

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Avaliação do desempenho de telhado verde na eficiência energética e nas emissões de carbono para um edifício universitário em um cenário futuro de mudanças climáticas

Jaqueline Teixeira Bousado
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

JAQUELINE TEIXEIRA BOUSADO

Avaliação do desempenho de telhado verde na eficiência energética e nas emissões de carbono para um edifício universitário em um cenário futuro de mudanças climáticas

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Clarissa Ferreira Albrecht

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

B777a
2025

Bousado, Jaqueline Teixeira, 1996-
Avaliação do desempenho de telhado verde na eficiência energética e nas emissões de carbono para um edifício universitário em um cenário futuro de mudanças climáticas / Jaqueline Teixeira Bousado. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (125 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Clarissa Ferreira Albrech.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.192>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Arquitetura e conservação de energia. 2. Energia limpa - Simulação. 3. Mercado de emissão de carbono. 4. Mudanças climáticas. I. Albrech, Clarissa Ferreira, 1981-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDD 22. ed. 333.7962

JAQUELINE TEIXEIRA BOUSADO

Avaliação do desempenho de telhado verde na eficiência energética e nas emissões de carbono para um edifício universitário em um cenário futuro de mudanças climáticas

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

Jaqueline Teixeira Bousado
Autora

Clarissa Ferreira Albrecht
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 09/04/2025 às 17:36:15 e pela orientadora em 10/04/2025 às 11:07:50. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **347A.YG89.HHWP** e clique no botão 'Validar documento'.

A Deus e a meus pais, Penha e Luiz.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, Autor da vida e Senhor de todas as coisas, por ter me concedido esta oportunidade e por me sustentar ao longo de toda esta caminhada e sempre.

Agradeço à Nossa Senhora Aparecida, por seu amor e pela sua valiosa intercessão junto ao seu filho Jesus Cristo.

Agradeço aos meus pais pelo amor incondicional, por sempre acreditarem em mim, pelo incentivo, pela motivação, pela dedicação e por nunca me deixarem sentir sozinha. Sem dúvidas, vocês foram e sempre serão muito especiais para mim. Quero que saibam que esta é mais uma conquista nossa.

Aos familiares e a todos que me incentivaram, apoiaram e rezaram por mim.

Ao meu primo Guilherme Mateus Bousada, pelo apoio e pela acolhida em Viçosa nos meus primeiros meses de aula.

Aos membros do laboratório Latecae, pela colaboração e pelo companheirismo. Não posso deixar de citar a Ligiana Pricila Guimarães Fonseca, o Caio de Carvalho Lucarelli e os professores Joyce Correna Carlo e Matheus Menezes Oliveira, que sempre foram solícitos em ajudar.

Ao professor José Maria Franco de Carvalho, do departamento de Engenharia Civil, pelos ensinamentos e pela presteza para discutir os temas em estudo.

Ao professor Celso Eduardo Lins de Oliveira, da USP, pela disponibilidade e pelo esclarecimento sobre o tema de um dos capítulos deste trabalho.

À minha orientadora Clarissa Ferreira Albrecht, pelo apoio e pelas orientações que foram essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

À Maria Vitória de Carvalho Chermont, graduanda da iniciação científica, pela colaboração no desenvolvimento de um dos capítulos deste trabalho.

Aos professores e colegas da pós-graduação, que contribuíram através de aulas, reuniões e discussões.

A todos, que de forma direta ou indireta, seja através de ações ou palavras, contribuíram para a realização deste mestrado.

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

“Entrega teu caminho ao Senhor, confia Nele, e Ele agir.”
(Salmo 37:5)

RESUMO

BOUSADO, Jaqueline Teixeira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Avaliação do desempenho de telhado verde na eficiência energética e nas emissões de carbono para um edifício universitário em um cenário futuro de mudanças climáticas.** Orientadora: Clarissa Ferreira Albrecht.

As mudanças climáticas impactam o conforto térmico e o consumo energético das edificações. Os telhados verdes são considerados uma alternativa sustentável, pois podem reduzir a temperatura interna das edificações e minimizar a necessidade de sistemas de climatização e absorverem carbono. No entanto, sua eficiência térmica e energética depende de diversos fatores, como tipo de vegetação, espessura do substrato e condições climáticas locais. Este estudo teve como objetivo avaliar a influência dos telhados verdes na eficiência energética e nas emissões de carbono operacional e incorporado em um edifício universitário, considerando um cenário climático futuro para 2050. Para isso, a pesquisa foi conduzida em três etapas: simulações termoenergéticas utilizando o *software* EnergyPlus, estudos sobre o cálculo do carbono operacional considerando a matriz elétrica brasileira e avaliação do ciclo de vida por meio do *software* SimaPro. O objeto de estudo foi o edifício de salas de aula denominado Pavilhão de Aulas II da Universidade Federal de Viçosa. Foram analisados cinco cenários: quatro variações de telhados verdes, sendo dois extensivos e dois intensivos, com variação de índice de área foliar e espessura de substrato, e um caso base com a cobertura existente. Os resultados indicaram que, no contexto analisado, os telhados verdes não proporcionaram reduções expressivas da temperatura interna das salas de aula nem na economia de energia elétrica do edifício. A variação térmica entre os casos foi inferior a 0,5°C, e o consumo energético se reduziu no máximo em 0,23%. A quantificação do carbono operacional considerou o cálculo do fator de emissão para 2050, fundamentado nos dados do cenário de estagnação da matriz elétrica do Plano Nacional de Energia 2050. Para o cálculo das emissões, foi utilizado o fator de emissão e os resultados de consumo de energia elétrica. Já na análise de emissões incorporadas de carbono, verificou-se que o telhado verde extensivo apresentou emissão incorporada negativa, enquanto o intensivo teve emissão positiva, devido à diferença de espessura do substrato. Além disso, a camada de vegetação foi a única com balanço negativo de emissões, evidenciando seu potencial de remoção de dióxido de carbono equivalente. Embora os telhados verdes não tenham se mostrado eficazes para melhorar a eficiência energética e o conforto térmico no cenário estudado, seu uso pode ser justificado por

outros benefícios ambientais, como redução da ilha de calor urbana, absorção de águas pluviais e melhora da qualidade do ar. A pesquisa ressalta a necessidade de avaliar a viabilidade dos telhados verdes considerando parâmetros de projeto, clima e combinação com estratégias passivas e ativas. Sugere-se o uso de dados mais precisos da matriz elétrica para calcular fatores de emissão futuros e uma análise mais detalhada do ciclo de vida, abrangendo todo o ciclo de vida.

Palavras-chave: Simulação termoenergética; Fator de emissão futuro; Carbono operacional; Carbono incorporado.

ABSTRACT

BOUSADO, Jaqueline Teixeira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Evaluation of green roof performance in energy efficiency and carbon emissions for a university building in a future climate change scenario.** Adviser: Clarissa Ferreira Albrecht.

Climate change impacts thermal comfort and energy consumption in buildings. Green roofs are considered a sustainable alternative, as they can reduce indoor temperatures and minimize the need for HVAC systems, while also contributing to carbon absorption. However, their thermal and energy efficiency depends on several factors, such as vegetation type, substrate thickness, and local climatic conditions. This study aimed to evaluate the influence of green roofs on energy efficiency and operational and embodied carbon emissions in a university building, considering a future climate scenario for the year 2050. The research was conducted in three stages: thermal-energy simulations using EnergyPlus software, studies on operational carbon calculations based on the Brazilian electricity matrix, and life cycle assessment using SimaPro software. The object of study was the classroom building known as Pavilhão de Aulas II at the Federal University of Viçosa. Five scenarios were analyzed: four variations of green roofs – two extensive and two intensive – with differences in leaf area index and substrate thickness, and one baseline scenario with the existing roof structure. The results indicated that, in the analyzed context, green roofs did not provide significant reductions in indoor classroom temperatures or in the building's electricity consumption. The thermal variation among scenarios was less than 0.5°C, and energy savings reached a maximum of only 0.23%. Operational carbon quantification was based on the emission factor forecast for 2050, derived from the stagnation scenario of the Brazilian electricity matrix in the National Energy Plan 2050. The emissions were calculated using the projected emission factor and electricity consumption results. As for embodied carbon emissions, it was found that the extensive green roof presented a negative embodied emission, while the intensive roof had a positive one, due to the difference in substrate thickness. Additionally, the vegetation layer was the only component with a negative emission balance, highlighting its potential to sequester equivalent carbon dioxide. Although green roofs were not effective in improving energy efficiency and thermal comfort under the studied scenario, their implementation may be justified by other environmental benefits, such as reduction of the urban heat island effect, stormwater absorption, and air quality improvement. The study emphasizes the need to assess the feasibility of green roofs by

considering design parameters, climate, and the combination with passive and active strategies. It also recommends the use of more accurate data for future electricity matrix projections and a more detailed life cycle assessment encompassing the entire life cycle.

Keywords: Thermo-energy simulation; Future emission factor; Operational carbon; Embodied carbon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Pavilhão de Aulas II	39
Figura 2.2 – Salas de aula a noroeste	41
Figura 2.3 – Cobertura do PVB atual. Cobertura das salas de aula laterais (a e c); cobertura do pátio (b); cobertura da entrada do edifício, de parte do corredor e do pátio (d); cobertura das salas de aula à esquerda, do corredor, do pátio e da entrada do edifício (e).....	42
Figura 2.4 – Camadas do telhado verde.....	43
Figura 2.5 – Variações de temperatura entre os casos com telhado verde e o caso CB para a maior temperatura externa	45
Figura 2.6 – Variações de temperatura entre os casos com telhado verde e o caso CB para a menor temperatura externa	46
Figura 2.7 – Maiores diminuições de temperaturaFonte: própria autora.....	47
Figura 2.8 – Maiores aumentos de temperatura.....	48
Figura 2.9 – Consumo de energia elétrica pelo edifício	49
Figura 2.10 – Variações de consumo total entre os casos com telhado verde e o caso CB.....	50
Figura 3.1 – Repartição da oferta interna de energia no ano de 2023.....	63
Figura 3.2 – Matriz elétrica brasileira entre 2022 e 2023	64
Figura 3.3 – Sequência metodológica	66
Figura 3.4 – Camadas simuladas dos telhados verdes.....	67
Figura 3.5 – Participação das categorias na matriz elétrica brasileira	72
Figura 3.6 – Emissão operacional pelo consumo de energia elétrica	75
Figura 4.1 – Fases de uma ACV	90
Figura 4.2- Pavilhão de Aulas II.....	93
Figura 4.3 – Representação simplificada do telhado verde sobre as lajes das salas	94
Figura 4.4 – Representação simplificada da cobertura existente.....	94
Figura 4.5 – Diagrama de contribuição de cada processo para as emissões totais do telhado verde extensivo	100
Figura 4.6 – Diagrama de contribuição de cada processo para as emissões totais do telhado verde intensivo	100
Figura 4.7 – Emissão incorporada por categoria de impacto	101

Figura 4.8 – Emissão incorporada por processo e por categoria de impacto para o telhado verde extensivo (kg CO ₂ eq/m ²)	103
Figura 4.9 – Emissão incorporada por processo e por categoria de impacto para o telhado verde intensivo (kg CO ₂ eq/m ²)	104
Figura A.1 – Temperatura interna horária na sala do 2º pavimento no caso CB.....	113
Figura A.2 – Temperatura interna horária na sala do 2º pavimento no caso TE1 ...	114
Figura A.3 – Temperatura interna horária na sala do 2º pavimento no caso TI1.....	114
Figura A.4 – Temperatura interna horária na sala do 2º pavimento no caso TE2 ...	115
Figura A.5 – Temperatura interna horária na sala do 2º pavimento no caso TI2.....	115
Figura A.6 – Temperatura interna horária na sala do 1º pavimento no caso CB.....	116
Figura A.7 – Temperatura interna horária na sala do 1º pavimento no caso TE1 ...	116
Figura A.8 – Temperatura interna horária na sala do 1º pavimento no caso TI1.....	117
Figura A.9 – Temperatura interna horária na sala do 1º pavimento no caso TE2 ...	117
Figura A.10 – Temperatura interna horária na sala do 1º pavimento no caso TI2...	118
Figura A.11 – Temperatura interna horária na sala do térreo no caso CB	118
Figura A.12 – Temperatura interna horária na sala do térreo no caso TE1	119
Figura A.13 – Temperatura interna horária na sala do térreo no caso TI1	119
Figura A.14 – Temperatura interna horária na sala do térreo no caso TE2.....	120
Figura A.15 – Temperatura interna horária na sala do térreo no caso TI2	120
Figura B.1 – Sequência metodológica	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Casos simulados.....	43
Tabela 2.2 – Propriedades dos materiais das camadas dos telhados verdes	44
Tabela 2.3 – Temperatura interna da sala do 2º pavimento para a maior e a menor temperatura externa	47
Tabela 2.4 – Número de horas por ano com a necessidade de resfriamento e de aquecimento nas salas de aula.....	49
Tabela 3.1 – Consumo de energia elétrica em 2050	68
Tabela 3.2 – Detalhamento da matriz elétrica prevista para 2046 – 2050	70
Tabela 3.3 – Previsão de geração anual de energia elétrica por tecnologia (MWmédio)	71
Tabela 3.4 – Consumo de energia elétrica pelo edifício (MW).....	75
Tabela 4.1 – Quantitativo dos processos.....	97
Tabela 4.2 – Absorção por processo (kg CO ₂ eq)	101
Tabela 4.3 – Emissão incorporada por processo e por categoria de impacto para o telhado verde extensivo (kg CO ₂ eq/m ²)	103
Tabela 4.4 – Emissão incorporada por processo e por categoria de impacto para o telhado verde intensivo (kg CO ₂ eq/m ²)	104
Tabela B.1 – Valores GWP100 e tempos de vida atmosféricos para uma série de GHG, com base no AR6 WGI	123

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Camadas e materiais dos telhados verdes e processos do SimaPro..	96
Quadro 4.1 – Camadas e materiais dos telhados verdes e processos do SimaPro (continuação).....	97

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1	Mudanças climáticas	17
1.2	Conforto ambiental e emissões associadas às edificações	19
1.3	Contexto da pesquisa.....	22
1.4	Justificativa e relevância do tema	23
1.5	Objetivos.....	25
1.5.1	<i>Objetivo geral.....</i>	25
1.5.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	26
1.6	Estrutura da dissertação	26
1.7	Procedimentos metodológicos	27
	REFERÊNCIAS	29
2	INFLUÊNCIA DE TELHADOS VERDES EM UM EDIFÍCIO UNIVERSITÁRIO PARA UM CENÁRIO CLIMÁTICO FUTURO.....	32
	RESUMO	32
	ABSTRACT	33
2.1	Introdução.....	34
2.2	Material e métodos.....	38
2.2.1	<i>Local de estudo</i>	38
2.2.2	<i>Clima e recorte temporal</i>	39
2.2.3	<i>Modelagem e simulações termoenergéticas do edifício</i>	39
2.2.4	<i>Casos para simulação</i>	41
2.3	Resultados e discussão	44
2.4	Conclusões.....	51
	REFERÊNCIAS.....	53
3	EMISSÃO OPERACIONAL DE UM EDIFÍCIO UNIVERSITÁRIO PARA UMA MATRIZ ELÉTRICA FUTURA.....	56
	RESUMO	56
	ABSTRACT	57
3.1	Introdução.....	58
3.1.1	<i>Carbono operacional pelo consumo de energia elétrica.....</i>	59
3.1.2	<i>Abordagens para estimativa de emissões de GHGs</i>	60
3.1.3	<i>Quantificação das emissões de GHGs</i>	62

3.1.4	<i>Matriz energética brasileira</i>	63
3.1.5	<i>Matriz elétrica brasileira</i>	64
3.1.6	<i>Objetivos</i>	65
3.2	Material e métodos	65
3.2.1	<i>Objeto de estudo</i>	67
3.2.2	<i>Dados da matriz elétrica brasileira futura</i>	68
3.2.3	<i>Fator de emissão</i>	69
3.2.4	<i>Quantificação de emissão operacional</i>	70
3.3	Resultados e discussão	70
3.3.1	<i>Dados da matriz elétrica brasileira futura</i>	70
3.3.2	<i>Fator de emissão</i>	72
3.3.3	<i>Quantificação de emissão operacional</i>	74
3.4	Conclusões	76
	REFERÊNCIAS	79
4	QUANTIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO COM USO DE TELHADO VERDE EM UM EDIFÍCIO UNIVERSITÁRIO	83
	RESUMO	83
	ABSTRACT	84
4.1	Introdução	85
4.1.1	<i>Carbono incorporado nos edifícios</i>	86
4.1.2	<i>Avaliação do Ciclo de Vida</i>	88
4.1.3	<i>Ferramentas computacionais para a ACV</i>	90
4.1.4	<i>Objetivos</i>	92
4.2	Material e métodos	92
4.2.1	<i>Objeto de estudo</i>	93
4.2.2	<i>Quantificação do carbono incorporado</i>	93
4.2.3	<i>Objetivo e escopo</i>	94
4.2.4	<i>Análise do inventário</i>	95
4.2.5	<i>Avaliação de impacto</i>	98
4.2.6	<i>Interpretação</i>	99
4.3	Resultados e discussão	99
4.4	Conclusões	105
	REFERÊNCIAS	106

5	CONCLUSÕES GERAIS.....	109
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	111
	APÊNDICES.....	113
	Apêndice A – Temperatura interna de três salas de aula para os cinco casos de cobertura	113
	Apêndice B – Metodologia para cálculo de fator de emissão de uma matriz elétrica	120
	REFERÊNCIAS.....	125

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Mudanças climáticas

Uma meta importante para mitigar as mudanças climáticas é a diminuição das emissões de gases de efeito estufa (*greenhouse gases* – GHGs) (Brasil, 2009; IPCC, 2021; IRENA, 2023; Zhang *et al.*, 2022). Sabe-se que o aquecimento na atmosfera, no oceano e na terra no contexto global foi impulsionado pelas atividades humanas. A escala das mudanças recentes e muitos outros aspectos no sistema climático como um todo não têm precedentes ao longo de muitos séculos há milhares de anos (IPCC, 2021).

Acredita-se que muitos elementos e fenômenos naturais ficaram em desequilíbrio por influência humana, podendo citar as ocorrências de (IPCC, 2021):

- A. Aumento da temperatura (nos oceanos, na terra, na atmosfera);
- B. Perda de gelo;
- C. Aumento das ondas de calor marinhas;
- D. Aumento da frequência e da intensidade dos eventos de precipitação intensa;
- E. Aumento das secas agrícolas e ecológicas;
- F. Maior frequência dos extremos de calor na maioria das regiões terrestres;
- G. Frios com extremos menos frequentes e menos severos.

Como forma de desacelerar esses eventos, busca-se reduzir a emissão de GHGs e a quantidade de carbono na atmosfera. Esses são os principais objetivos associados à transição para uma economia de baixo carbono, ou seja, aquela que possui uma produção mínima de GHGs na biosfera, com baixo consumo de energia, baixa poluição ambiental e baixas emissões de carbono (EPE, 2020).

Para atingir esses objetivos, a Organização das Nações Unidas (ONU), através da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, expõe um conjunto de dezessete ações, que dentre os aspectos abordados, abrange a garantia de proteção duradoura do planeta e seus recursos naturais e a criação de condições para um crescimento econômico sustentável. Esta agenda alerta para a necessidade de agir de forma a combater as mudanças climáticas e seus desdobramentos, o que

está diretamente relacionado às emissões de GHGs. A agenda ressalta ainda que para atingir esses objetivos, ações conjuntas serão necessárias, envolvendo governos, a sociedade civil, o setor privado, o sistema das Nações Unidas, entre outros atores (ONU, 2015).

No Acordo de Paris, adotado durante a 26^a Conferência das Partes ocorrida em 2015, o Brasil se comprometeu em reduzir suas emissões de GHGs em 37% até 2025, e em 50% até 2030, em comparação com as emissões de 2005. Os compromissos do Brasil também incluem o objetivo de longo prazo para alcançar a neutralidade climática até 2050. Em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), o Brasil define os meios de implementação e da efetivação de ações de mitigação e adaptação em todos os setores econômicos (Brasil, 2022).

Nesse contexto de esforços globais para o combate às mudanças climáticas, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) tem um papel de fornecer avaliações científicas sobre as tendências e impactos climáticos. O relatório do IPCC (2021) apresenta cenários climáticos com o objetivo de investigar futuras emissões, mudanças climáticas, impactos e riscos relacionados e embasar a proposta de estratégias de mitigação e adaptação. Esses cenários são projeções quantitativas baseadas em suposições, incluindo variáveis socioeconômicas, níveis de mitigação climática, uso da terra e controles de poluição do ar para aerossóis e precursores de ozônio não-CH₄.

Em seu sexto relatório, este órgão descreve os cinco cenários socioeconômicos (SSP1 a SSP5), ou percursos socioeconômicos compartilhados, os quais recebem a nomenclatura SSPx-y. “SSPx” indica o Caminho Socioeconômico Compartilhado (*Shared Socio-economic Pathway*), descrevendo as tendências socioeconômicas contidos nos cenários, e “y” indica o nível de forçamento radiativo (em watts por metro quadrado) resultante do cenário no ano de 2100. A modelagem dos cenários é baseada nos níveis de mitigação de GHGs e podem ser de nível de aquecimento baixo ou alto (IPCC, 2021).

Dessa forma, a classificação dos cenários do IPCC permite uma avaliação das possíveis condições climáticas. Os cenários de emissões altas e muito altas de GHGs (SSP3-7.0 e SSP5-8.5) apresentam emissões de dióxido de carbono (CO₂) que se aproximam do dobro dos níveis atuais até 2100 e 2050, respectivamente. O cenário intermediário de emissões de GHGs (SSP2-4.5) tem emissões de CO₂ permanecendo em torno dos níveis atuais até metade do século. Os cenários de

emissões muito baixas e baixas (SSP1-1.9 e SSP1-2.6) apresentam emissões de CO₂ decrescendo até zero líquido por volta de 2050 e 2070, respectivamente, seguidas por emissões líquidas negativas de CO₂ de vários níveis (IPCC, 2021).

Além das previsões climáticas, existem pesquisas que analisaram alterações já ocorridas, como a de Sanches, Fialho e Quina (2017). Estes pesquisadores fizeram um estudo sobre as alterações de temperatura no município de Viçosa-MG devido às mudanças climáticas, no qual analisaram dados mensais obtidos da Estação Meteorológica Convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Viçosa, no período de 1968 a 2015. Observou-se o aumento significativo das temperaturas mínimas médias nos meses de janeiro (1,8°C), fevereiro (1,2°C), março (1,6°C), abril (2,0°C), junho (2,1°C), julho (1,8°C), outubro (1,3 °C), novembro (1,2°C) e dezembro (1,6°C).

Diante disso, nota-se que controlar a mudança climática é um dos maiores desafios atuais junto à dificuldade de desenvolvimento sustentável de todos os países. Por outro lado, esse é um momento de grande oportunidade, no qual são discutidas formas de superar os desafios de desenvolvimento. Entre as metas do desenvolvimento sustentável, estão: (i) redução do impacto ambiental das cidades, incluindo um olhar atento à qualidade do ar e à gestão de resíduos; (ii) fortalecimento da resiliência e da capacidade adaptativa para perigos climáticos e naturais; e (iii) integração de medidas de mudança climática em políticas nacionais, estratégias e planejamento (ONU, 2015). Duas ações podem ser realizadas no que diz respeito à mitigação das mudanças climáticas, (i) a aprovação de leis e planos com recomendação de medidas concretas e (ii) a implementação de programas educacionais (Olcina; Morote, 2023).

As consequências das mudanças climáticas sobre as cidades são variadas e apresentam certo nível de incerteza quanto à sua intensidade, sendo influenciadas pelo aumento médio da temperatura e outras variáveis climáticas. Para enfrentar esses desafios, são adotadas medidas de adaptação e mitigação (Cerezini; Castro, 2024).

1.2 Conforto ambiental e emissões associadas às edificações

O planejamento das edificações mudou com o passar do tempo, fundamentado na evolução do conhecimento humano sobre o ambiente interior e

exterior ao edifício, no aumento da complexidade das construções, no aumento das exigências dos ocupantes e no desenvolvimento técnico. Alguns requisitos básicos eram, por exemplo, a segurança do edifício, a impermeabilidade e/ou a estanqueidade às chuvas, ventos e neve. Entretanto, com novas exigências, outros aspectos foram progressivamente adicionados, tendo em vista o conforto, seja ele térmico, visual ou lumínico, olfativo ou acústico, cada vez mais valorizado. Tudo isso por ser necessário para garantir a saúde, o bem-estar e as condições de conforto dos ocupantes (Silva, 2009).

O conforto ambiental compreende um conjunto de condições ambientais que permitem ao ser humano sentir bem estar térmico, visual, acústico e antropométrico e garante a qualidade do ar e o conforto olfativo (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Pode-se dizer que uma pessoa está confortável com relação a um acontecimento ou fenômeno quando pode observá-lo ou senti-lo sem preocupação ou incômodo, sentindo-se em neutralidade com relação a ele (Corbella; Yannas, 2009).

Além do conforto, um bom projeto arquitetônico deve abranger o estudo de seu desempenho energético, pelo fato de interferirem um no outro. As decisões devem ser embasadas no conhecimento das variáveis e dos conceitos que envolvem a eficiência energética e o conforto ambiental e na escolha das diferentes alternativas de projeto em todo o processo. A especificação dos materiais construtivos participa do processo de redução da demanda de energia com a análise da energia embutida nos seus processos de fabricação e transporte (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

Em acréscimo, é válido mencionar que a condição climática local e as características do edifício são fatores determinantes para definir as intervenções de *retrofit* e seu desempenho energético. Algumas intervenções que são benéficas em um clima podem ser menos vantajosas e até apresentarem efeito contrário em outros climas (Sarihi; Saradj; Faizi, 2021).

A envoltória é um elemento determinante na utilização de energia nos edifícios por estabelecer a interação entre o ambiente interior e o exterior. No que tange o desempenho térmico, o fluxo de calor através de paredes, janelas e telhados impacta consideravelmente as temperaturas no interior do edifício (Geraldini *et al.*, 2022).

No contexto das mudanças climáticas, a temperatura média do ar externo e o consumo de energia são duas variáveis analisadas em diversas publicações acerca

dos efeitos do aquecimento global para os períodos de 2020, 2050 e 2080. O que indica que as condições de conforto térmico precisarão ser revistas diante deste cenário (Guarda; Durante; Callejas, 2020).

Com um projeto passivo, pode-se reduzir ou eliminar a necessidade de equipamentos mecânicos para resfriamento, aquecimento, ventilação e iluminação. Isso através da distribuição dos elementos arquitetônicos nos ambientes, da forma da edificação e da sua envoltória (Wen *et al.*, 2023).

Por outras palavras, é possível alcançar a eficiência energética com a adoção de tecnologias e práticas eficazes para reduzir o consumo de energia. Essa abordagem fundamenta-se na premissa de que a redução do uso de energia contribui para a diminuição das emissões de GHGs resultantes da queima de combustíveis fósseis (Min *et al.*, 2022).

Além disso, a arquitetura pode contribuir com a redução das emissões de GHGs através das escolhas de projeto e materiais utilizados, tanto na estrutura como nos acabamentos e isolamentos. Dessa forma, pode-se conseguir efeitos positivos ao reduzir as emissões de GHGs produzidas, evitar a sua liberação para a atmosfera e promover meios para a absorção de carbono (Besana; Tirelli, 2022). Na maioria das situações, a construção de novos edifícios gera mais emissões de carbono do que o *retrofit*, isso porque no *retrofit* há a permanência de materiais já existentes, não havendo a necessidade de substituí-los por novos com uma nova carga de carbono incorporado (Arup, 2020).

Outra questão a se destacar é o fato de que um sistema construtivo com melhor eficiência não necessariamente será o que apresenta menores emissões, como se constatou da pesquisa de Alegbe (2022). No trabalho, foi verificado que paredes externas de madeira/tijolo com divisórias de madeira proporcionaram maior conforto térmico interno quando comparadas a paredes de madeira, mas estas últimas apresentaram menor emissão ao longo do ciclo de vida do edifício.

Para as edificações existem dois tipos de emissões, as incorporadas e as operacionais. Emissões incorporadas referem-se às emissões geradas para a fabricação, o transporte e o uso dos materiais de construção, sendo geralmente elevadas ao finalizar a construção de um edifício. Essas emissões são causadas, por exemplo, pelo uso de energia proveniente de fontes fósseis na produção dos materiais. Já as emissões operacionais, referem-se às emissões resultantes do uso de energia durante a operação do edifício, como para aquecimento ou resfriamento.

Se a energia utilizada for de fontes fósseis, as emissões serão positivas, mas se forem de fontes renováveis, como solar ou eólica, as emissões podem ser negativas, contribuindo para a redução das emissões totais (Jancovic, 2024).

Nesse contexto, a construção verde cresceu nos últimos trinta anos e se tornou a tendência mais importante e progressiva na indústria da construção. Notaram-se avanços na concepção, construção e operação de edifícios, mas que não são tão relevantes diante da necessidade de mudanças pelos efeitos das alterações climáticas e por outros desafios ambientais globais (ILFI, 2019). Um dos elementos que pode ser implementado é o telhado verde que utiliza de técnicas multicamadas para melhorar o conforto térmico das edificações (Pragati *et al.*, 2023).

Scherer, Alves e Redin (2018) definem as coberturas ou telhados verdes como um tipo de fechamento superior de edificações, composto por camada de solo e vegetação, além de outras camadas não orgânicas, pertinentes em cada caso, como manta de retenção de substrato, camada de drenagem, manta antirraiz e impermeabilização. Diante disso, percebe-se que é uma técnica ecológica que pode ser usada em substituição aos sistemas de cobertura convencionais.

Diferentes autores utilizaram simulações para avaliar os impactos dos telhados verdes, como Aboelata (2021), com os *softwares* EnergyPlus e DesignBuilder para análise do consumo de energia de edifícios, e Piqué, Blanchet e Breton (2023), com o *software* SimaPro para avaliação do ciclo de vida. A modelagem computacional e a simulação são técnicas de análise válidas e muito utilizadas, com diversas aplicações, incluindo previsões econômicas, climáticas e análises de problemas de engenharia (Hensen; Lamberts, 2019).

1.3 Contexto da pesquisa

Esta pesquisa integra o projeto intitulado “Tecnologias para adaptação de edificações às mudanças no clima: eficiência energética, geração fotovoltaica e redução de emissões em escolas”, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Este projeto entrou em vigor em dezembro de 2022, com duração de 48 meses. Sua proposta é atuar em duas vertentes: (i) consumo de energia elétrica e emissão de CO₂eq (ii) conforto térmico e produtividade, ambas direcionadas para ambientes escolares. As mudanças climáticas poderão agravar o desconforto térmico nas escolas do Brasil, país

predominantemente quente. Com isso, será intensificado o uso de ar condicionado para manter o conforto térmico, o que demandará maior consumo de energia elétrica.

Este estudo integra também a pesquisa intitulada “Tecnologias para adaptação do desempenho termoenergético de uma edificação escolar às mudanças climáticas”, financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O desenvolvimento dessa pesquisa se iniciou em março de 2022 e a previsão de seu término é em fevereiro de 2026. Seu objetivo geral é alisar combinações de tecnologias passivas e ativas de baixo consumo de energia que apresentem viabilidade técnica e econômica para aplicação em um *retrofit* do Pavilhão de Aulas II (PVB) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Isso visando melhoria do conforto térmico e da eficiência energética em um cenário de aumento de temperatura devido às mudanças climáticas.

Portanto, este trabalho visa contribuir com a quantificação e a diminuição das emissões operacionais por meio da inserção do telhado verde em um *retrofit* para melhorar a eficiência energética de salas de aula para um cenário futuro de aumento de temperatura. As salas de aula deste estudo fazem parte do PVB, escolhido para estudo devido à sua relevância por ser uma edificação de uma instituição de ensino, bem como para verificar a interferência de um dos climas previstos para o futuro do Brasil. Além disso, busca-se avaliar o impacto de materiais, inclusive de origem biológica, nas emissões incorporadas.

1.4 Justificativa e relevância do tema

A necessidade de mitigar as mudanças climáticas e reduzir as emissões de GHGs reforça a importância da eficiência energética e do uso de materiais sustentáveis nas edificações. A pesquisa avalia o impacto do telhado verde na redução das emissões operacionais e incorporadas em um edifício universitário, visando maior eficiência energética e menor carbono operacional e incorporado.

No cenário de mudanças climáticas e diante das necessidades de mitigar o aumento da temperatura, observa-se que a implementação de medidas para reduzir as emissões de CO₂ precisa ser mais intensa do que tem sido. Tendo isso em vista, é necessária uma aceleração considerável das medidas nos setores de tecnologias de energia, desde a eletrificação mais profunda do uso final de transporte e

aquecimento, até o uso direto de energia renovável, eficiência energética e adições de infraestrutura. Se não houver evolução, as necessidades futuras de investimento e os custos do agravamento dos efeitos das mudanças climáticas, conforme discutido anteriormente, aumentarão (IRENA, 2023).

O IPCC alerta que se as emissões de GHGs não forem limitadas, muitas mudanças serão definitivas em escalas de tempo centenárias e milenares. Entretanto, com reduções profundas e rápidas nas emissões de GHGs, a qualidade do ar melhoraria dentro de alguns anos, as tendências da temperatura da superfície global perceptível se reduziriam após cerca de 20 anos e, em períodos de tempo mais longos, para vários outros fatores de impacto climático (IPCC, 2021).

Diante do contexto de mudanças climáticas e da necessidade de diminuir as emissões de GHGs, observa-se a importância de priorizar a aplicação de soluções construtivas que gerem menos emissões de carbono, como é o caso dos telhados verdes. Portanto, a pesquisa é relevante por buscar uma solução que atenda aos princípios de menos emissões durante o ciclo de vida dos materiais e na fase operacional da edificação.

Além disso, as instituições de ensino superior atuam como organizações estratégicas, através dos trabalhos desenvolvidos na sociedade em suas variadas áreas de atuação, sejam elas de ensino, de pesquisa ou de extensão, que cumprem a função social de despertar na comunidade a importância de sua atuação na tomada de decisão para as mudanças e transformações necessárias para o desenvolvimento sustentável da região nas quais se inserem (Sousa; Carniello; Araújo, 2012). Em acréscimo, é válido destacar que essas instituições devem combater os impactos ambientais gerados por suas atividades e assumir o compromisso de cuidar da conservação dos recursos naturais, bem como da qualidade do meio ambiente, sendo exemplos, inclusive no cumprimento de legislações (Silva; Nassar, 2016).

Os aspectos físicos do conforto ambiental na arquitetura e no urbanismo, também chamados de fisiológicos, envolvem todos os sentidos, classificando-se em conforto térmico ou higrotérmico, visual ou lumínico, acústico, olfativo, palatal (de qualidade do ar) e ergonômico (França, 2018). Quando o conforto térmico não é tratado, a temperatura interna pode influenciar negativamente o ambiente escolar e o desempenho dos alunos, professores e demais colaboradores. Diante disso, observa-se que a deficiência no conforto ambiental do edifício prejudica e diminui a

qualidade dos espaços de ensino (Brasil; Silva, 2018).

A eficiência energética é importante para a diminuição do consumo de energia pela questão ambiental, ou seja, por possibilitar a redução do impacto causado pelos processos relacionados ao fornecimento de energia elétrica que incluem a obtenção de recursos naturais, os processos de geração e transmissão e seu uso final e é importante também pela redução dos custos para o consumidor (Silva; Nassar, 2016).

A partir da perspectiva apresentada, observa-se que a pesquisa se relaciona diretamente com dois dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, o objetivo 11, que trata de tornar as cidades e assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis e o objetivo 13, tomar ação urgente para combater a mudança climática e seus impactos (ONU, 2015). Buscou-se atender ao objetivo 11 apresentando uma solução de adaptação de edificações às mudanças de temperatura através de um sistema de cobertura sustentável no contexto ambiental. Para atender ao objetivo 13, foi avaliado o potencial desse sistema de cobertura na diminuição das emissões de carbono, as quais influenciam nas mudanças climáticas.

Concluindo, este projeto é relevante pelo fato de que as mudanças no clima tendem a diminuir o conforto térmico em edificações, a aumentar o uso de sistemas de condicionamento de ar e, conseqüente, o consumo de energia elétrica, o que amplia os efeitos negativos no clima em um ciclo vicioso. Neste contexto, os ambientes escolares serão muito impactados, uma vez que as salas de aula têm alta ocupação e, portanto, apresentam elevada carga térmica interna. Além disso, as emissões operacionais e incorporadas podem agravar os efeitos das mudanças climáticas, tornando necessária maior atenção nas fontes de energia elétrica e na escolha de materiais e sistemas construtivos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo geral

Quantificar a influência do telhado verde na diminuição de emissões operacionais e incorporadas de carbono do edifício do Pavilhão de Aulas II da Universidade Federal de Viçosa.

1.5.2 Objetivos específicos

- A. Identificar a variação da temperatura interna de salas de aula sem sistema HVAC e o consumo de energia elétrica pelo edifício com sistema HVAC com e sem o telhado verde em um cenário de aumento de temperatura devido às mudanças climáticas.
- B. Organizar uma metodologia para cálculo de carbono operacional pelo consumo de energia elétrica para a matriz elétrica brasileira do ano de 2050.
- C. Quantificar o dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) emitido pela edificação em operação pelo consumo de energia elétrica com e sem os telhados verdes para uma matriz elétrica futura.
- D. Quantificar o CO₂eq emitido durante o ciclo vida do telhado verde nas etapas de berço à entrega ao consumidor.
- E. Identificar se o telhado verde pode reduzir as emissões ao longo de seu ciclo de vida de berço à entrega ao consumidor.

1.6 Estrutura da dissertação

A dissertação foi organizada em cinco capítulos, três deles em formato de artigos.

O capítulo 1 apresenta a introdução, a justificativa do tema, o objetivo geral, os objetivos específicos, a estrutura da dissertação e os métodos adotados nos capítulos 2, 3 e 4 de forma simplificada.

No capítulo 2, o objetivo específico A foi investigado. A influência térmica da cobertura de um edifício educacional foi analisada, comparando a cobertura atual com quatro tipos de telhados verdes, dois extensivos e dois intensivos, variando o índice de área foliar e a espessura do substrato. O estudo foi para o município de Viçosa no ano de 2050. Os resultados incluem a temperatura interna de salas de aula e o consumo de energia elétrica do edifício sem e com um sistema HVAC, respectivamente.

No capítulo 3, os objetivos específicos B e C foram abordados. Este capítulo apresentou uma proposta metodológica para calcular as emissões operacionais pelo consumo de energia elétrica, considerando uma matriz elétrica brasileira para 2050.

A partir disso e dos resultados de consumo de energia elétrica do capítulo anterior, as emissões do Pavilhão de Aulas II com a cobertura atual e com quatro tipos de telhados verdes, dois extensivos e dois intensivos, foram quantificadas.

No capítulo 4, os objetivos específicos D e E foram respondidos. Neste capítulo, realizou-se uma avaliação do ciclo de vida dos materiais das camadas de dois tipos de telhado verde, extensivo e intensivo, inseridos no edifício universitário. A pesquisa verificou as emissões incorporadas ao longo de parte do ciclo de vida dos telhados e investigou sua capacidade de absorção de carbono.

O capítulo 5 mostra as conclusões dos capítulos 2, 3 e 4. Além disso, apresenta uma avaliação geral que engloba todos os objetivos, as contribuições da pesquisa, as limitações do estudo e as recomendações para pesquisas futuras sobre o tema. As principais conclusões foram: (i) o comportamento térmico e o consumo de energia elétrica com os telhados verdes foi semelhante ao da cobertura existente, (ii) é importante a transição para uma matriz energética com mais fontes renováveis para reduzir emissões de CO₂eq e (iii) a camada de vegetação foi a que mais absorveu carbono na avaliação do ciclo de vida (ACV).

1.7 Procedimentos metodológicos

No capítulo 2 foram realizadas simulações termoenergéticas do Pavilhão de Aulas II da UFV utilizando o *software* EnergyPlus, simulando cinco casos para um cenário climático previsto para 2050 em Viçosa-MG, sendo quatro com telhados verdes, variando índice de área foliar e espessura do substrato, e um caso base com a cobertura atual. Foram analisados o consumo de energia total e do sistema HVAC e a temperatura interna ao longo do ano, considerando o uso do edifício. As demais camadas do telhado verde foram configuradas conforme recomendações encontradas na literatura.

No capítulo 3 foi estruturada uma metodologia para calcular o fator de emissão para a matriz elétrica brasileira em 2050 e, posteriormente, calculadas as emissões operacionais devido ao consumo de energia elétrica. Para isso, utilizaram-se dados de projeções da matriz elétrica de 2050, procedimentos da literatura e resultados obtidos no capítulo 2. Com isso, obteve-se o fator de emissão e as emissões do edifício universitário para cada um dos cinco casos de cobertura foram quantificadas para um ano.

No capítulo 4 realizou-se a modelagem de um telhado verde extensivo e um intensivo no Pavilhão de Aulas II para avaliação do ciclo de vida a fim de obter as emissões pelo o carbono incorporado em um horizonte temporal de 100 anos. As características dos telhados verdes foram as mesmas utilizadas no capítulo 2. Foi utilizado o *software* SimaPro e o banco de dados Ecoinvent. A ACV considerou as etapas desde a obtenção de matéria-prima até a entrega do produto ao consumidor, referentes aos materiais das camadas dos telhados verdes. Os resultados foram analisados para comparar os impactos dos telhados verdes e seu potencial de redução das emissões.

REFERÊNCIAS

ABOELATA, Amir. Assessment of green roof benefits on buildings' energy-saving by cooling outdoor spaces in different urban densities in arid cities. **Energy**, v. 219, p. 119514, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119514>.

ALEGBE, Mark. (2022). Comparative analysis of wall materials toward improved thermal comfort, reduced emission, and construction cost in tropical buildings. In *Proceedings of the 11th Masters Conference: People and Buildings*. vol. 1, University of Southampton. p. 67-72 . <https://doi.org/10.5258/SOTON/P1094>.

ARUP. **Net Zero Carbon Buildings: Three Steps to Take Now**. 2020. Disponível em: <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/net-zero-carbon-buildings-three-steps-to-take-now>. Acesso em: 9 set. 2023.

BESANA, Daniela; TIRELLI, Davide. Reuse and retrofitting strategies for a net zero carbon building in Milan: An analytic evaluation. **Sustainability**, v. 14, n. 23, p. 16115, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142316115>.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Portaria n.º 309, de 6 de setembro de 2022. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 173, p. 30, 12 set. 2022. 2022b. Disponível em: https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/INI-C_Portaria%20309%20de%202022.pdf. Acesso em: 19 abr. 2023.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 19 jun. 2023.

BRASIL, P. de C.; SILVA, J. C. Impactos da arquitetura escolar na qualidade do ensino brasileiro. **Conhecimento & Diversidade**, v. 10, n. 21, p. 187-197, 2018.

CEREZINI, Monise Terra; CASTRO, César Nunes de. **Mudanças climáticas: desafios para a adaptação nas regiões metropolitanas brasileiras**. Brasília, DF: Ipea, 2024. 43 p. (Texto para Discussão, n. 2993). Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/13731>. Acesso em: 28 jan. 2025.

CORBELLA, O; YANNAS, Simons. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos**. Rio de Janeiro, Brasil, 2. ed. Revan, 2009. ISBN 9788571063976.

EPE – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **PNE 2050** – Plano Nacional de Energia. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2023.

FRANÇA, Livia Ferreira de. **Singular e plural**: estudos de conforto ambiental à luz de arquitetura bioclimática, eficiência energética e experiência espacial do usuário. 2018. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Urbano) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Artes e Comunicação, Departamento de Arquitetura e

Urbanismo, Recife, 2018.

GERALDI, Matheus Soares *et al.* Assessment of the energy consumption in non-residential building sector in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 273, p. 112371, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112371>.

HENSEN, Jan LM; LAMBERTS, Roberto (Ed.). **Building performance simulation for design and operation**. Routledge, 2012. ISBN 139780415474146.

ILFI – INTERNATIONAL LIVING FUTURE INSTITUTE. **Living Building Challenge 4.0: A Visionary Path to a Regenerative Future**. 2019. International Living Future Institute, Seattle. Disponível em: https://living-future.org/wp-content/uploads/2022/08/LBC-4_0_v14_2_compressed.pdf. Acesso em: 14 set. 2023.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6)**. 2021. Disponível em: https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Acessado em: 4 abr. 2023.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **World Energy Transitions Outlook 2023**. 2023. Disponível em: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_WETO_Preview_2023.pdf?rev=2ca35086907b42cca651b0179a7c639c. Acesso em: 4 abr. 2023.

JANCOVIC, Ljubomir. **Designing Zero Carbon Buildings: Embodied and Operational Emissions in Achieving True Zero**. 3. ed. Abingdon: Routledge, 2024. ISBN 9781032378701.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay Pereira. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Eletrobras/Procel. 2014. ISBN 9788520430798.

MIN, Ji *et al.* The effect of carbon dioxide emissions on the building energy efficiency. **Fuel**, v. 326, p. 124842, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124842>.

OLCINA, Jorge; MOROTE, Álvaro Francisco. Cambio climático y objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Adaptación y enseñanza como retos principales en el ámbito Mediterráneo. **Finisterra**, v. 58, n. 122, p. 39-61-39-61, 2023. <https://doi.org/10.18055/Finis28898>.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2023.

PIQUE, Laurie; BLANCHET, Pierre; BRETON, Charles. Global warming potential comparison between green and conventional roofs in cold climate using life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, p. 138314, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138314>.

PRAGATI, Saranathan *et al.* Simulation of the Energy Performance of a Building with Green Roofs and Green Walls in a Tropical Climate. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 2006, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15032006>.

SANCHES, Fabio de Oliveira; FIALHO, Edson Soares; QUINA, Robson Rodrigues. Evidências de mudanças climáticas em Viçosa (MG). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 34, p. 122-136, 2017. <https://doi.org/10.11606/rdg.v34i0.138581>.

SARIHI, Soad; SARADJ, Fatemeh Mehdizadeh; FAIZI, Mohsen. A critical review of façade retrofit measures for minimizing heating and cooling demand in existing buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 64, p. 102525, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102525>.

SCHERER, Minéia Johann; ALVES, Thales Severo; REDIN, Janaína. Envoltórias vegetadas aplicadas em edificações: benefícios e técnicas. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 7, n. 1, p. 84-101, 2018. <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2018.v7i1.2693>.

SILVA, Carine de Oliveira Santos da; NASSAR, Cristina Aparecida Gomes. Análise do Uso da Energia Elétrica no Instituto Federal Fluminense Campus Campos Guarus. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 5, n. 3, p. 1-20, 2016. <https://doi.org/10.5585/geas.v5i3.428>.

SILVA, S. M. G. M. da. **A Sustentabilidade e o Conforto das Construções**. 360p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Portugal, 2009. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/10245>. Acesso em: 23 set. 2022.

SOUSA, Maria das Graças Bastos de; CARNIELLO, Monica Franchi; ARAÚJO, Elvira Aparecida Simões de. O papel das instituições de ensino superior no desenvolvimento sustentável. **Revista Cereus**, v. 4, n. 3, p. 24-35, 2012.

WEN, Yueming *et al.* Passive ventilation for sustainable underground environments from traditional underground buildings and modern multiscale spaces. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 134, p. 105002, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105002>.

ZHANG, Libo *et al.* How does the photovoltaic industry contribute to China's carbon neutrality goal? Analysis of a system dynamics simulation. **Science of The Total Environment**, v. 808, p. 151868, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151868>.

2 INFLUÊNCIA DE TELHADOS VERDES EM UM EDIFÍCIO UNIVERSITÁRIO PARA UM CENÁRIO CLIMÁTICO FUTURO

RESUMO

O aumento das temperaturas internas das edificações, agravado pelas mudanças climáticas, está diretamente relacionado ao maior consumo de energia e ao desconforto térmico. Em diversos casos, os telhados verdes têm se mostrado eficientes no controle da temperatura. Por vezes, simulações são realizadas em *softwares* que consideram seus parâmetros construtivos para analisar sua influência nas edificações. O objetivo deste trabalho foi identificar a interferência do índice de área foliar e da espessura do substrato no Pavilhão de Aulas II da Universidade Federal de Viçosa, considerando um cenário climático futuro de 2050. A metodologia foi embasada em simulações termoenergéticas utilizando o *software* EnergyPlus, considerando cinco diferentes casos, quatro com telhados verdes extensivos e intensivos e um com a edificação em sua configuração atual. As simulações e análises foram realizadas para a temperatura interna de três salas de aula sem o sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (HVAC) e para o consumo de energia elétrica de todo o edifício com o sistema HVAC nas salas de aula. Os resultados indicaram que, no contexto estudado, os telhados verdes não se mostraram eficientes para controle térmico e para a eficiência energética, por não terem proporcionado mudanças consideráveis em comparação com a cobertura atual, entretanto, podem oferecer outros benefícios ambientais, como a melhora da qualidade do ar.

Palavras-chave: Cobertura verde; Temperatura interna; Consumo de energia; Mudanças climáticas; Simulação termoenergética.

ABSTRACT

The increase in indoor temperatures in buildings, exacerbated by climate change, is directly linked to higher energy consumption and thermal discomfort. In several cases, green roofs have proven to be effective in temperature control. Often, simulations are conducted using software tools that account for their construction parameters to analyze their influence on building performance. The objective of this study was to identify the impact of the leaf area index and substrate thickness on the thermal behavior of the Pavilhão de Aulas II classroom building at the Federal University of Viçosa, considering a future climate scenario for the year 2050. The methodology was based on thermo-energy simulations performed with EnergyPlus software, considering five different scenarios – four with extensive and intensive green roofs, and one with the building in its current configuration. Simulations and analyses were conducted for the indoor temperature of three classrooms without a Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) system, as well as for the building's overall electricity consumption with the HVAC system in the classrooms. The results indicated that, in the studied context, green roofs were not effective for thermal control or energy efficiency, as they did not result in significant changes compared to the existing roof. However, they may still offer other environmental benefits, such as improving air quality.

Keywords: Green roof; Indoor temperature; Energy consumption; Climate change; Thermo-energy simulation.

2.1 Introdução

O aumento da temperatura interna das edificações está diretamente relacionado ao maior consumo de energia e ao desconforto térmico, o que pode ser um problema no contexto das mudanças climáticas (Guarda; Durante; Callejas, 2020). Para o município de Viçosa existem projeções de aumento da temperatura ao longo dos anos (Sanches; Fialho; Quina, 2017). O impacto desse aumento pode ser um desafio para edificações destinadas a atividades acadêmicas (Allab, 2017). Nessa situação, os telhados verdes são passíveis de ser uma proposta sustentável para melhorar as condições térmicas e reduzir o consumo energético, com sua eficácia dependendo de sua composição e do clima local (Balvedi; Giglio, 2023; Jamei *et al.*, 2023; Mousavi *et al.*, 2023; Sharon *et al.*, 2024; Zahedi *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2022). Por meio de simulações termoenergéticas, este estudo avalia o impacto de telhados verdes em um edifício educacional em Viçosa, visando estratégias de eficiência energética.

O aumento da temperatura do ar interno dos ambientes é um fator diretamente relacionado ao aumento do consumo de energia e ao desconforto térmico no que diz respeito aos edifícios no contexto das mudanças climáticas e do aquecimento global (Guarda; Durante; Callejas, 2020). Nesse cenário, entre 2000 e 2015, as emissões urbanas globais de gases de efeito estufa (GHGs) per capita cresceram de 5,5 para 6,2 t CO₂eq (tonelada de dióxido de carbono equivalente) por pessoa, um aumento de 11,8%. As projeções indicam que as emissões urbanas irão aumentar até 2050 (IPCC, 2022).

Sanches, Fialho e Quina (2017) apontaram que o município de Viçosa passou por um aumento de temperatura no período de 1968 a 2015 e isso é compatível com o encontrado por diversos estudos e em relatórios como do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) e do Plano Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC). Os pesquisadores concluíram que esse município apresentou maior temperatura no ano final da análise comparado aos anos anteriores, o que reforça as evidências de que o local está sendo afetado pelas mudanças climáticas. De acordo com Martins *et al.* (2018), a projeção do clima futuro de Viçosa é tropical com seca no inverno entre os anos de 2041 e 2070 para o cenário climático Caminho Socioeconômico Compartilhado (*Shared Socio-economic Pathway – SSP*) 4.5 do Sexto Relatório de

Avaliação IPCC (2021).

No que tange o conforto térmico no interior das edificações, a influência da temperatura é observada em uma pesquisa de Marçal *et al.* (2018) sobre a interferência das condições térmicas nas atividades de estudantes de uma instituição de ensino superior. O estudo constatou que 70% dos estudantes percebem que a atividade de estudo fica prejudicada na sala de aula em situação de desconforto, a dificuldade de prestar atenção no conteúdo das aulas e a impaciência devido ao desconforto térmico foram duas questões ressaltadas e 80% dos estudantes apontaram a necessidade de utilizar equipamentos artificiais para melhorar o conforto térmico. Isso demonstra o quanto as condições térmicas interferem no processo de aprendizagem e a necessidade de manter o conforto térmico nos ambientes de ensino, como também confirmam os autores Wu e Wagner (2024) e Romero (2024).

Como forma de melhorar a temperatura interna, o telhado verde pode apresentar benefícios, além de ser uma técnica ecológica que pode ser usada em substituição aos sistemas de cobertura convencionais (Zhang *et al.*, 2022). De acordo com Zhang *et al.* (2022), o desempenho térmico dos telhados verdes depende preponderantemente da sua composição e do clima local. É crucial selecionar uma configuração apropriada dos parâmetros do sistema em consonância com as condições climáticas. Isso porque algumas alternativas podem não oferecer um bom desempenho térmico e energético e resultar em um aumento no consumo de energia (Balvedi; Giglio, 2023).

Os telhados verdes podem ser classificados em três tipos, de acordo com o tipo de vegetação cultivada: (i) intensivos, (ii) semi-intensivos ou (iii) extensivos. Os intensivos possuem uma camada de substrato espessa, variando entre 20 e 200 cm, o que permite uma diversidade maior de plantas, incluindo arbustos e árvores de porte pequeno. No entanto, apresenta custos de manutenção mais altos e peso mais elevado. Os sistemas extensivos possuem uma camada de substrato inferior a 15 cm, demanda menos manutenção e requer baixo custo de investimento (Mishra; Sakharle, 2022).

Com o intuito de avaliar o comportamento desse tipo de telhado, diversos autores estudaram a influência dos telhados verdes para conforto térmico e eficiência energética em diferentes localidades através de simulações termoenergéticas. O índice de área foliar foi analisado em diversos estudos, com

resultados variados dependendo do contexto climático. Em Porto Alegre, Balvedi e Giglio (2023) observaram uma redução de 5,6% no consumo anual de climatização com um baixo índice de área foliar, enquanto em Brasília, um alto índice de área foliar resultou em uma redução de 4,9%. De forma semelhante, Mousavi *et al.* (2023) relataram que o índice de área foliar teve o maior impacto positivo na carga de resfriamento em Monterrey, México, enquanto Jamei *et al.* (2023), em Melbourne, identificaram que um índice de área foliar de 1,08 reduziu o consumo de energia em até 70%. No entanto, também apontaram que embora um índice de área foliar maior seja preferível, há um limite para o seu aumento, além do qual não apresenta grandes diferenças.

A espessura do substrato também se destacou como um fator relevante. Em Nanning, Zhang *et al.* (2022) concluíram que a espessura do solo foi o parâmetro mais impactante, com economias no consumo de energia anual de até 56,4% ao adotar a espessura de 20 cm. Neste mesmo sentido, Balvedi e Giglio (2023) relataram que em Porto Alegre e Brasília, o substrato espesso de 20 cm combinado com baixo índice de área foliar e baixa condutividade térmica reduziu o consumo de energia para climatização em 5,6% para Porto Alegre. Já quando combinado com alto índice de área foliar, alta altura da vegetação e alta condutividade térmica, economizou 4,9% de energia em Brasília. Ambas as situações comparando ao telhado frio. Zahedi *et al.* (2023) descobriram que o aumento da espessura do solo em cidades iranianas melhorou o desempenho para resfriamento nos meses quentes, mas teve efeito negativo no aquecimento durante os meses frios.

As propriedades da vegetação, como sua altura, também influenciaram nos resultados. Em Brasília, Balvedi e Giglio (2023) identificaram que uma altura de vegetação elevada, em combinação com as variáveis: substrato espesso, alto índice de área foliar e alta condutividade térmica, foi benéfica para a redução do consumo de energia. Jamei *et al.* (2023) também observaram que em Melbourne, uma altura de planta de 0,33 m era ideal para melhorar a eficiência energética. Além disso, Mousavi *et al.* (2023) destacaram que a emissividade e a refletividade foliar são parâmetros com impacto na carga de aquecimento em Monterrey, enquanto Sharon *et al.* (2024) identificaram a buganvília como a espécie que proporcionou maior eficiência energética, dentre as demais espécies simuladas para Kanchipuram, Índia.

É possível destacar ainda que outras propriedades da vegetação e do

substrato influenciam no consumo de energia. Entre os parâmetros com efeito positivo na redução desse consumo, Balvedi e Giglio (2023) verificaram que a baixa condutividade térmica da vegetação foi benéfica em Porto Alegre e a alta condutividade térmica apresentou melhor desempenho em Brasília, enquanto Zahedi et al. (2023) identificaram que a maior densidade das plantas durante os meses quentes contribuiu para o melhor desempenho do resfriamento em Tabriz, Teerã e Bandar Abbas. Além disso, Jamei et al. (2023) observaram que a umidade do substrato em torno de 50% favoreceu a redução no consumo energético. Por outro lado, conforme Zahedi et al. (2023), a elevada densidade da vegetação nos meses frios prejudicou a eficiência do aquecimento nas cidades de Tabriz, Teerã e Bandar Abbas.

Os resultados dos estudos ressaltam que estratégias para eficiência energética precisam considerar não apenas os parâmetros específicos, como índice de área foliar, altura de vegetação e espessura do substrato, mas também a interação desses fatores com o clima local. Dentre todos os parâmetros simulados pelos autores anteriormente referenciados, os mais estudados e que tiveram maior relevância para aquecimento e resfriamento das edificações foram o índice de área foliar e a espessura do substrato. Foram mostrados como parâmetros muito influentes na eficiência energética de telhados verdes, com variações conforme o clima. Com isso, propõe-se a verificação desses parâmetros no contexto de Viçosa na busca de analisar suas influências.

Diante do exposto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência térmica da cobertura de um edifício educacional, bem como seu consumo de energia elétrica. A cobertura atual e quatro telhados verdes, sendo dois extensivos e dois intensivos com uma combinação das variáveis índice de área foliar e espessura do substrato. O índice de área foliar é uma medida que expressa a relação entre a área das folhas e a área do terreno, sendo uma grandeza adimensional (Watson, 1947a, b *apud* Galvani *et al.*, 2000). As coberturas foram avaliadas em um cenário futuro para o município de Viçosa. Isso através de simulação termoenergética para obter dados de temperatura interna de três salas de aula e do consumo de energia elétrica por todo o edifício e por um sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (Heating, Ventilating and Air Conditioning – HVAC).

Dentre as tipologias arquitetônicas, os edifícios educacionais são particularmente preocupantes no que diz respeito à qualidade do ambiente interno e

demandam mais atenção por sua singularidade em comparação com outras tipologias. Esta especificidade é evidenciada especialmente por seus ocupantes, pelas atividades desenvolvidas e pelo padrão de ocupação (Allab, 2017). O desconforto térmico pode se agravar no cenário das mudanças climáticas, o que torna coerente a avaliação das variações de temperatura nesse tipo de edificação. Para o controle dessa temperatura, podem-se adotar estratégias que gerem menor consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, menor emissão operacional.

2.2 Material e métodos

A metodologia deste estudo consistiu na modelagem termoenergética de uma edificação da Universidade Federal de Viçosa (UFV), utilizando o *software* EnergyPlus. Foram simulados cinco cenários para o ano de 2050, no contexto climático SSP 4.5 do IPCC, considerando alterações na cobertura da edificação com a utilização de telhados verdes. As simulações abrangeram duas combinações de índice de área foliar, duas de espessura do substrato e a avaliação do desempenho do caso base. Na sequência, serão apresentados o local de estudo, o clima, o recorte temporal, a modelagem e as simulações termoenergéticas do edifício e os casos para simulação.

2.2.1 Local de estudo

A edificação em estudo corresponde ao Pavilhão de Aulas II (PVB) do campus da UFV, um edifício de salas de aula de três pavimentos (Figura 2.1). Sua localização é o município de Viçosa, do estado de Minas Gerais, e está na latitude 20°45'48,456" S e longitude 42°51'58,5468" O (Google, 2023).

Figura 2.1 – Pavilhão de Aulas II



Fonte: própria autora.

2.2.2 Clima e recorte temporal

O cenário climático definido foi o SSP 4.5 do IPCC (2021) e o ano de análise foi 2050. As simulações foram realizadas para o período de um ano completo, considerando os dias e horários de uso do edifício universitário estimados por seu padrão de uso e ocupação.

O arquivo do cenário climático futuro utilizado foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LATECAE) da UFV. Sua criação foi realizada por meio de uma ferramenta de interpolação de dados, denominada Future Weather Generator. Essa ferramenta ajusta matematicamente os parâmetros climáticos de um local para se adequar às variáveis projetadas para um cenário do IPCC, mantendo as tendências históricas. Para gerar o arquivo climático, é necessário um arquivo no formato EnergyPlus Weather (EPW), que contenha informações da localização da estação meteorológica, das condições de projeto, dos períodos típicos/extremos, das temperaturas do solo, dos feriados/horário de verão, do período de execução, dos comentários, dos períodos de dados opcionais e dos dados meteorológicos reais (Rodrigues; Fernandes; Carvalho, 2023).

2.2.3 Modelagem e simulações termoenergéticas do edifício

O edifício em estudo foi modelado e calibrado (Bre; Gimenez, 2022; Gimenez; Bre, 2023) a partir do projeto “Tecnologias para adaptação de edificações às mudanças no clima: eficiência energética, geração fotovoltaica e redução de emissões em escolas”, em desenvolvimento no Programa de Pós-graduação em

Arquitetura e Urbanismo da UFV cadastrado nesta instituição com o código 60419479890.

A simulação termoenergética foi feita no *software* EnergyPlus 22.1.0. O EnergyPlus é um *software* completo de simulação de energia de edifícios utilizado por engenheiros, arquitetos e pesquisadores. É empregado para criar modelos que representam o consumo de energia em diversos aspectos, como aquecimento, refrigeração, ventilação, iluminação, cargas de processos, além do uso de água em edificações (DOE, 2023).

O PVB da UFV possui salas de aula, laboratórios de informática, dois auditórios, cantina, banheiros e áreas administrativas, de convivência e de circulação. O edifício foi projetado para atender às necessidades acadêmicas. Nos modelos simulados, cada uma das salas de aula foi modelada como uma zona térmica. As salas foram configuradas com densidade de ocupação de 60% da capacidade total, a iluminação e os equipamentos das salas de aula funcionando em sua capacidade total de 7h às 22h nos dias de aula. Todas as portas e as janelas das salas de aula estão fechadas todo o tempo e a chaminé térmica está disponível a todo tempo. Existe um sistema HVAC nas salas com *setpoint* de 24°C para resfriamento e de 18°C para aquecimento. O período de ocupação e utilização do sistema HVAC foi de 7h às 22h e o período de aula considerado foi de 8h às 12h e de 14 às 22h de segunda-feira à sexta-feira, durante os meses de março até junho e de agosto até 15 de dezembro.

Considerando que o edifício estaria climatizado artificialmente, dados horários do consumo de energia elétrica pelo sistema HVAC para todas as salas de aula e do consumo pela utilização de todo o edifício foram extraídos das simulações do PVB, abrangendo os cinco casos ao longo do ano 2050. Além disso, foram simulados os cinco casos sem o sistema HVAC e extraídos dados horários de 2050 da temperatura do ar externo local e da temperatura média do ar interno de três salas de aula de um mesmo alinhamento vertical a noroeste (Figura 2.2) para serem analisadas, uma vez que esta foi a posição identificada como a de maior incidência solar. As áreas aproximadas dessas três salas são: 96,00 m² (térreo), 94,00 m² (1º pavimento) e 92,00 m² (2º pavimento). As saídas de dados utilizadas do *software* (em *Output:Variable*) foram: “*Whole Building: Facility Total HVAC Electricity Demand Rate*” (W), “*Whole Building: Facility Total Electricity Demand Rate*” (W), “*Site Outdoor Air Drybulb Temperature*” (°C) e “*Zone Mean Air Temperature*” (°C).

Figura 2.2 – Salas de aula a noroeste



Fonte: própria autora.

2.2.4 Casos para simulação

Os parâmetros da edificação foram inseridos no EnergyPlus no projeto “Tecnologias para adaptação de edificações às mudanças no clima: eficiência energética, geração fotovoltaica e redução de emissões em escolas”. De acordo com a configuração de materiais do modelo base do EnergyPlus, as paredes externas da edificação são compostas por bloco de concreto de 15,00 cm de espessura revestidos nas duas faces por reboco branco de 1,25 cm de espessura; as paredes internas são formadas por duas camadas de gesso acartonado de 1,25 cm de espessura com lã de vidro de 5,00 cm de espessura entre elas; a cobertura do edifício é constituída por laje em *steel deck* composta por aço galvanizado de 0,50 cm de espessura, concreto de 20,00 cm, contrapiso de 2,00 cm e por telhado em estrutura metálica com telhas galvanizadas pintadas na cor branca. Imagens da cobertura são apresentadas na Figura 2.3.

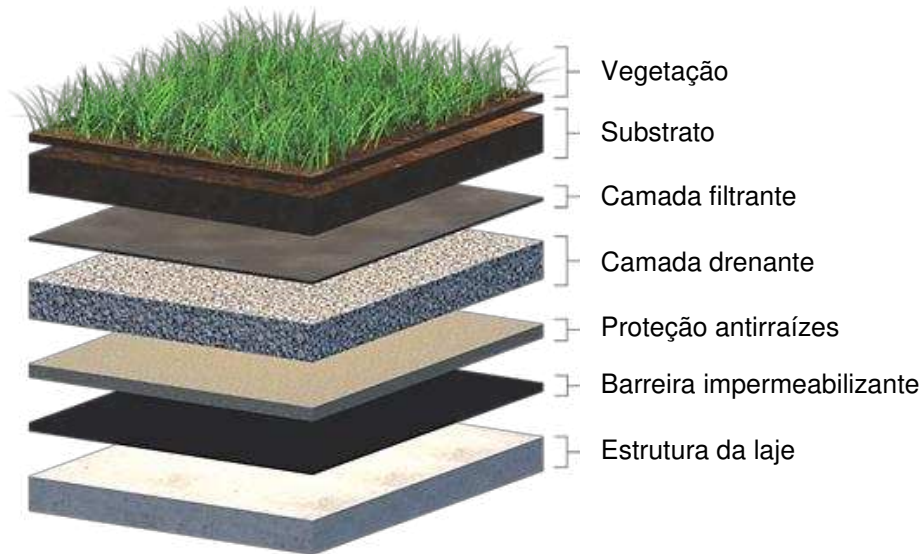
Figura 2.3 – Cobertura do PVB atual. Cobertura das salas de aula laterais (a e c); cobertura do pátio (b); cobertura da entrada do edifício, de parte do corredor e do pátio (d); cobertura das salas de aula à esquerda, do corredor, do pátio e da entrada do edifício (e)



Fonte: própria autora.

Foram criados cinco casos para avaliação e comparação com uma adaptação na estrutura da cobertura. Essa abordagem considerou a situação atual para o caso CB e, para os casos com telhado verde extensivo (TE1 e TE2) e intensivo (TI1 e TI2), a estrutura metálica e as telhas galvanizadas foram retiradas da laje das salas de aula, nas quais foi inserida a nova cobertura. As camadas de um telhado verde são apresentadas na Figura 2.4. É importante ressaltar que este estudo não inclui a análise das cargas do novo sistema de cobertura e reforços estruturais que pudessem ser necessários para sua implementação.

Figura 2.4 – Camadas do telhado verde



Fonte: Ecotecnologias. Adaptada pela autora.

O telhado verde foi adicionado a partir da configuração dos elementos que o constituem, disponíveis na configuração do material "*Material:RoofVegetation*". Dois valores para cada um dos dois parâmetros foram adotados. Para o índice de área foliar, definiu-se o menor valor como 0,002 e o maior valor como 5,000, ambos os limites estabelecidos pelo EnergyPlus. Para a espessura do solo, o menor valor foi de 15 cm e o maior valor de 70 cm. O menor como o limite encontrado na literatura para os telhados verdes extensivos e o maior como o limite do *software* para os telhados verdes intensivos. As demais entradas do material "*Material:RoofVegetation*" foram preenchidas com os valores padrões fornecidos pelo *software*. Os cinco casos simulados são demonstrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Casos simulados

Caso	Parâmetro	
	Índice de área foliar	Espessura do substrato (cm)
TE1	0,002	15
TI1	0,002	70
TE2	5,000	15
TI2	5,000	70
CB	Caso base, situação atual	

Fonte: própria autora.

A camada filtrante, a camada de drenagem e a barreira impermeabilizante foram criadas no campo "*Material*" do EnergyPlus. Os valores da configuração dessas variáveis foram os mesmos para todos os casos com telhado verde e foram

adotados os determinados por Capozzoli, Gorrino e Corrado (2013) e Silva (2014, *apud* Moreira, 2022), conforme Tabela 2.2. Os telhados verdes, compostos de vegetação, substrato, camada filtrante, camada drenante e barreira impermeabilizante, foram inseridos na laje através do objeto “*Construction*” do *software*.

Tabela 2.2 – Propriedades dos materiais das camadas dos telhados verdes

Camada	Camada filtrante	Camada drenante	Barreira impermeabilizante
Rugosidade	Liso	Liso	Liso
Espessura (m)	0,005	0,060	0,007
Condutividade térmica (W/m.K)	0,06	0,08	0,17
Densidade (kg/m ³)	160	800	1200
Calor específico (J/kg.K)	2500	920	920
Absortância térmica	0,9	0,9	0,9
Absortância solar	0,2	0,2	0,2
Absortância visível	0,2	0,2	0,2

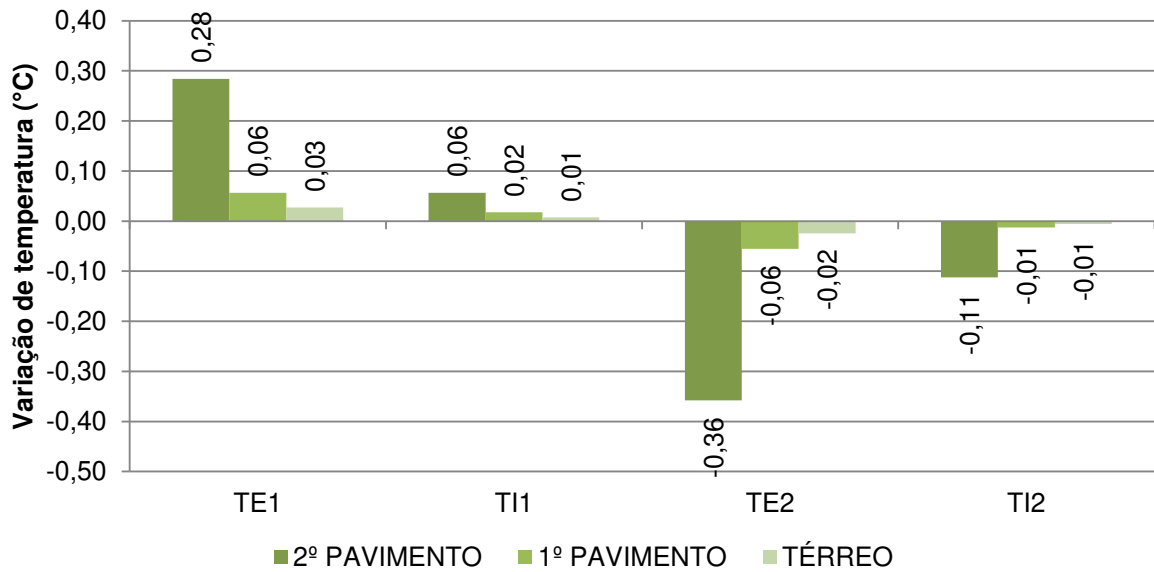
Fonte: (Capozzoli; Gorrino; Corrado, 2016; Silva, 2014 *apud* Moreira 2022). Adaptada pela autora.

2.3 Resultados e discussão

Os resultados são apresentados e analisados de acordo com os dados obtidos a partir das simulações termoenergéticas realizadas para o ano de 2050. A análise inclui a temperatura interna das três salas de aula a noroeste o longo dos períodos com aulas, sob condições de maior e menor temperatura externa e o consumo de energia elétrica associado ao funcionamento do edifício e do sistema HVAC. Foi realizada a comparação dos dados nos cinco casos analisados: um com a configuração atual do edifício e quatro de telhado verde.

Para avaliar as temperaturas internas, foi escolhido o horário de maior e menor temperatura externa do ano durante o período em que acontecem as aulas. O dia 11 de setembro teve a maior temperatura externa, 35,10°C, no intervalo de tempo de 14 h às 15 h. O gráfico representado na Figura 2.5 mostra que a temperatura interna em todos os casos simulados não apresentou diferença considerável com relação ao caso CB, com variação máxima de 0,36°C para resfriamento no caso TE2. A maior diferença de temperatura para resfriamento nos outros pavimentos foi com o caso do mesmo telhado. Quanto mais baixo o nível do pavimento, menor foi a variação, sendo 0,06°C no 1º pavimento e 0,02°C no térreo.

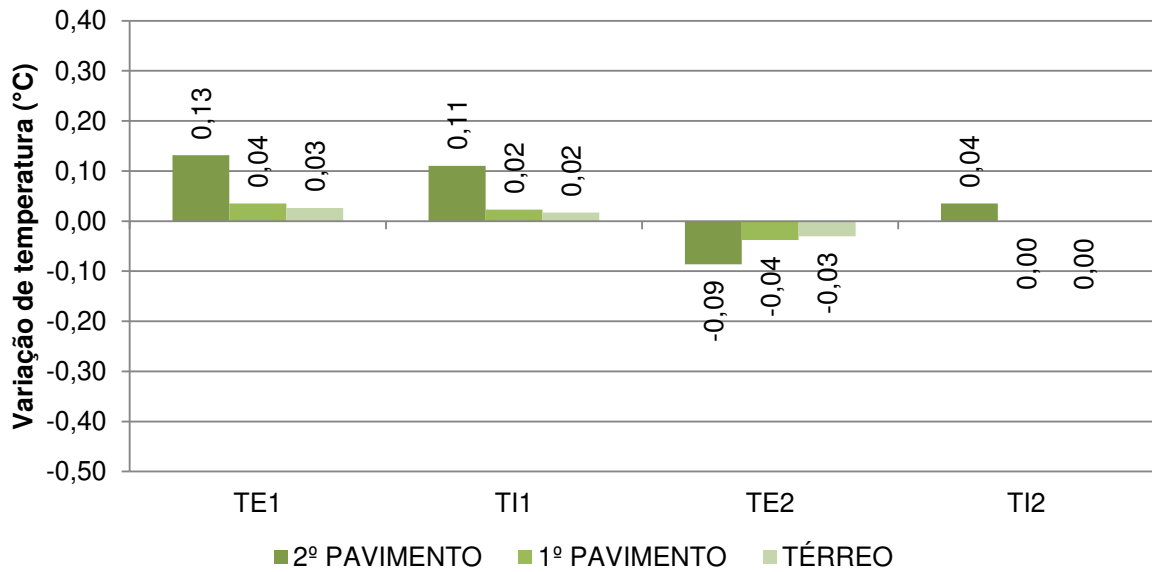
Figura 2.5 – Variações de temperatura entre os casos com telhado verde e o caso CB para a maior temperatura externa



Fonte: própria autora.

O dia 17 de setembro teve a menor temperatura externa, 14,75°C, no intervalo de tempo de 8 h às 9 h. De forma semelhante ao horário de maior temperatura externa, o gráfico representado na Figura 2.6 indica que a temperatura interna em todos os casos simulados não apresentou diferença considerável com relação ao caso CB. A variação máxima foi de 0,13°C para aquecimento no caso TE1. A maior variação para aquecimento nos demais pavimentos também foi com este telhado. Quanto mais baixo o nível do pavimento, menor a variação, sendo 0,04°C no 1º pavimento e 0,03°C no térreo.

Figura 2.6 – Variações de temperatura entre os casos com telhado verde e o caso CB para a menor temperatura externa



Fonte: própria autora.

Com os resultados das simulações, é coerente afirmar que a cobertura atual do edifício tem influência na temperatura interna de forma semelhante aos telhados verdes. Situação semelhante foi constatada na pesquisa de Pianella *et al.* (2017), em que utilizou o *software* EnergyPlus para simulações com a finalidade de verificar o efeito dos parâmetros do telhado verde por meio de análise paramétrica. A partir dos resultados, concluíram que as simulações não mostraram muitos benefícios dos parâmetros analisados, principalmente do substrato. De forma oposta, os dados obtidos por experimentação com telhados verdes evidenciaram a relevância dos parâmetros do substrato, o qual pode reduzir e atrasar consideravelmente o fluxo de calor pela cobertura. O estudo se desenvolveu para a cidade de Melbourne. Nos experimentos, os telhados verdes com substrato de 150 e 200 mm de espessura apresentaram melhor desempenho térmico que o de 100 mm, tanto no verão quanto no inverno. Por este motivo, julgaram necessária a validação das simulações com dados experimentais (Pianella *et al.*, 2017).

Na Tabela 2.3 está indicado o dia com a maior e o dia com a menor temperatura externa com seus respectivos horários de ocorrência e a temperatura interna nas três salas de aula em todos os cinco casos. As variáveis espessura do subsolo e índice de área foliar pouco influenciaram na diminuição ou no aumento da temperatura interna.

Tabela 2.3 – Temperatura interna da sala do 2º pavimento para a maior e a menor temperatura externa

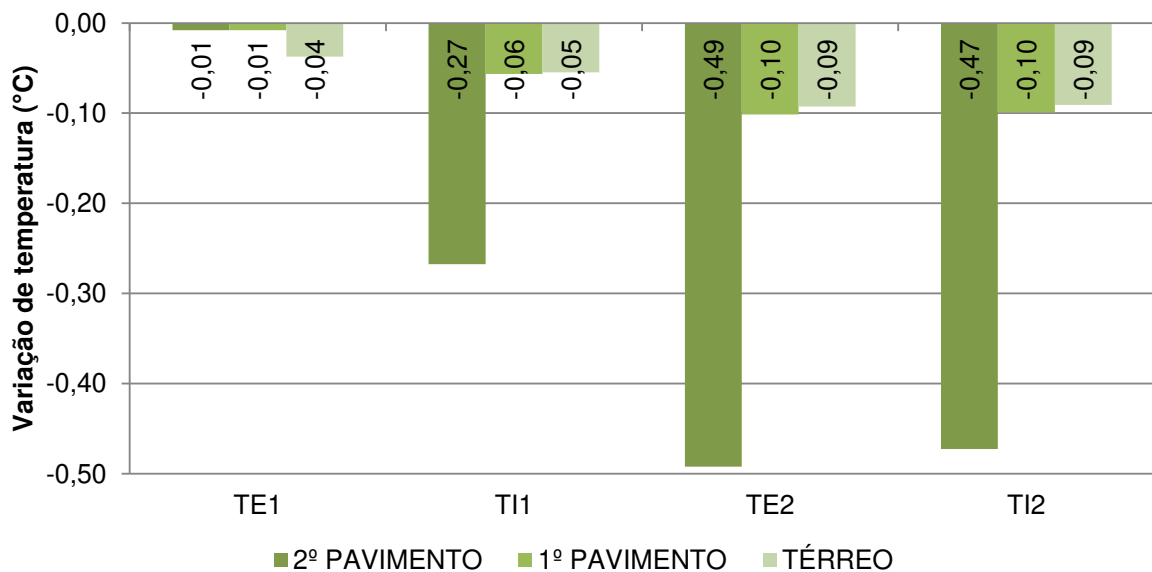
Data	Hora	Pavimento	Temperatura externa (°C)	CB (°C)	TE1 (°C)	TI1 (°C)	TE2 (°C)	TI2 (°C)
11/09	14h - 15h	2º	35,10	32,18	32,47	32,24	31,82	32,07
		1º	35,10	32,33	32,39	32,35	32,28	32,32
		Térreo	35,10	32,19	32,22	32,20	32,17	32,18
17/09	8h - 9h	2º	14,75	18,59	18,73	18,71	18,51	18,63
		1º	14,75	18,10	18,14	18,12	18,06	18,10
		Térreo	14,75	17,81	17,83	17,82	17,78	17,80

Fonte: própria autora.

Pode ser possível que outros parâmetros, e não o índice de área foliar e a espessura do substrato, sejam relevantes para esse contexto, ou até mesmo que essa estratégia não seja eficiente para o controle da temperatura para a localização estudada no ano de 2050.

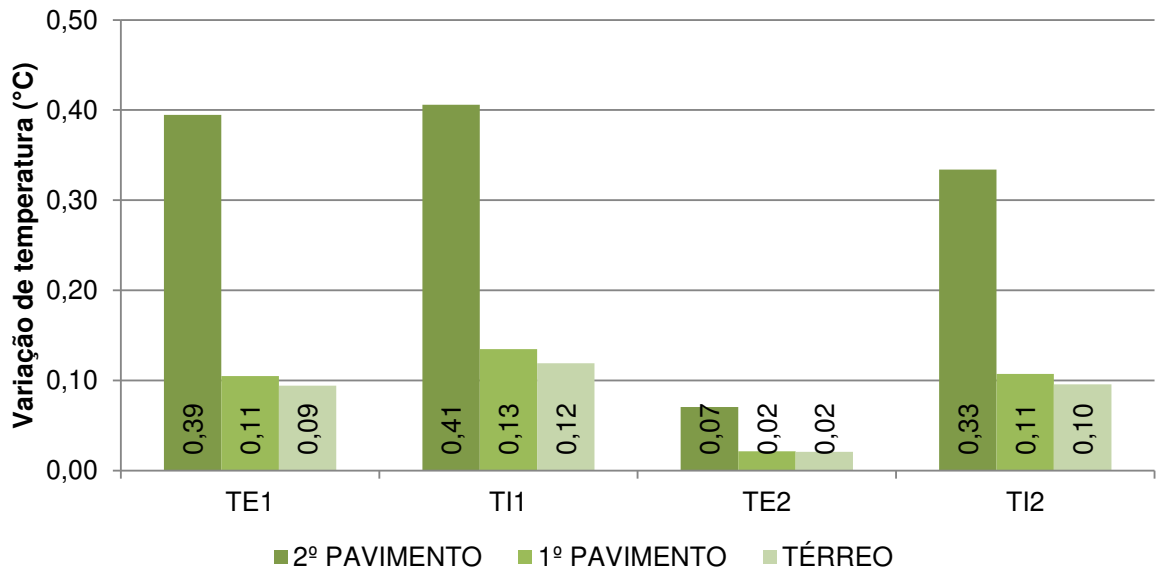
As maiores variações de temperatura para cada sala de aula ao longo do ano, extraídas da diferença entre as temperaturas internas do caso de cada telhado verde e o CB, são mostradas na Figura 2.7 e 2.8. Esses valores correspondem a uma análise de todos os dias e horários do ano do período de aulas. O comportamento de baixa variação de temperatura se repetiu nesta análise, mostrando-se semelhante para todos os dias e horários do ano e alcançando um valor máximo de 0,49°C para resfriamento com o caso TE2 para a sala do 2º pavimento.

Figura 2.7 – Maiores diminuições de temperatura



Fonte: própria autora.

Figura 2.8 – Maiores aumentos de temperatura



Fonte: própria autora.

Na maior parte do tempo no período de aulas, o sistema HVAC foi utilizado para resfriamento, uma vez que a temperatura excede 24°C com uma frequência superior à de temperaturas abaixo de 18°C. Esse comportamento pode ser observado nos gráficos das Figuras A.1 – A.15 do Anexo A. O número de horas em que é maior que 24°C e em que é menor que 18°C e a porcentagem correspondente ao total de horas com aulas são indicados na Tabela 2.4. A sala em que houve a maior necessidade de aquecimento foi a do 2º pavimento no caso TE1 e a de menor necessidade, foi a do térreo no caso TE2. A sala do térreo foi a única que demandou aquecimento.

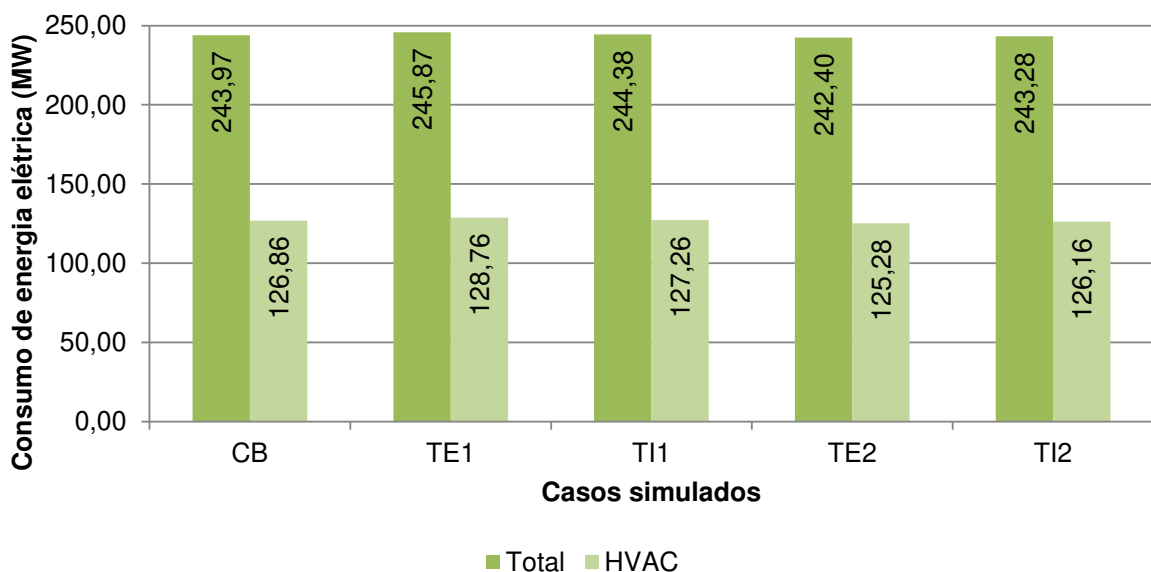
Tabela 2.4 – Número de horas por ano com a necessidade de resfriamento e de aquecimento nas salas de aula

Sala	Função do sistema HVAC	CB	TE1	TI1	TE2	TI2
2º pavimento	Resfriamento	2507 (80,66%)	2555 (82,21%)	2539 (81,69%)	2492 (80,18%)	2526 (81,27%)
	Aquecimento	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
1º pavimento	Resfriamento	2412 (77,61%)	2422 (77,93%)	2421 (77,90%)	2399 (77,19%)	2413 (77,64%)
	Aquecimento	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
Térreo	Resfriamento	2337 (75,19%)	2350 (75,61%)	2347 (75,51%)	2332 (75,03%)	2343 (75,39%)
	Aquecimento	3 (0,10%)	2 (0,06%)	2 (0,06%)	3 (0,10%)	3 (0,10%)

Fonte: própria autora.

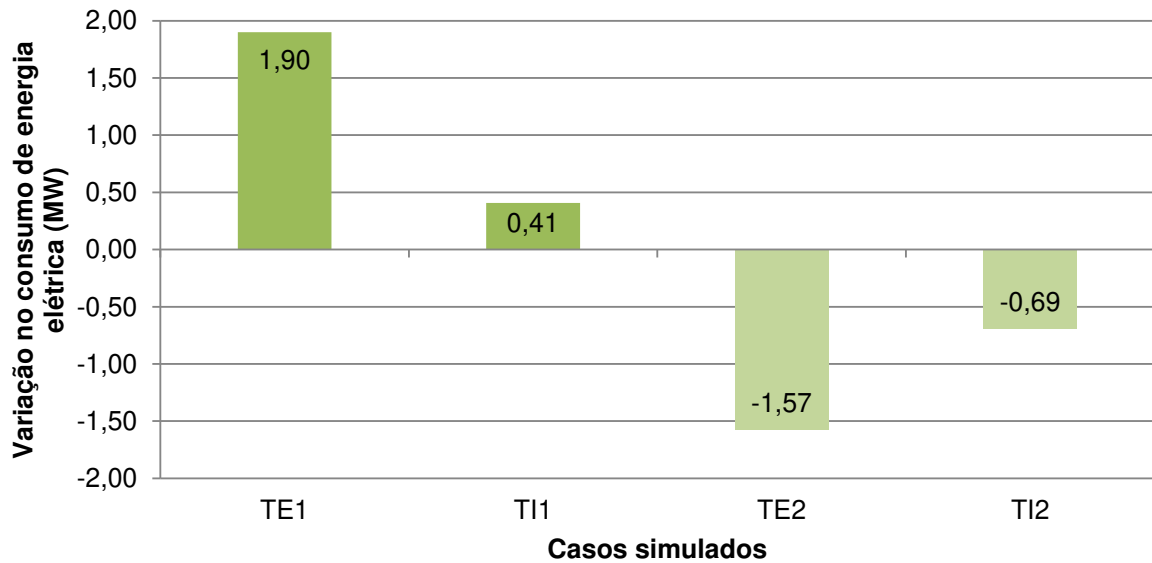
O consumo total do edifício e do sistema HVAC durante todo o ano de 2050 é mostrado no gráfico da Figura 2.9 e a variação de consumo total entre os casos com telhado verde e o caso CB, na Figura 2.10. O consumo para condicionamento de ar aumentou do CB para os casos TE1 e TI1 e diminuiu para os casos TE2 e TI2. Isso evidencia que a variável que influenciou na diminuição foi a do índice de área foliar, com seu maior valor. De forma geral, TE2 teve a maior redução no consumo, de 0,23%.

Figura 2.9 – Consumo de energia elétrica pelo edifício



Fonte: própria autora.

Figura 2.10 – Variações de consumo total entre os casos com telhado verde e o caso CB



Fonte: própria autora.

Saini (2020), em seu estudo para analisar o desempenho térmico de coberturas verdes por meio de simulação, obteve resultados de baixa contribuição da cobertura verde para a economia de energia, diferentemente do que a autora havia constatado na literatura. Todavia, considerando benefícios sociais e ambientais abrangentes, verificou que os telhados verdes podem ter bom custo-benefício.

Mesmo não oferecendo vantagens em termos de melhoria na temperatura interna da edificação, os telhados verdes podem ter outros benefícios como a melhoria na qualidade do ar por meio da captura de carbono, a diminuição do efeito de ilha de calor urbana e a redução da propagação do som, proporcionando isolamento devido à maior espessura do telhado (Rasul; Arutla, 2020), além da absorção de águas pluviais (Mishra; Sakharle, 2022). Porém, a confirmação desses benefícios para o local de estudo demandaria outras pesquisas.

O local de estudo em 2050 terá as características da zona bioclimática 4, de acordo com a classificação da ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Portanto, as estratégias bioclimáticas recomendadas nas edificações deste tipo de clima são aberturas para ventilação médias, sombreamento de aberturas, paredes pesadas, coberturas leves e isoladas. No que tange a cobertura, o telhado verde está entre as alternativas. Para condicionamento térmico passivo, para o verão é recomendado adotar resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento, ventilação

seletiva para permitir a troca de ar quando a temperatura interna for mais alta. Para o inverno, é indicado aquecimento solar e vedações internas pesadas para proporcionar inércia térmica.

2.4 Conclusões

A pesquisa analisou a influência térmica de quatro tipos de telhado verde em três salas de aula e o consumo total de energia elétrica e somente para o funcionamento do sistema HVAC, de um edifício de ensino da UFV para um cenário climático futuro de 2050, utilizando simulações termoenergéticas. Embora a implantação de telhados verdes seja uma estratégia reconhecida para melhoria do conforto térmico e para a eficiência energética, os resultados indicam que os benefícios esperados não foram obtidos para este caso específico, o que pode ter ocorrido, dentre outros fatores, pelas características arquitetônicas do edifício no que diz respeito à ventilação natural.

Os dados de temperatura indicam que a implantação dos telhados verdes resultou em um comportamento térmico similar ao do caso com a cobertura existente, considerando todas as portas e as janelas das salas de aula fechadas e a chaminé térmica disponível em todos os momentos. As variações observadas são insuficientes para justificar a adoção dos telhados verdes como uma solução para o controle da temperatura interna e para economia de energia elétrica. No entanto, outros benefícios poderiam justificar sua aplicação, como melhora da qualidade do ar, redução do calor urbano, absorção de águas pluviais e isolamento acústico.

A implementação de telhados verdes não ofereceu vantagens para o conforto térmico interno e para a eficiência energética. Entretanto, essa solução pode ser parte de uma estratégia sustentável que englobe seus outros benefícios. Estudos adicionais com a combinação de diferentes valores de outros parâmetros, por exemplo, a altura, a emissividade, a refletividade, a condutividade térmica e a densidade da vegetação, a umidade do substrato e a integração de múltiplas estratégias são recomendados para identificar abordagens mais eficientes para a adaptação das edificações às mudanças climáticas.

Recomenda-se também realizar simulações com outros *softwares* que possam estar mais preparados para telhados verdes e desenvolver experimentos para obter dados reais da interferência desse tipo de cobertura para comparar com

dados simulados e validar o desempenho dos parâmetros ou calibrar o modelo simulado. Além disso, tendo em vista o controle da temperatura interna e a eficiência energética, outros tipos de cobertura podem ser simulados, como os telhados frios, também classificados como uma estratégia passiva de climatização.

REFERÊNCIAS

ALLAB, Yacine *et al.* Energy and comfort assessment in educational building: Case study in a French university campus. **Energy and Buildings**, v. 143, p. 202-219, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.028>.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações — Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BALVEDI, Nadia; GIGLIO, Thalita. Influence of green roof systems on the energy performance of buildings and their surroundings. **Journal of Building Engineering**, v. 70, p. 106430, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106430>.

BRE, F., and GIMENEZ, J.M. A cloud-based platform to predict wind pressure coefficients on buildings. **Build Simulation**.15, 1507–1525, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0881-9>.

CAPOZZOLI A.; GORRINO A.; CORRADO V. Thermal characterization of green roofs through dynamic simulation 3th Conference of International Building performance Simulation. **Proceedings...** França. 2013. <https://doi.org/10.26868/25222708.2013.1447>.

DOE – UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Input Output Reference. 2023.

ECOTECNOLOGIAS. Telhados Verdes – Conceito. Disponível em: https://ecotecnologias.org/?page_id=561. Acesso em: 12 maio 2024.

GALVANI, Emerson *et al.* Estimativa do índice de área foliar e da produtividade de pepino em meio protegido-cultivos de inverno e de verão. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 4, p. 8-13, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000100002>.

GIMENEZ, J. M., and BRE, F. (2023). An enhanced k- ω SST model to predict airflows around isolated and urban buildings. **Building and Environment**, 110321. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110321>.

GOOGLE. 2023. Google Maps. Disponível em: [https://www.google.com/maps/place/Pavilh%C3%A3o+de+Aulas+II+\(PVB\)/@-20.7636589,-42.868928,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0xa367f9b379c651:0x9344f25f0632e34d!8m2!3d-20.7636639!4d-42.8663531!16s%2Fg%2F1pzs8lx62?entry=ttu](https://www.google.com/maps/place/Pavilh%C3%A3o+de+Aulas+II+(PVB)/@-20.7636589,-42.868928,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0xa367f9b379c651:0x9344f25f0632e34d!8m2!3d-20.7636639!4d-42.8663531!16s%2Fg%2F1pzs8lx62?entry=ttu). Acesso em: 24 set. 2023.

GUARDA, Emeli Lalesca Aparecida da; DURANTE, Luciane Cleonice; CALLEJAS, Ivan Julio Apolonio. Desempenho Termoenergético de Edificações Sob a Ótica das Mudanças Climáticas: Uma Revisão Sistemática. **E&S Engineering and Science**, v. 9, n. 1, p. 19-35, 2020. <https://doi.org/10.18607/ES2020910049>.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 30 jun. 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). 2021.

JAMEI, Elmira *et al.* Simulation-Based Study on the Effect of Green Roofs on Summer Energy Performance in Melbourne. **Land**, v. 12, n. 12, p. 2105, 2023. <https://doi.org/10.3390/land12122105>.

MARÇAL, Viviane Gomes *et al.* Relevância e percepção do conforto térmico no processo de aprendizagem em sala de aula. **Boletim Técnico do Senac**, v. 44, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.26849/bts.v44i2.693>.

MARTINS, Fabrina Bolzan *et al.* Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>.

MISHRA, S. Sangita; SAKHARLE, Divya. Design of green roof for an energy efficient university campus. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1546-1550, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.505>.

MOREIRA, Fernanda. Avaliação do desempenho térmico de telhado verde extensivo: estudo de caso no contexto climático de Brasília. 2022. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2023.

MOUSAVI, SeyedehNiloufar *et al.* A novel smart framework for optimal design of green roofs in buildings conforming with energy conservation and thermal comfort. **Energy and Buildings**, v. 291, p. 113111, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113111>.

PIANELLA, Andrea *et al.* Substrate depth, vegetation and irrigation affect green roof thermal performance in a mediterranean type climate. **Sustainability**, v. 9, n. 8, p. 1451, 2017. <https://doi.org/10.3390/su9081451>.

RASUL, M. G.; ARUTLA, L. K. R. Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment. **Energy Reports**, v. 6, p. 503-508, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.015>.

RODRIGUES, E; FERNANDES, M; CARVALHO, D. Future weather generator for building performance research: An open-source morphing tool and an application. **Building and Environment**, v. 233, n. 110104, apr, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110104>.

ROMERO, Pilar *et al.* An Analysis of Thermal Comfort as an Influencing Factor on the Academic Performance of University Students. **Education Sciences**, v. 14, n. 12, p. 1340, 2024. <https://doi.org/10.3390/educsci14121340>.

SAINI, Deva Shree. A Critical Review and Simulation-Based Evaluation of Green Roof's Energy Savings. 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2020. Disponível em: <https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/50a8efd2-9179-49e3-ac16-67f8238f3582/content>. Acesso em: 18 nov. 2024.

SANCHES, Fabio de Oliveira; FIALHO, Edson Soares; QUINA, Robson Rodrigues. Evidências de mudanças climáticas em Viçosa (MG). **Revista do departamento de Geografia**, v. 34, p. 122-136, 2017. <https://doi.org/10.11606/rdg.v34i0.138581>.

SHARON, Jenny *et al.* Impact of Green Roof Plants on Building Annual Energy Consumption in a Warm Humid Climate. **International Research Journal of Multidisciplinary Scope**. v. 5, p. 355-363, 2024. <https://doi.org/10.47857/irjms.2024.v05i01.0217>

SILVA, Marcelo F. da Rocha e. Simulação energética de coberturas verdes. 2014. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2014.

WATSON, D.J. Comparative physiological studies on the growth of field crops. I – Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*. London, v.11, n. 44, p.41-76, 1947a.

WATSON, D.J. Comparative physiological studies on the studies on the growth of field crops. II – The effect of varying nutrient supply on net assimilation rate and leaf area. *Annals of Botany*. London, v.11, n. 44, p. 375-407, 1947b.

WU, Zhibin; WAGNER, Andreas. Thermal comfort of students in naturally ventilated secondary schools in countryside of hot summer cold winter zone, China. **Energy and Buildings**, v. 305, p. 113891, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113891>.

ZAHEDI, Rahim *et al.* Thermal analysis model of a building equipped with green roof and its energy optimization. **Nature-Based Solutions**, v. 3, p. 100053, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100053>.

ZHANG, Kexin *et al.* Thermal performance and energy consumption analysis of eight types of extensive green roofs in subtropical monsoon climate. **Building and Environment**, v. 216, p. 108982, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108982>.

3 EMISSÃO OPERACIONAL DE UM EDIFÍCIO UNIVERSITÁRIO PARA UMA MATRIZ ELÉTRICA FUTURA

RESUMO

Este trabalho propõe um processo de cálculo de emissões operacionais em um cenário de estagnação da matriz elétrica brasileira para 2050. O método foi aplicado para o consumo de energia elétrica em cinco casos de um edifício universitário. Um dos casos corresponde a sua cobertura atual e os outros quatro, a telhados verdes com variações de parâmetros construtivos. O consumo de energia é referente ao total do edifício com um sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (HVAC) e somente em função do sistema HVAC. As emissões operacionais ocorrem durante o uso das edificações. Uma de suas formas é pelo consumo de eletricidade. Quantificar essas emissões é necessário para compreender seus impactos e buscar formas de mitigá-las, inclusive fazendo projeções para cenários futuros. Os dados foram embasados na projeção da matriz elétrica brasileira para o ano de 2050 e avaliados os fatores associados às emissões de dióxido de carbono equivalente. A análise dos coeficientes de emissão evidenciou a importância da transição para uma matriz energética com maior participação de fontes renováveis para diminuir emissões, como eólica, hidrelétrica e fotovoltaica. As emissões variaram pouco entre os casos e quando contabilizadas somente pelo sistema HVAC, as emissões foram quase metade das totais do edifício, chegando a 1,33 t CO₂eq/ano. Foi verificado também que a combinação de fontes renováveis, estratégias passivas e tecnologias de eficiência energética configura-se como uma abordagem integrada para reduzir emissões operacionais.

Palavras-chave: Fator de emissão futuro; Emissão de carbono; Carbono operacional; Energia elétrica; HVAC.

ABSTRACT

This study proposes a method for calculating operational emissions under a stagnation scenario of the Brazilian electricity matrix projected for the year 2050. The method was applied to the electricity consumption of five scenarios for a university building. One scenario corresponds to the current roof configuration, while the other four involve green roofs with variations in construction parameters. Energy consumption was evaluated for the entire building operating with a Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) system, as well as separately for the HVAC system alone. Operational emissions occur during the building's use phase, one of the main contributors being electricity consumption. Quantifying these emissions is essential for understanding their environmental impact and for developing mitigation strategies, including forecasting future scenarios. The data used in the analysis were based on projections of the Brazilian electricity mix for 2050, and the emission factors associated with carbon dioxide equivalent (CO₂eq) were assessed. The analysis of emission coefficients highlighted the importance of transitioning to an energy matrix with a higher share of renewable sources – such as wind, hydroelectric, and photovoltaic power – to reduce emissions. Emissions varied only slightly across the different scenarios, and when considering only the HVAC system, emissions accounted for nearly half of the building's total, reaching up to 1.33 t CO₂eq/year. The study also found that combining renewable energy sources with passive design strategies and energy-efficient technologies constitutes an integrated approach to reducing operational emissions.

Keywords: Future emission factor; Carbon emission; Operational carbon; Electric energy; HVAC.

3.1 Introdução

O setor energético e da construção civil geram emissões de gases de efeito estufa (*greenhouse gases* – GHGs) (Koilakou; Hatzigeorgiou; Bithas, 2024; Arup, 2020; Huang *et al.* 2024, ILFI, 2019), sendo essencial mensurá-las a fim de propor estratégias para sua redução. As emissões ocorrem ao longo de todo o ciclo de vida dos sistemas, dos produtos e dos materiais e se dividem em emissões incorporadas e operacionais (Arup, 2020). Fontes de energia não renováveis agravam o problema no que diz respeito às emissões operacionais pelo consumo de energia elétrica (Souza, 2023), mas soluções passivas podem reduzir essas emissões por melhorarem o conforto térmico, diminuindo a necessidade de sistemas que consomem energia (Elnabawi; Saber; Bande, 2024).

O monitoramento e o controle das emissões de carbono são indispensáveis para viabilizar a atenuação do aquecimento global que é um dos maiores desafios ambientais contemporâneos (Zhang *et al.*, 2025). No setor energético, as emissões de carbono são relativas ao uso da energia e à estrutura do sistema energético, o qual contribui positiva ou negativamente na composição da matriz energética (Koilakou; Hatzigeorgiou; Bithas, 2024). Neste contexto, é pertinente o estudo de métodos para estimativas de emissões de GHGs dos edifícios de forma que viabilize a quantificação de emissões, visando o desenvolvimento e a implementação de medidas que promovam sua redução.

Na construção civil, todo o material usado é extraído da natureza ou cultivado, transportado para o local onde será processado, transportado novamente para ser transformado em um produto, transportado para a obra e também dentro do espaço da obra. Todas essas etapas resultam na emissão de GHGs. Há ainda o consumo de energia e emissões de carbono ao final da vida da edificação, com a demolição e descarte dos materiais. Ao longo do ciclo de vida de um edifício, a emissão é menor na sua reparação e manutenção e nos programas de renovação, comparando com as demais etapas desde a obtenção de matéria-prima até seu descarte. Como as emissões podem ocorrer ao longo de toda a vida do edifício, é adequado buscar a minimização do carbono tanto incorporado quanto operacional (Arup, 2020). O carbono operacional compreende o consumo operacional de energia e o consumo de água, enquanto que o carbono incorporado é proveniente dos materiais e componentes de construção dos edifícios, considerando todo seu ciclo de vida

(Huang *et al.* 2024).

Os edifícios são responsáveis pela maior parcela de consumo de energia comparados a outros usos finais. Em nível mundial, a maior parte dessa energia é gerada com fontes ecologicamente destrutivas, incluindo carvão, gás, petróleo e energia nuclear (ILFI, 2019). A energia hidroelétrica de grande escala, embora seja mais limpa na produção, é produzida provocando perturbações generalizadas nos ecossistemas (Pereira; Santos; Targa, 2023; ILFI, 2019). A combustão de madeira ou outra biomassa libera partículas de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, o que pode prejudicar a saúde pública ou sobrecarregar terras reservadas para a produção de alimentos e privar o solo da reciclagem de nutrientes. Os impactos negativos combinados desta infraestrutura energética estão se tornando cada vez mais evidentes, à medida que as emissões crescentes de carbono provenientes da utilização de energia resultam em alterações climáticas que ameaçam a segurança e a prosperidade em todo o mundo (ILFI, 2019).

O impacto das fontes energéticas ocorre com maior ou menor intensidade no meio ambiente. Os avanços tecnológicos nas técnicas do uso de energia no último século causaram prejuízos sobre o meio ambiente e a sociedade, com a poluição do solo, do ar e da água e do agravamento das condições de saúde das populações. A relação entre homem e tecnologia é desarmônica, sobretudo pela sobrevalorização dos aspectos econômicos que fere a ordem natural da vida. A conservação da energia elétrica trará benefícios ao meio ambiente e permitirá a qualidade de vida (Roméro; Reis, 2012).

Em uma abordagem para redução de emissões operacionais de carbono, é essencial adotar um projeto passivo ou minimizar a necessidade de sistemas ativos. As estratégias passivas vão além de proporcionar menos emissões de carbono durante o funcionamento dos edifícios. Frequentemente, essas estratégias os tornam confortáveis, com níveis elevados de satisfação dos ocupantes e flexíveis, fazendo-os mais duradouros (Arup, 2020).

3.1.1 Carbono operacional pelo consumo de energia elétrica

O carbono operacional diz respeito às emissões relacionadas à energia utilizada para operar um edifício, englobando aquecimento, refrigeração, ventilação, sistemas de iluminação, água quente, equipamentos e elevadores. Por diversas

vezes, o carbono operacional é o foco quando se busca tornar uma edificação mais sustentável. Contudo, o carbono operacional é apenas uma parcela de suas emissões totais (UKGBC, 2023).

Os sistemas prediais consomem grandes quantidades de energia para atender às necessidades de operação do edifício. Além de aumentar os custos energéticos, isso aumenta as emissões de GHGs, o que indica a urgência no desenvolvimento de estratégias eficazes de controle energético. Atualmente, os edifícios modernos e inteligentes aliam conforto e segurança à economia de energia (Fu *et al.*, 2022).

As emissões de GHGs do setor de energia ocorrem pela queima de combustíveis e pelas emissões fugitivas. Da primeira forma, as emissões são provenientes da combustão dos diferentes tipos de combustíveis primários e secundários para geração de calor, força motriz, geração de energia elétrica ou outro tipo de transformação. Da segunda forma, os GHGs são emitidos por vazamentos, evaporação ou perdas, principalmente nos setores de petróleo e gás natural e de mineração de carvão, sem aproveitamento para geração de energia. Os gases mais consideráveis para o setor de energia são CO₂, CH₄ e N₂O (EPE, 2022).

3.1.2 Abordagens para estimativa de emissões de GHGs

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) apresenta duas abordagens que podem ser aplicadas individualmente ou combinadas para estimativa de emissões de GHGs, abordagens *top-down* e *bottom-up* (BRASIL, 2022b). No que diz respeito aos tipos de emissão, as emissões diretas são aquelas resultantes de atividades dentro de limites bem definidos, diretamente no local onde a atividade ocorre, como nas usinas onde a eletricidade é produzida. Já as emissões indiretas, são consequência das atividades dentro de limites bem definidos, ocorrendo em outro local, como pela emissão indireta de um edifício que consome a energia elétrica produzida por uma usina, ou seja, o edifício necessita que haja uma emissão externamente a ele para que seus sistemas operem (IPCC, 2022).

A abordagem *top-down* estima emissões diretas através da concentração de GHGs e de como esses gases se movimentam e dispersam na atmosfera. Esta abordagem compreende todo o carbono disponível no sistema, até mesmo parte do

carbono no combustível que não é queimado e que será liberado como emissões fugitivas, podendo ser por meio de vazamento ou evaporação na fase de produção e/ou transformação (Brasil, 2022b).

A abordagem *bottom-up* estima as emissões baseando em atividades locais ou medições diretas, como informações sobre tráfego e sobre consumo de energia e uso de edifícios. Além disso, geralmente inclui emissões indiretas resultantes da aquisição da eletricidade e da cadeia de abastecimento urbana (IPCC, 2022). Outro aspecto desta abordagem é a abrangência do ciclo de vida das usinas, em seus estágios de aquisição de matéria-prima, processamento de material, fabricação e montagem, uso e serviço, recuperação e descarte. Entradas de material e energia e saídas de resíduos (líquidos, sólidos, gasosos) podem estar incluídas em cada estágio (Wiebe; Gandy; Lutz, 2016).

A abordagem híbrida inclui aspectos amplos e detalhados próprios da abordagem *top-down* e *bottom-up*, simultaneamente, e por vezes é escolhida para quantificar as emissões territoriais (IPCC, 2022).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) utiliza a abordagem *bottom-up* em seus documentos para as estimativas de emissões de GHGs pela queima de combustível no setor energético. A mesma técnica foi utilizada por Unnewehr *et al.* (2022) e Peng *et al.* (2024). Nestes três casos, foram adotados dados específicos das fontes geradoras de energia. As emissões estimadas pela EPE são resultado da multiplicação do dado de consumo por seus fatores de emissão (*emission factors* – EFs). O consumo de combustíveis é embasado na matriz energética indicada pelo Balanço Energético Nacional (BEN), no qual pode ser identificada a matriz energética anual. Além disso, a EPE utiliza os EFs e os valores de Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* – GWP) do IPCC presentes respectivamente no Relatório de Avaliação e na metodologia para inventários nacionais de emissões e remoções de GHGs do setor de energia (EPE, 2022).

Unnewehr *et al.* (2022) aplicaram essa abordagem para determinar o EF utilizando dados de séries temporais de produção por usina de energia fornecidos pela Rede Europeia de Gestores de Redes de Transporte de Eletricidade (*European Network of Transmission System Operators* – ENTSO-E) e de emissões anuais de CO₂ das usinas de energia de relatórios do Registo de Transações da União Europeia (*European Union Transaction Log* – EUTL). O cálculo do EF de cada usina foi obtido de forma individual e a variação na eficiência das usinas não foi

considerada.

Peng *et al.* (2024), aplicando a mesma abordagem, empregaram dados de tabelas de balanço energético nacionais para os países analisados, as quais incluem informações acerca das receitas de energia, das conversões de energia e do consumo final. Em caso da inexistência desse documento para o país, utilizaram dados da Organização Latino-Americana de Energia (*Organización Latinoamericana de Energía* – OLADE) e da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* – IEA). Os fatores de emissão admitidos foram os das Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa. As emissões de CO₂ relacionadas ao consumo de energia foram calculadas multiplicando os dados de atividade pelo EF.

Em contraste, quando Unnewehr *et al.* (2022) adotaram a abordagem *top-down*, aplicaram dados por ano e por país sobre a geração de eletricidade e calor baseando-se em balanços energéticos das Estatísticas Europeias (*European statistics* – Eurostat) e emissões associadas relativas à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (*United Nations Framework Convention on Climate Change* – UNFCCC). Dessa forma, as emissões estimadas referentes à geração de eletricidade foram totais. Isso indica a aplicação de dados abrangentes de geração de eletricidade e de emissões.

3.1.3 Quantificação das emissões de GHGs

As emissões de carbono operacional são decorrentes do consumo de energia do edifício, como eletricidade, gás natural e outras fontes. Elas são calculadas com base nos EFs de carbono específicos para cada tipo de fonte de energia (Yang, *et al.*, 2023). Os EFs de CO₂ para energia elétrica têm o propósito de estimar a quantidade de CO₂ associada a uma geração de energia elétrica determinada. Este fator considera todas as usinas que estão gerando energia e não apenas aquelas que estejam funcionando na margem (Brasil, 2023).

No Brasil, o trânsito da energia é possível através do Sistema Interligado Nacional (SIN), que consiste em uma grande rede de transmissão com mais de 100.000 km de extensão. Esse sistema elétrico brasileiro permite o intercâmbio da energia produzida em todas as regiões, com exceção dos sistemas isolados, encontrados principalmente na Região Norte. As localidades do sistema isolado vêm

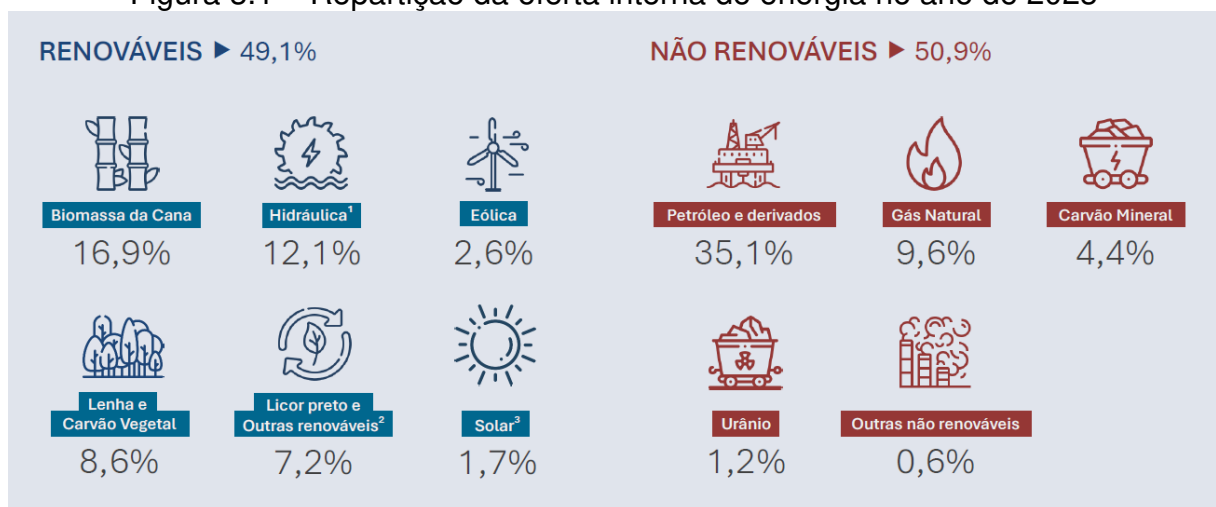
sendo gradativamente interligadas com o passar do tempo e, até 2022, somente cerca de 2% do mercado nacional permaneceu no sistema isolado (Brasil, 2022a).

3.1.4 Matriz energética brasileira

A matriz energética é formada a partir de um conjunto de fontes de energia utilizadas em um país, ou no mundo, para atender a demanda de energia (Brasil, s.d). No contexto global, a demanda por eletricidade tem crescido de forma constante. Até 2050, essa necessidade crescerá 3,1% por ano, e ainda, 38% das fontes de energia podem se tornar renováveis, com destaque para a solar e a eólica (EIA Annual Energy Outlook, 2020). Da mesma forma que a energia é um pré-requisito para o desenvolvimento, a energia sustentável é um pré-requisito para um desenvolvimento sustentável (Østergaard *et al.*, 2020). Portanto, pensar na diversificação e na renovabilidade de matriz energética torna-se fundamental para o crescimento econômico e social.

De acordo com o relatório nacional brasileiro de balanço energético de 2024, que se baseia no ano de 2023, a repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) foi composta por 49,1% de fontes renováveis e 50,9% de fontes não renováveis. As principais renováveis são a biomassa da cana de açúcar (16,9%) e a energia hidráulica (12,1%) e as principais não renováveis são o petróleo e seus derivados (35,1%) e o gás natural (9,6%) (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Repartição da oferta interna de energia no ano de 2023

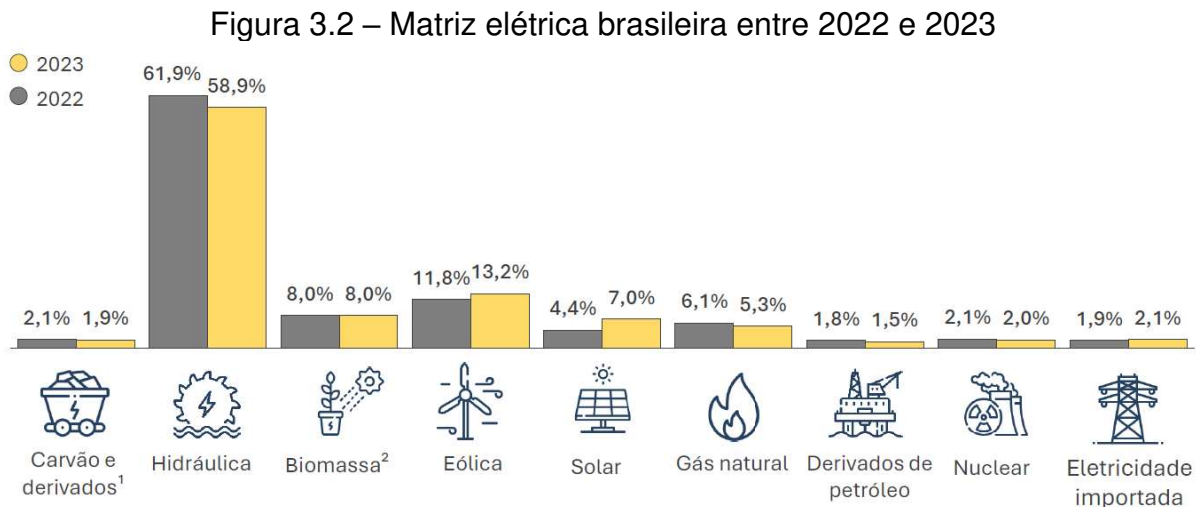


Fonte: EPE (2024).

A repartição da energia nesses dados refere-se a toda a demanda e produção necessária para os mais diversos setores da economia, com 33% destinados ao transporte de cargas e de passageiros, 31,8% para o setor industrial, 10,7% destinado a residências, 8,8% para o setor energético, 5% destinado à agropecuária e 5,1% para serviços (EPE, 2024).

3.1.5 Matriz elétrica brasileira

Com base no ano 2023, a matriz elétrica brasileira apresentou alterações devido à estabilidade do regime hídrico acompanhada pelo crescimento na geração de energia eólica e solar. As principais mudanças foram a diminuição da geração a partir de gás natural (-7,9%) e de óleo diesel (-24,6%), a manutenção da geração hidráulica e o crescimento da geração solar fotovoltaica (+68,1%) e eólica (+17,4%) (EPE, 2024) (Figura 3.2).



Fonte: EPE (2024).

Devido a essa mudança, a geração termoelétrica obteve uma redução de 1,9% na participação de energia elétrica em relação ao ano de 2022 para 2023, destacando-se as quedas no uso de gás natural, derivados de petróleo e, em menor escala, na geração nuclear. Concomitante a isso, a participação de renováveis na matriz elétrica atingiu 89,2% de renovabilidade, esse parâmetro é calculado com base na OIE Elétrica, ou seja, toda a produção nacional, somada a importação líquida (EPE, 2024).

Apesar do avanço positivo do país a respeito da participação de fontes de energia renováveis, e já ser considerado um exemplo para o contexto global, diversificar a matriz energética é de extrema importância para maior eficiência da produção de energia (Ferraz, 2017). A maior participação das usinas hidrelétricas pode ser um ponto positivo, porém, tornar-se dependente do regime de chuvas ameaça a sustentabilidade da produção de energia do país, uma vez que são usadas usinas térmicas, que produzem energia a partir de combustíveis fósseis, para garantir que os reservatórios estarão abastecidos durante os períodos de seca (Baitelo, 2009).

3.1.6 Objetivos

Este estudo teve como objetivos (i) propor uma metodologia para calcular as emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) em um edifício universitário devido ao consumo de energia elétrica e (ii) aplicá-la em cinco casos de um edifício, sendo quatro com telhado verde e um caso com a cobertura existente, e com sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (*Heating, Ventilating and Air Conditioning* – HVAC). A quantificação de carbono operacional é necessária para dimensionar estratégias que sejam capazes de mitigar ou até mesmo anular essas emissões.

3.2 Material e métodos

A metodologia é composta por duas etapas: a primeira corresponde ao processo de cálculo do EF para a matriz elétrica brasileira no ano de 2050 e para as emissões operacionais em CO₂eq; a segunda é referente à estimativa da emissão de CO₂eq operacional pelo consumo de energia elétrica do edifício universitário em análise. Esta metodologia utiliza as fontes de energia elétrica do cenário de estagnação da matriz elétrica no ano 2050, considerando seus impactos ambientais. Ao mesmo tempo, traz exposições de várias referências para descrever métodos e soluções para o problema da pesquisa, que consiste em aplicar uma metodologia para quantificar as emissões geradas pelo consumo de energia elétrica de um edifício.

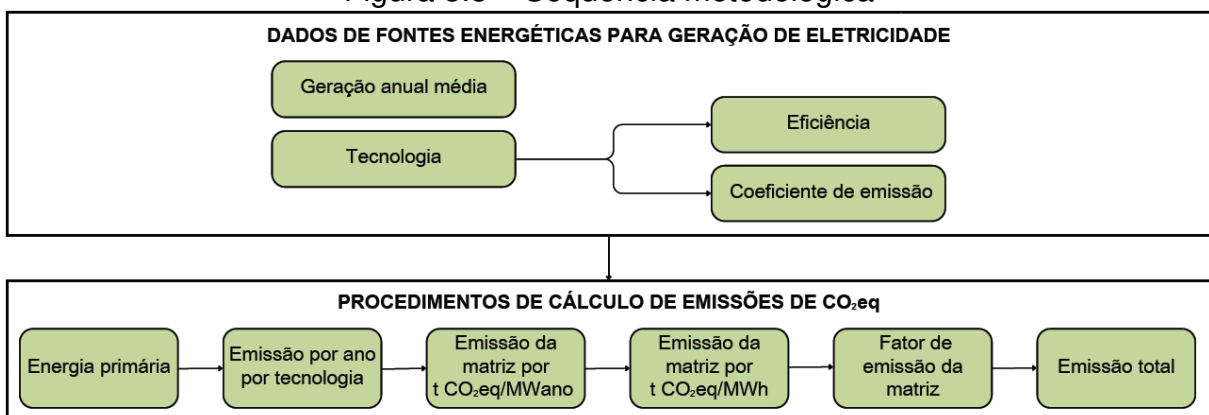
Neste estudo, foi utilizada a abordagem *bottom-up*, para a estimativa de

emissões de GHGs, com a avaliação das emissões diretas pela geração da energia elétrica que será adotada como o valor do consumo de energia elétrica pelo uso do edifício universitário. Não foram contabilizadas emissões ao longo do ciclo de vida das usinas, dentre elas, o carbono incorporado. Neste caso, as emissões avaliadas foram limitadas àquelas provenientes da queima dos combustíveis para geração de energia elétrica pelas usinas que compõem o SIN previsto para o ano de 2050.

Foram calculadas somente as emissões líquidas, ou seja, a metodologia não contempla a energia utilizada durante o processo de geração da energia elétrica. Todavia, foi considerada a eficiência das tecnologias, de forma que as emissões das perdas pela transformação da energia primária em energia útil foram contabilizadas. Além disso, a produção e participação de fontes que compõem a matriz elétrica foram uniformes ao longo de um mesmo ano. Com essa finalidade, foram coletados dados das fontes energéticas para a geração de eletricidade, dos procedimentos para cálculo para calcular o EF e a emissão operacional e, posteriormente, calculado o EF da matriz elétrica e as emissões do edifício em estudo.

A Figura 3.3 mostra a sequência metodológica utilizada, dividida em duas etapas. Primeiro, foram coletados dados sobre a geração anual média, a tecnologia utilizada, sua eficiência e coeficiente de emissão. Em seguida, as emissões foram calculadas iniciando pela energia primária consumida, seguida da determinação das emissões anuais por tecnologia, da emissão da matriz em t CO₂/MWano e em t CO₂/MWh, do fator de emissão da matriz e, por fim, da emissão total.

Figura 3.3 – Sequência metodológica



Fonte: própria autora.

Uma metodologia semelhante para combustão estacionária é adotada em um

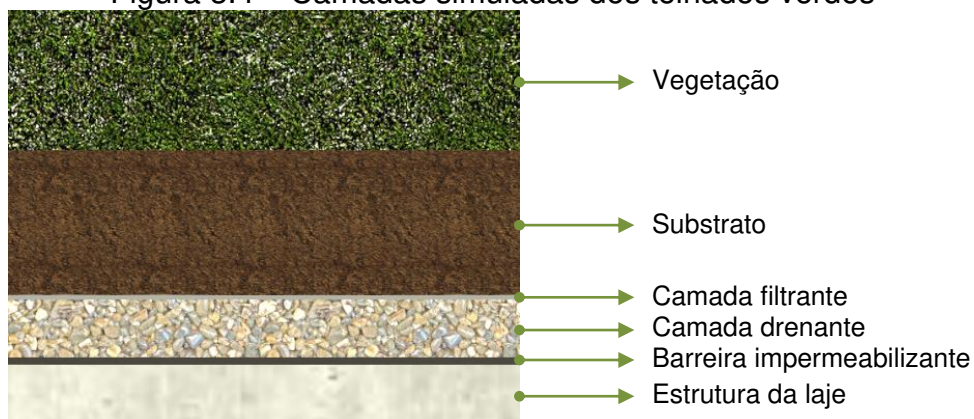
guia sobre medições de emissões do Ministério do Meio Ambiente da Nova Zelândia. Nele, os fatores de emissão compreendem as emissões diretas provenientes da combustão de combustível, porém não consideram o ciclo completo do combustível e não incorporam emissões indiretas associadas à extração, produção e transporte do mesmo (Ministry for the Environment, 2024).

3.2.1 Objeto de estudo

A área de estudo corresponde ao SIN brasileiro. O edifício para aplicação do estudo é o Pavilhão de Aulas II do *campus* da Universidade Federal de Viçosa, localizado no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Esta edificação é composta por três pavimentos e é utilizada para aulas dos cursos de graduação. Dados anuais do consumo de energia elétrica total pelo edifício com um sistema HVAC nas salas de aula e do consumo somente pelo sistema HVAC foram extraídos de simulações termoenergéticas deste edifício através do *software* EnergyPlus 22.1.0 no capítulo 2.

As simulações contemplaram cinco casos, sendo um com a cobertura em sua composição atual (CB), com estrutura metálica e telhas galvanizadas, e quatro sem a cobertura existente e com a implantação de telhado verde, sendo dois deles extensivos com camada de substrato de 15 cm, sendo um com índice de área foliar de 0,002 (TE1) e outro de 5,000 (TE2) e dois intensivos com camada de substrato de 70 cm, sendo um com índice de área foliar de 0,002 (TI1) e outro de 5,000 (TI2). As demais camadas dos telhados verdes foram configuradas com valores padrões do *software*. Na Figura 3.4 é mostrado um desenho esquemático das camadas dos telhados verdes utilizadas nas simulações.

Figura 3.4 – Camadas simuladas dos telhados verdes



Fonte: própria autora.

Para inserir os telhados verdes, uma camada filtrante, uma camada drenante e uma barreira impermeabilizante foram adicionadas acima da laje existente, configuradas conforme Capozzoli, Gorrino e Corrado (2013) e Silva (2014) *apud* Moreira (2022).

O cenário climático da simulação foi referente ao Caminho Socioeconômico Compartilhado (*Shared Socio-economic Pathway – SSP*) 4.5 do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (*Sixth Assessment Report – AR6*) e o ano de análise foi 2050. O consumo de energia elétrica por caso é mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Consumo de energia elétrica em 2050

Caso	CB		TE1		TI1		TE2		TI2	
	TOTAL	HVAC	TOTAL	HVAC	TOTAL	HVAC	TOTAL	HVAC	TOTAL	HVAC
Consumo (MW/ano)	243,97	126,86	245,87	128,76	244,38	127,26	242,40	125,28	243,28	126,16

Fonte: própria autora.

3.2.2 Dados da matriz elétrica brasileira futura

Os dados sobre a matriz elétrica foram obtidos no Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), que consiste em um conjunto de estudos e diretrizes para traçar estratégias de longo prazo para o setor energético brasileiro (Brasil, 2020). A EPE disponibiliza dados de entrada e relatórios de saída de simulações de eletricidade para o período de tempo proposto.

O PNE 2050 fornece resultados de 64 cenários simulados com dados de entrada e saída do setor de eletricidade, em cada um investigando um aspecto relevante para analisar os impactos ao longo dos anos na matriz elétrica (Brasil, 2020). Para este estudo, o cenário de estagnação foi definido para estar de acordo com o SSP2-4.5 do IPCC, no qual as emissões de CO₂ permanecem em torno dos níveis atuais até metade do século. Além disso, foi coerente considerar o contexto com usinas hidrelétricas apenas em áreas sem interferência com Unidades de Conservação ou Terras Indígenas e Quilombolas, uma vez que a pesquisa possui foco na sustentabilidade ambiental.

Foram coletados dados das tecnologias e suas respectivas categorias, eficiências e coeficientes de emissão para os anos de 2046 até 2050 do contexto determinado.

3.2.3 Fator de emissão

O método de cálculo de EF foi desenvolvido pelo consumo de energia elétrica e elaborado a partir da interpretação da literatura para um ano futuro. Isso por meio de uma revisão bibliográfica sobre metodologias de cálculo de emissões de GHGs e de EF, considerando a projeção da matriz elétrica brasileira para o ano de 2050. O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) fornece inventários com os EFs mensais e anuais, entretanto, as análises serão realizadas para o ano de 2050. Para isso, foi necessário conhecer as fontes de energia previstas para compor a matriz elétrica brasileira no ano em questão.

Os EFs para sistemas de energia geralmente são baseados em dados sobre a geração de energia e na quantidade de combustível utilizada para essa geração. Para cada combustível é necessário um EF, o qual pode ser determinado por análises químicas do mesmo. O EF específico da tecnologia é o resultado da multiplicação da quantidade do combustível pelo EF específico do combustível e dividida por seu rendimento energético (Unnewehr *et al.*, 2022). Como os dados obtidos já são do EF por tecnologia, foi necessário dividir os valores encontrados pelo rendimento energético (eficiência) para obter o EF específico. A emissão por tecnologia consiste no produto do EF específico pela geração.

Os coeficientes de emissão apresentados no PNE 2050 consideram os GHGs mais relevantes para o setor de energia: CO₂, CH₄ e N₂O. O GWP é utilizado para unificar a unidade de quantificação das emissões, possibilitando expressá-las em CO₂eq, conforme descrito no Informativo Técnico nº 011/2022 da EPE (EPE, 2022).

O EF médio anual para uma usina é calculado pela divisão das emissões de CO₂ provenientes da geração de eletricidade pela geração de energia elétrica total em um ano (Unnewehr, 2022). O relatório do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E, 2020) prescreve que os fatores de emissão de dióxido de carbono devem ser revisados a cada cinco anos e devem ser o resultado da média do EF dos últimos cinco anos.

3.2.4 Quantificação de emissão operacional

A quantificação de emissão do carbono operacional em função do consumo de energia elétrica anual do edifício foi estimado de forma análoga à EPE (EPE, 2022) e a Peng *et al.* (2024), pelo produto do consumo de energia elétrica pelo EF.

3.3 Resultados e discussão

Os resultados apresentados e analisados são baseados nos dados coletados para as etapas de cálculo e para a matriz elétrica no período de 2046 a 2050. A análise aborda as previsões da matriz elétrica, da geração de energia elétrica por tecnologia e as emissões operacionais associadas à matriz elétrica brasileira futura no contexto escolhido. Avalia-se o impacto do consumo de energia elétrica no edifício universitário, tanto total quanto pelo sistema HVAC, e as emissões de CO₂eq em diferentes cenários.

3.3.1 Dados da matriz elétrica brasileira futura

Os dados coletados foram: tecnologias, categoria, eficiência e coeficiente de emissão (Tabela 3.2) e a previsão de geração anual de energia elétrica por tecnologia (Tabela 3.3) para os anos de 2046 até 2050 para aplicação no cálculo do EF.

Tabela 3.2 – Detalhamento da matriz elétrica prevista para 2046 – 2050

Tecnologia	Categoria	Eficiência	Coeficiente de emissão (t CO ₂ /MWh)
CANA_condensação_CAPEX40	Biomassa	0,20	0,00
EOLICA-NE/N_2030-2039	Eólica	1,00	0,00
EOLICA-NE/N_2040-2050	Eólica	1,00	0,00
GAS_CC_CAPEX40_pos2030	Gás natural	0,55	0,37
GAS_CC_CAPEX40_6USD	Gás natural	0,55	0,37
NUCLEAR	Nuclear	0,33	0,00
X_OUTRAS	Outros	0,36	0,00
UPCH	PCH	0,36	0,00
UHE	UHE	1,00	0,00

Fonte: Brasil (2020). Adaptada pela autora.

Tabela 3.3 – Previsão de geração anual de energia elétrica por tecnologia (MWmédio)

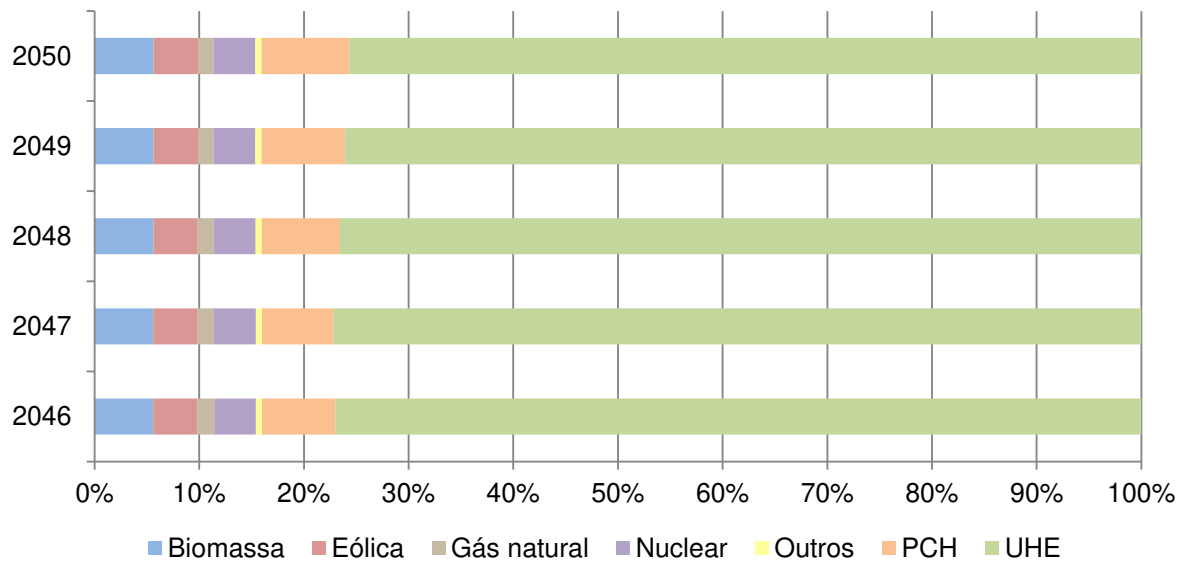
Tecnologia	2046	2047	2048	2049	2050
CANA_condensação_ CAPEX40	4096,59	4096,59	4096,59	4096,59	4096,59
EOLICA-NE/N_2030-2039	2005,02	2005,02	2005,02	2005,02	2005,02
EOLICA-NE/N_2040-2050	1090,58	1090,58	1090,58	1090,58	1090,58
GAS_CC_CAPEX40_ pos2030	758,21	758,21	758,21	758,21	758,21
GAS_CC_CAPEX40_6USD	411,71	387,24	360,23	332,70	307,12
NUCLEAR	2918,77	2917,56	2917,56	2917,56	2917,56
X_OUTRAS	427,56	427,56	427,56	427,56	427,56
UPCH	5133,16	5007,63	5446,12	5818,62	6107,45
UHE	56356,43	56409,75	55890,20	55435,13	55069,56
Total	73198,03	73100,14	72992,06	72881,97	72779,65

Fonte: Brasil (2020). Adaptada pela autora.

Dentre as categorias das tecnologias para geração de energia elétrica no período de 2046 até 2050, as categorias renováveis biomassa, eólica, nuclear e hidrelétrica não geram emissão operacional, enquanto a não renovável gás natural, gera, conforme observado pelos coeficientes de emissão na Tabela 3.2. No entanto, a produção de energia por hidrelétricas emite metano e CO₂ ao longo de seu ciclo de vida, pela liberação de gases de grandes reservatórios, o que impacta nas mudanças climáticas (Souza *et al.*, 2023). O sistema eólico pode gerar emissões de GWGs principalmente durante a incineração de pás de turbinas ao final de sua vida útil e em seus processos de fabricação e gestão de seus resíduos (Heng; Meng; Mckechnie, 2021).

De acordo com os dados da Tabela 3.2, as categorias de maior eficiência são a eólica e a hidrelétrica (1,00) e a menor de eficiência, a biomassa (0,20). Conforme a Tabela 3.3, levando em consideração o período de 2046 a 2050, a geração pelas categorias gás natural, nuclear e usina hidrelétrica tende a diminuir, já a de pequena central hidrelétrica tende a aumentar, enquanto as demais se mantêm estáveis. A Figura 3.5 mostra a porcentagem de cada categoria na matriz elétrica brasileira nos cinco anos. A tecnologia prevista para ser mais adotada é a usina hidrelétrica, sendo mais de 75% nos cinco anos de 2046 até 2050.

Figura 3.5 – Participação das categorias na matriz elétrica brasileira



Fonte: própria autora.

De 2046 até 2050 há uma tendência de estagnação da parcela das categorias biomassa, eólica e outros. A participação da categoria Pequena Central Hidrelétrica (PCH) tende a aumentar, com uma queda somente de 2046 para 2047. A previsão indica diminuição constante da participação do gás natural e também diminuição na categoria nuclear. Já para a categoria Usina Hidrelétrica (UHE), sinaliza diminuição com aumento somente de 2046 para 2047.

A partir do exposto, verifica-se que a matriz elétrica brasileira será predominantemente constituída por fontes renováveis. De acordo com Basso e Stamm (2023), o aumento do uso de energias renováveis e a diversificação da matriz energética ajudam a reduzir as emissões de CO₂ e os impactos ambientais. Investimentos no setor, metas para maior participação dessas fontes e o uso consciente dos recursos naturais são estratégias para mitigar os efeitos negativos do crescimento econômico e possibilitar o desenvolvimento sustentável.

3.3.2 Fator de emissão

A partir das descrições da metodologia, é possível encontrar o EF pela sequência de equações a seguir, da Equação (1) até a Equação (4). Com a Equação (1) (Unnewehr *et al.*, 2022), é obtida a emissão média por tecnologia por ano. O cálculo do EF médio para a matriz é realizado com a Equação 2 (Unnewehr *et al.*,

2022). A Equação (3) mostra a conversão do EF anual para horário. Por fim, com a Equação 4 (CB3E, 2020) é realizado o cálculo para encontrar o EF a partir da média dos últimos cinco anos (2046 – 2050). No Anexo B é apresentada outra forma de calcular o EF, a partir de outros tipos de dados da matriz elétrica.

$$E_{\text{tec}} = \frac{EF_{\text{tec}} \times GA_{\text{tec}} \times N \times 24}{\eta} \quad (1)$$

Onde:

E_{tec} é a emissão média por tecnologia por ano (t CO₂eq/ano);

EF_{tec} é o fator de emissão médio da tecnologia (t CO₂/MWh);

GA_{tec} é a geração média anual por tecnologia (MW);

N é o número de dias no ano (dias);

24 é o número de horas em um dia (h);

η é a eficiência por tecnologia (%).

$$EF_{\text{matriz, a}} = \frac{\sum E_{\text{tec}}}{\sum GA_{\text{tec}}} \quad (2)$$

Onde:

$EF_{\text{matriz, a}}$ é o fator de emissão médio da matriz elétrica por ano (t CO₂eq/MWano);

$E_{\text{tec, a}}$ é a emissão média por tecnologia por ano (t CO₂eq/ano);

GA_{tec} é a geração média anual por tecnologia (MW).

$$EF_{\text{matriz, h}} = \frac{\sum EF_{\text{matriz, a}}}{N \times 24} \quad (3)$$

Onde:

$EF_{\text{matriz, h}}$ é o fator de emissão média da matriz elétrica por hora para cada ano (t CO₂eq/MWh);

$EF_{\text{matriz, a}}$ é o fator de emissão médio da matriz elétrica por ano (t CO₂eq/MWano);

N é o número de dias no ano (dias);

24 é o número de horas em um dia (h).

$$EF = \frac{\sum EF_{matriz,h}}{5} \quad (4)$$

Onde:

EF é o fator de emissão médio da matriz elétrica (t CO₂eq/MWh);

EF_{matriz, h} é o fator de emissão média da matriz elétrica por hora para cada ano (t CO₂eq/MWh);

5 é o número de anos para o cálculo (ano).

A partir das equações utilizadas, é notável que o tipo de tecnologia e o volume de produção de energia elétrica são diretamente proporcionais ao EF, enquanto a eficiência da tecnologia é inversamente proporcional. Portanto, para que as emissões operacionais sejam menores, é coerente adotar fontes de energia elétrica com menor coeficiente de emissão e maior eficiência. A diminuição no consumo também se torna imprescindível para alterar o balanço final de emissões operacionais. Com os dados da matriz elétrica, obteve-se o EF de 0,01036 t CO₂eq/MWh.

3.3.3 Quantificação de emissão operacional

Com os dados do consumo anual de energia elétrica (EE_{edifício}) obtido pelas simulações do edifício universitário, foi possível quantificar a emissão de dióxido de carbono equivalente para cada caso por meio da Equação (5) (EPE, 2022; Peng *et al.*, 2024).

$$E_{total} = CE_{edifício} \times EF \quad (5)$$

Onde:

E_{total} é a emissão total de gás de efeito estufa pelo consumo de energia elétrica do edifício (t CO₂eq);

$CE_{\text{edifício}}$ é o consumo de energia elétrica pelo edifício (MWh);

EF é o fator de emissão médio da matriz elétrica (t CO₂eq/MWh).

A emissão total de carbono operacional para o edifício universitário foi calculada com base no consumo anual de energia elétrica (Tabela 3.4) e no EF da matriz elétrica para 2050.

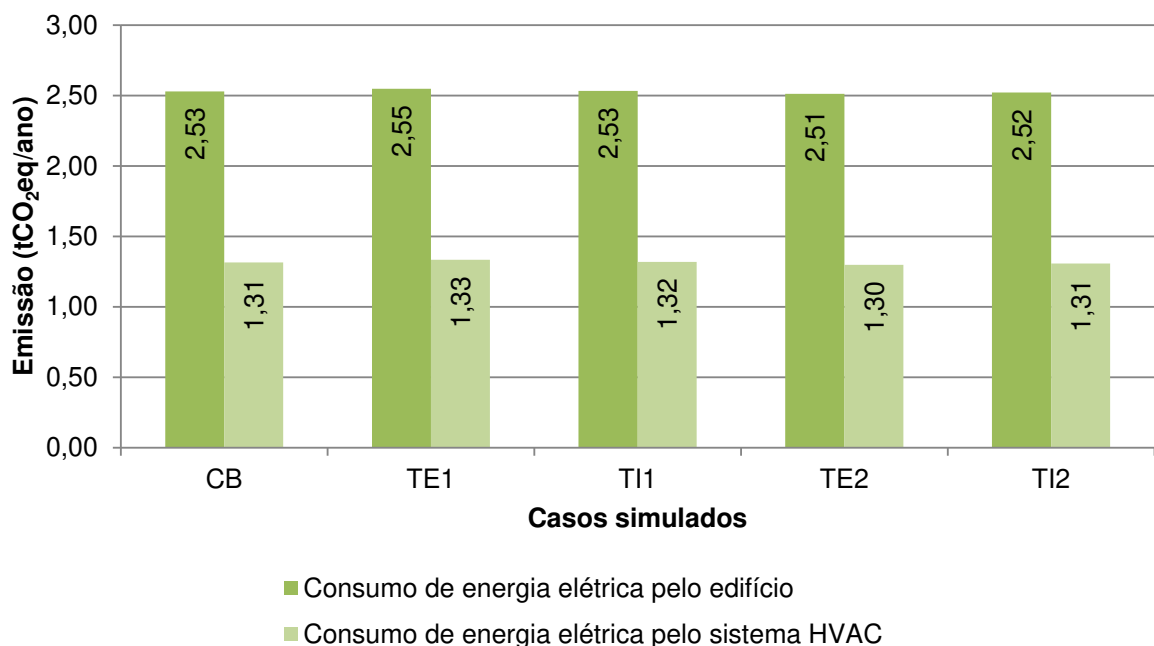
Tabela 3.4 – Consumo de energia elétrica pelo edifício (MW)

Caso	Total	HVAC
CB	243,97	126,86
TE1	245,87	128,76
TI1	244,38	127,26
TE2	242,40	125,28
TI2	243,28	126,16

Fonte: própria autora.

A Figura 3.6 apresenta as emissões de CO₂eq resultantes do consumo de energia elétrica para os cinco cenários. Nota-se que as variações nas emissões operacionais totais estão diretamente relacionadas ao consumo de energia elétrica do edifício e à composição da matriz elétrica.

Figura 3.6 – Emissão operacional pelo consumo de energia elétrica



Fonte: própria autora.

Os resultados indicam que o sistema HVAC é responsável pela maior parte das emissões, cerca de 52% do total em todos os casos analisado. Isso reforça a necessidade da adoção de estratégias de baixo consumo e até mesmo passivas, focadas na eficiência energética para manter a temperatura interna adequada sem a necessidade de sistemas para aquecimento e resfriamento que demandam alto consumo de energia elétrica.

O consumo de energia, no que diz respeito à climatização dos ambientes, pode ser reduzido com a aplicação de estratégias passivas combinadas como evidenciado no estudo de Elnabawi, Saber e Bande (2024), a partir do qual constataram que o isolamento das paredes externas e o tipo de envidraçamento podem reduzir a necessidade de resfriamento. Isso também é notado na pesquisa de Chen, Lu e Gong (2023), na qual é exposto que a composição de paredes, telhados e tipos de vidro de sistemas passivos de envoltória influenciam na eficiência energética para resfriamento e na redução das emissões de carbono, concomitantemente.

Os impactos das emissões operacionais podem também ser diminuídos ou até mesmo neutralizados ao utilizar outras fontes para geração de energia. Na pesquisa de Schultz e Carvalho (2022), através da avaliação do ciclo de vida, foi mostrado que o sistema de geração fotovoltaica produziu menores emissões de GHGs, sendo 0,044 kg CO₂eq/kWh, valor inferior à da matriz energética brasileira, de 0,227 kg CO₂eq/kWh. Essa diferença resultou em uma redução de 72.733.030 kg CO₂eq ao longo de 25 anos de operação. Isso torna nítido que os sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados para reduzir emissões, mesmo em matrizes elétricas renováveis, por terem claros benefícios ambientais.

3.4 Conclusões

O conhecimento de uma possível matriz elétrica brasileira e o consumo de energia elétrica no período de 2046 a 2050 viabilizou a análise das emissões operacionais do edifício universitário ao revelar o impacto ambiental devido ao consumo de energia elétrica do edifício em operação. O processo de cálculo das emissões considerou as emissões líquidas e as perdas para a produção da energia elétrica correspondente à consumida pelo edifício.

Observando os coeficientes de emissão encontrados para as tecnologias, é

perceptível que a transição para uma matriz energética mais diversificada e com maior participação de fontes renováveis, como eólica e hidrelétrica, sem emissões operacionais diretas, é fundamental para reduzir as emissões de CO₂eq e alcançar um modelo de desenvolvimento mais sustentável.

No entanto, a utilização de fontes não renováveis, como o gás natural, ainda apresenta desafios, uma vez que resulta em emissões de CO₂eq. Nesse sentido, é importante a implementação de estratégias de eficiência energética, com destaque para sistemas passivos de climatização, que contribuem diretamente para a redução do consumo de energia elétrica no edifício. Tecnologias aplicadas em paredes externas e telhados e a escolha de envidraçamento adequado são alternativas comprovadas para diminuir a demanda por sistemas ativos de resfriamento e aquecimento.

Isso é importante, tendo em vista que a demanda de energia elétrica e as emissões de CO₂eq com um sistema HVAC no contexto em questão foi de aproximadamente metade da demanda e das emissões totais. Os resultados das emissões operacionais apresentaram pouca variação entre os casos, uma vez que são diretamente proporcionais ao consumo de energia elétrica, que também manteve valores semelhantes.

A adoção de sistemas fotovoltaicos também se apresenta como uma solução eficaz para a diminuição das emissões, visto que as emissões associadas à energia solar são menores que as da matriz elétrica brasileira convencional. A combinação de fontes renováveis, soluções passivas e fotovoltaicas representam estratégias integradas e que podem mitigar os impactos ambientais de edificações, contribuindo para a construção de um futuro mais sustentável.

Dessa forma, a análise dos dados e a metodologia aplicada demonstram que, ao priorizar a eficiência energética e a utilização de fontes de energia renováveis e mais limpas, é possível não apenas reduzir as emissões de GHGs, mas também criar edifícios alinhados aos objetivos globais de sustentabilidade e redução das mudanças climáticas.

Para futuras pesquisas é recomendada a utilização de dados mais atualizados sobre a geração de energia para o cálculo do EF, como os obtidos nos Planos Decenais de Expansão de Energia (PDE), que são previsões atualizadas com mais frequência quando comparados ao PNE. Junto a eles, podem também ser utilizados os dados do balanço energético nacional (BEN), aplicando um modelo de

regressão para que o banco de dados seja mais preciso.

REFERÊNCIAS

ØSTERGAARD, P. A. *et al.* Sustainable development using renewable energy technology. **Renewable Energy**, v. 146, p. 2430–2437, fev. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>.

ARUP. **Net Zero Carbon Buildings: Three Steps to Take Now**. 2020. Disponível em: <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/net-zero-carbon-buildings-three-steps-to-take-now>. Acesso em: 9 set. 2023.

BAITELO, R. **Lei de energias renováveis**: propostas para a sustentabilidade energética brasileira. Greenpeace. 2009.

BASSO, Cassiane Gris; STAMM, Cristiano. Emissão de CO₂, Consumo de Energia Renovável e Crescimento Econômico: uma análise para o Brasil. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, v. 44, n. 145, p. 233-253, 2023.

BRASIL. Agência nacional de Energia Elétrica. Custo da energia que chega aos consumidores. 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/entenda-a-tarifa/custo-da-energia-que-chega-aos-consumidores>. Acesso em: 13 jun. 2023.

BRASIL. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Brasília: **MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações**, 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-GHG/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência e da Tecnologia e Inovação. Fator médio – Inventários corporativos. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em: 17 maio 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME, 2020.

BRASIL s.d. **Matriz energética e elétrica**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 6 ago. 2024.

CAPOZZOLI A.; GORRINO A.; CORRADO V. Thermal characterization of green roofs through dynamic simulation 3th Conference of International Building performance Simulation. **Proceedings...** França. 2013. <https://doi.org/10.26868/25222708.2013.1447>.

CB3E – CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Relatório**: Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações. UFSC: Florianópolis, Brazil, 2017. Disponível

em: http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/Relatorio-atualizado-fatores_energia-primaria_CO2_28_11_2020.pdf. Acesso em: 17 maio 2023.

CHEN, Jianheng; LU, Lin; GONG, Quan. Techno-economic and environmental evaluation on radiative sky cooling-based novel passive envelope strategies to achieve building sustainability and carbon neutrality. **Applied Energy**, v. 349, p. 121679, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121679>.

EIA Annual Energy Outlook 2020 - Issue in Focus - U.S. Energy Information Administration (EIA). Disponível em:

<https://www.eia.gov/outlooks/aeo/section_issue_policies.php>. Acesso em: 14 ago. 2024.

ELNABAWI, Mohamed H.; SABER, Esmail; BANDE, Lindita. Passive Building Energy Saving: Building Envelope Retrofitting Measures to Reduce Cooling Requirements for a Residential Building in an Arid Climate. **Sustainability**, v. 16, n. 2, p. 626, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16020626>.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Apresentação da metodologia e dos fatores de emissão utilizados para as estimativas de emissão de GHG nos planos de energia, no BEN e demais produtos da EPE**. 2022. 13 p. (Informativo Técnico n. 011/2022). Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/areas-de-atuacao/estudos-socioambientais/SiteAssets/Paginas/Emissoes-de-Gases-de-Efeito-Estufa/Informativo%20Tecnico_11-2022_fatores%20de%20emiss%C3%A3oSMA.pdf. Acesso em: 27 jun. 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2024: relatório síntese, ano base 2023**. Rio de Janeiro, 2024.

FERRAZ, Renan Teófilo; CODICEIRA, Alcides. Diversificação da Matriz de Energias Renováveis no Brasil: O Desenvolvimento das Novas Fontes de 2010 a 2016. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 4, 2017.

FU, Qiming *et al.* Applications of reinforcement learning for building energy efficiency control: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 50, p. 104165, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104165>.

HENG, Herman; MENG, Fanran; MCKECHNIE, Jon. Wind turbine blade wastes and the environmental impacts in Canada. **Waste Management**, v. 133, p. 59-70, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.032>.

HUANG, Zujian *et al.* Life-cycle carbon emissions (LCCE) of buildings: implications, calculations, and reductions. **Engineering**, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.08.019>.

ILFI – INTERNATIONAL LIVING FUTURE INSTITUTE. Living Building Challenge 4.0: A Visionary Path to a Regenerative Future. 2019. International Living Future Institute, Seattle. Disponível em: https://living-future.org/wp-content/uploads/2022/08/LBC-4_0_v14_2_compressed.pdf. Acesso em: 14 set. 2023.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 30 jun. 2024.

KOILAKOU, Eleni; HATZIGEORGIOU, Emmanouil; BITHAS, Kostas. Social and economic driving forces of recent CO₂ emissions in three major BRICS economies. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 8047, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58827-9>.

MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT. 2024. Measuring emissions: A guide for organisations: 2024 detailed guide. Wellington: Ministry for the Environment. ISBN 9781991140197.

MOREIRA, Fernanda. Avaliação do desempenho térmico de telhado verde extensivo: estudo de caso no contexto climático de Brasília. 2022. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2023.

PENG, Huaxi et al. Emission accounting and drivers in South American countries. **Applied Energy**, v. 358, p. 122528, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122528>.

PEREIRA, Eldyane Santos; SANTOS, Marcione Margarida da Silva; TARGA, Marcelo. Impactos ambientais da usina hidrelétrica de Estreito, MA–Amazonia-Brasil: uma revisão integrativa. **Revista Técnica Ciências Ambientais**, v. 1, n. 7, p. 1-12, 2023.

ROMÉRO, Marcelo de Andrade; REIS, Lineu Belico dos. Eficiência energética em edifícios. 2012. ISBN 9788520430798.

SCHULTZ, Herwin Saito; CARVALHO, Monica. Design, greenhouse emissions, and environmental payback of a photovoltaic solar energy system. **Energies**, v. 15, n. 16, p. 6098, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15166098>.

SILVA, Marcelo F. da Rocha e. Simulação energética de coberturas verdes. 2014. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2014.

SOUZA, Lidiane La Picirelli de *et al.* Life cycle assessment of prospective scenarios maximizing renewable resources in the Brazilian electricity matrix. **Renewable Energy Focus**, v. 44, p. 1-18, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.11.002>.

UKGBC – UK GREEN BUILDING COUNCIL. Operational & Embodied Carbon: Explainer Guide. 2023. Disponível em: <https://ukgbc.org/wp-content/uploads/2023/02/operational-and-embodied-carbon-1.pdf>. Acesso em: 4 jan. 2024.

UNNEWEHR, Jan Frederick *et al.* Open-data based carbon emission intensity signals for electricity generation in European countries—top down vs. bottom up

approach. **Cleaner Energy Systems**, v. 3, p. 100018, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100018>.

WIEBE, Kirsten S.; GANDY, Simon; LUTZ, Christian. Policies and consumption-based carbon emissions from a top-down and a bottom-up perspective. **Low Carbon Economy**, v. 7, n. 1, p. 21-35, 2016. <https://doi.org/10.4236/lce.2016.71003>.

YANG, Jingjing *et al.* Development of bottom-up model to estimate dynamic carbon emission for city-scale buildings. **Applied Energy**, v. 331, p. 120410, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120410>.

ZHANG, Ji *et al.* Analyzing carbon emissions and influencing factors in Chengdu-Chongqing urban agglomeration counties. **Journal of Environmental Sciences**, v. 151, p. 640-651, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.04.019>.

4 QUANTIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO COM USO DE TELHADO VERDE EM UM EDIFÍCIO UNIVERSITÁRIO

RESUMO

O setor da construção civil é responsável por grande parte das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, o que deixa evidente a necessidade da escolha criteriosa de materiais para minimizar impactos ambientais. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que permite quantificar esses e outros impactos ao longo do ciclo de vida dos materiais. Neste contexto, os telhados verdes são uma alternativa sustentável, pois contribuem para o sequestro de carbono e oferecem benefícios ambientais adicionais. Este estudo teve como objetivo quantificar as emissões incorporadas de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) em dois tipos de telhado verde (extensivo e intensivo) para um edifício universitário de salas de aula no *campus* da Universidade Federal de Viçosa, utilizando a metodologia de ACV. A modelagem e simulação foram realizadas no *software* SimaPro 9.6, utilizando o banco de dados Ecoinvent 3.10 e o método do Potencial de Aquecimento Global para um horizonte temporal de 100 anos (GWP100) para a obtenção das emissões e absorções de carbono. Os resultados indicaram que o telhado verde extensivo apresentou emissão incorporada negativa e o intensivo, positiva, devido à diferença na espessura do substrato. A vegetação foi a única camada com balanço negativo de emissões, destacando seu potencial de absorção de CO_2eq . A camada drenante, composta por argila expandida, apresentou a maior emissão dentre os processos analisados. Os resultados do estudo ressaltam a importância da escolha dos materiais na mitigação dos impactos ambientais das edificações e fornecem subsídios para a adoção de estratégias mais sustentáveis no setor da construção.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Emissão de carbono; Carbono incorporado; Cobertura verde; SimaPro.

ABSTRACT

The construction sector is responsible for a significant share of anthropogenic greenhouse gas emissions, which underscores the need for careful selection of materials to minimize environmental impacts. Life Cycle Assessment (LCA) is a tool that enables the quantification of these and other impacts throughout the lifecycle of materials. In this context, green roofs represent a sustainable alternative, as they contribute to carbon sequestration and provide additional environmental benefits. This study aimed to quantify the embodied carbon dioxide equivalent (CO_2eq) emissions of two types of green roofs (extensive and intensive) applied to a university classroom building on the campus of the Federal University of Viçosa, using LCA methodology. Modeling and simulations were conducted in SimaPro 9.6 software, using the Ecoinvent 3.10 database and the Global Warming Potential method for a 100-year time horizon (GWP100) to assess both emissions and carbon uptake. The results indicated that the extensive green roof presented negative embodied emissions, while the intensive green roof showed positive values, mainly due to differences in substrate thickness. Vegetation was the only layer with a negative emission balance, highlighting its potential for CO_2eq absorption. The drainage layer, composed of expanded clay, had the highest emissions among all analyzed components. The study's findings emphasize the importance of material selection in mitigating the environmental impacts of buildings and provide a foundation for the adoption of more sustainable strategies in the construction sector.

Keywords: Life Cycle Assessment; Carbon emission; Embodied carbon; Green roof; SimaPro.

4.1 Introdução

As emissões de gases de efeito estufa (*greenhouse gases* – GHGs) sofrem interferência da construção civil. Isso deve ser levado em consideração para a seleção criteriosa de materiais tendo em vista a mitigação dos impactos ambientais, como poluição e esgotamento de recursos (Grabasck; Carvalho, 2019; Kotaji; Schuurmans; Edwards, 2003). A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que pode ser utilizada para avaliar a sustentabilidade ambiental e para propiciar decisões conscientes, considerando todo o ciclo de vida dos materiais (ABNT, 2009; ILFI, 2019). Uma escolha considerada adequada como alternativa construtiva é a dos telhados verdes, que oferecem sequestro de carbono e benefícios climáticos (IPCC, 2022).

A arquitetura pode contribuir na redução das emissões de GHGs, uma vez que o aumento de suas emissões é diretamente relacionado ao desenvolvimento urbano e aos impactos ambientais (Grabasck; Carvalho, 2019). O projeto adequado e a escolha correta de materiais são essenciais para minimizar as cargas ambientais em uso. É possível obter informações importantes sobre aspectos ambientais de produtos por meio da ACV, que é uma das ferramentas apropriadas para a prática de construção sustentável (Kotaji; Schuurmans; Edwards, 2003).

Os materiais de construção são agentes que causam diversos impactos ambientais desfavoráveis ao longo do seu ciclo de vida, incluindo doenças, perda de habitat e espécies, poluição e esgotamento de recursos. Quando os impactos podem ser reduzidos, mas não eliminados, é necessário compensar as consequências prejudiciais associadas ao processo de construção e incentivar correções na própria indústria. A estética, a função e o custo da edificação devem ser ponderados em paralelo à especificação e à compra do material, pois estes têm impactos duradouros. Além disso, para a escolha consciente de materiais é imprescindível a transparência da indústria quanto aos seus processos produtivos (ILFI, 2019).

Diante das consequências das emissões de GHGs e da escassez de matérias-primas, o uso de recursos locais tende a intensificar e será ainda mais necessário recuperar, reutilizar ou reciclar materiais já disponíveis. Cabe aos profissionais configurar o projeto, buscando formas mais sustentáveis de obter os materiais. Para a próxima década, um modelo de crescimento regenerativo está

traçado, o qual é fundamental para reduzir a pegada de consumo e aumentar a utilização de materiais circulares. Há uma tendência de redução de matéria prima e, junto a isso, uma disponibilidade crescente de vários materiais e componentes de reutilização. Para eles será necessário atribuir novas funções, configurações e processos construtivos, concebendo soluções para prolongar a sua vida, torná-los leves para consumir menos material ou fragmentá-los mais facilmente para serem reciclados (Marrone; Montella, 2021).

Dentre as possibilidades mais impactantes para mitigar as emissões urbanas, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) (2022) cita a melhoria do sequestro de carbono pelas infraestruturas urbanas verdes e azuis, como telhados verdes, florestas urbanas e árvores nas ruas. Essa opção pode oferecer ao mesmo tempo, outros benefícios, como a redução das temperaturas do solo e a melhoria da saúde e do bem-estar públicos.

Com a ACV, pode-se avaliar a interferência do uso dos recursos e as consequências das suas liberações para o meio ambiente ao longo da vida de um produto, contabilizando desde a aquisição das matérias-primas até a disposição final. Além disso, com esta ferramenta é possível aumentar o nível de informação dos responsáveis por tomadas de decisão na indústria e nas organizações, tendo em vista o planejamento estratégico a partir de indicadores de desempenho ambiental (ABNT, 2009).

4.1.1 Carbono incorporado nos edifícios

O carbono incorporado abrange as emissões que não são operacionais, ou seja, aquelas referentes aos materiais e aos processos de construção ao longo de todo o ciclo de vida de um edifício. Isso inclui todos os processos, materiais ou produtos utilizados na fase de construção, manutenção, reparo, remodelação e demolição de um edifício (UKGBC, 2023).

Existem três possíveis subdivisões do carbono incorporado, sendo emissões iniciais, em uso e em fim de vida. O carbono incorporado inicial refere-se às emissões geradas durante as fases de produção de materiais e de construção antes do início da utilização do edifício. O carbono incorporado em uso diz respeito às emissões pelos materiais e pelos processos fundamentais para manter o edifício

durante o uso, como em reformas. O carbono incorporado em fim de vida é relativo às emissões de carbono devido à desconstrução, à demolição, ao transporte do local, ao processamento de resíduos e às fases de eliminação do ciclo de vida do edifício que sucedem a sua utilização (UKGBC, 2023).

Além do tipo de sistema, os impactos ambientais dos materiais devem ser considerados. A substituição de materiais de origem mineral, provenientes de processos industriais, por materiais de base biológica possibilita a redução nas emissões de carbono incorporado, uma vez que estes materiais armazenam carbono biogênico que pode ser suficiente para compensar as emissões (Besana; Tirelli, 2022).

A vegetação presente nos ambientes urbanos, os solos e os sistemas aquáticos podem atuar como fonte ou sumidouro do carbono da atmosfera. Durante o período de crescimento, por exemplo, parques urbanos, florestas e árvores em vias urbanas removem carbono da atmosfera através do processo de fotossíntese, enquanto em momentos como a estação de dormência ou ondas de calor, podem se tornar emissores de carbono (IPCC, 2022).

Neste contexto de elementos de base biológica, estão os telhados verdes. Este tipo de cobertura tem benefícios na redução das despesas do ciclo de vida do telhado, por ser cerca de três vezes mais duráveis do que os telhados convencionais. Também pode diminuir os resíduos gerados na construção, reduzindo os custos da obra, e reduzir a propagação do som, proporcionando isolamento devido à maior espessura do telhado. Além disso, protege e prolonga a vida útil do telhado atuando contra as altas temperaturas e as oscilações e permitem a melhoria da qualidade do ar por meio da captura de dióxido de carbono (Rasul; Arutla, 2020).

Além dos benefícios térmicos, diversos estudos de ACV comprovam que os telhados verdes apresentam menos impactos ambientais quando comparados aos telhados convencionais e aos brancos, em uma análise abrangendo outras fases além da fabricação. É válido destacar também que o consumo de energia para aquecimento e resfriamento interfere ativamente nos resultados da ACV. Entretanto, o desempenho térmico dos telhados verdes e brancos é influenciado pelo clima local, não podendo generalizar seus efeitos para todos os locais. Para reduzir os impactos ambientais dos telhados verdes, materiais alternativos podem ser usados como subprodutos ou materiais reciclados. Diversos estudos apontam que esse tipo

de cobertura tem custos mais baixos durante o ciclo de vida se os seus benefícios forem contabilizados e se for considerada toda a sua vida útil (Scolaro; Ghisi, 2022).

No estudo de Rasul e Arutla (2020) foram investigados os impactos ambientais de materiais desde a sua produção a partir de matérias-primas até os materiais de construção para vários tipos de cobertura. Com os resultados, concluíram que os impactos dos materiais utilizados para a cobertura convencional são maiores do que para as coberturas verdes. O ciclo de vida da cobertura verde é superior ao da cobertura convencional, o que indica que a substituição ou renovação do telhado verde deve ocorrer com uma periodicidade menor que a da cobertura convencional.

Esse sistema de cobertura é considerado ecologicamente correto por apresentar ainda outros benefícios ambientais. Como forma de reduzir ainda mais os impactos ambientais, pode-se evitar a extração de matéria prima e o descarte dos materiais com o uso de materiais reciclados (Shafique *et al.*, 2020).

Os telhados verdes podem ser extensivos, com profundidade rasa de solo ou intensivos, com maior profundidade de solo, oferecendo suporte a vegetação de tipos e tamanhos variados (Weiler; Scholz-Barth, 2009). Os sistemas intensivos são mais recomendados em termos ambientais por apresentarem impactos ambientais inferiores aos impactos causados pelos extensivos em varias categorias de efeitos ambientais, isso para o ciclo de vida de 25 anos dos telhados verdes. Embora os dois tipos de telhado verde tenham impactos ambientais comparáveis, os telhados verdes intensivos têm um desempenho um pouco melhor (Rasul; Arutla, 2020).

4.1.2 Avaliação do Ciclo de Vida

A ACV é uma metodologia eficaz para analisar o impacto ambiental de um produto ao longo de todas as fases de sua existência, abrangendo desde a extração de matérias-primas, os processos de fabricação, distribuição e uso, até o descarte final (Barsano; Barbosa, 2017).

Conforme Shafique *et al.* (2020), recentemente, a ACV tem ganhado adeptos em todas as áreas, por ajudar na tomada de decisões. Essa avaliação colabora na promoção e na adaptação de práticas e produtos verdes para o desenvolvimento sustentável em todo o mundo. Sabe-se que a maioria dos modelos de ACV é desenvolvida pelos países da União Europeia.

As emissões de GHGs obtidas em uma ACV são referentes às mudanças climáticas. O IPCC determina os fatores que caracterizam essas emissões e eles são apresentados em kg CO₂/kg emissão, como Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential – GWP*) para um horizonte temporal 100 anos. Considera-se o contexto geográfico em escala global para este indicador (PRé Sustainability, 2024).

Para cada GHG, é atribuído um GWP, o qual permite a comparação dos impactos de diferentes gases no aquecimento global. Esse índice mede a quantidade de energia que as emissões de 1 tonelada de um gás irão absorver ao longo de um período, geralmente de 100 anos, em comparação com as emissões de 1 tonelada de dióxido de carbono (CO₂). Gases com um GWP mais elevado absorvem mais energia, contribuindo de forma mais ativa para o aquecimento global (EPA, 2024).

A NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) indica as quatro fases que compõem um estudo de ACV, sendo: (i) definição de objetivo e escopo, (ii) análise do inventário, (iii) avaliação de impacto e (iv) interpretação (Figura 4.1). A primeira fase da ACV, definição de objetivo e escopo, envolve a definição do objetivo do estudo e do escopo da análise. Isso inclui determinar o que será avaliado, as fronteiras do sistema e a unidade funcional que será utilizada. Essa fase orienta todas as etapas seguintes da avaliação e também considera a aplicação pretendida dos resultados e as delimitações para o contexto em análise.

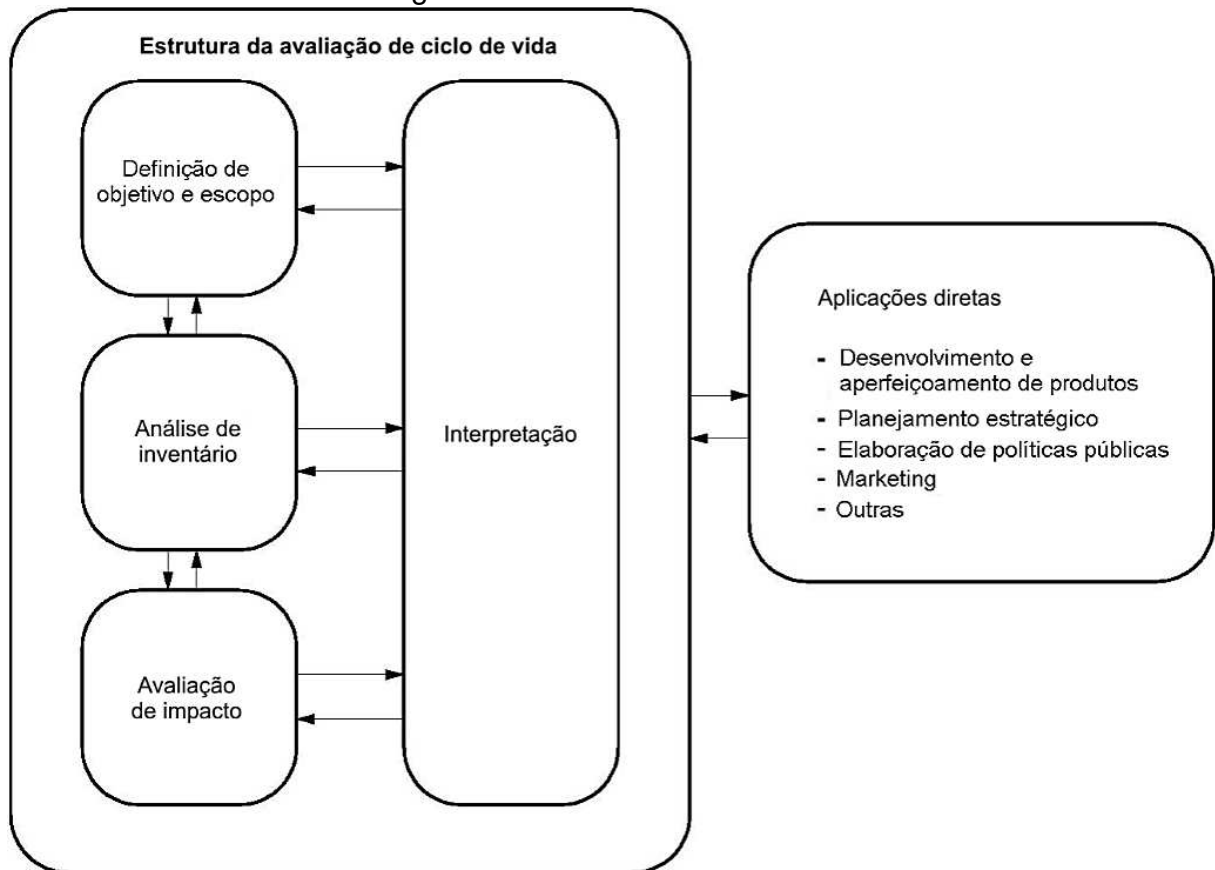
Na segunda fase, análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), realiza-se a coleta de dados e a seleção de procedimentos para a quantificação das entradas e saídas de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida. Dentre os dados, estão o consumo de recursos, as emissões e os resíduos gerados. A etapa de cálculo inclui validação dos dados, correlação dos dados aos processos, aos fluxos de referência e à unidade funcional definida para o sistema de produto (ABNT, 2009).

Na terceira fase, Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), os dados do inventário são analisados para entender a grandeza e a significância dos impactos ambientais potenciais associados ao sistema de produto. Essa fase envolve a escolha das categorias de impacto ambiental que serão analisadas e seus respectivos indicadores e modelos de caracterização, a correlação dos resultados da análise do inventário às categorias de impacto específicas e o cálculo quantitativo

dos impactos em cada categoria, utilizando os modelos de caracterização (ABNT, 2009).

A fase final é a interpretação do ciclo de vida, na qual os resultados da análise de inventário e da avaliação de impacto são integrados e discutidos. O objetivo é chegar a conclusões e recomendações que sejam coerentes com o objetivo e o escopo definidos inicialmente. A interpretação é importante para garantir que as decisões tomadas sejam informadas e que os resultados sejam apresentados de forma clara e compreensível. Essa fase permite revisões e ajustes com base nas descobertas feitas nas fases anteriores (ABNT, 2009).

Figura 4.1 – Fases de uma ACV



Fonte: ABNT (2009).

4.1.3 Ferramentas computacionais para a ACV

A crescente busca por edifícios sustentáveis tem incentivado proprietários a considerarem a eficiência energética e os impactos ambientais de suas construções. As construções sustentáveis podem favorecer a sua comercialização além de ser

uma estratégia de negócio (Sacks *et al.*, 2021). A ACV é uma ferramenta utilizada no desenvolvimento de edifícios de carbono zero líquido. Para essas edificações, estratégias para minimizar as emissões de carbono incorporadas em todas as etapas do ciclo de vida dos materiais devem ser consideradas desde os estágios iniciais. As etapas incluem produção, fornecimento, transporte, construção, manutenção e fim de vida útil. A redução ou reutilização de materiais deve ser priorizada, favorecendo o reaproveitamento e a reciclagem sempre que possível (Besana; Tirelli, 2022).

Apesar do aumento no uso dessas abordagens sustentáveis, as ACVs ainda não são adotadas amplamente no processo de projeto e construção e são ainda menos aderidas em processos de projetos integrados (MccorD *et al.*, 2024). Para o processo de construção, podem ser utilizadas ferramentas que funcionam de forma independente ou então, ferramentas que se integram ao ambiente de Modelagem de Informação da Construção (*Building Information Modeling – BIM*), promovendo uma abordagem holística e multidisciplinar ao longo do ciclo de construção, com uma transferência de informações de forma eficiente entre as partes envolvidas (Besana; Tirelli, 2022).

De acordo com Sacks *et al.* (2021), modelos de edificações feitos em BIM oferecem benefícios em comparação a desenhos 2D, por proporcionarem informações detalhadas sobre os elementos construtivos que possibilitam análises energéticas e ambientais. Além disso, o BIM promove uma nova abordagem para o uso da tecnologia da informação no planejamento e gestão do ciclo de vida de edificações, envolvendo setores como mercado imobiliário, financiamento, engenharia, arquitetura, fabricação, manutenção, operação e planejamento, seguimento aos regulamentos, sustentabilidade e descarte durante o ciclo de vida da edificação.

O modelo BIM permite integrar modelos construtivos a ferramentas de análise energética, viabilizando esse tipo de avaliação em estágios iniciais do projeto, o que é menos viável com ferramentas 2D devido à complexidade e ao tempo demandado para preparação dos dados. Essa integração proporciona maior flexibilidade para otimizações no desempenho energético e melhorias na qualidade das construções. Utilizando ferramentas 2D, a análise energética é realizada apenas no final do projeto, para verificação ou para cumprimento de requisitos normativos, o que limita as possibilidades de realizar alterações que poderiam otimizar o desempenho

energético da edificação na fase de projeto (Sacks *et al.*, 2021).

Para McCord *et al.* (2024), uma limitação dessas ferramentas para ACV é a composição de seus bancos de dados em relação a materiais inovadores ou mesmo a alguns elementos básicos. Nesses casos, para uma avaliação com materiais experimentais, deve-se buscar fontes externas e avaliar a confiabilidade dos dados disponíveis para materiais emergentes ou menos documentados.

Um *software* amplamente utilizado é o SimaPro, o qual é muito utilizado no setor de ACV, por integrar o banco de dados Ecoinvent, pela disponibilidade de uma licença educacional e por ter uma interface intuitiva (Farias *et al.*, 2023). Este *software* permite a modelagem de produtos e sistemas de processos complexos. Nele é possível criar modelos com vários processos interligados, possibilitando definir com precisão os limites do sistema e compatibilizando uma ampla entrada de dados, como matérias-primas, consumo de energia, emissões e produção de resíduos. Possibilita acesso a bases de dados com uma grande quantidade de dados normalizados (Batgi; Dincer, 2024). Esse *software*, embora não seja BIM, permite maior flexibilidade para modelagem de uma ACV.

4.1.4 Objetivos

Este estudo teve como objetivos (i) quantificar o CO₂eq emitido durante o ciclo de vida de dois telhados verdes, um extensivo e outro intensivo, desde a fase de berço até a entrega ao consumidor e (ii) identificar se essa solução construtiva pode reduzir as emissões ao longo do seu ciclo de vida definido.

4.2 Material e métodos

A metodologia é composta por duas etapas: a primeira consiste na criação de composições das camadas dos telhados verdes do edifício universitário para a ACV. A segunda parte é referente à análise do carbono incorporado nessas coberturas emitido em um período de 100 anos. A metodologia adotada utiliza de um *software* com seu banco de dados para gerar resultados de diferentes categorias de impacto ambiental baseadas no GWP para os processos do ciclo de vida dos telhados a fim de obter a emissão de cada um deles.

4.2.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo consiste no Pavilhão de Aulas II (PVB) (Figura 4.2), localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil. Trata-se de uma edificação destinada ao uso acadêmico, composta por três pavimentos que contêm salas de aula. Este edifício apresenta características arquitetônicas e funcionais próprias de estruturas utilizadas para atividades de ensino superior.

Figura 4.2- Pavilhão de Aulas II



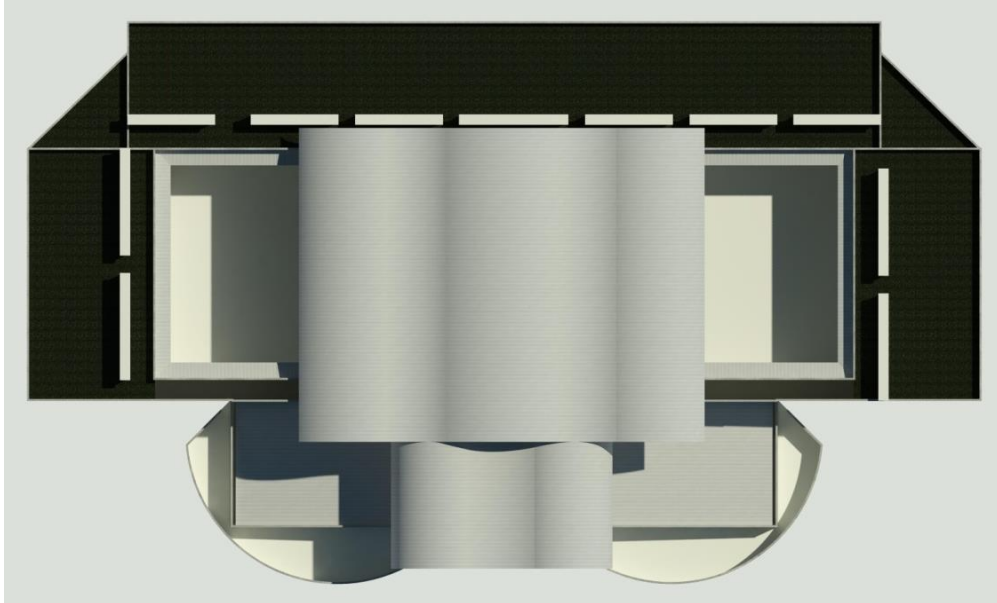
Fonte: Google (2024). Adaptada pela autora.

4.2.2 Quantificação do carbono incorporado

A quantificação de carbono incorporado pelo telhado verde foi realizada através da metodologia de gestão ambiental de ACV, normatizada pela ABNT NBR ISO 14040:2009 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura e pela ABNT NBR ISO 14044:2009 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

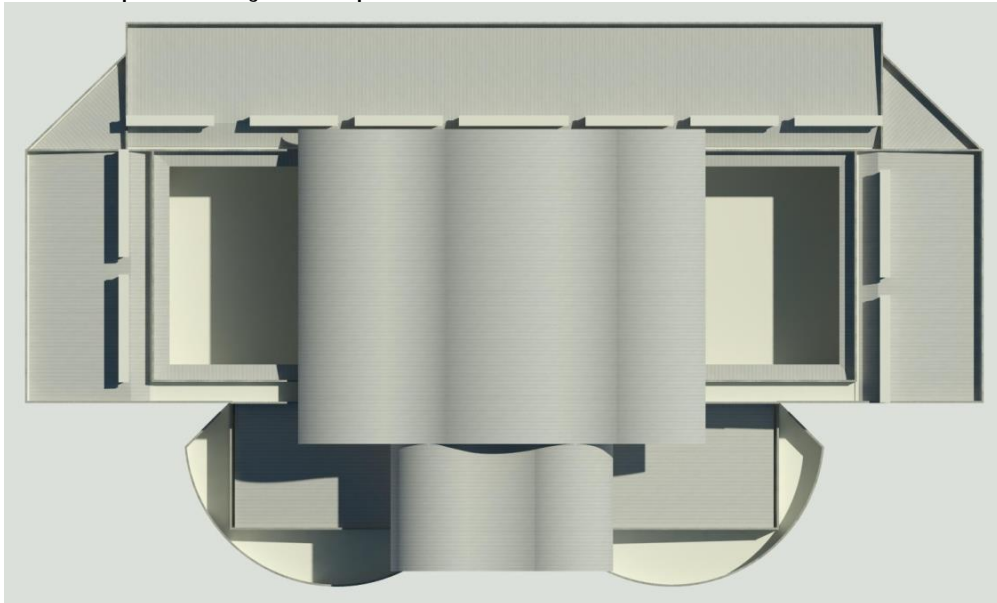
Foram avaliados dois tipos de telhado verde (Figura 4.3) em substituição à cobertura de telha existente (Figura 4.4) acima da laje das salas de aula. Um telhado verde foi extensivo e outro, intensivo. Para a modelagem e simulação dos cenários e obtenção da pegada de carbono, foi utilizado o *software* SimaPro 9.6 junto ao banco de dados Ecoinvent 3.10, já inserido no *software*.

Figura 4.3 – Representação simplificada cobertura existente com telhas metálicas e do telhado verde sobre as lajes das salas



Fonte: própria autora.

Figura 4.4 – Representação simplificada da cobertura existente com telhas metálicas



Fonte: própria autora.

4.2.3 Objetivo e escopo

Na primeira fase, definiu-se o objetivo, sendo este quantificar os impactos ambientais no que diz respeito ao dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) por dois casos de telhado verde, descritos no capítulo 2, para sua posterior avaliação e comparação.

O escopo foi definido para a unidade funcional de 1 m² do telhado verde em uma abordagem cuja fronteira do sistema estabelecida foi de berço à entrega do material, dessa forma, incluindo desde a extração de matéria-prima, produção e transporte até seu fornecimento consumidor, considerando o transporte com as configurações padrões do *software*. O escopo não abrange as demais fases do ciclo de vida após o fornecimento do material.

4.2.4 Análise do inventário

Para a segunda fase, foram selecionadas duas bibliotecas para estruturar o inventário. O inventário foi desenvolvido utilizando dados secundários do banco de dados Ecoinvent 3.10 para todas as entradas. Os bancos de dados aplicados foram: (i) *Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - unit* e (ii) *Methods*. A biblioteca Ecoinvent 3 abrange dados de inventário de ciclo de vida de diversos setores, como produção de energia, transporte, materiais de construção, produção de produtos químicos, produção de metais, frutas e vegetais. Reúne mais de 20000 conjuntos de dados interligados, cada qual descrito por um inventário do ciclo de vida em nível de processo. Os processos unitários são ligados a outros processos. A biblioteca *Methods* inclui vários métodos de avaliação de impacto, nesta versão, com atualização em 2024 (PRé Sustainability, 2024).

A modelagem do sistema foi limitada de berço ao fornecimento ao consumidor. É válido ressaltar que para os dois telhados verdes utilizaram-se os mesmos processos, mas alterando seus quantitativos quando necessário. O critério de escolha da localização dos dados foi do país em questão (Brasil – BR), global (GLO) e do resto do mundo (RoW), nesta ordem de preferência de acordo com a disponibilidade do banco de dados.

A ACV foi desenvolvida para os materiais que compõem as camadas de um telhado verde, sendo aqui representadas por: vegetação, substrato, camada filtrante, camada drenante, proteção antirraízes e barreira impermeabilizante. Dentre os processos disponíveis no banco de dados Ecoinvent, foram escolhidos os processos que fossem semelhantes às camadas do telhado verde. Os tipos de processo escolhidos incluem o processo de fabricação e o transporte (*Market*). O transporte foi adotado com as configurações padrões do *software*.

Somente para a camada de vegetação foi criado um novo processo composto

por outros dois existentes. O nome dado ao novo processo foi “Grass {GLO}| market | Cut-off, U”, conforme descrito no Quadro 1 para a camada de vegetação. Os sub-processos que o compõem são: “Grass, organic {RoW}| grass production, permanent grassland, organic, extensive | Cut-off, U” (1 kg) e “Transport, freight, lorry, unspecified {GLO}| market group for transport, freight, lorry, unspecified | Cut-off, U” (0,13333333333333 tkm), este último conforme existe no processo “Grass, organic {GLO}| market for grass, organic | Cut-off, U”. O primeiro é encontrado na categoria Material > Agricultural > Animal feed e o segundo, na categoria Transporte > Road.

No subprocesso “Grass, organic {RoW}| grass production, permanent grassland, organic, extensive | Cut-off, U” foram excluídas duas entradas conhecidas da esfera tecnológica referentes à silagem da grama: “Fodder loading, by self-loading trailer {GLO}| market for fodder loading, by self-loading trailer | Cut-off, U” e “Mowing, by rotary mower {GLO}| market for mowing, by rotary mower | Cut-off, U”.

O Quadro 4.1 mostra a correspondência das camadas e seus respectivos materiais, categorias dos processos e processos selecionados.

Quadro 4.1 – Camadas e materiais dos telhados verdes e processos do SimaPro

Camada	Material	Categoria do processo	Processo
Vegetação	Grama	-	1 – Grass {GLO} market Cut-off, U
Substrato	Argila	Material > Minerals	2 – Clay {RoW} market for clay Cut-off, U
	Areia		3 – Sand {BR} market for sand Cut-off, U
Camada filtrante	Polipropileno não tecido	Material > Textiles	4 – Textile, nonwoven polypropylene {GLO} market for textile, nonwoven polypropylene Cut-off, U
Camada drenante	Argila expandida	Material > Minerals	5 – Expanded clay {GLO} market for expanded clay Cut-off, U
Proteção antirraízes	Polipropileno não tecido	Material > Textiles	6 – Textile, nonwoven polypropylene {GLO} market for textile, nonwoven polypropylene Cut-off, U

Fonte: própria autora.

Quadro 4.1 – Camadas e materiais dos telhados verdes e processos do SimaPro (continuação)

Barreira impermeabilizante	Adesivo betuminoso, frio	Material > Construction > Sealing	7 – Bitumen adhesive compound, cold {GLO} market for bitumen adhesive compound, cold Cut-off, U
----------------------------	--------------------------	-----------------------------------	---

Fonte: própria autora.

A entrada do quantitativo de cada processo é em kg. Foi extraída a densidade e a espessura utilizadas nas camadas da simulação termoenergética no EnergyPlus do capítulo 2, no qual foi analisada a influência térmica e a eficiência energética do edifício com sua cobertura atual e com quatro casos de telhado verde. A densidade e a espessura foram multiplicadas para obter as quantidades em kg para a área de 1 m² de telhado verde. Uma exceção foi para a densidade da vegetação, a qual foi atribuído um valor de uma produtora e vendedora de grama natural, Agro gramas (www.agrogramas.com.br/grama-esmeralda). As variáveis são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Quantitativo dos processos

Processo	Unidade	Densidade	Unidade	Espessura	Unidade	Telhado verde extensivo (kg/m ²)	Telhado verde intensivo (kg/m ²)
1	kg	23	kg/m ²	-	m	23	23
2	kg	1100	kg/m ³	0,075 e 0,35	m	82,5	385
3	kg	1100	kg/m ³	0,075 e 0,35	m	82,5	385
4	kg	160	kg/m ³	0,005	m	0,8	0,8
5	kg	800	kg/m ³	0,06	m	48	48
6	kg	160	kg/m ³	0,005	m	0,8	0,8
7	kg	1200	kg/m ³	0,007	m	8,4	8,4

Fonte: própria autora.

Embora o banco de dados disponível para esta pesquisa não ofereça informações específicas sobre as camadas de um telhado verde, é possível realizar uma análise qualitativa e quantitativa aproximada dos impactos ambientais. Através dessa abordagem, é possível obter uma visão geral das tendências dos efeitos dos

materiais, inclusive os de origem biológica, permitindo uma comparação com as informações encontradas na literatura.

Mesmo as quantidades de emissões de CO₂eq não sendo exatas, a análise permite identificar como as diferentes camadas influenciam o impacto total, permitindo uma compreensão do comportamento ambiental dos materiais de acordo com suas origens e características. Além do mais, essa metodologia pode servir para direcionar pesquisas mais específicas, além de oferecer uma visão sobre as implicações ambientais dos telhados verdes.

4.2.5 Avaliação de impacto

Na terceira fase, realizou-se a avaliação do impacto ambiental considerando todo o CO₂eq incorporado ao longo de um ciclo de vida de 100 anos. Os impactos foram calculados por meio do método “IPCC 2021 GWP100 (inc. CO₂ uptake)”, desenvolvido pelo IPCC.

O método inclui os fatores de GWP do IPCC para um horizonte de 100 anos, recomendados como padrão pelo UNEP-GLAM (2017). Esta versão do método considera a captação de CO₂ e as emissões biogênicas, permitindo calcular os resultados de emissões: fóssil, CO₂ biogênico, transformação da terra e de captação de CO₂ (PRé Sustainability, 2024). Esse método foi selecionado por sua relevância ambiental e sua relação com os objetivos deste estudo.

O GWP é uma das métricas mais conhecidas e se tornou padrão para converter as emissões de diferentes gases em uma escala comum. O GWP com horizonte temporal de 100 anos, definido pelo IPCC, foi adotado como referência na UNFCCC para a implementação da abordagem multigás e, posteriormente, com o Protocolo de Quioto, foi viabilizada e garantida sua aplicação (UNFCCC, s.d.).

Os processos de infraestrutura e emissões de longo prazo também foram considerados. Após o processamento, foi analisado o impacto ambiental em emissões incorporadas de CO₂eq de cada processo, de cada categoria de impacto (fóssil, biogênico, transformação da terra e absorção de CO₂) e de cada telhado, resultantes dos processos adicionados na composição do ciclo de vida dos casos de telhado verde.

4.2.6 Interpretação

Para a quarta fase, o resultado de emissões em kg CO₂eq foi obtido para cada m² de telhado verde, abrangendo os GHGs presentes no ciclo de vida do telhado verde de cada caso por categoria de impacto e por processo. A quantificação de emissões totais, para toda a área de telhado verde, foi obtida pelo produto das emissões unitárias e da área total.

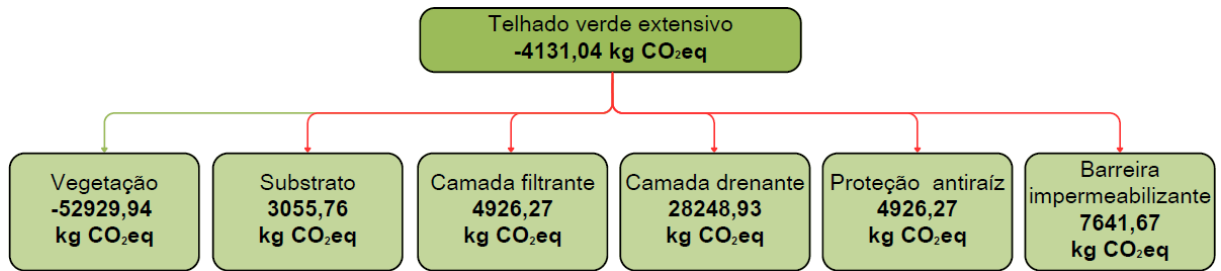
Os resultados foram discutidos de forma a identificar o nível de impacto de cada um dos casos para compará-los. Além disso, foi avaliado o quanto cada processo contribui para a emissão e absorção de CO₂eq.

4.3 Resultados e discussão

Os resultados refletem o impacto ambiental de cada categoria de impacto para cada processo. Os impactos mensurados foram em termos de emissões incorporadas de CO₂eq para um horizonte temporal de 100 anos. A investigação englobou as emissões incorporadas por cada um dos dois tipos de telhado verde, por cada uma de suas categorias de impacto e pelos processos que compõem sua estrutura. A análise também se voltou para o carbono que pode ser absorvido em cada processo.

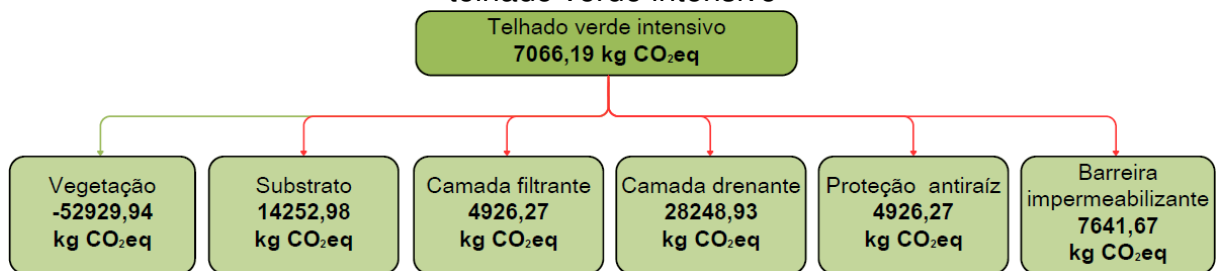
A área total do telhado é de 1440,59 m². Os resultados por unidade de área foram convertidos em emissões totais. O total de emissões do telhado verde extensivo foi negativo (-4131,04 kg CO₂eq) e do telhado verde intensivo, positivo (7066,19 kg CO₂eq), ou seja, o primeiro absorveu mais carbono do que emitiu até a fase determinada do ciclo de vida dos seus componentes. Os diagramas das Figuras 4.5 e 4.6 indicam as emissões por processo do telhado verde extensivo e intensivo, respectivamente. O único processo com balanço negativo foi da vegetação. Em ambos os tipos de telhado, o que diferiu foi apenas a emissão do substrato, pela variação de sua espessura.

Figura 4.5 – Diagrama de contribuição de cada processo para as emissões totais do telhado verde extensivo



Fonte: própria autora.

Figura 4.6 – Diagrama de contribuição de cada processo para as emissões totais do telhado verde intensivo



Fonte: própria autora.

De acordo com Jancovic (2024), materiais de construção de origem biológica, como madeira, palha e cânhamo industrial, possuem emissões negativas incorporadas devido ao sequestro de dióxido de carbono durante o crescimento das plantas. No entanto, esses materiais ainda causam emissões positivas durante seus processos de extração, fabricação, transporte e uso na construção. Essas emissões podem ser diminuídas, equilibradas ou negativas pelo efeito de absorção de carbono. A utilização desses materiais de origem biológica torna mais fácil a construção de edifícios carbono zero.

A absorção de carbono por cada processo do telhado verde extensivo e intensivo também se diferiu apenas para a camada de substrato. A porcentagem da absorção por processo é mostrada na Tabela 4.2 para ambos os telhados.

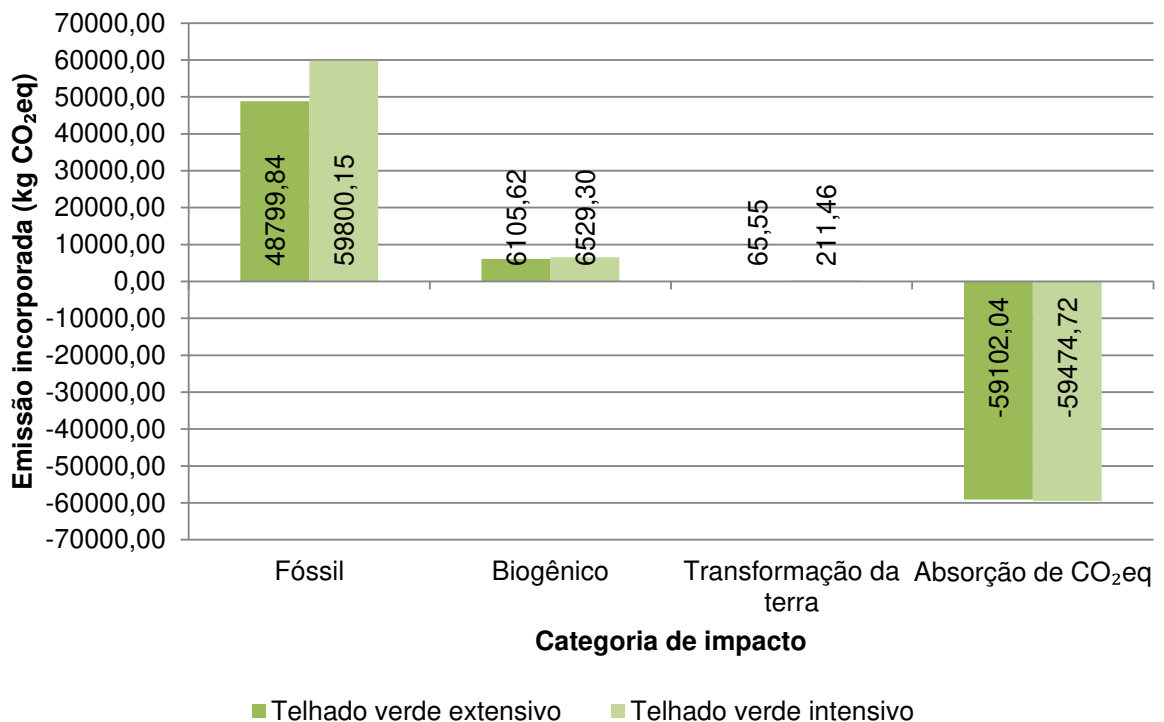
Tabela 4.2 – Absorção por processo (kg CO₂eq)

Camada/processo	Vegetação	Substrato	Camada filtrante	Camada drenante	Proteção antirraízes	Barreira impermeabilizante
Telhado verde extensivo	-91,16%	-0,17%	-0,13%	-8,26%	-0,13%	-0,14%
Telhado verde intensivo	-90,59%	-0,80%	-0,13%	-8,21%	-0,13%	-0,14%

Fonte: própria autora.

As emissões totais por categoria de impacto para cada telhado verde são mostradas na Figura 4.7. Para ambos os telhados, a maior emissão foi de carbono fóssil, sendo de 48799,84 kg CO₂eq para o extensivo e de 59800,15 kg CO₂eq para o intensivo. A menor emissão foi de transformação da terra, sendo de 65,55 kg CO₂eq para o extensivo e de 211,46 kg CO₂eq para o intensivo. A absorção de carbono se mostrou com um valor expressivo para os dois.

Figura 4.7 – Emissão incorporada por categoria de impacto



Fonte: própria autora.

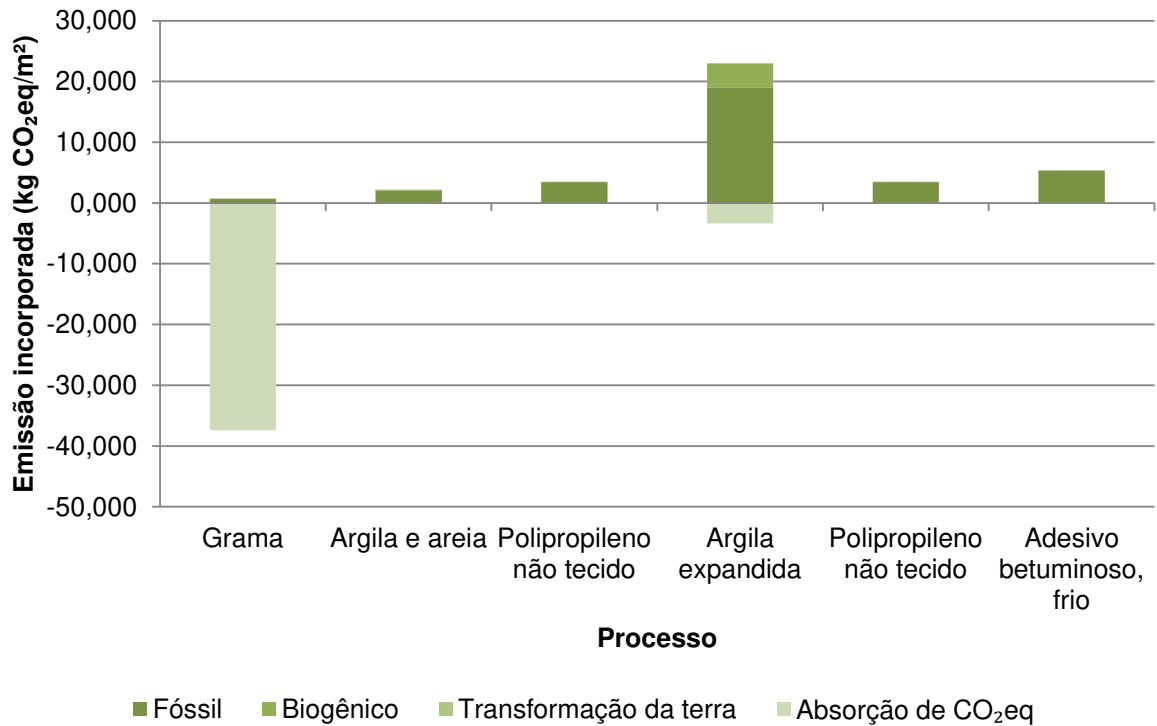
As emissões de CO₂ de origem fóssil ocorrem devido à decomposição de compostos de carbono fóssil através de combustão ou outros processos de oxidação. Esses compostos estão em sua maioria na forma de combustíveis fósseis, por exemplo, carvão, petróleo e gás natural (Andrew, 2020).

O carbono biogênico corresponde ao carbono que é capturado da atmosfera durante o crescimento da biomassa, podendo ser liberado novamente para a atmosfera futuramente, como resultado da combustão da biomassa ou da decomposição de materiais orgânicos (Stamford, 2020).

Já o carbono pela transformação do uso da terra se refere às alterações ocorridas pelo seu uso, principalmente em áreas agrícolas, florestais, pastagens, terras para construção e bacias hidrográficas, sendo sua intensidade um indicador das transformações territoriais de forma integrada e sistêmica (Li, 2024).

Nas Figuras 4.8 e 4.9, pode-se perceber a proporção de carbono emitido e absorvido pelos processos das camadas. As Tabelas 4.3 e 4.4 auxiliam na compreensão dos valores dos gráficos. A grama foi o material que mais absorveu carbono. Para o telhado extensivo, a argila expandida foi o processo que mais emitiu acompanhada do adesivo betuminoso, do polipropileno não tecido de cada camada, da argila e areia e da grama. Para o telhado intensivo, a argila expandida teve a maior emissão, acompanhada da argila e areia, do adesivo betuminoso, do polipropileno não tecido de cada camada e da grama.

Figura 4.8 – Emissão incorporada por processo e por categoria de impacto para o telhado verde extensivo (kg CO₂eq/m²)



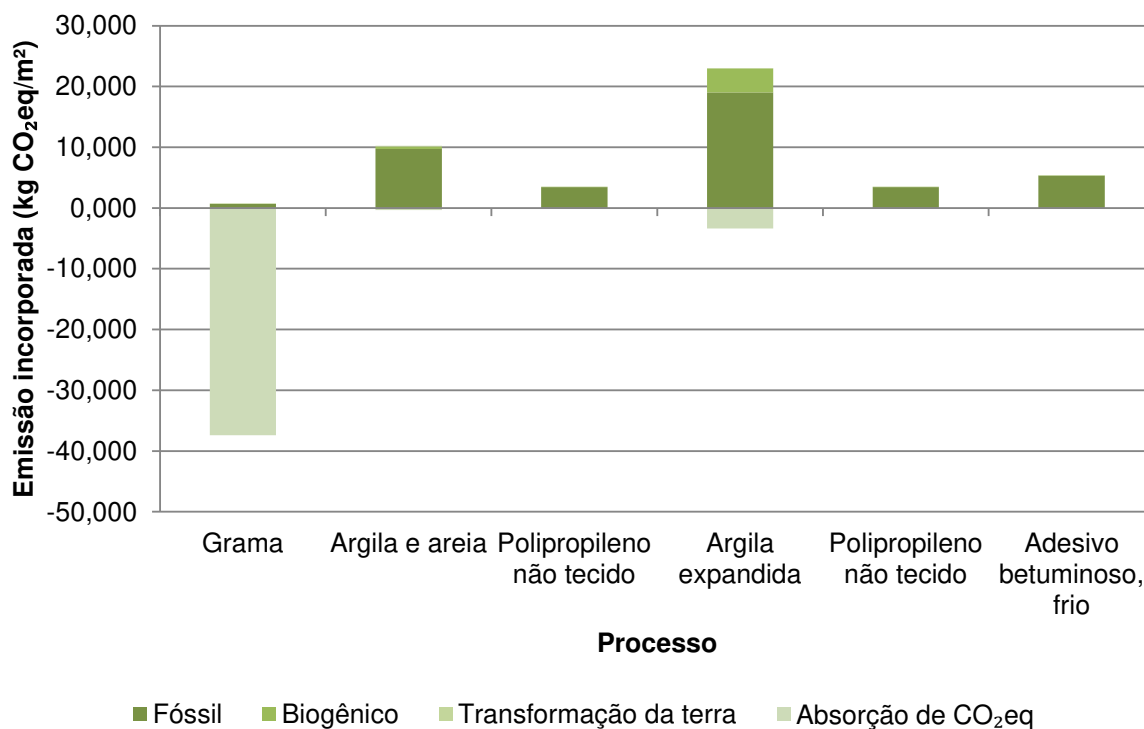
Fonte: própria autora.

Tabela 4.3 – Emissão incorporada por processo e por categoria de impacto para o telhado verde extensivo (kg CO₂eq/m²)

	Grama	Argila e areia	Polipropileno não tecido	Argila expandida	Polipropileno não tecido	Adesivo betuminoso, frio
Fóssil	0,651	2,084	3,420	19,000	3,420	5,300
Biogênico	0,005	0,080	0,052	3,990	0,052	0,060
Transformação da terra	0,002	0,028	0,002	0,009	0,002	0,002
Absorção de CO ₂ eq	-37,400	-0,071	-0,054	-3,390	-0,054	-0,058

Fonte: própria autora.

Figura 4.9 – Emissão incorporada por processo e por categoria de impacto para o telhado verde intensivo (kg CO₂eq/m²)



Fonte: própria autora.

Tabela 4.4 – Emissão incorporada por processo e por categoria de impacto para o telhado verde intensivo (kg CO₂eq/m²)

	Grama	Argila e areia	Polipropileno não tecido	Argila expandida	Polipropileno não tecido	Adesivo betuminoso, frio
Fóssil	0,651	9,720	3,420	19,000	3,420	5,300
Biogênico	0,005	0,374	0,052	3,990	0,052	0,060
Transformação da terra	0,002	0,129	0,002	0,009	0,002	0,002
Absorção de CO ₂ eq	-37,400	-0,329	-0,054	-3,390	-0,054	-0,058

Fonte: própria autora.

Grazieschi, Asdubrali e Thomas (2021) destacam que os materiais naturais podem apresentar uma competitividade em relação aos materiais tradicionais de origem fóssil ou mineral devido à inclusão de carbono biogênico. Isso geralmente resulta em um menor GWP e, em alguns casos, os valores podem ser até mesmo negativos, considerando a captura de dióxido de carbono durante o crescimento da

matéria-prima. No entanto, o carbono armazenado é liberado na atmosfera quando o material é queimado ou descartado no fim de sua vida útil.

4.4 Conclusões

Este estudo analisou as emissões incorporadas de CO₂eq de dois tipos de telhado verde, um extensivo e um intensivo, utilizando a metodologia de ACV normatizada pela ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009. A modelagem e a simulação foram realizadas no *software* SimaPro 9.6, considerando o banco de dados Ecoinvent 3.10 para a quantificação das emissões e absorções de carbono ao longo de 100 anos.

Os resultados demonstraram que o telhado verde extensivo apresentou emissão incorporada negativa, enquanto o intensivo teve um saldo de emissão positivo, o que está diretamente relacionado à espessura do substrato utilizado. Além disso, a vegetação foi o único processo com balanço negativo de carbono, ou seja, responsável pela maior absorção de CO₂eq. Esta situação está em acordo com estudos anteriores sobre o papel de materiais de origem biológica na mitigação de impactos ambientais nas edificações.

A camada drenante, composta por argila expandida, resultou em maior emissão comparada às outras camadas. Esse fato evidencia a importância de uma escolha de materiais que leve em conta suas especificações técnicas no desempenho ambiental das construções. Isso buscando alternativas para substituir materiais por outros que gerem menos emissões, ou até mesmo, possam absorvê-las.

Dessa forma, este estudo fornece uma base quantitativa para o aprimoramento de estratégias visando à sustentabilidade ambiental das edificações, podendo servir como referência para futuras pesquisas sobre a implementação de telhados verdes.

É recomendável que estudos futuros realizem a ACV de telhados verdes utilizando materiais que melhor representem a vegetação real e diferenciando a vegetação dos sistemas extensivo e intensivo. Para isso, sugere-se a inclusão de um inventário da vegetação no *software*, visando obter resultados mais precisos. De forma complementar, é recomendada a realização da ACV considerando todo o ciclo de vida para uma avaliação global dos impactos dos telhados verdes.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

AGRO GRAMAS. **Gramma Esmeralda**. Disponível em: <https://www.agrogramas.com.br/gramma-esmeralda>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ANDREW, R. M. A comparison of estimates of global carbon dioxide emissions from fossil carbon sources. **Earth System Science Data**, v. 12, n. 2, p. 1437-1465, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-12-1437-2020>.

BARSANO, Paulo R.; BARBOSA, Rildo P. **Gestão Ambiental**. Rio de Janeiro: Érica, 2017. p.99. ISBN 9788536521596.

BATGI, Sibel Uygun; DINCER, Ibrahim. A study on comparative environmental impact assessment of thermochemical cycles and steam methane reforming processes for hydrogen production processes. **Computers & Chemical Engineering**, v. 180, p. 108514, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108514>.

BESANA, Daniela; TIRELLI, Davide. Reuse and retrofitting strategies for a net zero carbon building in Milan: An analytic evaluation. **Sustainability**, v. 14, n. 23, p. 16115, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142316115>.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Understanding Global Warming Potentials**. 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>. Acesso em: 1 jan. 2025.

FARIAS, Lidianne do Nascimento *et al.* ACV de materiais cimentícios suplementares e agregados reciclados: uma revisão sistemática. **Mix Sustentável**, v. 9, n. 3, p. 67-81, 2023. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n3.67-81>.

GRABASCK, Jaqueline Ramos; CARVALHO, Agatha Muller de. **Arquitetura sustentável**. Porto Alegre: Grupo A, 2019. ISBN 9788533500105.

GRAZIESCHI, Gianluca; ASDUBRALI, Francesco; THOMAS, Guilhem. Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review. **Cleaner Environmental Systems**, v. 2, 100032, jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100032>.

GOOGLE. 2024. Google Maps. Disponível em: [https://www.google.com.br/maps/place/Pavilh%C3%A3o+de+Aulas+II+\(PVB\)/@-20.7636589,-42.868928,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0xa367f9b379c651:0x9344f25f0632e34d!8m2!3d-20.7636639!4d-42.8663531!16s%2Fg%2F1pzs8lx62?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDIwMi4wIKXMDS](https://www.google.com.br/maps/place/Pavilh%C3%A3o+de+Aulas+II+(PVB)/@-20.7636589,-42.868928,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0xa367f9b379c651:0x9344f25f0632e34d!8m2!3d-20.7636639!4d-42.8663531!16s%2Fg%2F1pzs8lx62?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDIwMi4wIKXMDS)

oJLDEwMjExMjM0SAFQAw%3D%3D. Acesso em: 04 fev. 2025.

ILFI – INTERNATIONAL LIVING FUTURE INSTITUTE. **Living Building Challenge 4.0: A Visionary Path to a Regenerative Future**. 2019. International Living Future Institute, Seattle. Disponível em: https://living-future.org/wp-content/uploads/2022/08/LBC-4_0_v14_2_compressed.pdf. Acesso em: 14 set. 2023.

IPCC – Intergovernmental panel on climate change. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 30 jun. 2024.

JANCOVIC, Ljubomir. **Designing Zero Carbon Buildings: Embodied and Operational Emissions in Achieving True Zero**. 3. ed. Abingdon: Routledge, 2024. ISBN 9781032378701.

KOTAJI, Shpresa; SCHUURMANS, Agnes; EDWARDS, Suzy (Ed.). **Life-Cycle Assessment in Building and Construction: A state-of-the-art report**, 2003. Setac, 2003. ISBN 1880611597.

LI, Shuoshuo; LIU *et al.* Carbon surplus or carbon deficit under land use transformation in China? **Land Use Policy**, v. 143, p. 107218, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107218>.

MARRONE, Paola ; MONTELLA, Ilaria. Material Efficiency design strategies for the circular transition. **TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment**, p. 86-95, 2021. <https://doi.org/10.36253/techne-10601>.

MCCORD, Kieren H. *et al.* Strategies for connecting whole-building LCA to the low-carbon design process. **Environmental Research: Infrastructure and Sustainability**, v. 4, n. 1, p. 015002, 2024. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad17ce>.

PRÉ SUSTAINABILITY. **SimaPro 9.6: Software for Life Cycle Assessment**. 2024.

RASUL, M. G.; ARUTLA, L. K. R. Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment. **Energy Reports**, v. 6, p. 503-508, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.015>.

SACKS, Rafael, *et al.* Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2021.

SCOLARO, Taylana Piccinini; GHISI, Enedir. Life cycle assessment of green roofs: A literature review of layers materials and purposes. **Science of The Total Environment**, v. 829, p. 154650, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154650>.

SHAFIQUE, Muhammad *et al.* An overview of life cycle assessment of green roofs. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, p. 119471, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119471>

STAMFORD, Laurence. Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida no setor energético. In: **Biomassa e biocombustíveis para um futuro mais sustentável**. Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida e Tomada de Decisão Multicritério. Elsevier, 2020. p. 115-163. DOI: 10.1016/B978-0-12-815581-3.00005-1.

UKGBC – UNITED KINGDOM GREEN BUILDING COUNCIL. **Operational & Embodied Carbon**: Explainer Guide. 2023. Disponível em: <https://ukgbc.org/wp-content/uploads/2023/02/operational-and-embodied-carbon-1.pdf>. Acesso em: 4 jan. 2024.

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Common metrics**. s.d. Disponível em: https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review/methods-for-climate-change-transparency/common-metrics?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 2 fev. 2025.

WEILER, Susan; SCHOLZ-BARTH, Katrin. **Green roof systems**: a guide to the planning, design, and construction of landscapes over structure. John Wiley & Sons, 2009. ISBN 9780471674955.

5 CONCLUSÕES GERAIS

Este estudo abordou diferentes aspectos relacionados à sustentabilidade ambiental em edificações, destacando a análise da influência térmica e da eficiência energética com a aplicação de telhados verdes, as emissões operacionais devido ao consumo de energia elétrica e as emissões incorporadas em telhados verdes. As simulações termoenergéticas, o cálculo do carbono operacional e as simulações de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) fornecem dados importantes sobre os impactos ambientais das escolhas de construção, oferecendo subsídios para a adoção de estratégias voltadas a construções sustentáveis.

Embora esses sistemas de cobertura sejam frequentemente associados a soluções para o conforto térmico e eficiência energética, os resultados obtidos pelas simulações termoenergéticas mostraram que os telhados verdes não apresentaram benefícios expressivos para a redução da temperatura interna ou economia de energia elétrica no Pavilhão de Aulas II (PVB) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Isso pode ter ocorrido devido a alguma limitação do *software* utilizado ou pela necessidade de calibração com resultados experimentais, os quais podem ser diferentes com a aplicação real desse tipo de cobertura. Os resultados também indicaram que o consumo do sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (*Heating, Ventilating and Air Conditioning – HVAC*) corresponde a quase metade do consumo total de energia elétrica do edifício. Contudo, mesmo não obtendo os resultados esperados, existem outros aspectos dos telhados verdes que podem ser benéficos, como a melhoria da qualidade do ar, a redução do calor urbano, a absorção de águas pluviais e o isolamento acústico. Isso pode os tornar uma estratégia aceitável quando integrada a outras soluções sustentáveis.

A análise das emissões operacionais através de suas tecnologias e seus respectivos coeficientes de emissão, considerando uma matriz elétrica brasileira futura em 2050, reforçou a importância da transição para fontes de energia renováveis e mais limpas. Além disso, o estudo considerou as emissões líquidas e a eficiência das tecnologias para geração de eletricidade. A combinação de fontes renováveis com estratégias passivas de climatização, como nos elementos da envoltória, pode resultar em redução do consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, das emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq). O uso de sistemas fotovoltaicos também se destaca como uma solução eficaz para

mitigar os impactos ambientais, no que diz respeito à geração de energia elétrica, tornando as edificações mais sustentáveis e alinhadas com os objetivos globais de redução das emissões de gases de efeito estufa (*greenhouse gases* – GHGs). Como os resultados de consumo de energia elétrica tiveram pouca variação entre os casos, as emissões operacionais seguiram a mesma lógica, pois são diretamente proporcionais.

A avaliação das emissões incorporadas de CO₂eq dos telhados verdes, realizada por meio da metodologia de ACV, demonstrou que os telhados verdes extensivos apresentam emissões negativas e os intensivos, positiva, considerando uma variação em sua estrutura somente da espessura do substrato e para o escopo definido. A vegetação apresentou um balanço negativo de carbono, contribuindo para a absorção de CO₂eq. Isso reforça a influência dos materiais de origem biológica na mitigação dos impactos ambientais. A escolha de materiais mais sustentáveis mostra-se fundamental, evidenciando a necessidade de selecionar soluções com menor impacto ambiental, por exemplo, em substituição a camada drenante de argila expandida que mais gerou emissões.

Este estudo contribuiu com a avaliação abrangente dos impactos ambientais de telhados verdes em edificações através da avaliação e da quantificação dos seus efeitos térmicos e das emissões de carbono, tanto operacionais quanto incorporadas. Foram utilizadas diferentes ferramentas, tais como os *softwares* Energyplus e SimaPro para responder aos problemas da pesquisa que consiste em quantificar o consumo de energia elétrica, o carbono operacional e incorporado. Ao integrar simulações termoenergéticas, cálculo de carbono operacional e incorporado, foi possível avaliar de forma ampla os efeitos das escolhas construtivas para mitigação dos impactos ambientais. Além disso, os resultados possibilitam comparações com outros casos, sejam de simulações ou de experimentos.

Assim, este estudo destaca a importância de adotar uma abordagem integrada para a sustentabilidade nas construções, que considere as emissões operacionais e incorporadas, o uso de fontes renováveis de energia, soluções passivas de climatização e a escolha consciente de materiais. Com uma análise holística será possível construir edificações que ao longo de seu ciclo de vida favoreçam menos emissões sem deixar de cumprir sua função de forma eficiente.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

A seguir, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros:

- A. Investigar a combinação de diferentes parâmetros do telhado verde, como altura, emissividade, refletividade, condutividade térmica e densidade da vegetação e umidade do substrato para a temperatura interna e eficiência energética das edificações.
 - B. Avaliar a integração de múltiplas estratégias em conjunto com o telhado verde, para identificar abordagens mais eficientes na adaptação das edificações às mudanças climáticas.
 - C. Realizar simulações com outros *softwares*, diferentes do EnergyPlus, que sejam apropriados para fornecer dados mais precisos do desempenho dos telhados verde.
 - D. Realizar experimentos para obter dados reais sobre a interferência dos telhados verdes no conforto térmico e na eficiência energética, comparando-os com dados simulados para validar os parâmetros adotados ou calibrar os modelos computacionais.
 - E. Avaliar o desempenho térmico e energético de diferentes tipos de coberturas, como os telhados frios, a fim de determinar sua viabilidade como estratégia passiva de climatização.
 - F. Utilizar informações mais recentes sobre a matriz energética nacional, como as disponibilizadas nos Planos Decenais de Expansão de Energia (PDE) e no Balanço Energético Nacional (BEN), aplicando modelos de regressão para aprimorar a precisão dos cálculos do fator de emissão (EF).
 - G. Realizar estudos de ACV considerando um material que melhor represente a vegetação real e diferenciando as características destas nos sistemas extensivo e intensivo, com a inclusão de um inventário próprio da vegetação no *software* de análise.
 - H. Expandir a ACV dos telhados verdes para englobar todo o ciclo de vida, permitindo uma análise mais abrangente dos impactos ambientais desse tipo de cobertura.
- A aplicação dessas recomendações pode tornar mais claros os impactos

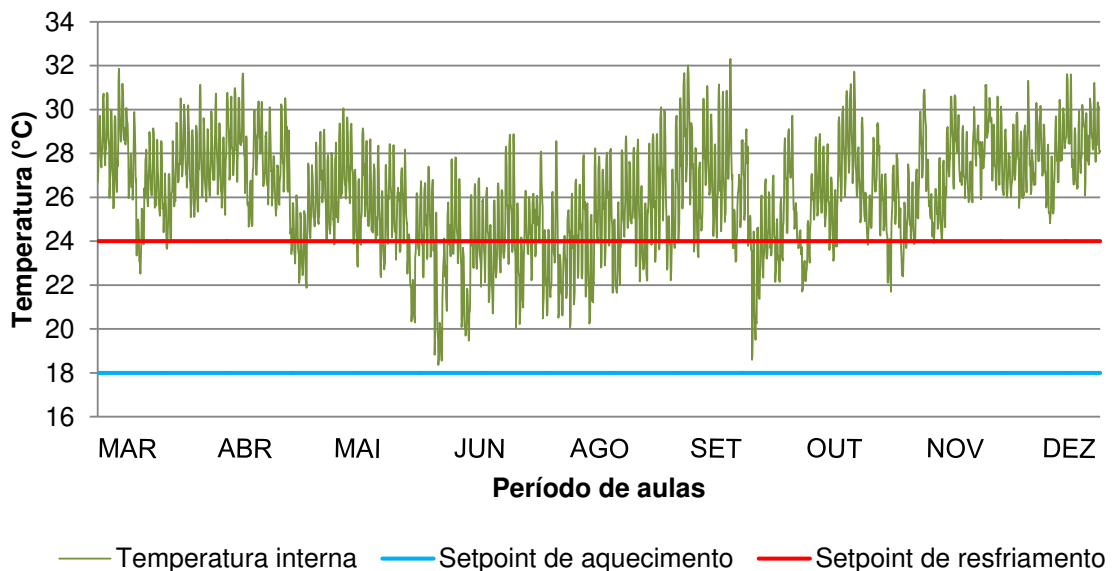
técnicos e ambientais dos telhados verdes. Com isso, será possível comparar dados de pesquisas futuras com os resultados deste trabalho e contribuir para o embasamento de decisões quanto ao uso deste sistema de cobertura.

APÊNDICES

Apêndice A – Temperatura interna de três salas de aula para os cinco casos de cobertura

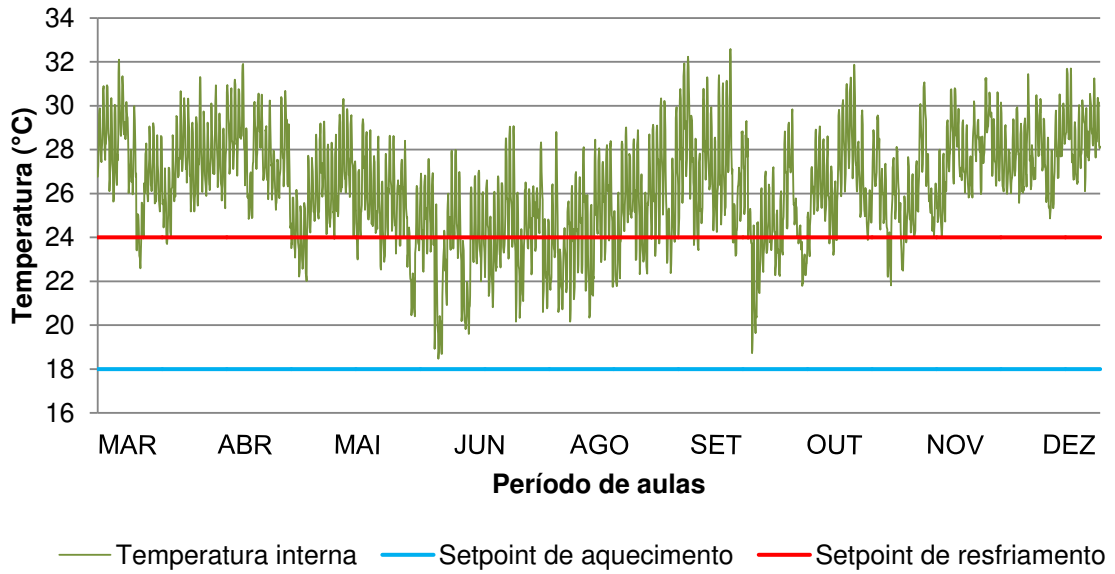
As salas de aula do térreo, 1º e 2º pavimento à noroeste foram simuladas sem a utilização do sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (Heating, Ventilating and Air Conditioning – HVAC). Os dados de temperatura interna obtidos foram organizados em gráficos (Figura A.1 até A.15), que distinguem o comportamento térmico por pavimento e por tipo de cobertura ao longo do ano nos períodos de aula. As temperaturas de *setpoint* foram evidenciadas nos gráficos, sendo de 18°C para aquecimento e de 24°C para resfriamento. A visualização dos gráficos possibilita identificar que a na maior parte do tempo, o sistema HVAC deve ser utilizado para resfriamento das salas de aula, considerando que a ocorrência de temperaturas acima de 24°C é mais frequente do que de temperaturas abaixo de 18°C.

Figura A.1 – Temperatura interna horária na sala do 2º pavimento no caso CB



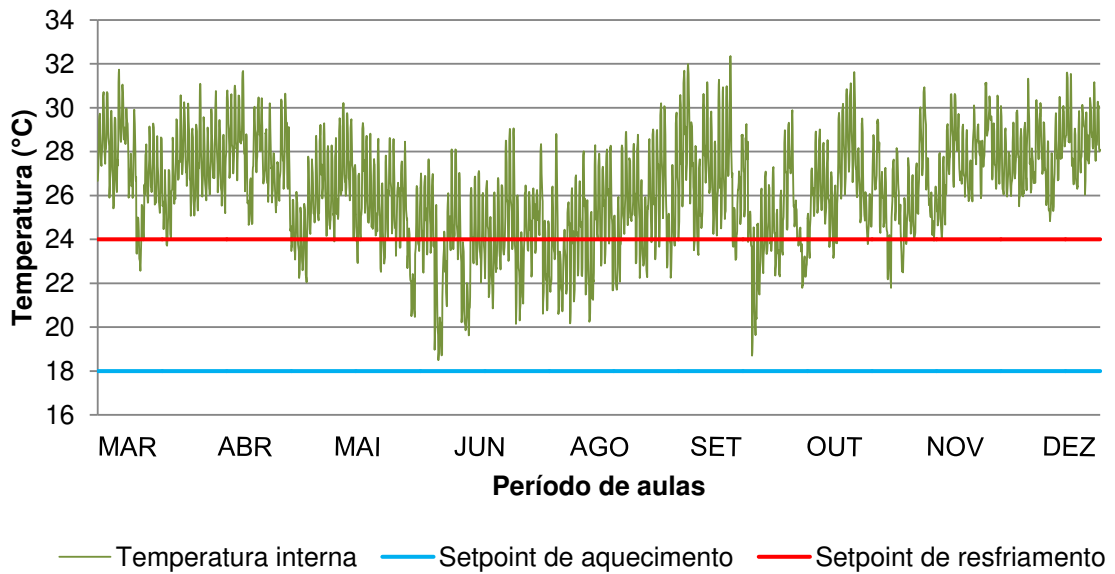
Fonte: própria autora.

Figura A.2 – Temperatura interna horária na sala do 2º pavimento no caso TE1



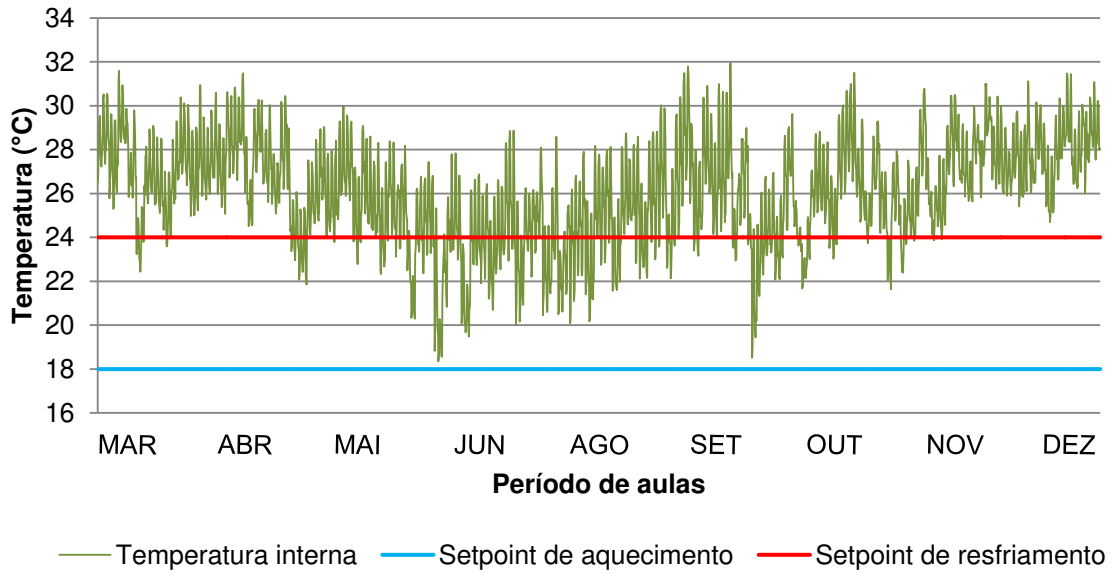
Fonte: própria autora.

Figura A 3 – Temperatura interna horária na sala do 2º pavimento no caso T11



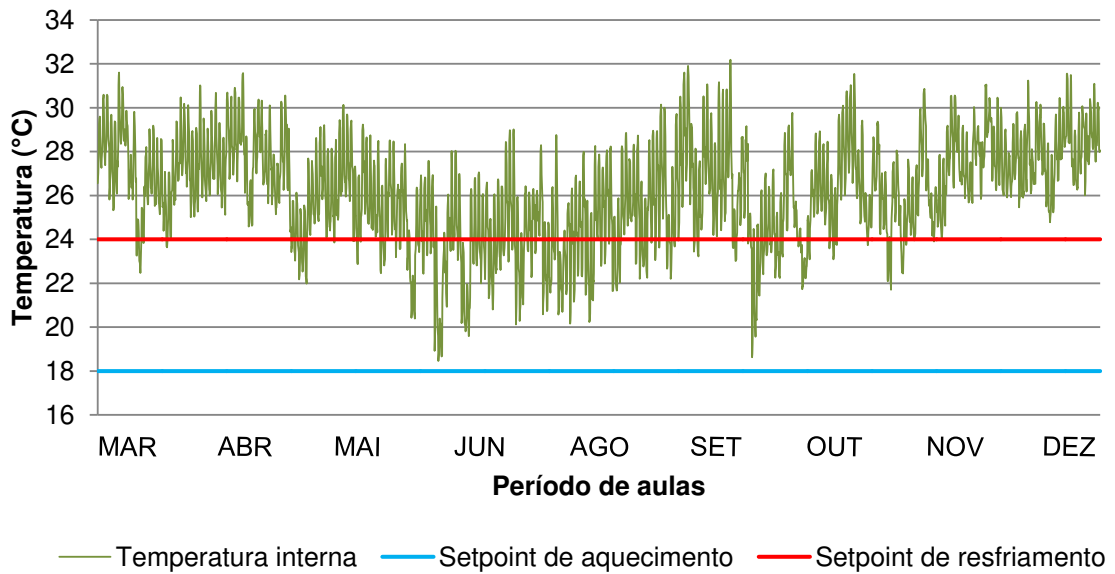
Fonte: própria autora.

Figura A.4 – Temperatura interna horária na sala do 2º pavimento no caso TE2



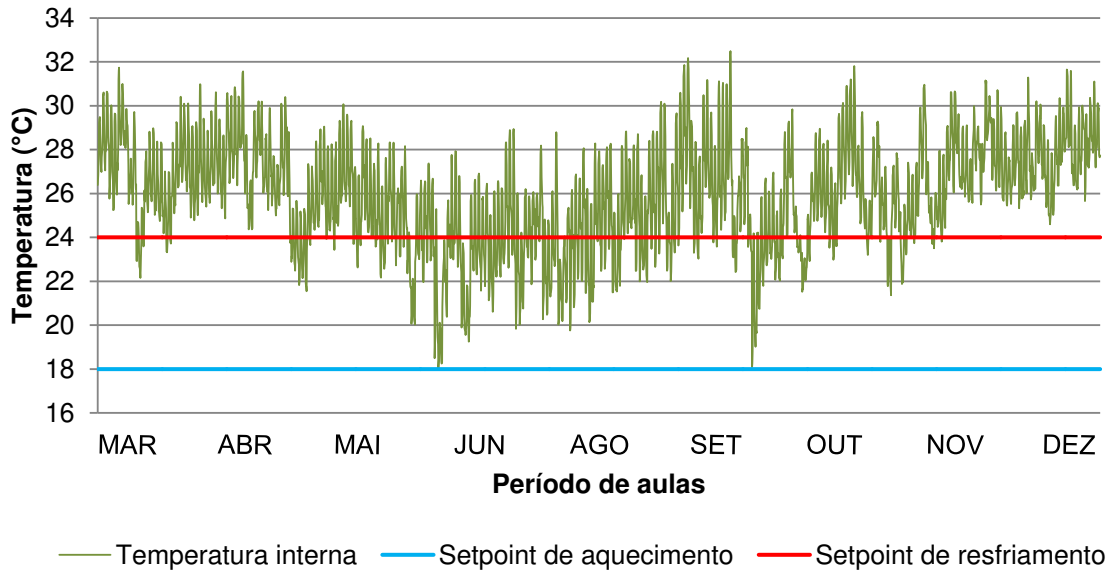
Fonte: própria autora.

Figura A.5 – Temperatura interna horária na sala do 2º pavimento no caso TI2



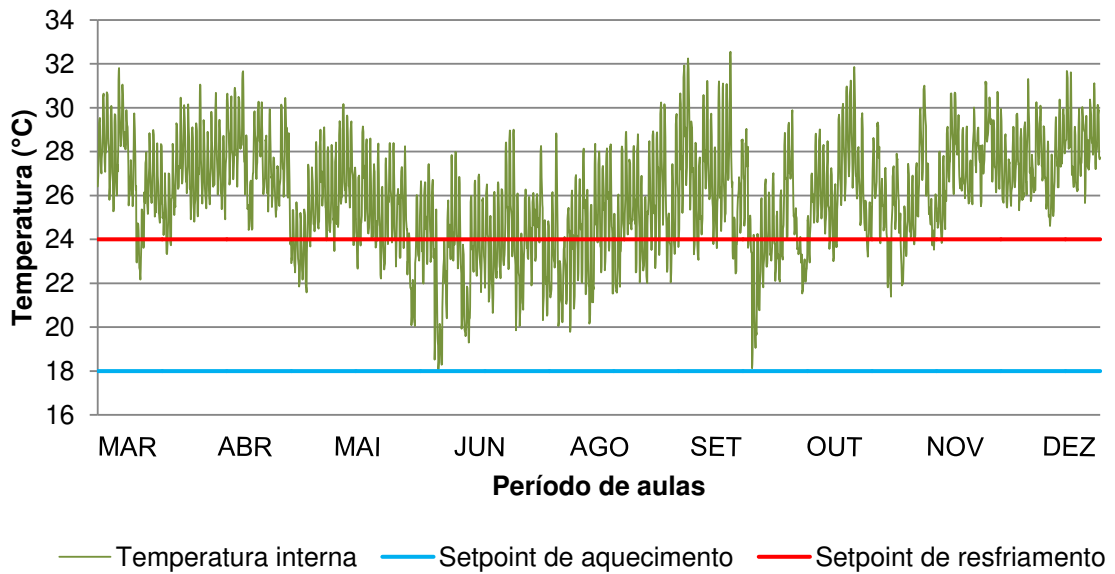
Fonte: própria autora.

Figura A.6 – Temperatura interna horária na sala do 1º pavimento no caso CB



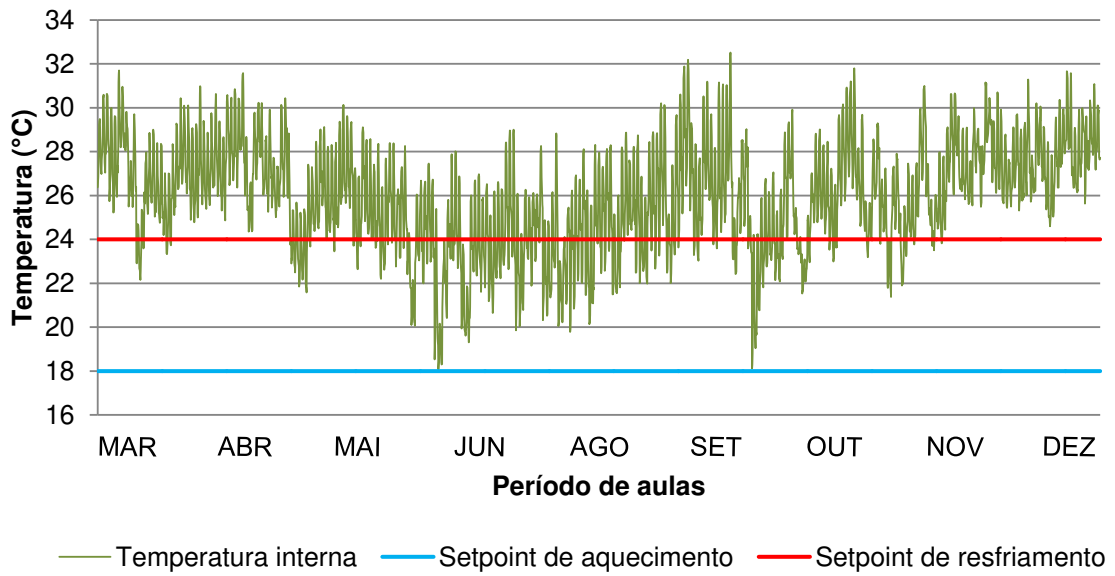
Fonte: própria autora.

Figura A.7 – Temperatura interna horária na sala do 1º pavimento no caso TE1



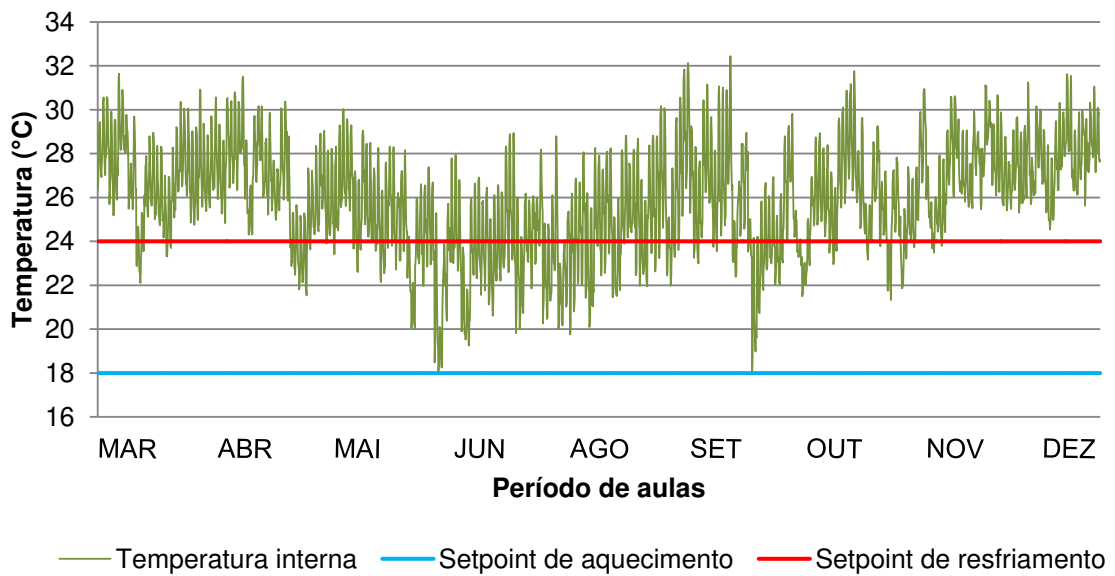
Fonte: própria autora.

Figura A.8 – Temperatura interna horária na sala do 1º pavimento no caso TI1



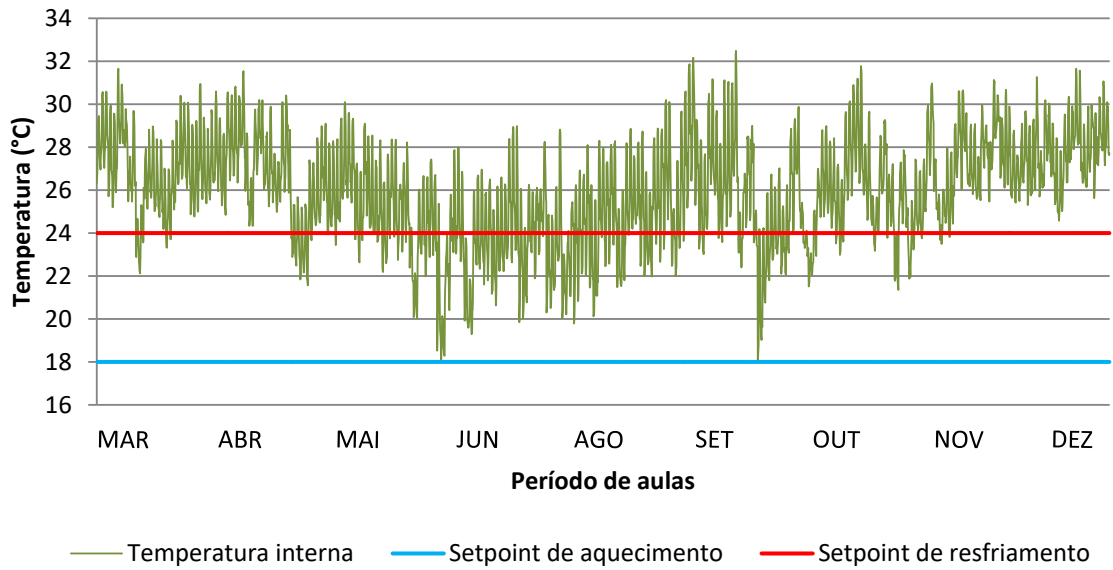
Fonte: própria autora.

Figura A.9 – Temperatura interna horária na sala do 1º pavimento no caso TE2



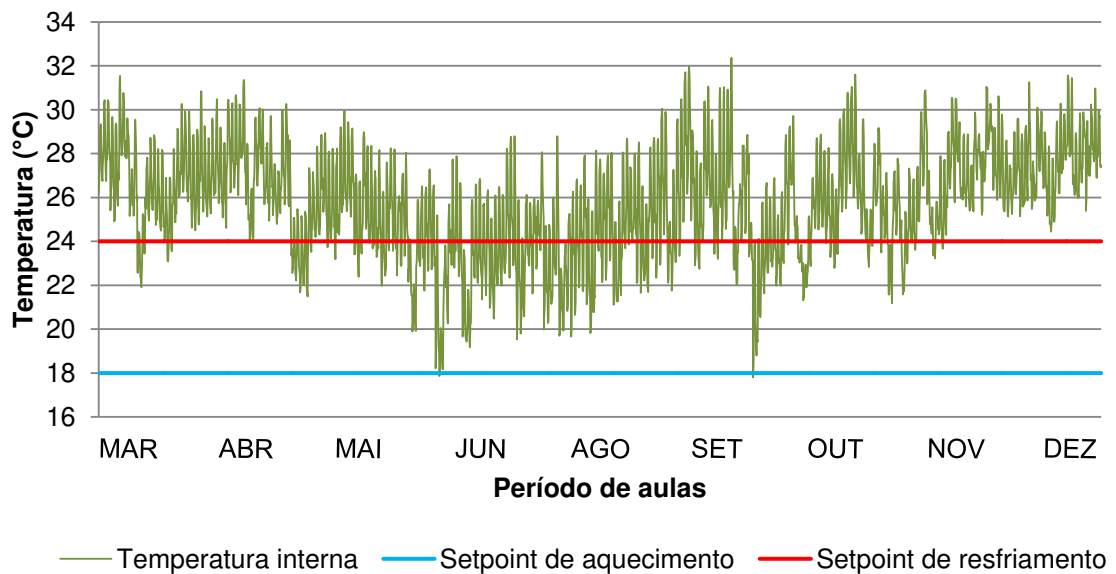
Fonte: própria autora.

Figura A.10 – Temperatura interna horária na sala do 1º pavimento no caso TI2



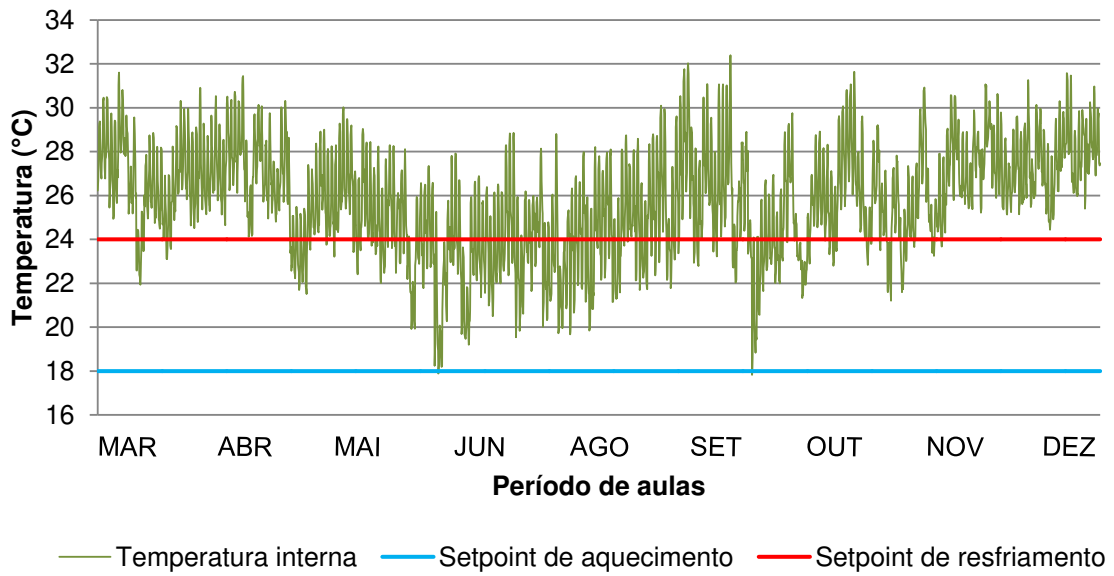
Fonte: própria autora.

Figura A.11 – Temperatura interna horária na sala do térreo no caso CB



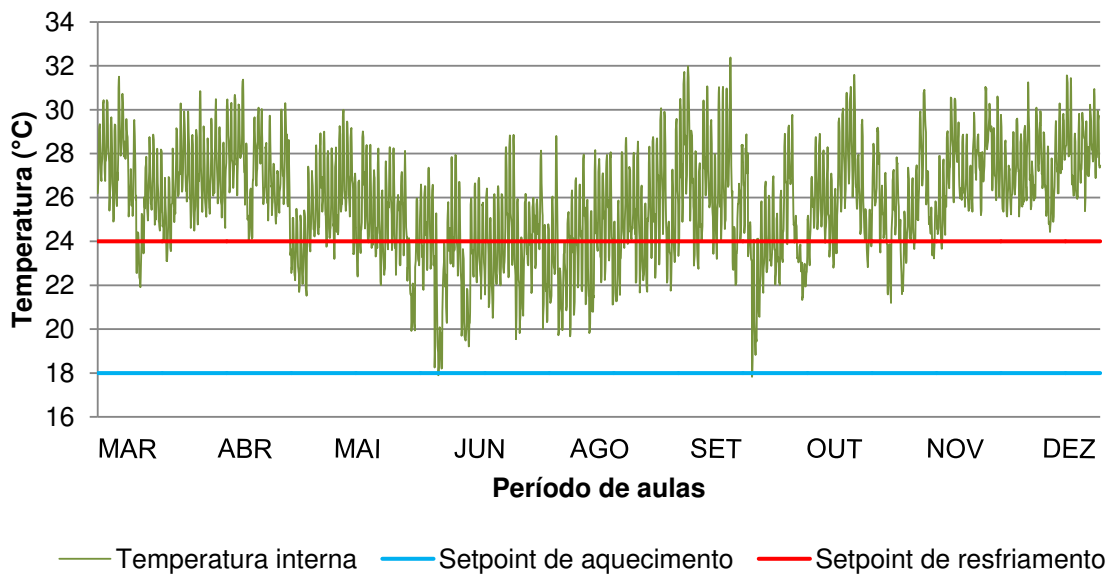
Fonte: própria autora.

Figura A.12 – Temperatura interna horária na sala do térreo no caso TE1



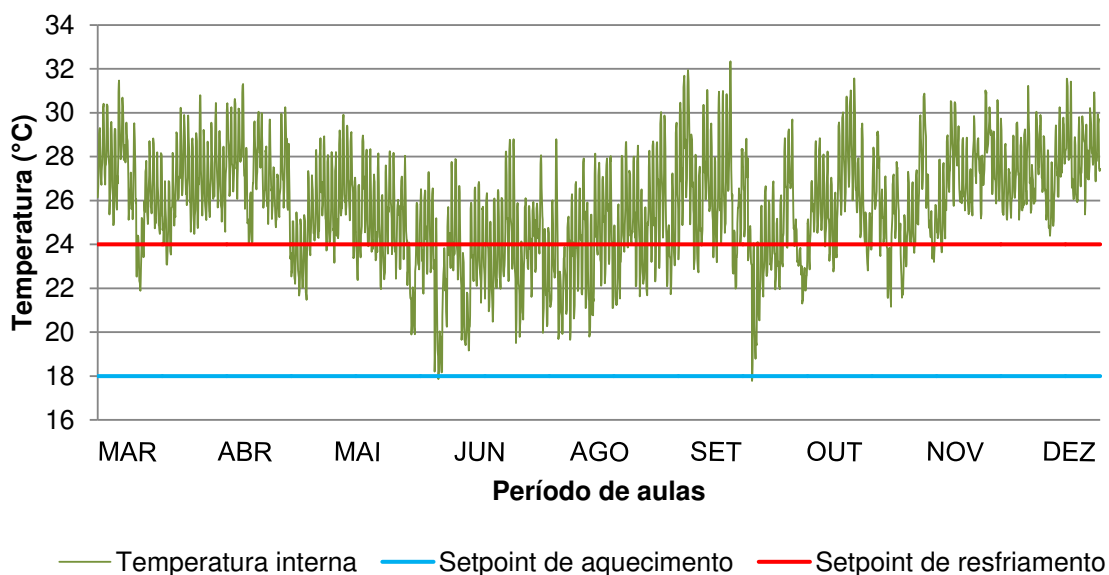
Fonte: própria autora.

Figura A.13 – Temperatura interna horária na sala do térreo no caso TI1



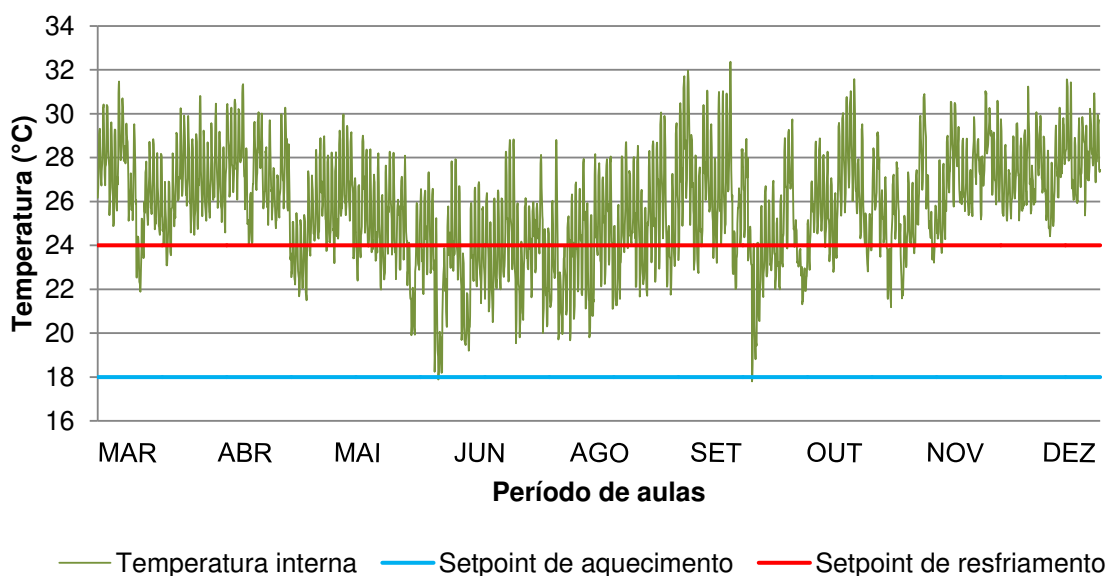
Fonte: própria autora.

Figura A.14 – Temperatura interna horária na sala do térreo no caso TE2



Fonte: própria autora.

Figura A.15 – Temperatura interna horária na sala do térreo no caso TI2



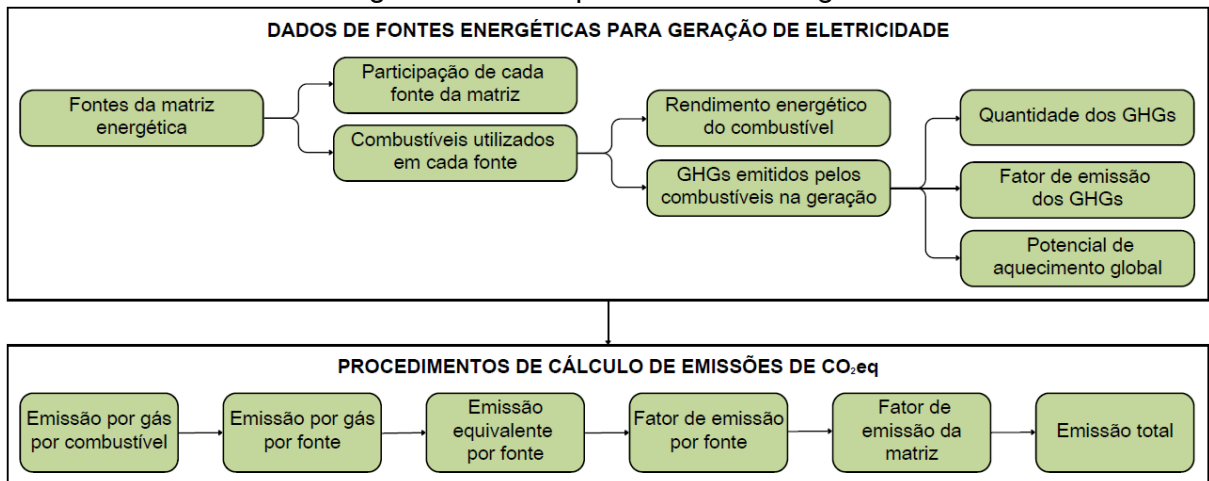
Fonte: própria autora.

Apêndice B – Metodologia para cálculo de fator de emissão de uma matriz elétrica

O clima e a intensidade de carbono da rede elétrica local são determinantes para as emissões operacionais (Echenagucia; Moroseos; Meek, 2023). No que diz respeito ao sistema de geração de eletricidade, no capítulo 3, foi apresentada uma metodologia para o cálculo do fator de emissão (*emission factor* – EF), com base

nos dados de uma matriz elétrica. Contudo, o EF pode ser calculado de diferentes formas, dependendo dos dados disponíveis da matriz elétrica. A seguir, é descrita uma metodologia alternativa, cujas etapas estão organizadas no fluxograma e detalhadas em sequência.

Figura B.1 – Sequência metodológica



Fonte: própria autora.

A emissão pode ser contabilizada devida à emissão de CO₂, CH₄ e N₂O liberados pela queima dos combustíveis utilizados da geração de eletricidade. Uma forma de obter o EF destes gases de efeito estufa (*greenhouse gases* – GHGs) é conforme a EPE (2022) e Peng *et al.* (2024), através das diretrizes do IPCC de 2006 para inventários nacionais de GHGs. Pelas diretrizes, as emissões são provenientes da combustão estacionária e pode ser definida a abordagem de nível 1, na qual os fatores de emissão são padrões (IPCC, 2006). Na Tabela 2.2 dessas diretrizes, encontram-se os fatores de emissão padrões para combustão estacionária nas indústrias de energia, da qual podem ser extraídos os fatores de emissão por combustível.

As emissões de GHGs da combustão estacionária ($E_{\text{GHG, combustível}}$) são dadas pela Equação (1) (IPCC, 2006):

$$E_{\text{GHG, combustível}} = QC_{\text{combustível}} \times EF_{\text{GHG, combustível}} \quad (1)$$

Onde:

$E_{\text{GHG, combustível}}$ é a emissão de um determinado gás de efeito estufa por tipo de combustível (t GHG);

$QC_{\text{combustível}}$ é a quantidade de combustível queimado (TJ);

$EF_{\text{GHG, combustível}}$ é o fator de emissão padrão de um determinado gás de efeito estufa por tipo de combustível (t GHG/TJ).

Para calcular as emissões totais por gás da categoria de fonte ($E_{\text{GHG, fonte}}$), é necessário somar as emissões de todos os combustíveis ($E_{\text{GHG, combustível}}$) calculadas anteriormente, como apresentado na Equação (2) (IPCC, 2006):

$$E_{\text{GHG, fonte}} = \sum_{\text{combustíveis}} E_{\text{GHG, combustível}} \quad (2)$$

Onde:

$E_{\text{GHG, fonte}}$ é a emissão de um determinado gás de efeito estufa por fonte (t GHG);

$E_{\text{GHG, combustível}}$ é a emissões de um determinado gás de efeito estufa por tipo de combustível (t GHG).

As emissões de GHGs são ponderadas pelos Potenciais de Aquecimento Global (*Global Warming Potentials* – GWPs), que pelo sexto relatório do IPCC é considerado para um horizonte temporal de 100 anos (GWP100). Essa mesma consideração é feita por grande parte da literatura sobre abrandar os efeitos das mudanças climáticas e é necessário para estar de acordo com o Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022). A Tabela 3 fornece os valores de GWP100, para a conversão da massa dos gases em massa de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq).

Tabela B.1 – Valores GWP100 e tempos de vida atmosféricos para uma série de GHG, com base no AR6 WGI

GÁS	AR6 – GWP100
CO ₂	1
CH ₄	27
N ₂ O	273

Fonte: Forster *et al.* (2021). Adaptada pela autora.

Para calcular o EF de GHGs para sistemas de energia, é comum utilizar dados relacionados à geração de energia e ao consumo de combustível. O cálculo envolve multiplicar a quantidade de combustível consumido pelo seu EF e dividir pelo rendimento energético do combustível utilizado (Unnewehr *et al.*, 2022).

Os dados de GWPs e de rendimento energético (RE) são aplicados na Equação (3) para encontrar a emissão por fonte em CO₂eq ($E_{\text{fonte eq}}$), permitindo a quantificação dos três GHGs em uma mesma unidade.

$$E_{\text{fonte eq}} = \sum \frac{E_{\text{GHG, fonte}} \times \text{GWP}}{\text{RE}_{\text{combustível}}} \quad (3)$$

Onde:

$E_{\text{fonte eq}}$ é a emissão equivalente por fonte (t CO₂eq);

$E_{\text{GHG, fonte}}$ é a emissão de um determinado gás de efeito estufa por fonte (t GHG);

GWP é o potencial de aquecimento global (adimensional).

$\text{RE}_{\text{combustível}}$ é o rendimento energético do combustível (%)

O EF médio anual (EF_{fonte}) para uma usina é calculado pela divisão das emissões de CO₂ provenientes da geração de eletricidade pela geração de energia elétrica total em um ano (Unnewehr, 2022). O cálculo para a usina é realizado pela Equação (4).

$$\text{EF}_{\text{fonte}} = \frac{E_{\text{fonte eq}}}{\text{EE}_{\text{fonte}}} \quad (4)$$

Onde:

EF_{fonte} é o fator de emissão por fonte (t CO₂eq/MWh);

$E_{\text{fonte eq}}$ é a emissão equivalente por fonte (t CO₂eq);
 EE_{fonte} é a energia elétrica produzida por fonte (MWh).

A soma ponderada dos fatores de emissão de cada uma das fontes possibilita obter o EF total (Ministry for the Environment, 2024), como apresentado na Equação (5).

$$EF_{\text{matriz}} = \sum (EF_{\text{fonte}} \times P) \quad (5)$$

Onde:

EF_{matriz} é o fator de emissão pela matriz elétrica (t CO₂eq/MWh);

EF_{fonte} é o fator de emissão por fonte (t CO₂eq/MWh);

P é a participação da fonte na matriz elétrica brasileira (%).

REFERÊNCIAS

ECHENAGUCIA, Tomás Méndez; MOROSEOS, Teresa; MEEK, Christopher. On the tradeoffs between embodied and operational carbon in building envelope design: The impact of local climates and energy grids. **Energy and Buildings**, v. 278, p. 112589, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112589>.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Apresentação da metodologia e dos fatores de emissão utilizados para as estimativas de emissão de GHG nos planos de energia, no BEN e demais produtos da EPE**. 2022. 13 p. (Informativo Técnico n. 011/2022). Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/areas-de-atuacao/estudos-socioambientais/SiteAssets/Paginas/Emissoes-de-Gases-de-Efeito-Estufa/Informativo%20Tecnico_11-2022_fatores%20de%20emiss%C3%A3oSMA.pdf. Acesso em: 27 jun. 2024.

Forster, P. *et al.*, 2021: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054, doi:10.1017/9781009157896.009.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2 – Energy**.

Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf. Acesso em: 01 ago. 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. 2022. Disponível em:

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 30 jun. 2024.

MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT. 2024. *Measuring emissions: A guide for organisations: 2024 detailed guide*. Wellington: Ministry for the Environment. ISBN 9781991140197.

PENG, Huaxi *et al.* Emission accounting and drivers in South American countries. **Applied Energy**, v. 358, p. 122528, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122528>.

UNNEWEHR, Jan Frederick *et al.* Open-data based carbon emission intensity signals for electricity generation in European countries—top down vs. bottom up approach. **Cleaner Energy Systems**, v. 3, p. 100018, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100018>.