados na cobertura —, as emissões concentraram-se predominantemente nas etapas A1–A3 e B4, em função dos impactos associados à produção dos módulos e ao número de substituições previstas ao longo de sua vida útil.

Em suma, os resultados obtidos para o Cenário 2 estão em consonância com a literatura recente de ACV em edificações de escritório. Conforme observado por Rock *et al.* (2020) e Palomar-Torres *et al.* (2022), as emissões incorporadas concentraram a maior parcela dos impactos, evidenciando a predominância dos processos associados à produção de materiais e insumos. Em relação aos benchmarks de carbono incorporado, verificou-se que o valor total obtido (8,48 kg CO₂eq/m².ano) permaneceu dentro da faixa reportada na literatura, que varia entre 6,6 e 15,2 kg CO₂eq/m².ano, conforme os relatórios do CLF (2025), Ramboll (2022) e One Click LCA (2021). Esse enquadramento indicou que, mesmo com o acréscimo das emissões associadas aos sistemas PVSD e aos módulos fotovoltaicos da cobertura, o LabZero – UnB manteve desempenho ambiental favorável em relação aos valores de referência internacionais.

4.2.4. Resultado do Cenário 3 – edificação com proteção solar passiva

No Cenário 3, que considera a adoção de estratégias de proteção solar passiva, o sistema é composto por *brises* convencionais de alumínio, contabilizados, nesse caso, como parte do sistema construtivo. Para fins comparativos, foram adotadas as mesmas dimensões dos dispositivos PVSD do Cenário 2, modificando-se apenas o material empregado. No cálculo operacional, foram mantidos os sistemas fotovoltaicos instalados na cobertura. As emissões totais são apresentadas no Gráfico 14.

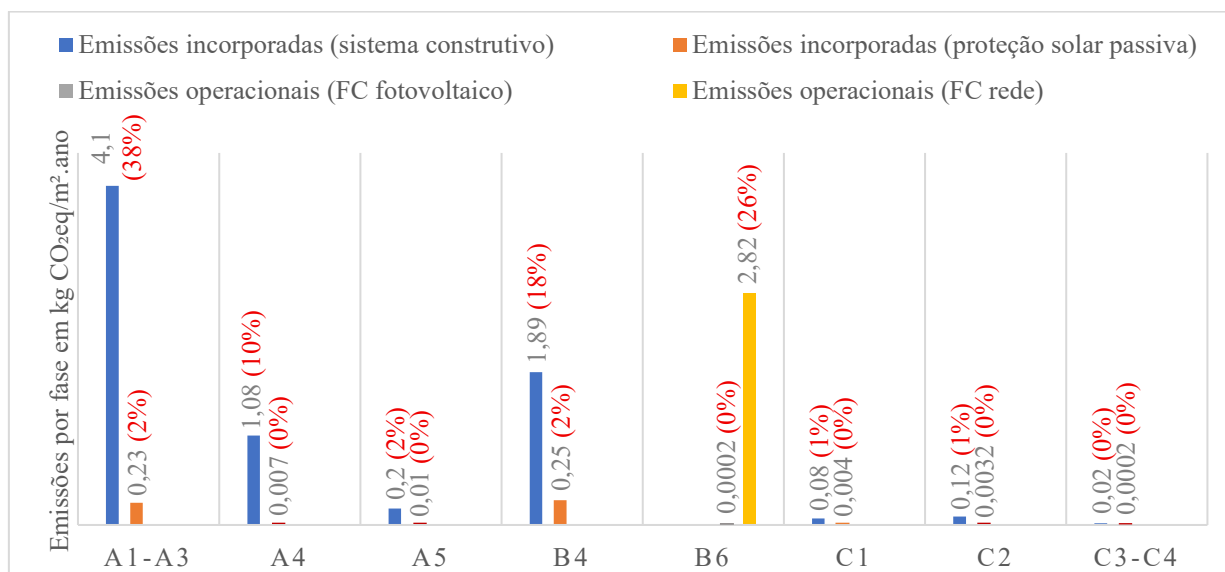
Gráfico 14: resultados das emissões incorporadas e operacionais totais para o Cenário 3.

Fonte: Autor (2026).

As emissões incorporadas do sistema construtivo, acrescidas da proteção solar passiva, representaram 7,57 kg CO₂eq/m².ano (70%), mantendo-se como um componente relevante no balanço total das emissões. Por sua vez, as emissões associadas aos módulos fotovoltaicos instalados na cobertura totalizaram 0,5 kg CO₂eq/m².ano (4%). Em conjunto, as emissões incorporadas do Cenário alcançaram 8,07 kg CO₂eq/m².ano, representando 74% das emissões totais.

As emissões operacionais, por sua vez, totalizaram 2,8202 kg CO₂eq/m².ano (26%). De forma semelhante ao Cenário 2, o Cenário 3 considerou duas fontes de suprimento energético — geração fotovoltaica e rede elétrica —, porém, neste caso, a geração restringiu-se exclusivamente aos módulos instalados na cobertura. Para o cálculo, também foram adotados os fatores de emissão apresentados na Tabela 15. Em termos de consumo energético, o autoconsumo anual do Cenário 3 correspondeu a 3.891 kWh, enquanto o consumo proveniente da rede atingiu aproximadamente 3.215 kWh/ano.

O Gráfico 15 apresenta as emissões incorporadas e operacionais do Cenário 3 por etapa do ciclo de vida, evidenciando a contribuição da proteção solar passiva nas emissões do sistema construtivo.

Gráfico 15: Emissões incorporadas e operacionais por etapa de ciclo de vida para o Cenário 3.

Fonte: Autor (2026).

Nota: produção dos materiais (A1–A3), transporte até o canteiro de obras (A4), processo construtivo (A5), substituição de componentes durante a fase de uso (B4), consumo operacional de energia (B6), demolição da edificação (C1), transporte para destinação final (C2) e tratamento ou disposição final dos resíduos (C3–C4).

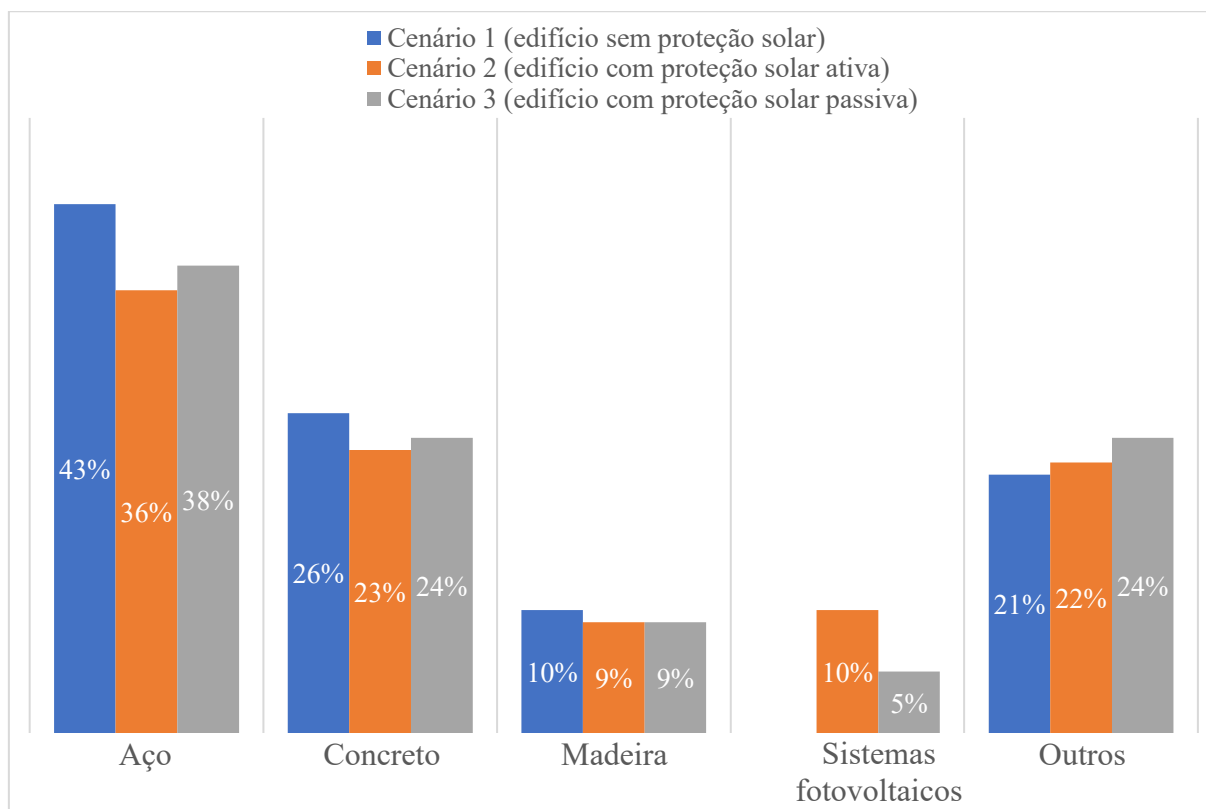
Assim como nos demais cenários, observou-se maior contribuição da fase A1–A3, com 4,1 kg CO₂eq/m².ano (38%). A etapa B4 contribuiu com 1,89 kg CO₂eq/m².ano (18%), valor superior ao observado no Cenário 2, em razão da vida útil do alumínio utilizado nos *brises* e da necessidade de substituições ao longo da vida útil da edificação. Com o acréscimo das emissões associadas à proteção solar passiva, as emissões incorporadas do Cenário 3 mostraram-se superiores às do Cenário 2. No caso dos módulos da cobertura, as emissões também se concentraram nas etapas de A1–A3 e B4, com 0,23 kg CO₂eq/m².ano (2%) e 0,25 kg CO₂eq/m².ano (2%), respectivamente, enquanto as demais fases apresentaram contribuições pouco expressivas.

Com base na literatura, os resultados indicaram que as emissões incorporadas superaram as emissões operacionais, em consonância com o observado por Rock *et al.* (2020). Além disso, o valor total de emissões incorporadas (8,07 kg CO₂eq/m².ano) situou-se dentro da faixa média reportada nos relatórios de *benchmark* (CLF, 2025; Ramboll, 2022; One Click LCA, 2021).

4.2.5. Participação dos principais materiais nas emissões para os três cenários analisados

O Gráfico 16 apresenta a participação dos principais materiais nas emissões incorporadas da etapa com maior influência no ciclo de vida, A1 – A3, para os três cenários analisados.

Gráfico 16: Participação dos principais materiais na etapa (A1-A3) de maior influência no ciclo de vida dos três cenários.



Fonte: Autor (2026).

Em todos os casos, o aço apresentou a principal fonte das emissões, com participação variando entre 36% e 43%, uma vez que o LabZero – UnB é majoritariamente composto por esse material. O concreto possui contribuições que variaram entre 23% e 26%, decorrente da concretagem de vigas e pilares, seguido pela madeira, com aproximadamente 9% a 10%.

Observa-se que o perfil de emissões dos materiais manteve-se relativamente semelhante entre os cenários, evidenciando que os elementos estruturais permaneceram como os principais responsáveis pelo carbono incorporado da edificação. No Cenário 2, a participação relativa do aço apresentou redução em função da incorporação dos sistemas fotovoltaicos (PVSD e cobertura), enquanto no Cenário 3 verificou-se influência adicional dos *brises* de alumínio. Apesar dessas diferenças, os resultados indicam que estratégias de redução de emissões devem priorizar a otimização dos materiais estruturais, especialmente aço e concreto, uma vez que estes concentraram a maior parcela dos impactos ambientais associados à produção dos materiais.

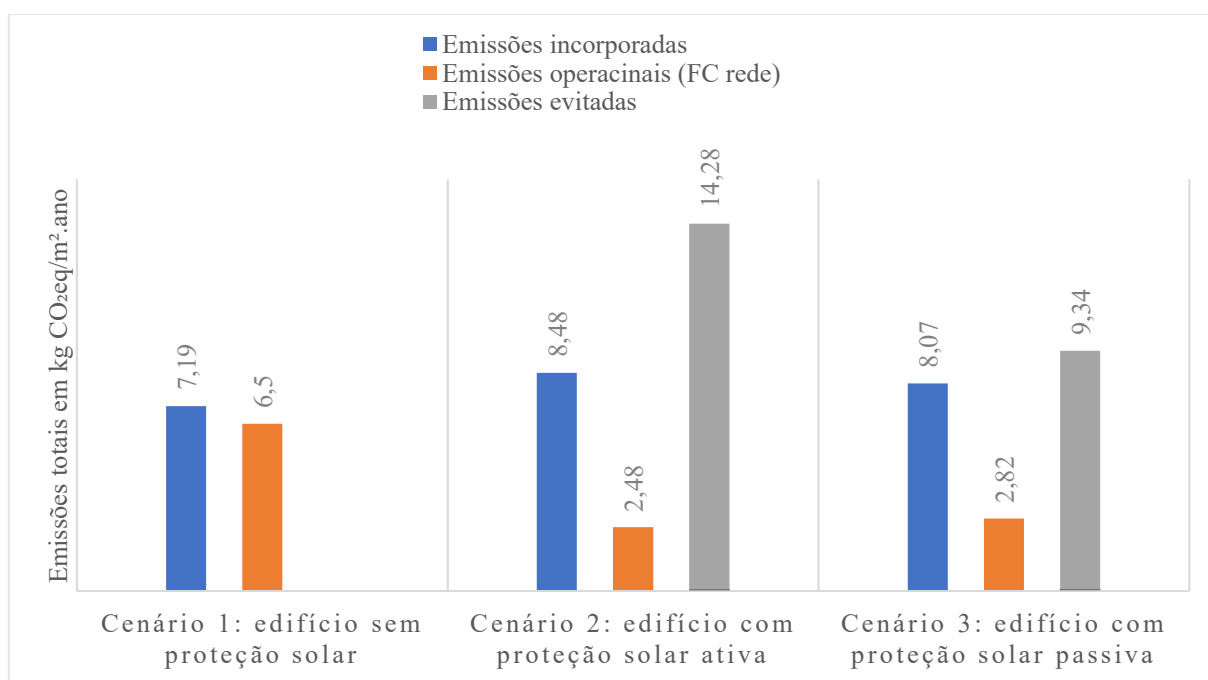
Por fim, o restante dos materiais utilizados no LabZero – UnB representaram entre 21% e 24% das emissões da etapa A1–A3, englobando componentes como alumínio, vidro, materiais de acabamento e demais insumos construtivos. Embora individualmente apresentem

contribuições menos expressivas, em conjunto esses materiais representam uma parcela relevante do carbono incorporado da edificação, evidenciando a importância de uma abordagem integrada na seleção e especificação dos materiais para a redução dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida.

4.2.6. Balanço de carbono evitado

Para o cálculo das emissões evitadas, adotou-se o procedimento proposto por Grinham *et al.* (2022), no qual a energia gerada pelo sistema fotovoltaico é considerada como substituta da eletricidade da rede elétrica. Dessa forma, as emissões evitadas foram estimadas a partir da multiplicação da energia total gerada — correspondente à soma do autoconsumo e da energia injetada na rede — pelo fator de emissão de carbono da matriz elétrica brasileira (0,182 kg CO₂eq/kWh) (Tabela 14).

Gráfico 17: Balanço de carbono evitado do LabZero - UnB.



Fonte: Autor (2026).

No Cenário 1, apresentando no Gráfico 17, observou-se predominância das emissões incorporadas em relação às emissões operacionais, embora ambas tenham apresentado participações próximas no balanço total do ciclo de vida.

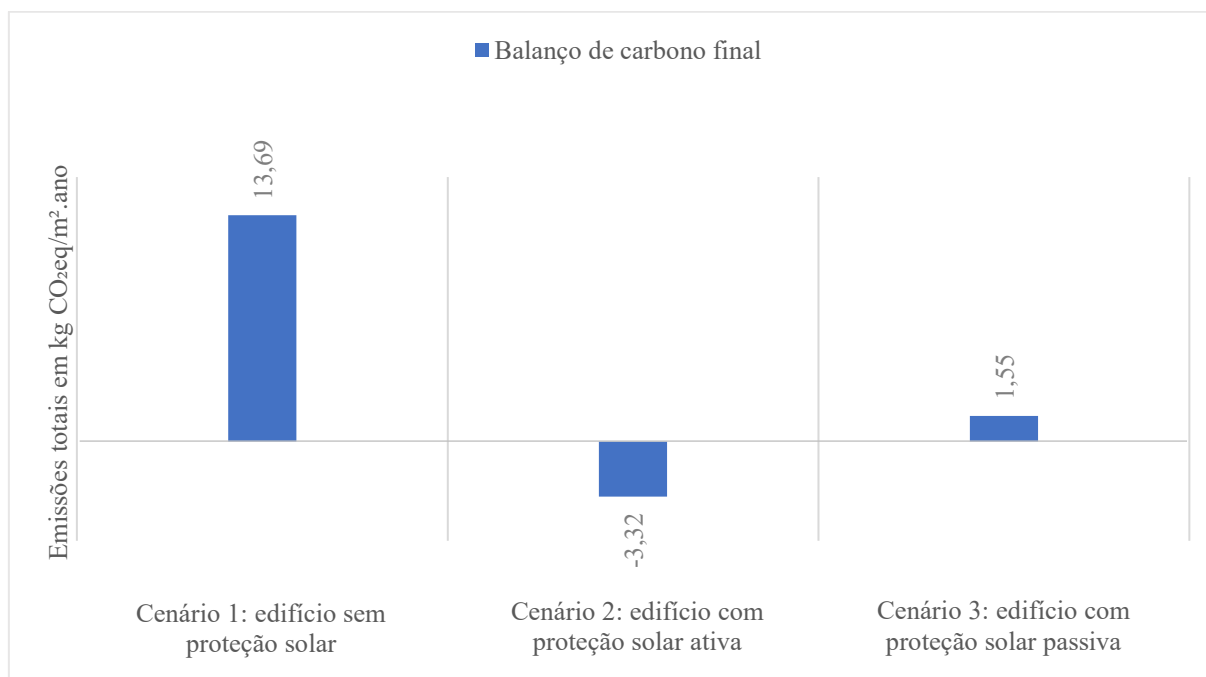
No Cenário 2, considerou-se uma geração total de 16.250 kWh/ano, resultante da soma do autoconsumo (4.284 kWh) e da energia injetada na rede (11.966 kWh). Assim, as emissões evitadas foram calculadas pela multiplicação desse total pelo fator de emissão da rede elétrica,

representando a quantidade de emissões que deixariam de ocorrer caso essa energia fosse suprida exclusivamente pela rede, totalizando 14,28 kg CO₂eq/m².ano.

De forma análoga, no Cenário 3, a geração total considerada foi de 10.624 kWh/ano, composta pelo autoconsumo (3.891 kWh) e pela energia exportada para a rede (6.733 kWh). Esse valor também foi multiplicado pelo fator de emissão da rede elétrica, que permitiu estimar as emissões evitadas associadas à geração fotovoltaica nesse cenário, totalizando 9,34 kg CO₂eq/m².ano.

Dessa forma, ao aplicar a equação proposta por Grinham *et al.* (2022) — que consiste na soma das emissões incorporadas e operacionais, subtraindo-se as emissões evitadas —, resultou no balanço de carbono final dos três Cenário (Gráfico 18).

Gráfico 18: Balanço de carbono líquido final.



Fonte: Autor (2026).

No Cenário 1, o balanço final foi de 13,69 kg CO₂eq/m².ano, obtido a partir da soma das emissões incorporadas (7,19 kg CO₂eq/m².ano) e operacionais (6,50 kg CO₂eq/m².ano). Nesse caso, como não houve geração fotovoltaica, não foram contabilizadas emissões evitadas, resultando em um balanço totalmente positivo e diretamente dependente da matriz elétrica da rede.

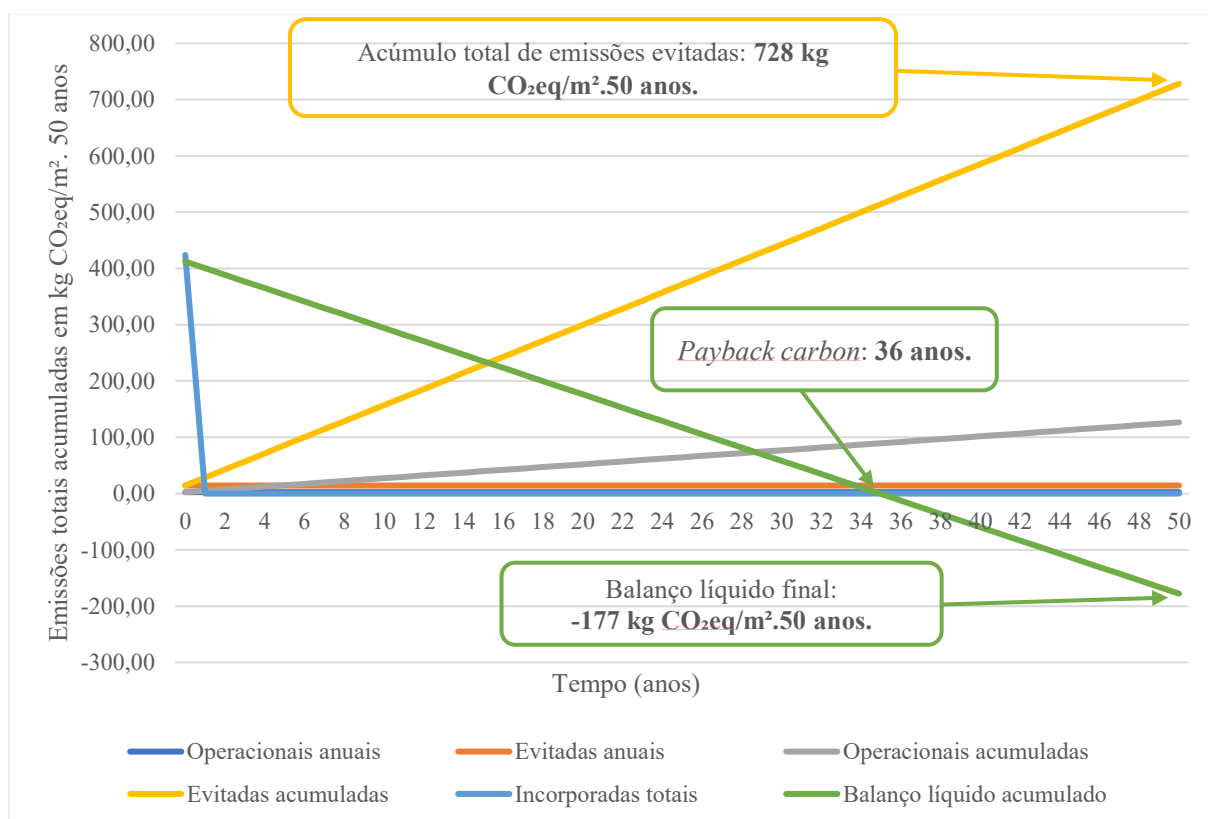
No Cenário 2, o balanço de carbono resultou em -3,32 kg CO₂eq/m².ano, considerando emissões incorporadas de 8,48 kg CO₂eq/m².ano, emissões operacionais da rede de 2,48 kg CO₂eq/m².ano e emissões evitadas de 14,28 kg CO₂eq/m².ano. O valor negativo indicou que a

geração fotovoltaica compensou integralmente as emissões associadas ao ciclo de vida da edificação, configurando um Cenário de carbono líquido negativo.

Já no Cenário 3, o balanço foi de 1,55 kg CO₂eq/m².ano, a partir de emissões incorporadas de 8,07 kg CO₂eq/m².ano, operacionais da rede de 2,82 kg CO₂eq/m².ano e emissões evitadas de 9,34 kg CO₂eq/m².ano. Nesse caso, embora a geração fotovoltaica da cobertura tenha reduzido significativamente as emissões totais, o volume de emissões evitadas não foi suficiente para compensar integralmente as emissões incorporadas e operacionais.

Na perspectiva de 50 anos, as emissões evitadas acumuladas do Cenário 2 são apresentadas no Gráfico 19. Observa-se que a geração fotovoltaica proporciona uma redução contínua das emissões ao longo da vida útil da edificação, resultando em um total acumulado de aproximadamente 730 kg CO₂eq/m² ao final do período analisado.

Gráfico 19: Evolução do balanço de carbono evitado ao longo de 50 anos.



Fonte: Autor (2026)

Em contraste, as emissões operacionais acumuladas pela rede elétrica atingem cerca de 130 kg CO₂eq/m², enquanto as emissões incorporadas totais permanecem constantes em aproximadamente 420 kg CO₂eq/m². A análise do balanço líquido acumulado demonstra que, embora a edificação apresente emissões líquidas positivas nos primeiros anos de operação devido ao carbono incorporado inicial, a geração fotovoltaica promove uma redução

progressiva desse impacto. O ponto de equilíbrio de carbono ocorre aproximadamente entre o 34º e o 35º ano de operação, quando as emissões evitadas acumuladas igualam as emissões incorporadas e operacionais acumuladas. A partir desse momento, o balanço líquido torna-se negativo, indicando que os benefícios ambientais proporcionados pela geração de energia renovável superam as emissões associadas à construção, operação e manutenção da edificação. Ao final dos 50 anos analisados, o balanço líquido acumulado atinge aproximadamente $-180 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2$, evidenciando o potencial da estratégia adotada para a descarbonização do ambiente construído ao longo do ciclo de vida.

De forma geral, os resultados evidenciaram que a incorporação de sistemas fotovoltaicos promoveu uma redução substancial do impacto climático da edificação, sendo mais eficaz no Cenário 2, em consonância com o observado por Grinham *et al.* (2022), que também identificaram desempenho superior associado à maior capacidade de geração de energia e, conseqüentemente, de emissões evitadas. Entretanto, os resultados devem ser analisados considerando algumas limitações metodológicas. Neste estudo, foi adotado um fator fixo de emissão da matriz elétrica brasileira para a quantificação das emissões operacionais evitadas pela geração fotovoltaica. Essa abordagem desconsidera as variações temporais e espaciais da intensidade de carbono da rede elétrica, as quais podem sofrer alterações em função da composição da matriz energética, da sazonalidade e do aumento da participação de fontes renováveis ao longo do tempo. Além disso, a utilização de um fator de emissão constante ao longo da vida útil da edificação pode superestimar ou subestimar os benefícios ambientais associados aos sistemas fotovoltaicos, especialmente em análises prospectivas de longo prazo e em cenários de progressiva descarbonização da matriz elétrica. Dessa forma, embora os resultados indiquem o potencial dos dispositivos PVSD na mitigação das emissões de carbono, os valores obtidos devem ser interpretados dentro das simplificações inerentes ao método adotado.

4.2.7. Implicações projetuais da adoção de estratégias de sombreamento

De forma global, a pequena diferença de desempenho termoenergético observada entre os cenários 2 e 3 constituiu um resultado relevante no estudo, uma vez que indicou que a simples presença de um elemento de sombreamento pode exercer influência mais significativa sobre os ganhos solares do que a sua configuração tecnológica específica. Embora o Cenário 2 incorpore dispositivos PVSD na fachada e o Cenário 3 possua *brises* convencionais, ambos apresentaram reduções semelhantes nos ganhos solares e na demanda de energia para resfriamento.

A possível explicação para essa reduzida distinção, está associada às propriedades termofísicas características de cada proteção solar nos cenários analisados ou, ainda, aos parâmetros inferidos da própria ferramenta de simulação. Os resultados sugeriram que a escolha entre dispositivos PVSD e proteções solares convencionais não devem ser pautada exclusivamente pelo desempenho térmico. Aspectos como potencial de geração de energia, emissões de carbono incorporadas, manutenção, substituição de componentes e integração arquitetônica podem exercer papel igualmente ou mais relevante no processo de decisão. No presente estudo, embora os cenários tenham apresentado desempenho térmico semelhante, o Cenário com PVSD destacou-se pela capacidade adicional de geração fotovoltaica, contribuindo para uma redução mais significativa do balanço de carbono da edificação.

Sob a perspectiva do processo de projeto, os resultados reforçaram a importância da adoção de abordagens integradas desde as etapas iniciais de concepção arquitetônica. A definição da geometria, orientação, dimensionamento e posicionamento dos dispositivos de sombreamento influencia simultaneamente o desempenho térmico, o potencial de geração fotovoltaica e os impactos ambientais associados ao ciclo de vida. Dessa forma, decisões tradicionalmente tratadas apenas sob critérios arquitetônicos passam a assumir papel estratégico na redução das emissões de carbono do ambiente construído.

Por fim, de modo geral, os resultados indicaram que a adoção de dispositivos PVSD apresenta potencial para contribuir com metas de descarbonização em edificações de alto desempenho. Embora os benefícios energéticos tenham se mostrado relativamente próximos aos obtidos com sistemas passivos convencionais, a capacidade adicional de geração fotovoltaica conferiu ao Cenário com PVSD vantagens ambientais que extrapolam o desempenho térmico, reforçando o potencial dessa tecnologia como estratégia integrada para edificações de baixo carbono.

05

Capítulo 05

Considerações finais

5. Conclusão

Este estudo teve como objetivo analisar a contribuição de dispositivos PVSD no desempenho termoenergético e ambiental do edifício LabZero – UnB, considerando diferentes cenários de aplicação e utilizando a ACV e o balanço de carbono evitado como ferramentas de análise.

Os resultados demonstraram que a incorporação de estratégias de sombreamento, tanto ativas quanto passivas, promoveu reduções significativas nos ganhos solares externos, variando entre 20% e 55% ao longo do ano, valores superiores, 10,87%, aos reportados por Albatayneh *et al.* (2022). Como consequência, observou-se redução da demanda anual de energia para resfriamento de aproximadamente 18,5% no Cenário com PVSD e 17,4% no Cenário com proteção passiva, confirmando o potencial dessas estratégias para a mitigação das cargas térmicas da edificação. Embora inferiores aos resultados reportados por Yoo e Choi (2021), 27,5% a 34%, as reduções observadas apresentaram comportamento semelhante ao identificado na literatura. Entretanto, a diferença entre as estratégias ativa (PVSD) e passiva mostrou-se pouco significativa do ponto de vista térmico, indicando desempenho semelhante na redução dos ganhos solares. Do ponto de vista energético, a integração dos sistemas fotovoltaicos elevou a capacidade de geração local de energia, resultando em maior taxa de autonomia energética. No Cenário 2, verificou-se geração anual de aproximadamente 16.250 kWh, superior à configuração do cenário 3 (10.624 kWh), além de maior volume de energia excedente (11.966 kWh/ano).

Na avaliação ambiental, os resultados indicaram uma mudança no perfil das emissões ao longo dos cenários analisados. Enquanto o Cenário 1 apresentou pequena diferença emissões incorporadas (7,19 kg CO₂eq/m².ano) e operacionais (6,50 kg CO₂eq/m².ano), os cenários 2 e 3 passaram a ser dominados pelas emissões incorporadas, que atingiram aproximadamente 8,48 kg CO₂eq/m².ano e 8,07 kg CO₂eq/m².ano, respectivamente, como relatado por Rock *et al.* (2020). Esse comportamento evidenciou que, à medida que a eficiência energética da edificação aumenta e há maior inserção de energia renovável, as emissões associadas aos materiais e à construção tornam-se mais relevantes, em consonância com a literatura. A análise por etapas do ciclo de vida revelou que a fase de produção dos materiais (A1–A3) constituiu o principal *hotspot* ambiental em todos os cenários, com valores em torno de 3,97 a 4,1 kg CO₂eq/m².ano, seguida pela etapa de substituição (B4), com contribuições de até 1,85 kg CO₂eq/m².ano a 1,89 kg CO₂eq/m².ano. Nos sistemas fotovoltaicos, as emissões concentraram-se

predominantemente nas etapas de produção e substituição, refletindo a influência dos processos de fabricação e da vida útil dos componentes.

O cálculo do balanço de carbono evitado evidenciou diferenças significativas entre os cenários. O Cenário 1 apresentou balanço positivo de 13,69 kg CO₂eq/m².ano, indicando maior impacto ambiental ao longo do ciclo de vida. O Cenário 3 apresentou redução expressiva das emissões, com balanço de 1,55 kg CO₂eq/m².ano, porém ainda positivo. Por outro lado, o Cenário 2 apresentou balanço negativo de carbono de -3,32 kg CO₂eq/m².ano, indicando que as emissões evitadas pelos sistemas fotovoltaicas (14,28 kg CO₂eq/m².ano) superaram as emissões incorporadas e operacionais, como demonstrado no estudo de Grinham *et al.* (2022). Na perspectiva de 50 anos, as emissões serão possivelmente compensadas em aproximadamente 35 anos. Entretanto, esses resultados devem ser analisados considerando as limitações inerentes ao método adotado, especialmente em relação ao uso de um fator fixo de emissão da matriz elétrica brasileira ao longo de toda a vida útil da edificação. Essa simplificação desconsidera possíveis variações temporais na intensidade de carbono da rede elétrica e os processos futuros de descarbonização da matriz energética, podendo influenciar as estimativas das emissões evitadas pela geração fotovoltaica.

Dessa forma, verifica-se que a pergunta da pesquisa foi respondida, uma vez que se comprovou que os dispositivos PVSD contribuem simultaneamente para a melhoria do desempenho térmico e para a redução do impacto ambiental da edificação, sendo mais eficazes quando comparados às soluções exclusivamente passivas no contexto analisado. Nesse sentido, os resultados indicaram que o PVSD tende a apresentar maior contribuição para a descarbonização quando associado a condições que favoreçam elevada geração fotovoltaica, elevada taxa de aproveitamento da energia produzida e vida útil suficiente para compensar os impactos iniciais de fabricação dos componentes.

A análise realizada evidencia ainda que, em edificações de alto desempenho energético, a simples redução da demanda operacional já não é suficiente para promover reduções expressivas das emissões totais ao longo do ciclo de vida. À medida que as emissões operacionais diminuem, as emissões incorporadas passam a representar parcela cada vez mais significativa do impacto ambiental da edificação. Esse resultado reforça a necessidade de que estratégias de descarbonização no setor da construção brasileiro avancem para além da eficiência energética, incorporando também critérios relacionados à seleção de materiais, à durabilidade dos sistemas construtivos e à redução das emissões associadas à cadeia produtiva da construção civil.

Sob essa perspectiva, os resultados obtidos sugerem que dispositivos PVSD poderiam ser utilizados como uma estratégia relevante para a descarbonização de edificações no Brasil, especialmente quando concebidos como elementos multifuncionais capazes de combinar controle solar, geração de energia renovável e redução da dependência da rede elétrica. Entretanto, a adoção desses sistemas não deve ser compreendida como uma solução universal. Sua viabilidade depende das características climáticas locais, da orientação da edificação, do potencial de geração fotovoltaica, da intensidade de carbono da matriz elétrica considerada e dos impactos associados à produção e reposição dos componentes.

Como principal contribuição, o estudo integrou a análise termoeenergética, a ACV e o balanço de carbono evitado em um estudo aplicado ao contexto brasileiro, evidenciando o papel dos sistemas fotovoltaicos como elementos multifuncionais na arquitetura. Além disso, demonstrou que, mesmo com o aumento das emissões incorporadas, a geração de energia renovável pode compensar esse impacto ao longo do ciclo de vida. Essa pesquisa contribui para ampliar a discussão sobre a descarbonização do ambiente construído no país, evidenciando que a tomada de decisão baseada exclusivamente no consumo operacional pode conduzir a interpretações incompletas acerca do desempenho ambiental das edificações ao longo do ciclo de vida.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o aprofundamento da análise das emissões operacionais por meio de abordagens dinâmicas, incorporando variações temporais da matriz elétrica brasileira e cenários prospectivos de descarbonização. Além dessa limitação metodológica, os resultados também evidenciaram desafios ainda presentes no campo da ACV aplicada a edificações, como a limitada disponibilidade de inventários nacionais de materiais de construção, as incertezas relacionadas à vida útil e aos ciclos de substituição dos componentes, a escassez de dados específicos para sistemas fotovoltaicos adaptados ao contexto brasileiro e a dificuldade de representação das transformações tecnológicas e energéticas que podem ocorrer ao longo de períodos extensos de análise. Tais aspectos não constituem limitações exclusivas deste estudo, mas refletem gargalos científicos e metodológicos ainda existentes na avaliação ambiental de edificações e que demandam avanços futuros do campo de pesquisa. Sugere-se, ainda, a aplicação da metodologia em diferentes contextos climáticos e tipologias construtivas, de modo a avaliar a robustez dos resultados e a adaptabilidade das estratégias de sombreamento fotovoltaico em outras realidades. Adicionalmente, destaca-se a importância da integração de análises com indicadores de desempenho como o *Energy Payback Time* (EPBT) e o *Energy Return Factor* (ERF), de forma

a complementar a avaliação ambiental e apoiar a tomada de decisão e uma ACV pós-obra para validar os dados incorporados levantados no estudo.

6. Bibliografia

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia de produtos de alumínio – 1. ed.** São Paulo: ABAL, 2022. Disponível em:

<https://abal.org.br/projetoelo/assets/pdf/projeto-elo-guia-de-produtos-de-aluminio-1a-ed.pdf>.

ABNT – 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.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 14044:2009: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ACV, BRASIL. **Declaração ambiental do produto.** 2020. Disponível em: <https://acvbrasil.com.br/rotulagem-ambiental/declaracao-ambiental-produto>. Acesso: 21 de agosto de 2023.

AGÊNCIA BRASÍLIA. **Na COP27, Brasília apresenta iniciativas contra as mudanças climáticas.** Agência Brasília, 14 nov. 2022. Disponível em: <https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2022/11/14/na-cop27-brasilia-apresenta-iniciativas-contras-mudancas-climaticas/>.

AGOSTINO, D. 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: 10.1016/j.job.2018.10.019.

AGUACIL, S.; DUQUE, S.; LUFKIN, S.; REY, E. **Designing with building-integrated photovoltaics (BIPV): a pathway to decarbonize residential buildings.** Journal of Building Engineering, v. 96, p. 110486, 2024. DOI: 10.1016/j.job.2024.110486.

ALBATAYNEH, A.; ALBADAINAH, R.; JUAIDI, A.; ABDALLAH, R.; MONTTOYA, M. D. G.; MANZANO-AGUGLIARO, F. **Rooftop photovoltaic system as a shading device for uninsulated buildings.** Energy Reports, v. 8, p. 4223–4232, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.082>.

AMER, M.; DAIM, T. U.; JETTER, A. **A review of scenario planning**. Futures, v. 46, p. 23-40, 2013. Disponível em: <https://www-sciencedirectcom.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0016328712001978>.

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.

ANDERY, M. A. et al. **Para compreender a ciência: uma perspectiva histórica**. Rio de Janeiro: EDUC, 2004.

ASDRUBALI, F.; BAGGIO, P.; PRADA, A.; GRAZIESCHI, G.; GUATTARI, C. **Dynamic life cycle assessment modelling of a NZEB building**. Energy, v. 191, 2020, p. 116489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116489>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. **Características químicas e físicas**. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15980: Eficiência energética — Sistemas de iluminação em edificações — Método de cálculo**. Rio de Janeiro, 2011.

BOSO, A. C. M. R., et. al. **Análise de custos dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid no Brasil**. Revista Científica Anap, Brasil, v.8, n.12, p. 57-66, 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE). **Resolução CGIEE nº 4, de 26 de setembro de 2025**. Define os índices mínimos de eficiência energética para edificações residenciais, comerciais, de serviços e públicas. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2025. Disponível em: [Resolução CGIEE nº 4/2025](#). Acesso em: 30 jun. 2026.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil: 6ª edição**. Brasília: MCTI, 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Guia para Municípios: PBE Edifica. Volume I – Contexto Nacional**. Brasília: MME, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/ee/guia-para-municipios/guia_de_ee_para_municipios/volume-I/contexto-nacional/pbe-edifica/pbe-edifica/?utm_source=chatgpt.com

BROWN, K. E.; BANIASSADI, A.; PHAM, J. V.; SAILOR, D. J.; PHELAN, P. E. **Effects of rooftop photovoltaics on building cooling demand and sensible heat flux into the environment for an installation on a white roof**. *Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities*, v. 1, n. 2, p. 021001, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4046399>.

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.

CARDOSO, A. et al. **Cinturas periféricas na periferia do capitalismo: os casos de Belém e Manaus**. *Revista de Morfologia Urbana*, v. 11, n. 1, 17 abr. 2023.

CECarbon. **CECarbon – Sobre a CECarbon**. 2020. Disponível em: <https://www.cecarbon.com.br/about>. Acesso em: 21 de agosto de 2023.

CELERE – Sidac: a plataforma que mede a emissão de CO₂ na construção civil. Fortaleza: Celere, 26 mai. 2022. Disponível em: <https://celere-ce.com.br/sustentabilidade/sidac-co2-construcao-civil-sustentabilidade/>. Acesso em: 30 de jan. 2026.

CHIVELET, N. M.; KAPSIS, C.; FRONTINI, F. **Building-Integrated Photovoltaics: A Technical Guidebook**. Ed 1. New York: Routledge, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781003432241>.

CHIVELET, N. M.; GÓMEZ, D. M. **Optimizing photovoltaic self-consumption in office buildings**. *Energy and Buildings*. V. 150, p. 71-80, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.073>.

CLIMATE-DATA.ORG. **Clima: Curitiba**. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/americas-dosul/brasil/parana/curitiba-2010/>. Acesso em: 6 ago. 2025.

COMPRACO. **Densidade de metais: gráfico e tabela de densidade de todos os metais comuns**. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/especificacoes-do-aco/densidade-de-metais-grafico-e-tabela-de-densidade-de-todos-os-metais-comuns-pdf>. Acesso: 10 jun. 2024.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). **Plataforma BIPc lançada pela Caixa adota base de dados do SIDAC**. São Paulo, 2026. Disponível em: https://cbcs.org.br/plataforma-bipc-lancada-pela-caixa-adota-base-de-dados-do-sidac/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 30 de jan. 2026.

CODEPLAN - Companhia De Planejamento Do Distrito Federal. **Atlas do Distrito Federal: Caracterização Ambiental**. Brasília: 2020. Disponível em: <https://www.codeplan.df.gov.br/>. Acesso em 26 abril 2025.

CLICK PETRÓLEO & GÁS. **CECarbon chega a Campinas: cidade paulista adota sistema inédito para monitorar impacto ambiental da construção civil**. São Paulo, 24 nov. 2023. Disponível em: <https://en.clickpetroleoegas.com.br/cecarbon-chega-a-campinas-cidade-paulista-adota-sistema-inedito-para-monitorar-impacto-ambiental-da-construcao-civil-ama01/>. Acesso em: 30 de jan. 2026.

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

CRONEMBERGER, J. C. R.; MARTIN, E. C. **Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil**. Brasília: Ed. UnB, 2020. DOI: <https://doi.org/10.26512/9786558460435.c5>.

CRONEMBERGER, J. C. R.; MARTIN, E. C.; SANCHEZ, S. V. **Energia fotovoltaica na arquitetura: princípios de aplicação em edificações**. Brasília: Ed. UnB, 2020.

CRONEMBERGER, J. C. R. et al. **BIPV technology application: Highlighting advances, tendencies and solutions through Solar Decathlon Europe houses**. Energy and Buildings, v. 83, p. 44–56, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.079>. Acesso em: 28 maio 2025.

DASSI, J. A. et. al. **Análise da viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma Instituição de Ensino Superior do Sul do Brasil**. XXII Congresso Brasileiro de Custos. Foz do Iguaçu, PR, 2015.

DRESCH, A. et. al. **Design Science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ECOINVENT ASSOCIATION. Database. Zurich: ecoinvent, 2026. Disponível em: <https://ecoinvent.org/database/>. Acesso em: 16 jun. 2026.

Electricity, medium voltage {BR}| market group for electricity, medium voltage | Cut-off, U | 0,182 kg CO₂/kWh. Ecoinvent, Version 3.11, 2026.

Electricity, low voltage {RoW}| electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, laminated, integrated | Cut-off, U | 0,000015 kg CO₂/kWh. Ecoinvent, Version 3.11, 2026

EPE — Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional – Síntese 2024**. Brasília, DF: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 05 out. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco 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: 13 de abril de 2026.

EUROPEAN COMMISSION. Joint Research Centre. **Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)**. 2025. Disponível em: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.

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

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

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

- FARIA, R. C. A. **Metodologia de avaliação da emissão incorporada de GEE no estoque de edifícios construídos**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de Brasília, Brasília, 2023.
- FREITAS, J. S. et al. **Modeling and assessing BIPV envelopes using parametric Rhinoceros plugins Grasshopper and Ladybug**. *Renewable Energy*, v. 160, p. 1468–1479, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.137>. Acesso em: 28 maio 2025.
- FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.-J. et al. **The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework**. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 10, n. 1, p. 3–9, 2005.
- GARANTIA SOLAR BIPV. Apresentação Garantia Solar – Diagnóstico. São Paulo: Garantia Solar BIPV, 18 mar. 2025. 1 apresentação (PDF).
- GLOBAL SOLAR ATLAS. **Global Photovoltaic Power Potential by Country**. 2020; Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/download/brazil>. Acesso em 21 maio 2025.
- GRINHAM, J. et. al. **Zero-carbon balance: The case of HouseZero**. *Building and Environment*, v. 207, 108511, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108511>.
- GODINHO, C. **A importância das comunidades de energia renovável na descarbonização**. ISCAP, Instituto Politécnico do Porto, 2023.
- GÓES, Thiago et al. Labzero|UnB: **simulação para o desempenho de edifício de balanço energético nulo em Brasília**. In: Encontro Nacional De Conforto No Ambiente Construído, 16.; Encontro Latino-Americano De Conforto No Ambiente Construído, 12., 2021. Anais [...]. Palmas,TO: Even3, 2021.
- GONÇALVES, R.; LOPES, A.; MENEZES, J. **Desafios e Oportunidades para a Implementação de BIPV no Brasil**. *Revista de Energia Solar*, v. 25, n. 3, p. 45-56, 2019.
- GOKSU, A. U.; GEDIK, G. Z. **The effect of CIS BIPV as a shading device on building life cycle energy performance**. *International Journal of Sustainable Energy*, v. 42, n. 1, p. 575-593, 2023. Disponível em: [10.1080/14786451.2023.2217943](https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2217943).

GOPI, A. et. al. **Performance modeling of the weather impact on a utility-scale PV power plant in a tropical region.** International Journal of Photoenergy, v. 2021, p. 1–10, 2021. Disponível em: 10.1155/2021/5551014.

HALASAH, S. A. et. al. **Field installation versus local integration of photovoltaic systems and their effect on energy evaluation metrics.** Energy Policy. v. 2013, p. 1-10. 2013. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512008452>.

HAXHO, E. LCA – Lighting. **Material de apoio da Subtask D da Task 70**, 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades: Curitiba (PR) - Panorama.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/curitiba/panorama>. Acesso em: 6 ago. 2025.

ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade. **Belém do Pará: análise de risco e vulnerabilidades climáticas.** Belém: ICLEI América do Sul; Prefeitura Municipal de Belém, 2025. 32 p. Projeto N. B. Cities – Nature Based Cities.

ICS, Instituto Clima e Sociedade. **Edifícios de Baixo Carbono no Brasil: aspectos e subsídios para programas nacionais.** São Paulo, 2017. Disponível em: <https://climaesociedade.org/publicacao/edificios-de-baixo-carbono-no-brasil/>.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil: período 1991-2020.** Brasília: INMET, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Gráficos Climatológicos – Curitiba.** Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/DF/83377>.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** Ed. 2. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/thisInformationItemHomePage.html>.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria nº 309, de 6 de setembro de 2022.** Aprova as Instruções Normativas para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

e Residenciais. Rio de Janeiro: Inmetro, 2022. Disponível em: [PBE Edifica – INI-C Portaria 309/2022](#). Acesso em: 30 jun. 2026.

JA SOLAR GMBH. **Environmental Product Declaration – Mono-crystalline Single glass, P-Type, solar photovoltaic modules**. The Norwegian EPD Foundation / EPDItaly. Declaração nº NEPD-4907-4258-EN. Em conformidade com ISO 14025 e EN 15804+A2. Data de emissão: 12 set. 2023. Atualização: 6 set. 2024. Validade até: 12 set. 2028. Disponível em: <https://www.epditaly.it>.

KNOPE, J. W. **Doing a literature review**. PS: Political Science & Politics, v. 39, 1, p. 127–132, 2006. DOI: https://files.commonscs.gc.cuny.edu/wp-content/blogs.dir/3005/files/2019/04/Doing_a_Literature_Review-1.pdf.

LUDIN, N. A. et al. **Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 2018, p. 1-18, 2018. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118305574>.

MACHADO, J. R. F. **Metodologias de pesquisa: um diálogo quantitativo, qualitativo e quanti-qualitativo**. Revista Devir Educação, Lavras, v. 7, n. 1, e-697, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/8MGqFCjhjvXKQsq37t6q7PK/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 04 abr. 2025.

MAIERHOFER, D.; RÖCK, Martin; S.; MENDES, M. R.; HOXHA, E.; PASSER, A. **Critical life cycle assessment of the innovative passive nZEB building concept ‘be 2226’ in view of net-zero carbon targets**. Building and Environment, v. 223, p. 109476, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109476>.

MAKA, A. O. M.; ALABID, J. M. **Solar energy technology and its roles in sustainable development**. Clean Energy. v. 6,3, p. 476–483, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1093/ce/zkac023>.

MALHOTRA, P.; SCHULZ, G. **Building Integrated Photovoltaics: A Handbook for Architects**. New York: Springer, 2017.

AMARIPADATH, D. et. al. **Are net zero energy buildings necessarily also net zero emission buildings? Time-integrated analysis using dynamic grid emission factors**. Building and Environment, v. 283, p. 113367, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113367>.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **MCTI publica fatores de emissão de CO₂ da geração de energia elétrica no Brasil para 2025**. Brasília: MCTI, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/06/mcti-publica-fatores-de-emissao-de-co2-da-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-para-2025>. Acesso em: 26 set. 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **PBE Edifica – contexto nacional**. Brasília, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/ee/guia-para-municipios/guia_de_ee_para_municipios/volume-I/contexto-nacional/pbe-edifica?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 30 de jan. 2026.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Do consumo à eficiência: políticas públicas fortalecem o futuro energético brasileiro**. Brasília: MME, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/do-consumo-a-eficiencia-politicas-publicas-fortalecem-o-futuro-energetico-brasileiro?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 13 de abril de 2026.

MISHRA, V.; MISHRA, M. P. **Prisma for review of management literature: method, merits, and limitations – and academic review**. Advancing Methodologies of Conducting Literature Review in Management Domain. Ed. Emerald, vol. 2, 125-136, 2023.

Neoenergia Brasília leva ações de eficiência energética a famílias do Recantos das Emas. Neoenergia, 2022. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/web/brasil/w/neoenergia-brasil-aco-es-eficiencia-energetica-familias-recanto-das-emas>. Acesso: 18 de agosto de 2023.

OGBEBA, J. E.; HOSKARA, E. **The evaluation of single-family detached housing units in terms of integrated photovoltaic shading devices: the case of Northern Cyprus**. Sustainability, Basel, v. 11, n. 3, p. 593, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11030593>.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970–2023**. São Paulo: SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Acesso em: 26 de jan. 2026.

OUR WORLD IN DATA. **Carbon intensity of electricity generation – Ember (2025)**; Energy Institute – Statistical Review of World Energy (2025). Disponível em:

<https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?region=Europe&tab=table>.

Acesso em: 8 out. 2025.

PALACIOS, J. et. al. **Transformation of a university lecture hall in Valladolid (Spain) into a NZEB: LCA of a BIPV system integrated in its façade.** International Journal of Photoenergy, v. 2017, p. 1-11, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2017/2478761>.

PALOMAR-TORRES, A.; REY-HERNÁNDEZ, J. M.; REY-HERNÁNDEZ, A.; REY-MARTÍNEZ, F. J. **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.jobbe.2024.110868>.

PROJETEEE. **Dados climáticos: Belém/PA.** Ministério do Meio Ambiente; Eletrobras; Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: https://projeteee.mme.gov.br/dados-climaticos/?cidade=PA+-+Bel%C3%A9m&id_cidade=bra_pa_belem-ribeiro.intl.ap.821930_try.1964. Acesso em: 21 set. 2025.

PROJETEEE. **Dados climáticos: Curitiba/PR.** Ministério do Meio Ambiente; Eletrobras; Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: https://projeteee.mme.gov.br/dados-climaticos/?cidade=PR+-+Curitiba&id_cidade=bra_pr_curitiba-pena.intl.ap.838400_try.1969. Acesso: 21 set. 2025.

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>.

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

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

SANTOS, T.; COSTA, V. **A Integração de Painéis Fotovoltaicos na Arquitetura Moderna.** Construção Sustentável, v. 19, n. 2, p. 78-90, 2021.

SEEG, Observatório do Clima. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil**. 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>.

SILVA, E. J. et. al. **O uso de energia elétrica nas Universidades Federais Brasileiras, sob o enfoque do Plano de Gestão de Logística Sustentável**. Ciência e Natura. UFSM. 2019.

SILVA, V. V. F. **Aplicação de Tecnologias Solares BIPV em Fachadas na Construção Civil: Uma revisão sistemática da literatura**. 2024. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2024.

SINDUSCON-SP. **CECarbon: ferramenta brasileira gratuita mede carbono incorporado em obras e já fomenta políticas públicas sustentáveis**. São Paulo, 20 out. 2020. Disponível em: https://sindusconsp.com.br/cecarbon-ferramenta-brasileira-gratuita-mede-carbono-incorporado-em-obras-e-ja-fomenta-politicas-publicas-sustentaveis/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 30 de jan. 2026.

SHI, S. et. al. **Energy-saving potential comparison of different photovoltaic integrated shading devices (PVSDs) for single-story and multi-story buildings**. Energies, Basel, v. 15, n. 23, p. 9196, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15239196>

SOARES, M. T. B. **Balanco energético nulo em edifícios universitários: o caso do campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília**. 2024. P. 137. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

SOUST-VERDAGUER, B. et. al. **The use of Environmental Product Declarations of construction products as a data source to conduct a building life-cycle assessment in Spain**. Sustainability, Basel, v. 15, n. 2, p. 1284, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021284>.

TIAN, W. **A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 20, p. 411–419, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014>.

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: 5 jun. 2025.

WANG, Y. et. al. **I Evaluation of Photovoltaic Performance in Cold Regions: A Case Study of BIPV in Harbin, China.** Sustainability, [S.l.], v. 17, n. 2, p. 1017, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17021017>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/2/1017>.

WEBSTER, J.; WATSON, R. T. **Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review.** MIS Quarterly, 26,2. p. 13–23, 2002.

WWF-Brasil. World Wide Funf for Nature. Relatório Anual 2022. São Paulo: WWF-Brasil, 2022. Disponível em: https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/ra_2022_completo_pt.pdf.

WU, X.; WANG, Y.; DENG, S.; SU, P. **Clamate-Responsive Design of Photovoltaic Façades in Hot Climates: Materials, Technologies, and Implementation Strategies.** BUILDINGS, 2025. Buildings, v. 15, p. 1648, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/10/1648>.

YANG, S. et. al. **Optimising design parameters of a building-integrated photovoltaic double-skin facade in different climate zones in Australia.** Buildings, Basel, v. 13, n. 4, p. 1096, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13041096>.

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. Disponível em: [10.1088/1757-899X/556/1/012053](https://doi.org/10.1088/1757-899X/556/1/012053).

YOO, S. H.; CHOI, H. J. **Solar architecture integrated bi-facial photovoltaic system as a shade.** Processes, Basel, v. 9, n. 9, p. 1625, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9091625>

ZHANG, X. et. al. **Photovoltaic integrated shading devices (PVSDs): A review.** Solar Energy, v. 169, p. 298–323, ago. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.067>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/326745917>. Acesso em: 29 jun. 2025.

Apêndices

Apêndice A – Levantamento de transporte (km) previsto para as etapas A4 e C2.

Componentes	Subcomponentes	Material	Transporte (km)	Local de origem previsto	Transporte (km)	Locas de descarte previsto
			A4		C2	
Fundação	Concretagem de estacas	Concreto	500	Brasília/DF e/ou Goiás	30	Aterro Classe A – Samambaia/DF
	Blocos de coroamento					
	Forma em madeira	Madeira	200	Goiás/GO	50	Área de triagem/reciclagem – Ceilândia/DF
	Armaduras	Aço	1200	Minas Gerais/MG	150	Reciclagem – Anápolis/GO
	Impermeabilização	Poliéster	200	Distribuidor regional (DF/GO)	30	Aterro Classe A – Samambaia/DF
Estrutura	Aço	Aço	1200	Minas Gerais/MG	150	Reciclagem – Anápolis/GO
	Fôrma de laje	Madeira	200	Goiás/GO	50	Área de triagem/reciclagem – Ceilândia/DF
	Concretagem baldrame	Concreto	500	Brasília/DF e/ou Goiás	30	Aterro Classe A – Samambaia/DF
	Forma de viga baldrame	Madeira	200	Goiás/GO	50	Área de triagem/reciclagem – Ceilândia/DF
	Perfis metálicos estruturais	Aço	1200	Minas Gerais/MG	150	Reciclagem – Anápolis/GO
Estrutura metálica	Perfis metálicos estruturais	Aço	1200	Minas Gerais/MG	150	Reciclagem – Anápolis/GO
	Cobogó cerâmico	Cerâmica	200	Brasília/DF e/ou Goiás	30	Aterro Classe A – Samambaia/DF
	Divisória em granilite	Granilite	1200	São Paulo/SP	30	Aterro Classe A – Samambaia/DF
	Parede de <i>drywall</i>	<i>Drywall</i>	1200	São Paulo/SP	80	Reciclagem – Aparecida de Goiânia/GO
Paredes (internas)	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	1200	São Paulo/SP	80	Triagem especializada – GO/DF
	Sistema fibrocimento	Fibrocimento	1200	São Paulo/SP	30	Reciclagem – Aparecida de Goiânia/GO
	Lã de rocha	Lã de rocha	1200	São Paulo/SP	80	Triagem especializada – GO/DF
	Gesso	Gesso	1200	São Paulo/SP	80	Reciclagem – Aparecida de Goiânia/GO
Paredes (fachada)	Porta de alumínio	Alumínio	1200	São Paulo/SP	150	Reciclagem – Goiânia/GO
	Portas de madeiras	Madeira	200	Goiás/GO	50	Área de triagem/reciclagem – Ceilândia/DF
	Janela (11 unidades)	Alumínio	1200	São Paulo/SP	150	Reciclagem – Goiânia/GO
	Vidro laminado 4mm	Vidro	1200	São Paulo/SP	120	Reciclagem – Goiânia/GO
	Vidro 10mm	Vidro	1200	São Paulo/SP	120	Reciclagem – Goiânia/GO
Esquadrias	Telha termoacústica	Aço	1500	Minas Gerais/MG	80	Reciclagem – Anápolis/GO
	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	1200	São Paulo/SP	150	Triagem especializada – GO/DF
	Trama de aço	Aço	1200	Minas Gerais/MG	50	Reciclagem – Anápolis/GO
Cobertura	Telha termoacústica	Aço	1500	Minas Gerais/MG	80	Reciclagem – Anápolis/GO
	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	1200	São Paulo/SP	150	Triagem especializada – GO/DF
	Trama de aço	Aço	1200	Minas Gerais/MG	50	Reciclagem – Anápolis/GO

Pisos	Piso cimento queimado	Cimento queimado	200	Brasília/DF e/ou Goiás	150	Aterro Classe A – Samambaia/DF
	Contrapiso	Argamassa	200	Brasília/DF e/ou Goiás	30	Aterro Classe A – Samambaia/DF
	Granilite	Granilite	1200	São Paulo/SP	30	Aterro Classe A – Samambaia/DF
Pintura	Massa látex (paredes)	Massa acrílica	200	/	/	/
	Pintura paredes	Tinta	200			
	Pintura metálica	Tinta	200			
	Pintura madeira	Verniz	200			
	Selador	Selador	200			
	Pintura teto	Tinta	200			
Brises linear	Brises linear	Alumínio extrudado	1200	São Paulo/SP	150	Reciclagem – Goiânia/GO
Estrutura de suporte (PVSD)	Barras de aço	Aço	1200	Minas Gerais/MG	150	Reciclagem – Anápolis/GO
Estrutura de suporte (Módulos fotovoltaico - cobertura)	Barras de alumínio	Alumínio	1200	São Paulo/SP	150	Reciclagem – Goiânia/GO
Dispositivos de sombreamento fotovoltaico (PVSD)	Módulos fotovoltaicos	N/Type Monocristalina	18.000	China	1000	Centro especializado – São Paulo/SP
		Vidro frontal 2mm				
		Vidro traseiro 2mm				
		Moldura poliuretano				
		Plastico				
Sistema fotovoltaico convencional (cobertura)	Módulos fotovoltaicos	N/Type Monocristalina	18.000	China	1000	Centro especializado – São Paulo/SP
		Vidro frontal 2mm				
		Vidro traseiro 2mm				
		Moldura poliuretano				
		Plastico				

Apêndice B: Levantando dos fatores de emissão para a aba base de dados.

Componentes	Subcomponentes	material	Fonte
Fundação	Concretagem de estacas	Concreto	Environmental Product Declaration for Ready Mixed Concrete FCK 30 São Paulo
	Blocos de coroamento		
	Fôrma em madeira	Madeira	Environmental Product Declaration for Plywood C+/C
	Armaduras	Aço	Environmental Product Declaration for Steel Profiles
	Impermeabilização	Poliéster	
Estrutura	Aço	Aço	Environmental Product Declaration for Steel Profiles
	Fôrma de laje	Madeira	Environmental Product Declaration for Plywood C+/C
	Concretagem baldrame	Concreto	Environmental Product Declaration for Ready Mixed Concrete FCK 30 São Paulo
	Forma de viga baldrame	Madeira	Environmental Product Declaration for Plywood C+/C
Estrutura metálica	Perfis metálicos estruturais	Aço	Environmental Product Declaration for Steel Profiles
Paredes (internas)	Cobogó cerâmico	Cerâmica	

	Divisória em granilite	Granilite	Ecoinvent v. 3.9
	Parede de <i>drywall</i>	<i>Drywall</i>	Ecoinvent v. 3.9
	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	Environmental Product Declaration for Rock Contact / Rock Contact plus
Paredes (fachada)	Sistema fibrocimento	Fibrocimento	Environmental Product Declaration for HICEM Fiber Cement Board
	Lã de rocha	Lã de rocha	Environmental Product Declaration for Rock Contact / Rock Contact plus
	Gesso	Gesso	Environmental Product Declaration for 12.5 mm thick Standard Plasterboard
Esquadrias	Porta de alumínio	Alumínio	Ecoinvent v. 3.9
	Portas de madeiras	Madeira	Environmental Product Declaration for Plywood C+/C
	Janelas	Alumínio	Ecoinvent v. 3.9
	Vidro 4mm	Vidro	Environmental Product Declaration for Vidro Float 4 mm
	Vidro 10mm	Vidro	Environmental Product Declaration for Vidro Float 3 mm a 19 mm
Cobertura	Telha termoacústica	Aço	Environmental Product Declaration for Steel Profiles
	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	Environmental Product Declaration for Rock Contact / Rock Contact plus

	Trama de aço	Aço	Environmental Product Declaration for Steel Profiles
Pisos	Piso cimento queimado	Cimento queimado	
	Contrapiso	Argamassa	Environmental Product Declaration for Cimentcola Rende Mais ACIII Plus
	Granilite	Granilite	Ecoinvent v. 3.9
Pintura	Massa látex (paredes)	Massa acrílica	
	Pintura paredes	Tinta	
	Pintura metálica	Tinta	
	Pintura madeira	Verniz	
	Selador	Selador	
	Pintura teto	Tinta	
Brises linear	Brises linear	Alumínio extrudado	Environmental Product Declaration for Extruded aluminium profiles
Estrutura de suporte (PVSD)	Barras de aço	Aço	Environmental Product Declaration for Steel Profiles
Estrutura de suporte (Módulos fotovoltaico - cobertura)	Barras de alumínio	Alumínio	Ecoinvent v. 3.9
Dispositivos de sombreamento fotovoltaico (PVSD)	Módulos fotovoltaicos	N/Type Monocristalina	Environmental Product Declaration for Mono-crystalline Double glass, N-Type, Solar photovoltaic modules
		Vidro frontal 2mm	
		Vidro traseiro 2mm	
		Moldura poliuretano	
		Plastico	
Sistema fotovoltaico convencional (cobertura)	Módulos fotovoltaicos	N/Type Monocristalina	Environmental Product Declaration for Mono-crystalline Double glass, N-Type, Solar photovoltaic modules
		Vidro frontal 2mm	
		Vidro traseiro 2mm	

		Moldura poliuretano	
		Plástico	

Apêndice C: Tabela correspondente a aba de resultados por metro quadrado.

Componentes	Subcomponentes	Material	A1-A3 (Extração, processamento e produção)	A4 (Transporte até o canteiro de obra)	A5 (instalação)	B4 (Substituição)	B6 (Uso operacional de energia)	C1 (Demolição)	C2 (Transporte de resíduos)	C3-C4 (Reciclagem e destinação final)	Transporte (Aquaviário)
Fundação	Concretagem de estacas	Concreto	8186,42	3989,475	409,321	0	513,604	163,7284	239,3685	-494,538	
	Blocos de coroamento										
	Fôrma em madeira	Madeira	95,22	558,348	4,761	0		1,9044	139,587	15,456	
	Armaduras	Aço	1055,996	79,968	52,7998	0		21,11992	9,996	6,96508	
	Impermeabilização	Poliéster	/	/	/	/		/	/	/	
Estrutura	Aço	Aço	1646,88	124,236	82,344	0		32,9376	15,5295	10,8624	
	Fôrma de laje	Madeira	64,17	380,086	3,2085	0		1,2834	95,0215	10,416	
	Concretagem baldrame	Concreto	2478,78	1207,85	123,939	0		49,5756	72,471	-149,742	
	Forma de viga baldrame	Madeira	391,23	1327,088	19,5615	0		7,8246	331,772	63,504	
Estrutura metálica	Perfis metálicos estruturais	Aço	13.950	1059,576	697,48	0		278,992	132,447	92,008	
Paredes (internas)	Cobogó cerâmico	Cerâmica	/	/	/	/		/	/	/	
	Divisória em granilite	Granilite	18,3493	19,992	0,917465	39,189821		0,366986	0,4998	-0,93573	
	Parede de drywall	Drywall	364,9959	776,832	18,249795	1230,788173		7,299918	51,7888	11,62176	
	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	1593,529	122,808	79,67645	1840,262613		31,87058	8,1872	4,191383	
Paredes (fachada)	Sistema fibrocimento	Fibrocimento	729,5661	191,352	36,478305	993,903377		14,591322	4,7838	17,13185	
	Lã de rocha	Lã de rocha	994,483	75,684	49,72415	1147,442151		19,88966	5,0456	2,615741	
	Gesso	Gesso	167,9757	49,385	8,398785	242,369079		3,359514	7,9016	5,34848	
Esquadrias	Porta de alumínio	Alumínio	75,6	26,9892	3,78	113,90085		1,512	3,37365	2,646	

	Portas de madeiras	Madeira	3651,48	209,916	182,574	4762,1826		73,0296	52,479	592,704	
	Janela (11 unidades)	Alumínio	936,8	32,844	46,84	1072,1135		18,736	4,1055	32,788	
	Vidro laminado 4mm	Vidro	257,58	28,56	12,879	309,1893		5,1516	2,856	2,1627	
	Vidro 10mm	Vidro	173,25	14,28	8,6625	202,06956		3,465	1,428	0,98406	
Cobertura	Telha termoacústica	Aço	1410	133,875	70,5	1659,015		28,2	7,14	9,3	
	Isolamento lã de rocha	Lã de rocha	1169,532	89,964	58,4766	1355,684904		23,39064	11,2455	3,076164	
	Trama de aço	Aço	1410	107,1	70,5	1629,5625		28,2	4,4625	9,3	
Pisos	Piso cimento queimado	Cimento queimado	/	/	/	/		/	/	/	
	Contrapiso	Argamassa	286,4839	518,84	14,324195	910,398674		5,729678	77,826	7,194901	
	Granilite	Granilite	75,4215	57,12	3,771075	135,402855		1,50843	1,428	-3,84615	
Pintura	Massa látex (paredes)	Massa acrílica	/	/	/	/		/	/	/	
	Pintura paredes	Tinta	/	/	/	/		/	/	/	
	Pintura metálica	Tinta	/	/	/	/		/	/	/	
	Pintura madeira	Verniz	/	/	/	/		/	/	/	
	Selador	Selador	/	/	/	/		/	/	/	
	Pintura teto	Tinta	/	/	/	/		/	/	/	
Brises linear	Brises linear	Alumínio extrudado	465,608	8,8536	23,2804	508,201758		9,31216	1,1067	0,040898	
Estrutura de suporte (PVSD)	Barras de aço	Aço	662,888	49,98	33,1444	765,51766		13,25776	6,2475	4,37224	
Estrutura de suporte (Módulos fotovoltaico - cobertura)	Barras de alumínio	Alumínio	212,96	7,5684	10,648	243,83525		4,2592	0,94605	7,4536	
Dispositivos de sombreamento fotovoltaico (PVSD)	Módulos fotovoltaicos	N/Type Monocrystalina	2390,1	39,984	119,505	2633,4866		47,802	33,32	2,7756	33,00696
		Vidro frontal 2mm									
		Vidro traseiro 2mm									

		Moldura poliuretano									
		Plástico									
Sistema fotovoltaico convencional (cobertura)	Módulos fotovoltaicos	N/Type Monocristalina	2390,1	39,984	119,505	2633,4866		47,802	33,32	2,7756	33,00696
		Vidro frontal 2mm									
		Vidro traseiro 2mm									
		Moldura poliuretano									
		Plástico									

Resultados / sistema construtivo	A1-A3 (Extração, processamento e produção)	A4 (Transporte até o canteiro de obra)	A5 (Instalação)	B4 (Substituição)	B6 (Uso de energia operacional)	C1 (Demolição)	C2 (Transporte de resíduos)	C3-C4 (Reciclagem e destinação final)	
kg CO2eq/50 anos	42.525	11248,5702	2126,23992	19161,02963	513,604	850,495968	1289,0437	263,081377	
kg CO2eq/m².50 anos	205,4338087	54,34091884	10,27169043	92,56536051	2,481178744	4,108676174	6,227264251	1,270924527	
(%)	37%	10%	2%	17%	23%	1%	1%	0%	

Resultados / sistemas fotovoltaicos	A1-A3	A4	A5	B4	B6	C1	C2	C3-C4	A4
kg CO2eq/50 anos	4780,2	145,98192	239,01	5266,9732		95,604	66,64	5,5512	66,01392
kg CO2eq/m².50 anos	23,09275362	0,705226667	1,154637681	25,44431498		0,461855072	0,321932367	0,026817391	0,318907826
(%)	4%	0%	0%	5%		0%	0%	0%	

