

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

AMANDA MELO

INTEGRAÇÃO DE TELHADOS VERDES E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS:
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE TEMPERATURA, UMIDADE E
COMPORTAMENTO TÉRMICO

JOINVILLE

2024

AMANDA MELO

**INTEGRAÇÃO DE TELHADOS VERDES E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS:
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE TEMPERATURA, UMIDADE E
COMPORTAMENTO TÉRMICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Desenvolvimento Sustentável na Construção Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Fernanda Perazzolo Disconzi.

JOINVILLE

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

MELO, AMANDA
INTEGRAÇÃO DE TELHADOS VERDES E MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS: : AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E
NUMÉRICA DE TEMPERATURA, UMIDADE E
COMPORTAMENTO TÉRMICO / AMANDA MELO. -- 2024.
136 p.

Orientadora: Fernanda Perazzolo Disconzi
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2024.

1. Telhado Verde. 2. Módulos Fotovoltaicos. 3.
Transferência de Calor e Massa. 4. Telhados Sustentáveis. 5.
Eficiência Energética. I. Perazzolo Disconzi, Fernanda . II.
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de
Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

AMANDA MELO

**INTEGRAÇÃO DE TELHADOS VERDES E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS:
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE TEMPERATURA, UMIDADE E
COMPORTAMENTO TÉRMICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Desenvolvimento Sustentável na Construção Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Fernanda Perazzolo Disconzi

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Fernanda Perazzolo Disconzi
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Prof. Dr. Leonardo Romero Monteiro
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof.^a Dr.^a Camila Gregório Atem
Universidade Estadual de Londrina

Prof^a. Dr^a. Fernanda Perazzolo Disconzi
Universidade do Estado de Santa Catarina

Joinville, 29 de julho de 2024.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha profunda gratidão a Deus pela oportunidade de estar nessa jornada de crescimento acadêmico.

À minha família, que esteve ao meu lado em todos os momentos, agradeço por seu apoio incondicional e compreensão. Aos meus pais, Silvio e Patricia, expresso minha sincera gratidão pela ajuda incansável na construção deste trabalho.

À minha orientadora, Fernanda Perazzolo Disconzi, dedico um agradecimento especial pela excelente orientação fornecida ao longo deste percurso.

À Universidade do Estado de Santa Catarina, expresso minha gratidão pela oportunidade concedida e pela bolsa que possibilitou o desenvolvimento deste projeto. Não posso deixar de agradecer também aos demais professores que fizeram parte desta caminhada. Suas contribuições, ensinamentos e *insights* foram valiosos para minha formação.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para este percurso, meu mais sincero obrigado.

“A sabedoria oferece proteção, como o faz o dinheiro, mas a vantagem do conhecimento é esta: a sabedoria preserva a vida de quem a possui.” (Eclesiastes 7:12)

RESUMO

A integração de tecnologias de telhado verde e módulos fotovoltaicos é utilizada para mitigar as ondas de calor na superfície de edifícios e melhorar as condições internas das construções. A implementação conjunta dessas tecnologias é conhecida internacionalmente como "*Green Roof Integrated Photovoltaics*" (GRIPV), que se traduz como energia fotovoltaica integrada ao telhado verde. O objetivo principal desta pesquisa é desenvolver um protótipo e um modelo matemático para monitorar a variação da temperatura e umidade ao longo do tempo, bem como o comportamento térmico no sistema GRIPV. O desenvolvimento do modelo matemático considera os efeitos da transferência de calor e massa no sistema. Esse modelo foi empregado em simulações numéricas e seus resultados foram comparados com os dados experimentais. O experimento envolveu a construção de um protótipo que foi instrumentado com sensores estrategicamente posicionados e que coletaram dados durante 50 dias nos meses de dezembro de 2023 a fevereiro de 2024. O modelo matemático desenvolvido considerou os efeitos de transferência de calor e massa das plantas e do substrato. Os resultados indicam que o sistema GRIPV apresentou desempenho satisfatório, com os dados experimentais do módulo fotovoltaico mostrando-se consistentes com a simulação. Contudo, variações nas medições das temperaturas foram observadas devido às condições bioclimáticas locais e à retenção de calor pelo material da construção da edificação. As contribuições deste estudo incluem um modelo matemático detalhado, um guia para a construção de telhados verdes e fotovoltaicos, e uma base de dados sólida para futuras pesquisas. Limitações incluem o tempo limitado para coleta de dados e a necessidade de programação mais eficiente do Arduino. Sugere-se que futuras pesquisas ampliem a coleta de dados, considerem alterações nos materiais de construção e integrem sistemas de reaproveitamento de água da chuva. Este estudo demonstra a viabilidade e a importância da integração de telhados verdes com módulos fotovoltaicos para construções sustentáveis.

Palavras-chave: Telhado Verde; Módulos Fotovoltaicos; Transferência de Calor e Massa; Telhados Sustentáveis; Eficiência Energética.

ABSTRACT

The integration of green roof technologies and photovoltaic modules is used to mitigate heat waves on the surface of buildings and improve indoor conditions. The joint implementation of these technologies is known internationally as "Green Roof Integrated Photovoltaics" (GRIPV), which translates as photovoltaic energy integrated into the green roof. The main objective of this research is to develop a prototype and a mathematical model to monitor the variation in temperature and humidity over time, as well as the thermal behavior in the GRIPV system. The development of the mathematical model considers the effects of heat and mass transfer in the system. This model was used in numerical simulations and its results were compared with experimental data. The experiment involved the construction of a prototype that was instrumented with strategically positioned sensors that collected data for 50 days between December 2023 and February 2024. The mathematical model developed considered the heat and mass transfer effects of the plants and the substrate. The results indicate that the GRIPV system performed satisfactorily, with the experimental data from the photovoltaic module proving to be consistent with the simulation. However, variations in temperature measurements were observed due to local bioclimatic conditions and heat retention by the building's construction material. The contributions of this study include a detailed mathematical model, a guide for the construction of green and photovoltaic roofs, and a solid database for future research. Limitations include the limited time for data collection and the need for more efficient Arduino programming. It is suggested that future research extend data collection, consider changes in building materials and integrate rainwater reuse systems. This study demonstrates the feasibility and importance of integrating green roofs with photovoltaic modules for sustainable construction.

Keywords: Green Roof; Photovoltaic Modules; Heat and Mass Transfer; Sustainable Roofs; Energy Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Esquema visual geral do sistema GRIPV nos ambientes interno e externo.	23
Figura 2. Principais camadas do telhado verde.....	28
Figura 3. Tipos de plantas para telhados verdes.....	29
Figura 4. Visão esquemática do protótipo com dimensões apresentadas na (a) visão frontal e (b) visão 3D.	48
Figura 5. Edificação de isopor com a instalações elétricas (a) controlador de carga e interruptor fixados na edificação, (b) edificação parte interna, onde está instalada a lâmpada, que é a fonte de energia interna e a bateria, (c) estrutura do telhado verde com a impermeabilização instalada e o módulo fotovoltaico em sua posição inicial.	49
Figura 6. Edificação, estrutura do telhado verde impermeabilizada, módulo fotovoltaico e suas instalações elétricas.	50
Figura 7. Montagem do telhado verde, (a) a argila expandida, (b) o tecido filtro, (c) o substrato e (d) as plantas.	51
Figura 8. Amostras de plantas <i>Sedum Carnicolor</i> que foram dimensionadas.	52
Figura 9. Esquema visual da distribuição dos sensores de temperatura e no protótipo.....	54
Figura 10. Instalação do Arduino e dos sensores no protótipo, (a) Arduino com instalações dentro de uma caixa protetora e indicação do sensor de temperatura e umidade do ar, (b) sensor de umidade do solo, (c) sensor da planta no microclima e (d) sensor da planta longe do microclima.	54
Figura 11. Protótipo completo.	55
Figura 12. Representação gráfica do modelo matemático GRIPV.	60
Figura 13. Registros diários da temperatura da edificação.	77
Figura 14. Registros da temperatura da edificação por hora, no dia 12 de janeiro de 2024.....	77
Figura 15. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura edificação.	78
Figura 16. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura da laje de concreto.	80
Figura 17. Registros diários da temperatura da laje de concreto.....	82

Figura 18. Registros diários da temperatura da drenagem.....	82
Figura 19. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura da drenagem.	83
Figura 20. Registros diários da temperatura do substrato.....	85
Figura 21. Registros da temperatura do substrato por hora, no dia 12 de janeiro de 2024.....	85
Figura 22. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura do substrato.....	87
Figura 23. Registros diários das temperaturas e umidade do substrato.....	88
Figura 24. Registros da temperatura da planta no microclima.....	88
Figura 25. Sensor na planta do microclima.	90
Figura 26. Sensor na planta longe do microclima.	91
Figura 27. Registros diários da temperatura da planta longe do microclima.	92
Figura 28. Comparação das temperaturas das plantas no microclima e longe do microclima.	92
Figura 29. Análise da temperatura no dia 12 de janeiro, 2024 – Planta longe do microclima X Planta no microclima.	93
Figura 30. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura média das plantas.	94
Figura 31. Registros diários da temperatura do microclima.	96
Figura 32. Registros diários das temperaturas e umidade do microclima.	96
Figura 33. Sensor de temperatura e umidade da região de microclima.	97
Figura 34. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura do microclima.	98
Figura 35. Registros diários da temperatura da parte traseira do módulo fotovoltaico.	100
Figura 36. Registros diários da temperatura da parte frontal do módulo fotovoltaico.	100
Figura 37. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura da traseira do módulo fotovoltaico.....	101
Figura 38. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura frontal do módulo fotovoltaico.....	103
Figura 39. Comparação das temperaturas traseira e frontal do módulo fotovoltaico.	104

Figura 40. Relação total da coleta de dados do protótipo.	104
Figura 41. Evolução temporal das temperaturas máximas interna e externa da edificação.....	105
Figura 42. Temperaturas dentro da edificação (a) janeiro e (b) fevereiro.	108
Figura 43. Temperaturas da laje de concreto (a) janeiro e (b) fevereiro.	110
Figura 44. Temperaturas da drenagem (a) janeiro e (b) fevereiro.....	112
Figura 45. Temperaturas da substrato (a) janeiro e (b) fevereiro.	114
Figura 46. Temperaturas das plantas (a) janeiro e (b) fevereiro.	116
Figura 47. Temperaturas do microclima (a) janeiro e (b) fevereiro.....	117
Figura 48. Umidade relativa do ar no microclima (a) janeiro e (b) fevereiro.	119
Figura 49. Temperaturas da traseira do módulo fotovoltaico (a) janeiro e (b) fevereiro.....	121
Figura 50. Temperaturas parte frontal do módulo fotovoltaico (a) janeiro e (b) fevereiro.....	123
Figura 51. Análise do desempenho térmico simulado (a) janeiro e (b) fevereiro. ...	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Resumo das plantas adequadas para o sistema GRIPV.....	31
Quadro 2. Materiais para construção do protótipo.	47
Quadro 3. Equações polinomiais para descrever as variações temporais da temperatura externa, umidade relativa e radiação solar.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão. .58	
Tabela 2. Parâmetros geométricos e operacionais, condições iniciais e de contorno.	74
Tabela 3. Resumo das temperaturas e desvio padrão do substrato.	84
Tabela 4. Coleta de dados temperatura e umidade do substrato.....	89
Tabela 5. Comparação dos critérios de avaliação de desempenho térmico e dos resultados.	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CTP	Condição de Teste Padrão
DGW	<i>Double Glazed Windows</i> – Janelas de Vidro Duplo
DSF	<i>Double Skin Facades</i> – Fachadas de Dupla Camada
EV	Elemento de Volume
GRIPV	<i>Green Roof Integrated Photovoltaics</i> – Módulos Fotovoltaicos Integrados ao Telhado Verde
ICU	Ilhas de Calor Urbano
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LAI	<i>Leaf Area Index</i> – Índice de Área Foliar
MEV	Método de Elemento de Volume
PCM	Paredes com Material de Mudança de Fase
PV	<i>Photovoltaic Modules</i> – Módulos Fotovoltaicos
SAM	<i>System Advisor Model</i>
STC	<i>Standard Test Condition</i> – Condição de Teste Padrão
TGW	<i>Triple Glazed Windows</i> – Janelas de Vidro Triplo
TSF	<i>Triple Skin Facades</i> – Fachadas de Tripla Camada

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal [m ²]
$A_{\text{módulo}}$	Área da superfície do módulo [m ²]
A_s	Área da superfície [m ²]
C	Constante inferior a 1 [-]
C_p	Calor específico [kJ/kg.K]
D_{AB}	Coeficiente de difusão das substâncias A e B [m ² /s]
E	Radiação refletida [-]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
Gr_L	Número de Grashof [-]
G_s	Radiação solar incidente [W/m ²]
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² .K]
h_{massa}	Coeficiente médio de transferência de massa [kJ/kg]
h_{vp}	Entalpia de evaporação da água [kJ/kg]
J	Radiosidade da superfície [W/m ²]
k	Condutividade térmica do fluido [W/m.K]
L	Altura da camada [m]
L_c	Comprimento característico [m]
m	Massa [kg]
M_{abs}	Fluxo de massa de água [kg/s]
M_{dif}	Fluxo de massa que se difunde entre camadas [kg/s]
\dot{m}_{evap}	Fluxo de massa da evaporação de água [kg/s]
n	Constante [-]
Nu	Número de Nusselt [-]
p	Perímetro [m]
$P_{a,s}$	Pressão parcial do ar seco [Pa]
Pr	Número de Prandtl [-]
P_{sat}	Pressão de saturação [Pa]
$P_{v,s}$	Pressão de vapor de água [Pa]
Q_{bomb}	Fluxo hídrico [m ³ /s]
Q_{cond}	Fluxo de calor condutivo [W]
Q_{conv}	Fluxo de calor convectivo [W]

Q_{dif}	Fluxo mássico difusivo [kg/s]
Q_{evap}	Fluxo de calor perdido em razão da evaporação d'água [W/m ²]
Q_{ger}	Fonte de calor gerado [W]
$Q_{rad,atm}$	Radiação atmosférica [W/m ²]
$Q_{rad,solar}$	Radiação solar [W/m ²]
R	Resistencia térmica do material [K/W]
R_a	Constante do ar seco [kJ/kmol.K]
Ra_L	Número de Rayleigh [-]
Re	Número de Reynolds [-]
R_v	Constante do vapor de água [kJ/kmol.K]
Sc	Número de Schmidt [-]
Sh	Número de Sherwood [-]
T	Temperatura [K]
t	Tempo [s]
$T_{céu}$	Temperatura aproximada do céu [K]
T_f	Temperatura de filme [°C]
V	Velocidade do fluido [m/s]
W	Teor de umidade [-]
x	Fração de área sombreada pelo módulo fotovoltaico [-]

Símbolos gregos:

ρ	Densidade [kg/m ³]
β	Coeficiente de expansão volumétrica [K ⁻¹]
ϑ	Viscosidade cinemática do fluido [m ² /s]
∞	Vizinhança [-]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido [kg/m.s]
α_s	Absortividade [-]
σ_f	Fração de cobertura vegetal [-]
ε	Emissividade [-]
η	Eficiência [-]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² K ⁴]
$\rho_{v,s}$	Densidade do vapor de água na superfície [kg/m ³]
$\rho_{a,s}$	Densidade do ar seco na superfície [kg/m ³]

ρ_s	Densidade total na superfície [kg/m³]
$\rho_{v,\infty}$	Densidade do vapor de água longe da superfície [kg/m³]
$\rho_{a,\infty}$	Densidade do ar seco longe da superfície [kg/m³]
ρ_∞	Densidade total longe da superfície [kg/m³]
ω	Teor de umidade [-]
φ	Umidade relativa [-]
\forall	Volume [m³]

Subscritos:

1	Ar no ambiente interno da edificação
2	Concreto
3	Drenagem
4	Substrato
5	Plantas
6	Região do microclima
7	Alumínio
8	Vidro
4s	Substrato seco
s	superfície
ar,s	Ar seco
vap	Vapor
evap 4	Evaporação do substrato
evap 5	Evaporação das plantas
eq	Equilíbrio
ext	Região fora do microclima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	20
1.2	JUSTIFICATIVA	24
1.3	OBJETIVOS	25
1.3.1	Objetivo Geral	25
1.3.2	Objetivos Específicos	25
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	27
2.1.1	Telhado Verde	27
2.1.2	Módulos fotovoltaicos	32
2.2	TELHADO VERDE INTEGRADO AO FOTOVOLTAICO	35
2.2.1	Eficiência do conjunto	35
2.2.2	Balanco energético	40
2.2.3	Simulações de eficiência energética	41
3	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO SISTEMA GRIPV	45
3.1	ESTRUTURA DO PROTÓTIPO	46
3.2	INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA GRIPV: PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO E DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES.....	52
3.3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	55
3.4	ANÁLISES DE INCERTEZAS	56
3.5	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO	57
4	MODELO MATEMÁTICO E SIMULAÇÃO DO SISTEMA GRIPV	59
4.1	MODELO MATEMÁTICO	59
4.1.1	Hipóteses simplificadoras	62
4.1.2	Balanco de energia.....	62
4.1.3	Balanco de massa	72
4.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	73
4.2.1	Condições iniciais, parâmetros geométricos e operacionais	73
5	RESULTADOS E ANÁLISE.....	76
5.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	76
5.2	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO	105

5.3	RESULTADOS NUMÉRICOS E COMPARAÇÕES COM DADOS EXPERIMENTAIS	106
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	126

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As mudanças climáticas representam transformações significativas nos padrões meteorológicos do planeta ao longo do tempo, sendo impulsionadas pelas atividades humanas (Ascione, 2017). Seus impactos já estão presentes nas áreas urbanas, como ondas de calor mais longas e mais frequentes (Leal Filho et al., 2018). Entre os principais fenômenos que causam alterações no clima, estão as ilhas de calor. Segundo Leal Filho et al. (2021), as Ilhas de Calor Urbano (ICUs) são um fenômeno microclimático que afetam especialmente as áreas urbanas e, em razão da sua intensidade, causam desconforto térmico e redução dos níveis de qualidade de vida. Para Hsieh et al. (2010), existe uma forte relação entre o fenômeno das ICUs e a configuração urbana.

Durante os meses de verão, as cidades não apenas enfrentam o desafio das ICUs, mas também lidam com o fenômeno do superaquecimento dentro das residências (Ascione, 2017). As ICUs são agravadas pela combinação de altas temperaturas externas e o uso intensivo de sistemas de refrigeração, que podem não ser eficientes o suficiente para manter um ambiente confortável sem um consumo excessivo de energia (Maia, 2023). Como resultado, muitas casas se tornam locais propícios ao superaquecimento, aumentando o desconforto dos moradores, também os custos associados ao consumo de energia elétrica (Maia, 2023).

Diversas são as estratégias para mitigar e reduzir as ICUs e melhorar as condições de conforto térmico nas residências, utilizando novas abordagens no planejamento estratégico urbano. Essas podem ser consideradas como importantes ferramentas para alcançar a redução de impactos adversos, quando se trata dos efeitos das mudanças climáticas e da expansão urbana (Leal Filho et al., 2018). Entre as estratégias ambientalmente sustentáveis presentes na literatura, Leal Filho et al. (2021), sugerem a infraestrutura verde como método para enfrentar as ICUs, proporcionando bem-estar à vida humana, além de evitar danos ao ecossistema. Um ecossistema saudável possui uma biodiversidade em equilíbrio, contendo a diversidade do mundo natural, como plantas, animais e

microrganismos (Yang et al., 2016). A busca pela melhoria da biodiversidade nas cidades é reconhecida visando os conceitos de sustentabilidade no ambiente urbano (Mayrand; Clergeau, 2018).

A integração de telhados verdes e sistemas fotovoltaicos desempenha um papel fundamental na busca pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 e 11 (ONU, 2015). Ao adotar sistemas fotovoltaicos, surge uma direção à meta do ODS 7, que visa assegurar acesso a uma energia sustentável, moderna e acessível para todos. Simultaneamente, a implementação de telhados verdes, alinhada ao ODS 11, contribui para o desenvolvimento de cidades e comunidades sustentáveis. Essa prática não apenas reduz o efeito das ICUs, melhorando o conforto térmico, mas também oferece espaços verdes que promovem a biodiversidade e a qualidade de vida urbana (ONU, 2015).

Abdalazeem et al. (2022), propõem duas abordagens para diminuir as ondas de calor e melhorar as condições internas de uma construção. A primeira se refere ao telhado verde, que é uma técnica de resfriamento passivo gerado pós-implementação (Fahmy et al., 2020; Zluwa; Pitha, 2021) e a segunda abordagem é a produção de energia no local gerada através da implementação de módulos fotovoltaicos (Khotbehsara; Daemei; Malekjahan, 2019). O estudo realizado por Abdalazeem et al. (2022) destacaram que a integração dessas duas tecnologias é aplicada visando atingir um equilíbrio energético por meio das melhorias em questões econômicas e aumento de produção de energia através das células fotovoltaicas.

Os telhados verdes são estudados como forma de tecnologias que podem proporcionar maior desempenho térmico de uma estrutura (Fleck et al., 2022). Para Oberndorfer et al. (2007), os telhados verdes consistem em camadas que incluem impermeabilização, drenagem, isolamento com solo e plantas específicas para essa aplicação. São aplicados conforme especificidades ecológicas e técnicas efetivas de funcionamento. O tamanho dos habitats é o fator que determina as populações de plantas, porém a dificuldade é saber o quão grande deve ser esse espaço verde para apoiar a conservação da biodiversidade na área urbana local (Mayrand; Clergeau, 2018).

Os telhados verdes podem desempenhar um papel essencial na redução consumo de energia, contribuindo para o conforto térmico do ambiente, ao

mesmo tempo que desempenham um papel sustentável na conservação da biodiversidade. Já a aplicação de módulos fotovoltaicos desenvolve características de produção de energia sustentável e é uma tecnologia que promove a eficiência energética. Para Habibi, Obonyo e Memari (2020), a implantação de módulos fotovoltaicos em edifícios deve considerar aspectos como a radiação solar disponível e a área da cobertura. Os autores sugerem que em busca de estimar a produção de energia de um painel fotovoltaico, deve-se estudar a classificação dos edifícios de acordo com o tamanho, a orientação do telhado e o ângulo de inclinação dos painéis com base nas condições climáticas locais.

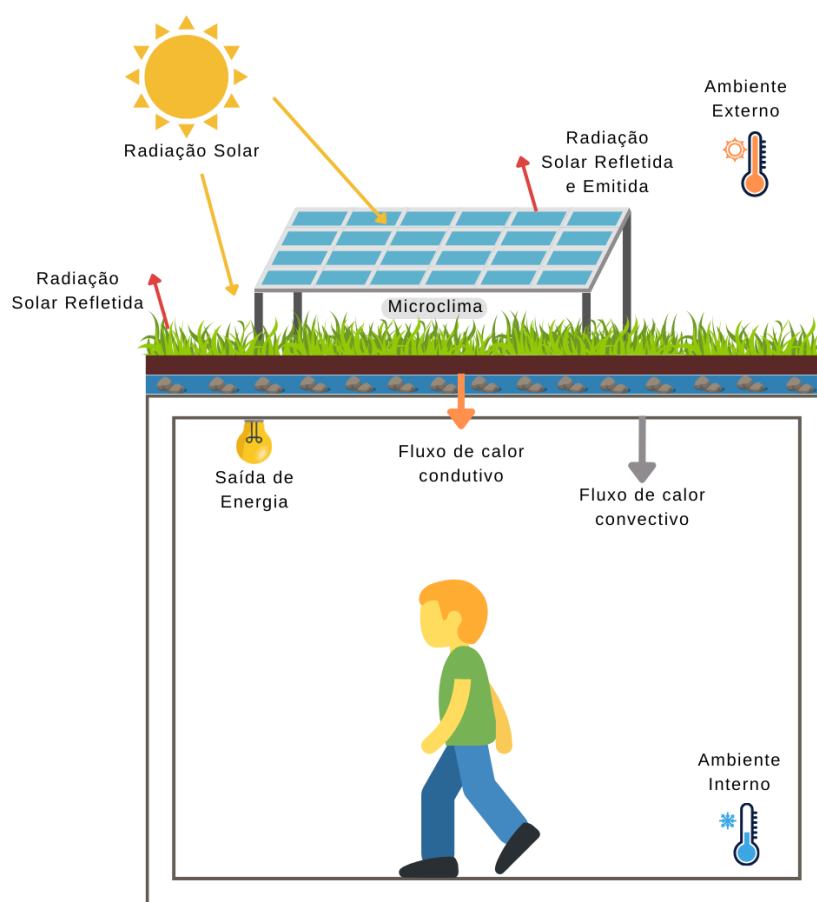
Conforme ressaltado por Smith et al. (2022) a adoção global de fontes de energia renovável tem crescido, com os módulos fotovoltaicos desempenhando um papel significativo na geração de energia. No entanto, a intensidade solar elevada e o aumento das temperaturas nas regiões onde esses módulos são instalados podem comprometer sua eficiência (Dupré; Vaillon; Green, 2015). Em ambientes de climas quentes, onde as temperaturas no verão excedem os 35°C, os módulos fotovoltaicos podem atingir temperaturas até 60°C (Müller; Friedrich, 2010). Nesse contexto, as temperaturas operacionais dos módulos comuns oscilam entre 45°C e 65°C, situando-se de 20°C a 40°C acima da temperatura nominal da Condição de Teste Padrão (CTP), que é em torno de 25°C (King; Kratochvil; Boyson, 1997). Nessa faixa de temperatura, as células solares de silício, amplamente utilizadas, podem perder eficiência a uma taxa de até 0,5% por grau acima da CTP (King; Kratochvil; Boyson, 1997). Torna-se evidente que operar os painéis em temperaturas mais elevadas não apenas afeta imediatamente a eficiência, mas também levanta a preocupação da potencial redução na vida útil dos módulos.

Os pontos destacados anteriormente ressaltam que a eficiência na implementação das tecnologias de telhado verde e módulos fotovoltaicos é significativa quando essas abordagens são integradas. Isso é particularmente evidente ao analisar a relação entre os módulos fotovoltaicos e a Condição de Teste Padrão (CTP), cuja importância se reflete na eficiência energética global do sistema. Internacionalmente conhecida como *Green Roof Integrated Photovoltaics* – GRIPV, ou Módulos Fotovoltaicos Integrados ao Telhado Verde

(Witmer; Brownson, 2011), a instalação conjunta dessas duas tecnologias representa uma abordagem sinérgica que maximiza os benefícios de ambas, resultando em uma solução mais eficaz e sustentável. O GRIPV representa uma abordagem inovadora que integra tecnologia fotovoltaica à ecologia do telhado verde, proporcionando uma solução sustentável para a geração de energia renovável e a promoção da biodiversidade

A Figura 1 apresenta um esquema visual geral do sistema GRIPV nos ambientes interno e externo. Esta representação visual oferece uma análise aprofundada dos componentes e funcionalidades do sistema, contendo as três camadas principais do telhado verde (vegetação, solo e drenagem), bem como o módulo fotovoltaico e o ambiente interno da edificação.

Figura 1. Esquema visual geral do sistema GRIPV nos ambientes interno e externo.



Fonte: Autora (2024).

1.2 JUSTIFICATIVA

Para deixar a pesquisa mais abrangente, busca-se preencher as lacunas de estudos sobre o sistema GRIPV. Inicialmente foi elaborado uma revisão sistemática em dois bancos de dados da literatura: Scopus e Google Scholar. Nesse sentido, foram definidas quatro palavras-chave principais, que são: “GREEN ROOF INTEGRATED PHOTOVOLTAICS”, “PHOTOVOLTAICS” AND “GREEN ROOF”, “PV/GR” e “TELHADO VERDE E FOTOVOLTAICO”, encontrando um total de 33 artigos relacionados ao tema de pesquisa. Sobre os estudos de aplicação das duas tecnologias, telhado verde e energia fotovoltaica, há registros desde 2010.

Witmer e Brownson (2011) propõem as equações do balanço energético do sistema GRIPV analisando as superfícies das partes do telhado verde (vegetação, substrato e drenagem) e o módulo fotovoltaico. Já Cavadini e Cook (2021) propõem equações do balanço energético para duas situações do sistema GRIPV, na primeira situação, simula-se o rendimento de energia do painel, enquanto na segunda estima-se a temperatura da superfície do telhado, ambas são utilizadas como entrada para um *software* de simulação. Nesse sentido, verifica-se que os balanços energéticos propostos na literatura são simplificados e adaptados para *softwares* de simulação, demonstrando a necessidade de uma pesquisa que elabore um balanço de energia completo do sistema GRIPV. Abrangendo propriedades como teor de umidade do solo, índice de área foliar e conforto térmico interno.

Abdalazeem et al. (2022), apresenta uma ampla revisão de literatura sobre telhados verdes, bem como o sistema GRIPV. As lacunas de pesquisas para o sistema GRIPV apresentadas pelos autores Abdalazeem et al. (2022) são estudos em outros climas, como climas frios, equatoriais e tropicais, bem como a investigação do sistema aplicado em diferentes escalas urbanas. Nesse contexto, a presente pesquisa visa realizar uma análise abrangente da transferência de calor e do desempenho térmico, empregando balanços de massa e energia para o sistema GRIPV. Este enfoque será claramente destacado durante a revisão bibliográfica, que também abordará simulações em escalas reais e um estudo experimental.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo e um modelo matemático para monitorar a variação da temperatura e umidade ao longo do tempo, bem como o comportamento térmico no sistema GRIPV.

1.3.2 Objetivos Específicos

Alinhados com o objetivo geral deste trabalho, foram considerados os seguintes objetivos específicos:

- i. Construir um sistema GRIPV fundamentado nas características ótimas de telhado/coberturas verdes e módulos fotovoltaicos;
- ii. Instrumentar o sistema GRIPV para coleta de dados de temperatura e umidade ao longo dos meses de verão;
- iii. Avaliar o comportamento térmico;
- iv. Desenvolver um modelo matemático que considere os efeitos de transferência de calor e massa em telhados verdes com a integração de módulos fotovoltaicos;
- v. Simular o comportamento das temperaturas tanto no telhado verde quanto no módulo fotovoltaico e na edificação, e comparar com os resultados experimentais;

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 1 apresenta a motivação para o trabalho e explica os conceitos fundamentais do sistema em estudo. O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica dos temas e pesquisas que analisaram a aplicação e a estruturação dos telhados verdes, a eficiência e o funcionamento dos módulos fotovoltaicos. Bem como a aplicação e uso das duas tecnologias. O Capítulo 3 apresenta a construção do protótipo, envolvendo a seleção dos tipos de plantas que foram estudadas, as especificações do módulo fotovoltaico, bem como, a instrumentação. No

Capítulo 4 está apresentado o modelo matemático do sistema GRIPV, considerando os balanços energético e de massa. No capítulo 5 estão apresentados os resultados obtidos na pesquisa e as discussões pertinentes ao tema. Por fim, o Capítulo 6 propõe as considerações finais, conclusões da pesquisa e as sugestões de estudos futuros. No final deste documento estão apresentadas as Referências Bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foram revisados os principais temas para elaboração da pesquisa proposta. Foram destacados os tipos de telhados verdes, os tipos de plantas utilizadas nesse sistema, o funcionamento e estruturação desta tecnologia. Também foram descritas as principais definições dos módulos fotovoltaicos, o funcionamento e suas perdas. Por fim, foram revisadas as aplicações das duas tecnologias e os conceitos de transferência de calor nesse conjunto.

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

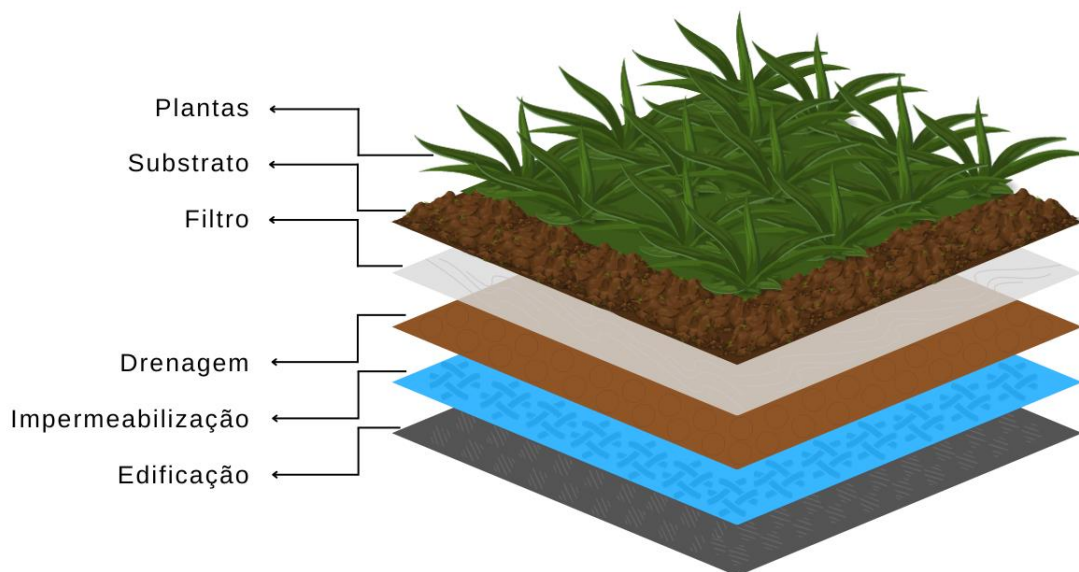
2.1.1 Telhado Verde

A literatura propõe diversas soluções ecológicas, como telhados verdes, paredes verdes e árvores urbanas, que são adotadas para mitigar o efeito das ICUs, bem como economia de energia e conforto térmico interno (Abdallah et al., 2020; Fahmy et al., 2020). Os telhados verdes são mais utilizados porque estão expostos à maior irradiância solar (Costanzo et al., 2016), enquanto as paredes verdes tendem a aumentar a temperatura do ar externo em razão da radiação refletida (Fahmy et al., 2020).

Os telhados verdes são compostos por três camadas principais, sendo a primeira camada a vegetação, a segunda substrato e a terceira drenagem, que mantém o equilíbrio entre ar e água (Cook e Larsen, 2021). Existem também alguns componentes secundários e essenciais, como a camada de filtro, que é permeável à água, camada de drenagem, camada de raízes ou filtro, que auxilia como barreira para que as raízes não afetem outras camadas do sistema, e a camada de impermeabilização (Abdalazeem et al., 2022).

Na Figura 2 são apresentadas as principais camadas do telhado verde, destacando elementos essenciais para sua estrutura e funcionamento. Esta análise visual fornece uma visão clara das diferentes camadas que compõem um telhado verde bem-sucedido, são elas: plantas, substrato, filtro, drenagem, impermeabilização e edificação.

Figura 2. Principais camadas do telhado verde.



Fonte: Autora (2024).

Existem dois principais tipos de telhados verdes, o intensivo e o extensivo (Abdalazeem et al., 2022). O telhado verde intensivo é caracterizado pela alta profundidade de solo, variando entre 30 e 120 cm, com grande massa nas camadas, alta capacidade de retenção de água, acomodando diferentes tipos de plantas e possuindo altos custos de manutenção, irrigação e fertilização (Jamei et al., 2021; Zluwa; Pitha, 2021). Já o telhado verde extensivo é mais econômico, possui baixo peso, altura entre 10 e 15 cm e menores custos de manutenção e irrigação (Jamei et al., 2021; Zluwa; Pitha, 2021). A literatura também apresenta o telhado verde semi-intensivo, que possui uma espessura de solo variando entre 15 e 30 cm, possuindo características semelhantes ao intensivo, porém com menores custos de manutenção (Jamei et al., 2021; Zluwa; Pitha, 2021).

Conforme proposto pela revisão feita por Abdalazeem et al. (2022), o telhado verde intensivo é o tipo mais eficaz de telhado verde, atingindo o melhor desempenho nos parâmetros de mitigação da ilha de calor urbano, economia de energia e conforto térmico em climas quentes. No entanto, o telhado verde extensivo é mais econômico em decorrência dos menores custos de manutenção e irrigação e menor volume de solo necessário para suas camadas.

As plantas mais indicadas para os telhados verdes são aquelas que necessitam de pouca profundidade de solo e são resistentes à escassez de

água (Abdalazeem et al., 2022). O tipo de telhado verde determina quais serão as plantas de acordo com o tamanho das raízes e a altura da planta (Abdalazeem et al., 2022). A literatura indica que as plantas do gênero *Sedum* são as mais utilizadas para os telhados verdes. Isso ocorre em razão da sua capacidade de crescer em substratos rasos e com baixa disponibilidade de água e reposição de nutrientes (Cook; Larsen, 2021; Jamei et al., 2021). No Brasil, *Sedum* são comumente conhecidas como suculentas.

No estudo feito por Azeñas et al. (2018), o *Sedum sediforme* teve melhor desempenho do que o *Brachypodium phienicoides*, como isolante na redução da temperatura do substrato, melhorando o conforto térmico interno e economizando energia no clima árido da Espanha. Outro estudo apresenta que o *Amendoim perene* plantado em uma camada de substrato de 10 cm tem uma vantagem de capacidade térmica maior em comparação com o *Sedum*, e reduziu a demanda de energia de aquecimento no inverno em climas subtropicais quentes (Kokogiannaki et al., 2014). Já a *Salvia officinalis* produziu a melhor redução de temperatura de superfície, máxima economia de energia e conforto térmico interior sob o clima mediterrâneo quente ao longo de um ano (Cascone et al., 2019). No geral, Abdalazeem et al. (2022) propõem que sejam feitos estudos comparativos entre plantas em diversas estações e condições climáticas. A Figura 3 ilustra visualmente os três tipos de plantas mencionadas. Essas plantas desempenham papéis distintos na regulação térmica de telhados verdes, como evidenciado por pesquisas anteriores.

Figura 3. Tipos de plantas para telhados verdes.



Fonte: Adaptado de Kokogiannaki et al. (2014); Cascone et al. (2019); Cook et al. (2021); Jamei et al. (2021); Abdalazeem et al. (2022).

O trabalho elaborado por Sattler, Zluwa e Österreicher (2020) apresenta diversas plantas que foram aplicadas ao telhado verde integrado ao sistema fotovoltaico. Nos testes realizados pelos autores, três diferentes zonas de luz, que foram em diferentes graus influenciadas pelo sombreamento dos painéis fotovoltaicos, foram identificadas como: Zona 1, com áreas predominantemente sem sombra com pouca influência dos módulos fotovoltaicos; Zona 2, com áreas semisombreadas, e Zona 3, com áreas majoritariamente sombreadas com forte influência dos módulos fotovoltaicos. Dentro dessas áreas, diferentes espécies vegetais anuais e semestrais, herbáceas perenes, gramíneas e trepadeiras foram inventariadas durante um período de três anos.

Com base em critérios como vitalidade, crescimento e sucesso de floração ao longo de um monitoramento de três anos, foi possível identificar plantas adequadas para diferentes zonas climáticas (Sattler, Zluwa e Österreicher, 2020). O protótipo foi construído em Viena, Áustria, caracterizada por um clima oceânico continental com invernos rigorosos e verões suaves, apresentando uma média de temperatura de 25°C. O Quadro 1 sintetiza as plantas que demonstraram características favoráveis nos testes conduzidos por Sattler, Zluwa e Österreicher (2020) no contexto de um telhado verde integrado com módulos fotovoltaicos.

A tonalidade das folhas que compõem a cobertura vegetal do telhado verde desempenha um papel significativo na quantidade de radiação solar refletida e absorvida. No contexto de climas mediterrâneos, Monteiro et al. (2017) recomendam particularmente folhas de cor clara, apontando para a redução da temperatura da superfície do telhado verde em ambientes quentes e úmidos. Reforçando essa perspectiva, Pandey, Hindoliya, Mod (2013) sugerem que tons mais frios são mais eficazes durante o verão, contribuindo para a eficiência energética nas condições climáticas quentes da região mediterrânea.

O solo é a segunda camada do telhado verde e contribui para o crescimento das plantas. Sua profundidade está relacionada ao tipo de solo, sendo entre 5 e 10 cm para telhado verde extensivo e entre 15 e 20 cm para telhado verde intensivo (Susca, 2019). A profundidade rasa do solo tem efeito positivo quando se trata do consumo de energia de resfriamento no verão, enquanto uma profundidade mais espessa de solo reduz a demanda de energia de aquecimento

no inverno (Abdalazeem *et al.*, 2022). De modo geral, a literatura apresenta que a melhor profundidade de solo varia entre 10 e 20 cm (Koura *et al.*, 2017; Permpituck; Namprakai, 2012). Geralmente, tal camada é composta por matéria orgânica e minerais porosos de baixo peso, pedra-pomes e argila expandida (Scolaro; Ghisi, 2022).

Quadro 1. Resumo das plantas adequadas para o sistema GRIPV.

Tipo	Espécies	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Gramíneas	<i>Calamagrostis, acutiflora</i>	X	X	X
	<i>Carex ornithopoda</i>	X	X	X
	<i>Deschampsia cespitosa Bronzeschleier</i>	X	X	X
	<i>Axonopus compressus</i>	X	X	X
Anuais e Semestrais	<i>Antirrhinum majus</i>	X	X	X
	<i>Echium vulgare</i>	X	X	
	<i>Silene vulgaris</i>	X	X	
	<i>Verbascum nigrum</i>	X	X	
Ornamentais Perenes	<i>Aster divaricatus</i>	X	X	X
	<i>Campanula portenschlagiana</i>	X	X	X
	<i>Coreopsis lanceolata</i>	X	X	X
	<i>Hemerocallis lilioaspedelus</i>	X	X	X
	<i>Hosta sp.</i>	X	X	X
	<i>Iris foetidissima</i>	X	X	X
	<i>Prímula denticulata</i>	X	X	X
Samambaias	<i>Polístico sp.</i>		X	X
	<i>Asplenium trichomanes</i>	X	X	X
	<i>Filite scolopendrium</i>	X	X	X
Trepadeiras	<i>Jasminum nudiflorum</i>	X	X	X
	<i>Lonicera sp.</i>	X	X	X
	<i>Rosa Filipes</i>	X	X	X
	<i>Vitis vinífera</i>	X	X	X

Fonte: Adaptado de Sattler, Zluwa e Österreicher (2020).

A terceira e quarta camadas, filtro e drenagem, desempenham um papel importante na construção do telhado verde, pois auxiliam no transporte da água controlando a umidade do solo (Abdalazeem *et al.*, 2022). A camada filtrante

visa evitar que partículas escorram com a água e bloqueiem a camada drenante (Vila et al., 2012). A literatura indica que normalmente a camada filtrante é feita utilizando polietileno ou polipropileno (Scolaro; Ghisi, 2022). A camada de drenagem deve reter a água para a vegetação, permitir a drenagem do excesso de água e garantir que o substrato e as raízes permaneçam arejados (Vila et al., 2012). Geralmente é feita de polietileno, poliestireno ou polipropileno, entretanto, (Rincón et al., 2014) apresentaram que a borracha reciclada de pneus pode ser usada nesta camada em telhados verdes extensivos.

A camada de impermeabilização serve para que a água não ultrapasse para as outras camadas e seja direcionada para o escoamento final, geralmente por meio de calhas (Scolaro; Ghisi, 2022). Os materiais utilizados nesta camada são fibras têxteis poliméricas e recicladas, perlite expandida e cloreto de polivinilo (Scolaro; Ghisi, 2022).

A literatura indica que o telhado verde sem isolamento térmico tem efeito positivo na redução de temperatura do ar interno e na demanda de energia de resfriamento no verão (Bevilacqua et al., 2020). Enquanto o telhado verde com isolamento térmico gera redução do consumo de energia de aquecimento no inverno e em noites frias, sendo necessário definir a utilização dessa camada de acordo com o clima regional (Abdalazeem *et al.*, 2022). Nesta camada são utilizados materiais como placas de espuma, papelão e telhas de filtron (Scolaro; Ghisi, 2022).

2.1.2 Módulos fotovoltaicos

Ao avaliar módulos fotovoltaicos a literatura apresenta estudos sobre o ângulo de inclinação, que se refere ao ângulo formado entre a superfície do painel e a superfície que será instalado, variando entre 0° e 90° (Abdalazeem *et al.*, 2022). Esse ângulo tem grande relevância, pois está relacionado diretamente à quantidade de eletricidade gerada pelo módulo fotovoltaico (Statler; Adams; Eckmann, 2017). Varia conforme as diferentes estações locais, permitindo que a célula fotovoltaica receba maior, ou menor, quantidade de radiação solar (Rock; Ashrae, 2020). O ângulo tende a ser menor no verão e maior no inverno, podendo ser reajustado de acordo com a estrutura que foi instalado (Statler;

Adams; Eckmann, 2017). Para painéis fixos, sem possibilidade de inclinação, foram estudadas diferentes localizações globais, onde o ângulo mais adequado depende da latitude, determinado como: 30° na Indonésia (Susan; Wardhani, 2020) e no Nepal (Gautam; Li; Ru, 2015), 33° na Catalunha, Espanha (Lamnatou; Chemisana, 2014), 45° em Calgary, Canadá (Hachem, 2016) e 28° em New Cairo, Egito (Ahmed et al., 2021).

Na pesquisa de Jirapongphatai *et al.* (2023), foi desenvolvido um método de resfriamento evaporativo de água para melhorar o desempenho de um módulo fotovoltaico flutuante. O módulo foi posicionado voltado para o sul, com uma inclinação de 18°, e o experimento foi realizado em Chiang Mai, Tailândia. Utilizando uma almofada hidrofílica de polipropileno misturada com fibra sintética, o estudo realizou testes experimentais em um módulo monocristalino. Ao aplicar a técnica de resfriamento, a temperatura do módulo foi reduzida de 73,2°C para aproximadamente 46°C em dias de céu claro, resultando em um aumento de 10% na geração total de energia elétrica. O uso de maior vazão de água e temperaturas mais baixas também melhorou o desempenho. Durante o verão, o resfriamento evaporativo proporcionou um aumento de 6,5% a 11,1% na geração de energia elétrica líquida quando a temperatura da água de alimentação variou entre 20-30°C.

Osma-Pinto e Ordóñez-Plata (2019) conduziram estudos em um clima tropical quente na Colômbia para avaliar a influência de três variáveis na eficiência de módulos fotovoltaicos instalados em telhados verdes. Os experimentos envolveram diferentes alturas de instalação (25, 50, 75 e 100 cm), tipos de telhado (vegetação e concreto) e velocidades do ar (0, 1,15 e 2,10 m/s). Os telhados verdes testados consistiam em camadas que incluíam geotêxtil, manta impermeabilizante, drenagem, substrato e vegetação do gênero *Sedum*. No Experimento I, foi concluído que a altura ideal para instalação dos módulos fotovoltaicos em telhados verdes está entre 50 e 75 cm. Comparado a telhados de concreto, os telhados verdes aumentaram a geração diária de energia em aproximadamente $1 \pm 0,4\%$ e $2 \pm 0,4\%$. No Experimento II, onde se variou a velocidade do ar com ventilação forçada, observou-se um aumento médio diário de energia de $2 \pm 0,4\%$ e $3 \pm 0,4\%$ para as velocidades do ar testadas. Esses

aumentos correspondem a um acréscimo de 20 a 30 Wh na produção diária de um módulo fotovoltaico de 255 W, capaz de gerar até 1 kWh por dia.

Rahmaniah et al. (2021) realizaram um estudo em Cingapura para avaliar o impacto da altura de elevação de módulos em sistemas de telhado verde e fotovoltaico em um clima tropical. O experimento incluiu seis matrizes com diferentes alturas de elevação dos módulos fotovoltaicos, variando de H1 (inferior a 60 cm e superior a 95 cm) a H3 (inferior a 100 cm e superior a 135 cm). Cada matriz cobria uma área de 2x3 m com cobertura verde usando solo misturado com a planta trepadeira Wedelia (*Sphagneticola trilobata*), comumente encontrada no clima tropical. A pesquisa monitorou microclimas ambientais, irradiância solar, temperatura do ar, umidade relativa e ventos. Os resultados indicaram que a altura H1, com maior sombreamento solar, promoveu o maior crescimento vertical (35,74 cm em média) e horizontal das plantas. Em contraste, o H3, com menor sombreamento, apresentou menor crescimento (19,82 cm em média). O sistema telhado verde e fotovoltaico também manteve temperaturas do ar mais baixas, maior umidade relativa e menor variação diurna das condições microclimáticas em comparação com telhados verdes abertos e de concreto. Além disso, o solo sob os módulos fotovoltaicos conservou mais umidade. Os autores recomendaram pesquisas adicionais para melhor entender como a altura dos módulos influencia esses fatores.

Considerando o crescimento da planta, taxa de evapotranspiração do telhado verde (Jahanfar et al., 2019) e o resfriamento da traseira do painel (Ogaili; Sailor, 2016), a altura mais adequada depende do tipo de telhado e do tipo de planta. Para um telhado verde semi-intensivo, a altura adequada foi de 60 cm entre os painéis e o telhado (Zluwa; Pitha, 2021; Arenandan et al., 2022). Conforme apresentado por Abdalazeem et al. (2022), a altura entre o telhado verde e o módulo fotovoltaico deve ser entre 50 e 70 cm, para permitir que a radiação solar e o vento atinjam a camada de vegetação, e para que ocorra o efeito de resfriamento da parte traseira do painel.

2.2 TELHADO VERDE INTEGRADO AO FOTOVOLTAICO

2.2.1 Eficiência do conjunto

Nagengast et al. (2013) elaboraram um projeto chamado de “*Sunscape*” que possui três tipos de tecnologias fotovoltaicas, dois tipos de telhados verdes (musgo e *sedum*), um telhado branco termoplástico (TPO) e um telhado preto de monômero de etileno propileno dieno (EPDM). Neste trabalho foram estudados apenas o telhado verde fotovoltaico e preto fotovoltaico. Nesta pesquisa, foram estabelecidas equações de regressão linear, uma técnica amplamente conhecida para prever a temperatura da célula fotovoltaica e a potência de saída em sistemas fotovoltaicos. Posteriormente essas regressões baseadas no projeto de Pittsburgh foram usadas para estimar, hipoteticamente, a diferença esperada na potência fotovoltaica de telhados verdes e pretos, em outras localizações com outras condições climáticas. Utilizando os diferentes perfis climáticos de Huntsville, San Diego e Phoenix, buscou-se analisar sob quais parâmetros climáticos o ar mais frio acima do telhado verde aumenta a produção de energia fotovoltaica em comparação com os telhados pretos, a magnitude da diferença na produção de energia fotovoltaica e uma faixa de resultados potenciais.

Os resultados de Nagengast *et al.* (2013) mostram que, em Pittsburgh, os módulos fotovoltaicos em telhados verdes superaram os instalados em telhados pretos, gerando 0,02 kW (0,5%) a mais, em média, durante o ano. Essa diferença se deve a fatores como a configuração do teste e o clima local. Durante o dia, em temperaturas acima de 25 °C, os telhados verdes ajudaram a diminuir a temperatura ao redor dos módulos, resultando em mais energia gerada em comparação com os telhados pretos. Assim, locais com temperaturas superiores a 25 °C tendem a se beneficiar mais dos telhados verdes com módulos fotovoltaicos.

Nagengast et al. (2013) também apresentaram que tanto em San Diego quanto em Huntsville, o módulo fotovoltaico do telhado verde produziu um pouco mais de energia do que a do telhado preto, 0,04 kW e 0,03 kW respectivamente, quando calculada a média durante todo o ano de horas de luz do dia. Em

Phoenix, a combinação telhado verde fotovoltaico produziu 0,08 kW, 1,3% a mais do que o módulo fotovoltaico do telhado preto. Os autores concluem que com base na configuração específica do *Pittsburgh Sunscape*, a escolha do telhado verde ou preto sob os módulos fotovoltaicos teve pouco impacto no desempenho fotovoltaico. Entretanto, os gerentes e projetistas de edifícios devem considerar a interação entre o tipo de telhado e a saída de energia fotovoltaica como um fator econômico.

A pesquisa feita por Chemisana e Lamnatou (2014) investiga o comportamento experimental de dois telhados verdes fotovoltaicos e sua comparação com um telhado de cascalho fotovoltaico de referência, sob as condições climáticas mediterrâneas da Espanha. Com base nos critérios propostos pela literatura, os autores selecionaram duas espécies de plantas mediterrâneas: *Gazania rigens* e *Sedum clavatum*, para o desenvolvimento de seus sistemas experimentais. Essas plantas são resistentes e adequadas para coberturas verdes extensivas, além disso, possuem folhagem densa e baixa e suas folhas são claras. Os dados foram coletados durante testes ao ar livre. Os parâmetros desse experimento foram monitorados durante dois meses.

Os resultados apresentados por Chemisana e Lamnatou (2014) revelaram que a camada de solo/planta causa um efeito positivo que leva à melhoria do desempenho elétrico do módulo fotovoltaico, com porcentagens médias de cinco dias de aumento de potência máxima para telhado verde fotovoltaico com *Gazania* e telhado verde fotovoltaico com *Sedum* de 1,29% e 3,33%, respectivamente, em comparação com o telhado de cascalho fotovoltaico. O módulo fotovoltaico colocado em *Sedum* obteve maior aumento de potência (2,24%) do que o colocado em *Gazania*. As características da planta levam a uma melhoria da saída fotovoltaica e, além disso, os módulos protegem as plantas de altas irradiâncias. Como benefício da combinação de módulos fotovoltaicos com telhados verdes, surge um potencial fator para reduzir o consumo de energia do edifício.

Silva *et al.* (2018) propuseram uma solução inovadora que consiste em um sistema de sombreamento que integra módulos de telhados verdes e módulos fotovoltaicos com rastreamento solar. O rastreamento solar consiste em módulos fotovoltaicos que se movem de acordo com a direção do sol.

Geralmente esse sistema aumenta o custo inicial da instalação, mas pode levar à produção de mais eletricidade. O critério de projeto para o desenvolvimento do rastreador solar foi o de otimizar a produção de energia ao longo do ano, minimizando o impacto estético, a carga de vento e o sombreamento do telhado verde, sendo selecionado um sistema de eixo. O projeto do telhado verde foi realizado levando em consideração sua exposição a condições extremas, como temperaturas elevadas, solo raso, vento e alta exposição à luz. Nesse sentido, foram selecionadas plantas pré-cultivadas de baixa manutenção e substrato raso. O telhado verde foi composto por mistura de espécies de plantas, sendo 33 *Herbáceas* perenes e anuais, 4 *Stonecrops* e 7 espécies de gramíneas.

Como resultados Silva *et al.* (2018) apresentaram uma boa integração entre o mecanismo de rastreamento solar e o telhado verde permitindo um aumento de 22,9% no rendimento energético, quando comparado com módulos fotovoltaicos horizontais, mantendo a compatibilidade com o telhado verde, limitando o ângulo de rotação a 30 graus. Os resultados também confirmam a resistência do mix selecionado de espécies de plantas às condições de exposição parcial à sombra que são esperadas para o telhado verde em razão da sua interação com o rastreador solar desenvolvido.

Sattler, Zluwa e Österreicher (2020) apresentam o projeto "*PV Rooftop Gardens: Innovative Systems for the Future*" que buscou integrar sistemas fotovoltaicos e telhados verdes em uma única área de telhado. O objetivo era encontrar projetos prototípicos que combinassem áreas verdes de lazer, geração de energia renovável e retenção de águas pluviais em uma superfície de cobertura, proporcionando benefícios múltiplos por metro quadrado. A equipe interdisciplinar desenvolveu vários projetos para diferentes layouts de construção, levando em consideração aspectos arquitetônicos, construtivos, facilidade de montagem, espécies de plantas, permeabilidade, retenção de água e desempenho do sistema fotovoltaico. Especial atenção foi dada à adaptação dos telhados planos existentes, para atualizar a infraestrutura do edifício. Os protótipos foram analisados e testados em relação ao projeto estrutural, escolha de plantas adequadas e produção de energia.

Os autores Sattler, Zluwa e Österreicher (2020) elaboraram um projeto de telhado fotovoltaico com jardim e horta na parte inferior, em um terraço de um

edifício. Um protótipo simples foi feito para estudo das reações das diversas espécies de plantas e posteriormente um projeto arquitetônico e estrutural foi elaborado em software como ideia de implementação futura. O projeto de pesquisa propôs o uso eficiente das superfícies dos telhados, permitindo que sejam utilizadas para áreas de lazer, plantas e produção de energia. Os autores destacam que o projeto é adequado para a modernização de edifícios existentes e pode aumentar a biodiversidade urbana. Além dos benefícios ecológicos, os telhados verdes também melhoram o conforto térmico. O sistema pode ser aplicado em diferentes contextos, como espaços abertos e grandes áreas. No entanto, é necessário cuidado na seleção das espécies vegetais adequadas e deve-se considerar as restrições estruturais e regulatórias. A implementação real em projetos de reforma de edifícios é necessária para testar e amadurecer o sistema para o mercado.

O estudo realizado por Fleck et al. (2022) apresenta um comparativo entre dois edifícios idênticos, um contendo telhado verde e outro telhado convencional. Este estudo foi realizado em Sydney, Austrália, iniciado na primavera de 2020 e concluído no outono de 2021, com período de observação e coleta de dados de 218 dias. Os edifícios possuem idade e material de construção semelhantes, com unidade de tratamento de ar e infraestrutura de telhado quase idênticas. O telhado verde apresentava um painel solar integrado voltado para o norte, enquanto o telhado convencional apresentava um painel solar voltado para o leste/oeste. Mostrou-se que o telhado verde possui capacidade de reduzir o efeito de radiação solar que ocasiona o aquecimento dos espaços interiores, promovendo a eficiência térmica em edifícios urbanos. No decorrer da pesquisa, verificou-se que o uso do telhado verde para reduzir as temperaturas da superfície foi eficaz em aproximadamente 30°C. Embora as temperaturas dos edifícios tenham sido semelhantes na primavera, notaram-se diferenças significativas no verão e no outono.

Fleck et al. (2022) observaram uma redução de até 17°C por termografia e 20°C por sensores de temperatura nas temperaturas da superfície do telhado. Essas descobertas estão alinhadas com estudos anteriores, indicando que os telhados verdes australianos podem ajudar a reduzir o aquecimento dos edifícios durante o verão e em condições de ondas de calor intensas. O microclima do

telhado também foi afetado significativamente, com temperaturas ambiente sombreadas até 56% mais frias em comparação com telhados convencionais. Isso pode ser atribuído à evapotranspiração das plantas e ao fluxo de ar adicional proporcionado pela altura e orientação dos painéis fotovoltaicos. Os cálculos de fluxo de calor demonstraram uma redução significativa na entrada e saída de energia térmica no envelope do edifício ao longo das estações. O telhado verde foi capaz de mitigar até $13,37 \text{ W/m}^2$ de calor que entraria no edifício durante a primavera e reduzir em $20,52 \text{ W/m}^2$ o fluxo de calor que sai do edifício durante o outono. Esses resultados destacam o potencial de economia de energia em propriedades comerciais australianas, que dependem muito do ar-condicionado para resfriamento no verão e aquecimento no inverno.

O artigo de Alonso-Marroquin e Qadir (2023) investiga a sinergia entre painéis fotovoltaicos (PV) e telhados verdes (GR) em estruturas de telhado separadas. O estudo avaliou três dimensões: conforto interno, temperatura da superfície traseira dos PVs e produção de energia solar. Para isso, foram comparadas duas casas off-grid, uma com telhado fotovoltaico simples (SRH) e outra com telhado duplo (DRH) combinando PV-GR. A análise revelou que a DRH, com sua combinação de PV e GR, proporcionou melhor desempenho em termos de conforto térmico, temperaturas mais baixas dos PVs e maior rendimento energético, comparado ao SRH.

Durante os 15 meses de observação, o DRH demonstrou temperaturas internas consistentemente mais baixas, especialmente durante os picos de radiação solar, e a temperatura traseira dos PVs foi reduzida em até 5°C devido à evapotranspiração das plantas. A produção energética do DRH superou a do SRH em média em 18%, mostrando a importância da sinergia entre PV e GR. A pesquisa conclui que a combinação de PV-GR em telhados duplos oferece vantagens significativas para o desempenho térmico e energético, sugerindo que estratégias adicionais de design passivo poderiam otimizar ainda mais esses benefícios (Alonso-Marroquin; Qadir, 2023).

O artigo de Abdalazeem et al. (2024) aborda o duplo impacto dos telhados verdes (GR) no conforto térmico interno e na eficiência de painéis fotovoltaicos (PV) em climas áridos de estepe quente (BSh). O estudo destaca a carência de investigações sobre como parâmetros específicos do telhado verde, como tipo e

profundidade do solo, vegetação e irrigação, influenciam o desempenho térmico e energético dos edifícios. O objetivo é preencher essa lacuna, comparando diferentes configurações de telhado (cru, vegetado e PV/GR) para avaliar suas contribuições no conforto térmico interno e na eficiência energética em um contexto árido, com foco em duas salas de teste instaladas no Egito.

Os resultados de Abdalazeem et al. (2024) revelaram que diferentes cenários de telhados verdes reduziram as temperaturas internas durante o dia, com variações significativas dependendo do tipo e condição do solo. Solos argilosos irrigados mostraram a maior redução de temperatura interna durante o dia, alcançando até 10,75% (4,0°C). No entanto, à noite, esses solos aumentaram ligeiramente as temperaturas internas. Em termos de umidade relativa, todos os cenários aumentaram a umidade durante o dia, com os maiores aumentos observados em solos irrigados. A cobertura vegetal também teve um impacto positivo, aumentando a redução da temperatura interna durante o dia. Em relação aos sistemas PV/GR, uma maior cobertura fotovoltaica e uma altura intermediária dos painéis proporcionaram melhores condições térmicas internas.

Conclusivamente, o estudo de Abdalazeem et al. (2024) recomenda o uso de solo argiloso irrigado com baixa profundidade e uma alta taxa de cobertura fotovoltaica para otimizar o desempenho térmico e energético. Os benefícios incluem a redução da temperatura interna em até 19,12% e o aumento da produção de eletricidade fotovoltaica em até 2,27%. Além disso, cada metro quadrado do sistema PV/GR pode reduzir as emissões de CO₂ em 59,56 kg e economizar 9,7 dólares por ano.

2.2.2 Balanço energético

Sailor (2008) desenvolveu um modelo numérico baseado em fenômenos físicos e biológicos para analisar o balanço de energia em telhados verdes e sua possibilidade de integrá-lo ao programa de simulação de energia de edifícios *EnergyPlus*. Segundos os autores, o módulo de telhado verde desenvolvido permite que o usuário do *software* explore diferentes opções de projeto de telhados verdes, considerando propriedades térmicas, profundidade do substrato e características da vegetação, como tipo de planta, altura e índice de

área foliar. O modelo foi validado com sucesso utilizando dados de um telhado verde monitorado na Flórida.

Witmer e Brownson (2011) desenvolveram um modelo de balanço de energia para um sistema que integra telhados verdes e energia fotovoltaica. O modelo é uma avaliação detalhada do balanço de energia do sistema, levando em consideração o impacto do microclima em seu desempenho. O estudo fornece uma compreensão abrangente do balanço energético do módulo fotovoltaico integrado em telhados verdes e seu potencial para gerar energia renovável, melhorando o ambiente urbano. A combinação das interações em cada superfície com o volume de controle do microclima resulta em um modelo térmico integrado que pode ser usado para simular módulos fotovoltaicos integrados ao telhado verde. Porém, no modelo, os autores não consideraram a evaporação da água do solo, nem a transpiração das plantas.

Cavadini e Cook (2021) apresentaram um estudo que teve como objetivo desenvolver um método sistemático para avaliar o impacto de configurações sustentáveis de coberturas, como coberturas verdes e frias, sobre o rendimento energético de instalações fotovoltaicas em coberturas. Ao integrar um modelo de balanço de energia no telhado com o *System Advisor Model* (SAM), os pesquisadores contabilizaram com precisão as características da superfície do telhado em simulações de rendimento de painéis fotovoltaicos. Os resultados mostraram que os telhados verdes podem aumentar o rendimento anual de energia fotovoltaica em 1,8% em média, enquanto os telhados frios podem alcançar um aumento de 3,4% em comparação com telhados convencionais em climas mais frios como na Suíça. O estudo destaca uma correlação inversa entre a temperatura da superfície do telhado e o rendimento energético fotovoltaico, com um aumento de 1 °C levando a uma redução de 71 kWh por ano.

2.2.3 Simulações de eficiência energética

Izadpanah *et al.* (2023) conduziram um estudo em um edifício residencial no Irã, com o objetivo de avaliar o impacto de diversas tecnologias no desempenho térmico. O edifício foi equipado com Paredes de Material de Mudança de Fase (PCMs), telhados verdes com Fachadas de Dupla e Tripla

Camada (DSFs/TSFs), combinados com Janelas de Vidro Duplo e Triplo (DGWs/TGWs) e Módulos Fotovoltaicos (PV). A análise foi realizada por meio do *software Design Builder*, possibilitando a avaliação do desempenho térmico em diferentes condições. O estudo abrange dois cenários principais: no primeiro, foram analisados o desempenho energético com o uso de telhado verde, PCM, DSF, TGW com PV e sem PV; no segundo cenário, avaliou-se o desempenho energético com o uso de telhado verde, PCM, TSF, TGW com PV e sem PV. Ambos os cenários foram aplicados em três distintas condições climáticas do Irã: Teerã, caracterizado por um clima árido quente e seco; Yazd, com um clima árido quente e desértico; e Amol, com um clima ameno e úmido.

Os resultados obtidos compararam o desempenho térmico do edifício em termos de consumo de energia, carga de aquecimento e resfriamento necessários nos 14 casos analisados. Em seguida, foi realizada uma avaliação paramétrica, investigando o efeito de (1) orientação geográfica do edifício, (2) distância entre as camadas nos DSFs e TSFs, e (3) índice de área foliar (LAI) no telhado verde, no desempenho térmico do edifício selecionado, que contava com TGWs, um TSF a norte e sul, paredes exteriores equipadas com PCMs, e um telhado verde.

No estudo conduzido por Izadpanah *et al.* (2023), os resultados dos diversos cenários analisados revelaram que em Teerã, uma região caracterizada por um clima árido e latitude média seca, é viável alcançar economias significativas de energia em edifícios, chegando a atingir até 70%. A utilização de Janelas de Vidro Triplo (TGW), Paredes de Mudança de Fase (PCM) e Telhados Verdes em edifícios residenciais mostrou-se mais eficiente em termos de economia de energia do que a combinação de Paredes de Fachada Dupla (DSF), PCM e Telhados Verdes. Contudo, ressalta-se que o desempenho dos cenários 1 e 2 é fortemente influenciado pelas condições climáticas, sendo observado um aumento na demanda de resfriamento nos cenários 1 em Teerã e Amol.

A carga mínima anual de resfriamento é alcançada nos cenários que empregam DGW, PCM e Telhados Verdes, totalizando 120134.6, 146849.2 e 159254.3 kWh, respectivamente, para condições de Teerã e Yazd. Da mesma forma, a carga mínima anual de aquecimento ocorre com o uso de DSF, PCM,

Telhados Verdes, TGW e PV, somando 24612.1, 23403.8 e 18580.2 kWh, respectivamente, para condições de Teerã e Yazd. Além disso, a análise dos efeitos de parâmetros como orientação, largura da cavidade e Índice de Área Foliar (LAI) indicou que a orientação norte resulta no menor consumo anual de energia em edifícios. Nesse sentido, Teerã apresenta a maior redução anual no consumo de energia, seguida por Yazd e Amol, quando a largura da cavidade é aumentada nesse tipo de edifício. O estudo conclui que o impacto do LAI no consumo anual de energia é insignificante.

Os autores propõem como estudos futuros a otimização do objetivo, visando alcançar uma resposta ótima com o uso simultâneo de PCMs, DSFs ou TSFs na construção integrada de energia fotovoltaica e telhado verde. Além disso, sugerem a avaliação de diferentes combinações de aplicação simultânea de métodos de economia de energia passiva para atingir o status de edifício de energia zero em diversas condições climáticas.

O estudo realizado por Maurer, Lienert, Cook (2023) centra-se na avaliação e comparação de diferentes opções de coberturas, incluindo tipos sustentáveis e tradicionais, com e sem instalações fotovoltaicas. Os autores pretendem avaliar o desempenho destas opções de cobertura em relação a eficiência energética, ao impacto ambiental e a relação custo-benefício, utilizando a análise de decisão multicritério.

Neste estudo, o *software EnergyPlus* foi utilizado para modelar o consumo de energia de diferentes opções de coberturas, analisando o aquecimento, o arrefecimento, a ventilação e as cargas elétricas. O *software* foi utilizado para avaliar o desempenho térmico e o balanço energético das coberturas, especialmente em relação às coberturas verdes e às instalações fotovoltaicas. O estudo personalizou parâmetros para coberturas vegetadas no *EnergyPlus*, incluindo a profundidade do solo, a altura da vegetação, a refletividade das folhas e o índice de área foliar. Como resultados desse *software*, os autores conseguiram avaliar o impacto de várias tecnologias de cobertura no consumo de energia, na transferência de calor e no desempenho geral do edifício. A modelagem térmica detalhada facilitou uma avaliação abrangente do desempenho energético das opções de cobertura, o que foi crucial para a análise de decisão multicritério realizada no estudo.

Em termos gerais, o estudo sugere que as coberturas verdes semi-intensivas com instalações fotovoltaicas integradas são recomendadas como opções de melhor desempenho, especialmente quando se considera uma combinação de eficiência energética, impacto ambiental e relação custo-benefício. Os resultados mostram que as coberturas verdes semi-intensivas com painéis fotovoltaicos proporcionam uma série de benefícios. Elas reduzem o escoamento de águas pluviais em até 90% em comparação com coberturas pretas, de cascalho e brancas. Além disso, apresentam um fluxo de calor significativamente menor, sendo 82% inferior aos telhados pretos. Essas coberturas também promovem maior diversidade de habitats, eficiência energética e um potencial de aquecimento global 11% menor do que os telhados frios.

3 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO SISTEMA GRIPV

Nesta etapa do estudo foi realizado um experimento com um ambiente com telhado verde e fotovoltaico para coletar dados de temperatura e de umidade. Os módulos fotovoltaicos são testados nas Condições de Teste Padrão (STC) a uma irradiância de 1000 W/m^2 , logo esta pode ser feita com iluminação artificial ou iluminação natural com o sol (Ramos Costa; Schuck De Oliveira, 2018). O protótipo foi instalado em um ambiente aberto com radiação solar direta e monitorado com sensores de temperatura e umidade, além de utilizar um controlador de carga para armazenar energia na bateria e ligar uma lâmpada que foi instalada dentro da edificação.

O telhado verde adotado neste experimento foi configurado com materiais apropriados para a retenção de água, substrato para plantas e plantas selecionadas especificamente para o propósito da pesquisa. Essa seleção considerou espécies que se adaptam a pouca profundidade de solo e são resistentes à escassez de água, conforme recomendado por estudos anteriores. Já os módulos fotovoltaicos utilizados possuem potência de 30W e eficiência 12,79%, selecionados com base nas características particulares do experimento. A escolha criteriosa desses componentes é fundamental para garantir a integração adequada com o telhado verde e permitir uma análise precisa do desempenho do sistema GRIPV.

Para a coleta de dados, foram empregados sensores de temperatura e umidade posicionados em pontos estratégicos do sistema, como na superfície do telhado verde, na superfície do painel, no ambiente interno e externo. Adicionalmente, foram necessários equipamentos de instalação, como estruturas de suporte para os módulos fotovoltaicos. Também foram utilizados dispositivos de medição e aquisição de dados para registrar as leituras provenientes dos sensores.

A etapa inicial consiste na instalação do sistema de telhado verde e fotovoltaico em um ambiente específico, seguindo as diretrizes e normas de instalação apropriadas. Uma vez instalado, o sistema foi submetido a um período de coleta de dados. Posteriormente, os dados experimentais coletados foram comparados com os resultados obtidos por meio de simulações numéricas. Essa

análise comparativa tem como objetivo validar o modelo matemático desenvolvido e verificar sua precisão na previsão do desempenho térmico do sistema combinado de telhado verde e fotovoltaico.

3.1 ESTRUTURA DO PROTÓTIPO

A metodologia teórica necessária para fundamentar o desenvolvimento do protótipo do sistema GRIPV foi apresentada no item 2 deste trabalho. Foram estudados os conceitos e definições de diferentes tipologias de telhados verdes, plantas e as características de instalação dos módulos fotovoltaicos. A revisão bibliográfica forneceu, assim, os fundamentos teóricos necessários que garantem as características ótimas do telhado verde e dos módulos fotovoltaicos.

Nesse contexto, o telhado verde ideal para este estudo é do tipo extensivo, que oferece vantagens econômicas, possui baixo peso, além de requerer menores custos de manutenção e irrigação (Jamei et al., 2021). Para garantir o sucesso do telhado verde, tornou-se necessário selecionar plantas que sejam adequadas para pouca profundidade de solo e resistentes à escassez e abundância de água (Abdalazeem *et al.*, 2022). A espécie de vegetação ideal encontrada foi a *Sedum*, que é um gênero de suculentas, originário da Europa e disseminada pelo mundo, são plantas cultivadas a pleno sol, em solos com bom teor de matéria orgânica, mas com maior quantidade de areia, bem arejados e bem drenados (Abdalazeem et al., 2022; Azeñas et al., 2018; Chemisana; Lamnatou, 2014; Nagengast; Hendrickson; Scott Matthews, 2013; Osma-Pinto; Ordóñez-Plata, 2019).

Após o substrato, as camadas de filtro e drenagem são essenciais para o bom funcionamento do telhado verde, permitindo o transporte adequado da água e controlando a umidade do solo (Abdalazeem *et al.*, 2022). A camada de filtro é responsável pela drenagem eficaz ao longo da vida útil da cobertura verde. O material utilizado foi um tecido de polipropileno, que também serve para separar o substrato dos agregados de pedra nas margens de segurança. Já a camada de drenagem deve reter a água para a vegetação, permitir o escoamento do excesso de água e garantir a aeração do substrato e das raízes, neste estudo,

foi adotada a argila expandida (Vila *et al.*, 2012). No Quadro 2, são apresentados os materiais escolhidos para a construção do protótipo, incluindo os materiais da instrumentação para coleta de dados.

Quadro 2. Materiais para construção do protótipo.

	Produto	QTD
Energia Solar	Painel Solar Fotovoltaico 30W	1
	Controlador de Carga 20A MPPT 12V/24V	1
	Bateria Estacionária 12V 7ah	1
	Lâmpada LED 8W	1
Telhado Verde	Placa cimentícia	1
	15 kg de substrato orgânico	-
	10 kg de argila expandida	-
	30 Mudas de plantas suculentas	-
	Lona de polietileno de baixa densidade	-
	Tecido de polipropileno	-
Edificação	Placas de isopor média densidade	5
Coleta de Dados	Arduino Mega 2560 CH340 + Cabo USB	1
	Módulo Sensor de Umidade do solo	1
	Módulo Cartão Micro Sd - Arduino	1
	Cartão Micro Sd 4 GB	1
	Sensores de Temperatura NTC 10K encapsulado	8
	Sensor de Umidade e Temperatura DHT22	1
Acessórios	Cabos de cobre para instalação	-
	Interruptor e conectores	-
	Cabos Jumper	-
	Demais estruturas metálicas	-

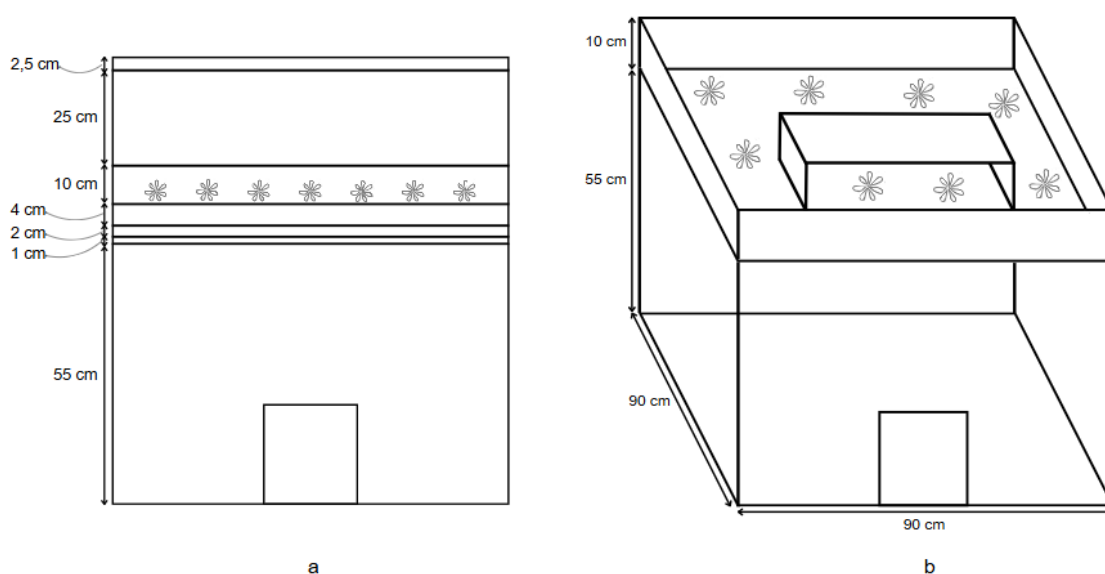
Fonte: Autora (2024).

A camada de impermeabilização tem como função evitar que a água ultrapasse para as outras camadas e direcioná-la para o escoamento final

(Scolaro; Ghisi, 2022). Os materiais utilizados nessa camada incluem fibras têxteis poliméricas e recicladas, lã de rocha, perlite expandida e cloreto de polivinilo (Scolaro; Ghisi, 2022). No presente estudo, foi utilizada uma lona de polietileno de baixa densidade como material de impermeabilização.

O desenvolvimento de um protótipo engloba uma série de etapas que visam a funcionalidade. Neste contexto, este tópico detalha o passo a passo da construção de um protótipo GRIPV, desde a montagem da edificação até a instalação de um sistema fotovoltaico e a implementação de sensores para monitoramento. A Figura 4 apresenta uma visão esquemática do protótipo com as dimensões utilizadas.

Figura 4. Visão esquemática do protótipo com dimensões apresentadas na (a) visão frontal e (b) visão 3D.



Fonte: Autora (2024).

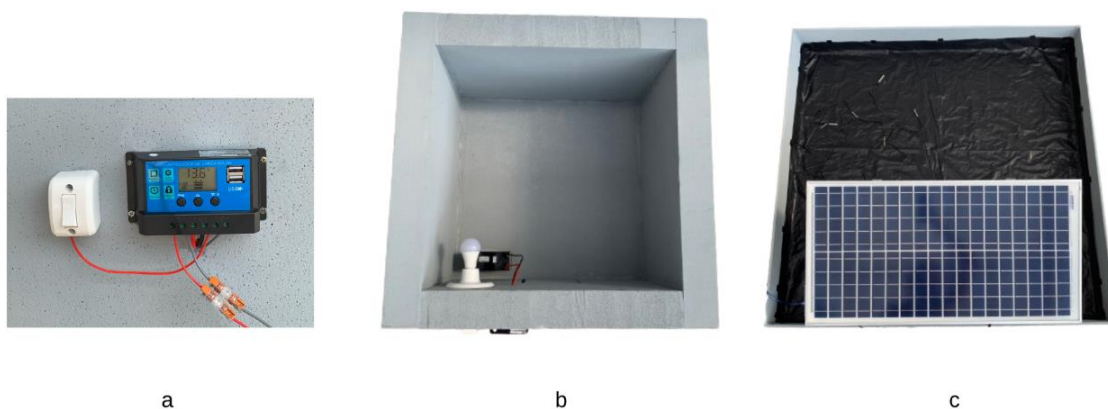
1) Montagem da Edificação:

Na montagem da edificação foram utilizadas as placas de isopor de média densidade. Essas possuem a espessura de 10 cm e foram cortadas em tamanhos de 45 cm x 90 cm para as laterais, 45 cm x 70 cm para o fechamento da frente e trás, com uma abertura na frente de 20 cm x 20 cm para visualização da luz e 90 cm x 90 cm para o fundo da edificação. Utilizando uma cola de poliuretano, as paredes e o fundo foram colados e posteriormente pintados com uma tinta cinza considerando fins estéticos.

2) Instalação do Sistema Fotovoltaico:

Uma estrutura com duas barras de ferro foi feita para fixação do módulo fotovoltaico. Essa possui alturas de 29 e 25 cm, formando um ângulo de $39,6^\circ$ e a fixação foi feita utilizando parafusos e porcas. Posteriormente o controlador de carga foi fixado na edificação utilizando parafusos. O módulo fotovoltaico foi conectado em uma das saídas do controlador, utilizando cabos de cobre e dois conectores de cabos. A lâmpada foi fixada dentro da edificação com o interruptor fixado fora da edificação e foi conectada em uma saída do controlador de carga utilizando cabos de cobre. Por fim, a bateria foi fixada dentro da edificação e conectada em uma saída do controlador de carga. A Figura 5 apresenta a edificação de isopor montada e pintada com a cor cinza. Na sequência, a Figura 6 apresenta a edificação com a estrutura do telhado verde, o módulo fotovoltaico e as instalações elétricas feitas.

Figura 5. Edificação de isopor com a instalações elétricas (a) controlador de carga e interruptor fixados na edificação, (b) edificação parte interna, onde está instalada a lâmpada, que é a fonte de energia interna e a bateria, (c) estrutura do telhado verde com a impermeabilização instalada e o módulo fotovoltaico em sua posição inicial.



Fonte: Autora (2024).

Figura 6. Edificação, estrutura do telhado verde impermeabilizada, módulo fotovoltaico e suas instalações elétricas.



Fonte: Autora (2024).

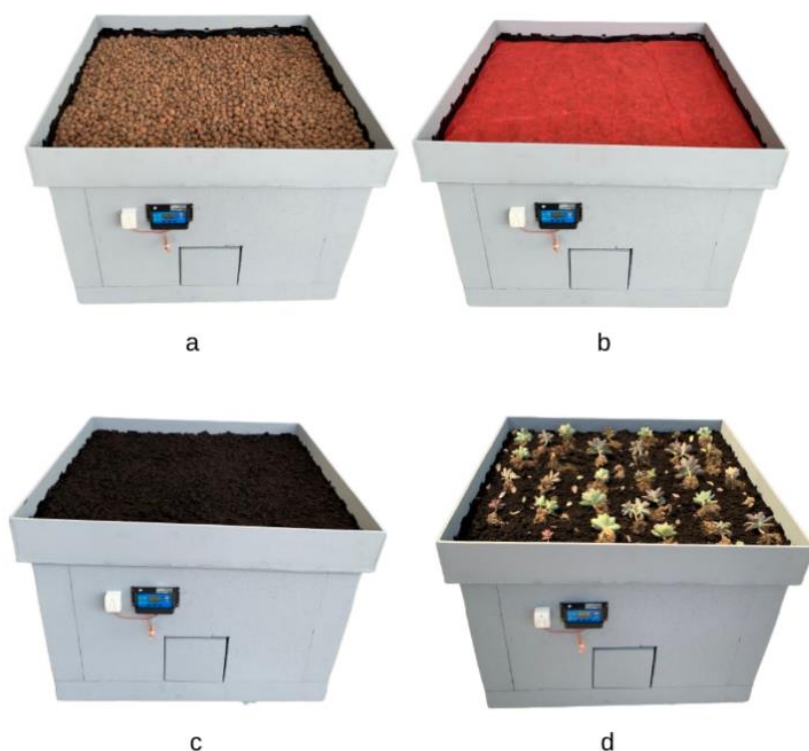
3) Construção da Estrutura do Telhado Verde:

Para a estrutura do telhado verde foi utilizada uma placa cimentícia que foi cortada em 10 cm x 95 cm para as laterais e 95 cm x 95 cm para o fundo. As extremidades de cada peça foram lixadas e coladas utilizando argamassa. Para união do fundo com as laterais foi utilizada uma fita telada de fibra de vidro visando melhor fixação. A estrutura também foi pintada de cinza. Em seguida, a impermeabilização da estrutura foi feita utilizando lona de polietileno de baixa densidade.

4) Montagem do Telhado Verde:

O telhado verde foi estruturado de acordo com a Figura 2, iniciando com a disposição da argila expandida formando uma camada de 2 cm, também foi colocado um tecido de polipropileno como camada de filtro, então foi colocado o substrato formando uma camada de 4 cm, e pôr fim a instalação das plantas *Sedum Carnicolor*. A montagem do telhado verde pode ser vista na Figura 7.

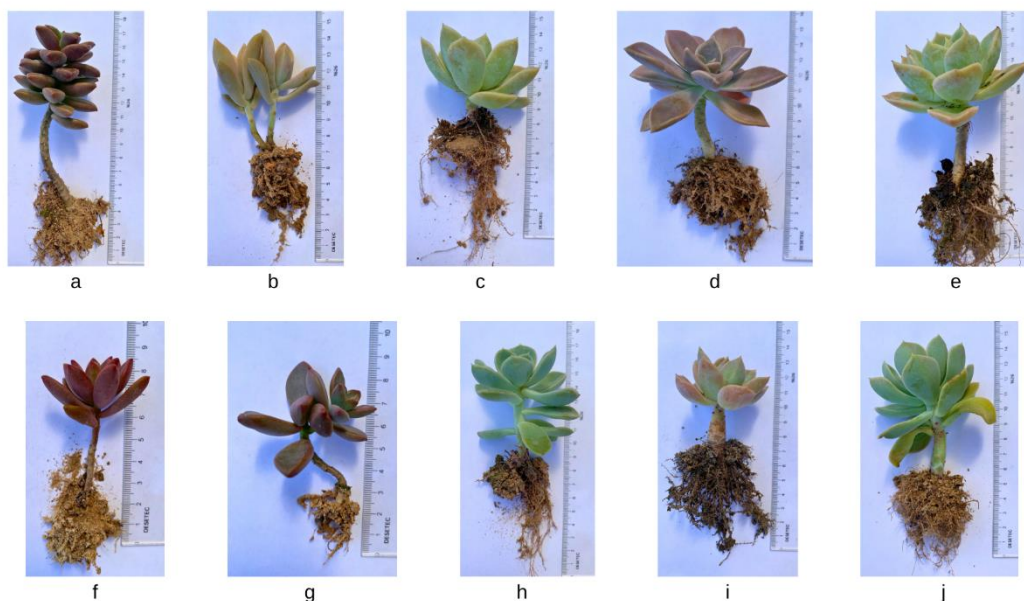
Figura 7. Montagem do telhado verde, (a) a argila expandida, (b) o tecido filtro, (c) o substrato e (d) as plantas.



Fonte: Autora (2024).

As folhas do *Sedum Carnicolor* são carnudas e crescem em rosetas compactas, apresentando uma coloração que varia do verde ao roxo, com bordas avermelhadas (Baldi, 2019). Para cuidar do *Sedum Carnicolor*, é importante ter um solo bem drenado e regas moderadas, permitindo que o substrato seque entre cada rega. As plantas foram dimensionadas, sendo considerada uma amostra de 10 unidades da população de 30 unidades. Elas possuem um tamanho médio de 14 cm e foram dispostas com distâncias aproximadas de 10 cm entre elas. A Figura 8 apresenta as amostras das plantas que foram dimensionadas com uma régua.

Figura 8. Amostras de plantas *Sedum Carnicolor* que foram dimensionadas.



Fonte: Autora (2024).

3.2 INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA GRIPV: PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO E DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES

O Arduino e os sensores foram conectados utilizando *jumpers*, o código foi desenvolvido no *software* Arduino IDE 2.3.2 utilizando bibliotecas específicas para cada tipo de sensor, como, DHT22 de umidade e temperatura do ar, FC28 umidade do solo, NTC 10K de temperatura e outras bibliotecas necessárias para leitura e armazenamento dos dados. Os sensores foram distribuídos em todas as camadas do telhado verde e no módulo fotovoltaico.

O Arduino foi ligado em uma saída USB do controlador de carga. O armazenamento de dados foi feito utilizando um cartão de memória micro sd, onde os dados são salvos como arquivo de texto. A coleta ocorreu todos os dias, sendo que após um dia de coleta os dados eram passados para o computador e o cartão ficava limpo para uma nova coleta. A Figura 9 apresenta um esquema visual da distribuição dos sensores de temperatura e umidade.

A Figura 10, apresenta a disposição do Arduino no protótipo, sendo que para a proteção contra chuva ou umidade foi utilizado um pote transparente de plástico. Também é possível ver o sensor de umidade e temperatura do ar, dispositivo branco em cima do pote, que ficou na região de microclima. Foram

utilizados 10 sensores para coleta de dados no protótipo, as dimensões de instalação e demais informações estão descritas abaixo:

1) Sensor de temperatura NTC 10K, instalado a 12 cm da L1 e 17 cm da L2, na frente do módulo fotovoltaico e próximo da lateral para não comprometer o funcionamento das células fotovoltaicas.

2) Sensor de temperatura NTC 10K, instalado a 14 cm da L1 e 40 cm da L2, embaixo do módulo fotovoltaico e centralizado com as laterais.

3) Sensor de temperatura NTC 10K, instalado a 26 cm da L1 e 40 cm da L2, na região de microclima e entre as folhas da planta, conforme apresentado na Figura 9c.

4) Sensor de temperatura NTC 10K, instalado a 80 cm da L1 e 30 cm da L2, fora de região do microclima e entre as folhas da planta, conforme apresentado na Figura 9d.

5) Sensor de temperatura NTC 10K, instalado a 60 cm da L1 e 30 cm da L2, por ser um sensor encapsulado foi possível dispor no meio da camada do substrato.

6) Sensor de umidade do solo FC28, instalado a 15 cm da L1 e 15 cm da L2, dentro do substrato e próximo da região de instalação do Arduino (Figura 9^a).

7) Sensor de temperatura NTC 10K, instalado a 60 cm da L1 e 30 cm da L2, por ser um sensor encapsulado foi possível dispor no meio da camada de drenagem, entre as argilas expandidas.

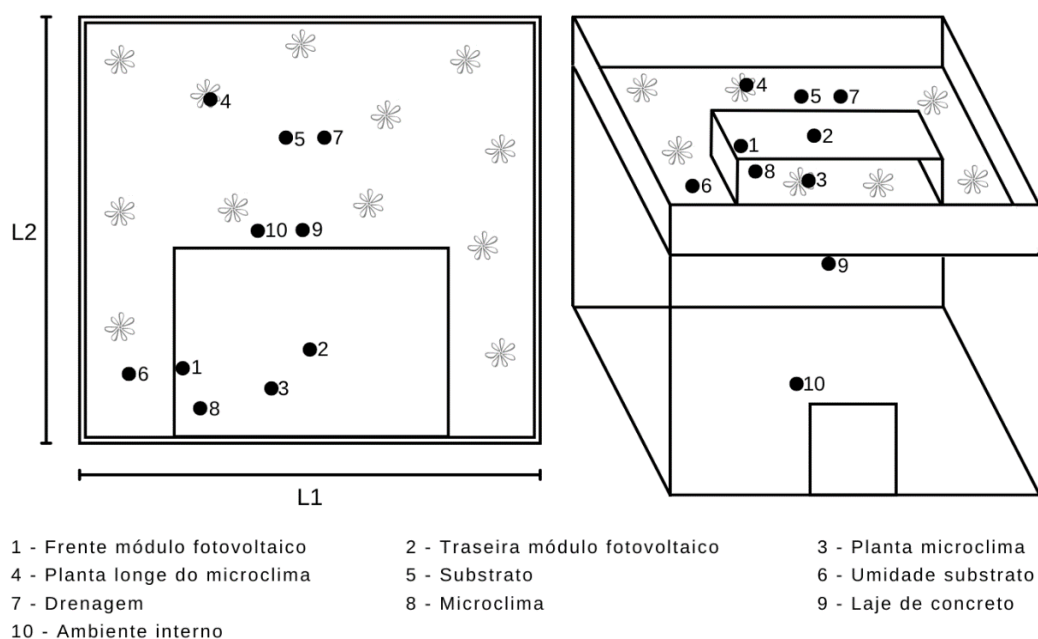
8) Sensor de temperatura e umidade do ar DHT22, instalado a 10 cm da L1 e 30 cm da L2, embaixo do módulo fotovoltaico e na região de microclima (Figura 9b)

9) Sensor de temperatura NTC 10K, instalado a 50 cm da L1 e 40 cm da L2, fixado na placa cimentícia dentro do ambiente interno da edificação.

10) Sensor de temperatura NTC 10K, instalado a 50 cm da L1 e 40 cm da L2, fixado no chão da edificação.

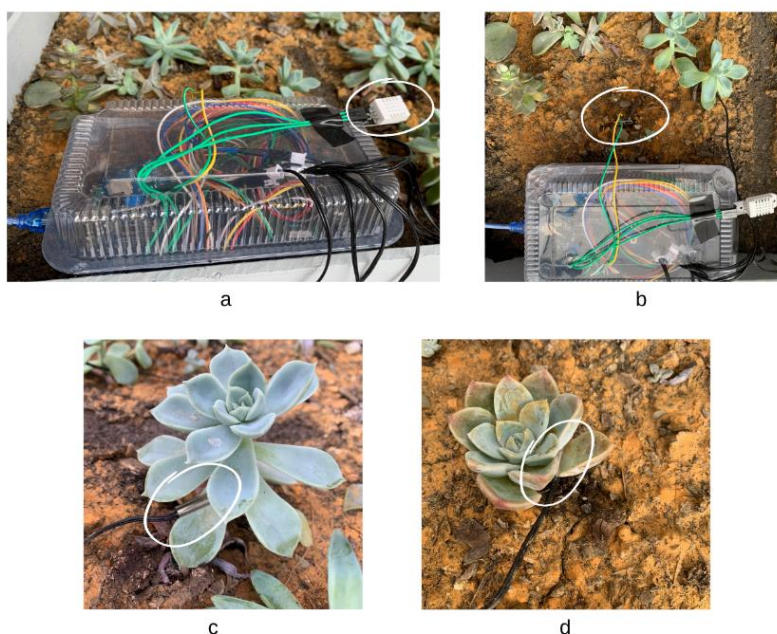
Na sequência, a Figura 11 apresenta o protótipo completo e finalizado, exibindo todos os detalhes e elementos integrados após o processo de desenvolvimento.

Figura 9. Esquema visual da distribuição dos sensores de temperatura e no protótipo.



Fonte: Autora (2024).

Figura 10. Instalação do Arduino e dos sensores no protótipo, (a) Arduino com instalações dentro de uma caixa protetora e indicação do sensor de temperatura e umidade do ar, (b) sensor de umidade do solo, (c) sensor da planta no microclima e (d) sensor da planta longe do microclima.



Fonte: Autora (2024).

Figura 11. Protótipo completo.



Fonte: Autora (2024).

3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os dados foram coletados com a utilização dos sensores de temperatura e umidade, e armazenados em um *micro sd*. O código do Arduino inicia com a descrição e inicialização das bibliotecas específicas, que são, *SD.h* e *DHT.h*, para leitura e armazenamento de dados no *micro sd* e inicialização do sensor de umidade e temperatura do ar DHT22, respectivamente. O sensor de umidade do solo FC28 necessitou de calibragem que foi feita modelando o código e determinando valores adequados para solo seco e solo úmido. Sendo 1023 para solo seco e 0 para solo molhado, depois foi necessário definir como esses valores seriam apresentados onde 0% representa solo seco e 100% solo molhado.

Os sensores de temperatura NTC 10K somente foram inicializados no programa utilizando a variável “*sensorPins*”. Os dados foram coletados em um intervalo de 10 segundos e em seguida armazenados em uma pasta no *micro sd* no formato de arquivo de texto, caso o cartão não estivesse correto o programa iria apresentar “Falha ao iniciar o cartão SD!”, até que o problema fosse solucionado. Esta medida foi adotada na construção do código visando melhor desempenho do código.

Após um dia de coleta de dados, o *micro sd* era removido do Arduino e os dados eram passados para o computador, em seguida os dados eram excluídos do *micro sd*. Essa prática foi adotada para melhor controle dos dados, caso algum dia apresentasse erro, esse seria resolvido. A coleta de dados iniciava no período da manhã, entre 08 e 09h e finalizava no final da tarde entre 17 e 19h. Os dados foram tratados e analisados utilizando o *software Power BI*. O protótipo foi instalado na cidade de Rio Negrinho, em Santa Catarina, conforme localização 26°14'21.4"S 49°30'32.1"W. Também foram utilizados dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para comparação com os resultados experimentais. A estação meteorológica de Rio Negrinho possui a seguinte localização 26°15'38.3"S 49°30'39.7"W. Em Rio Negrinho, o verão é morno, abafado e de céu quase encoberto; o inverno é curto, ameno e de céu parcialmente encoberto. Durante o ano inteiro, o tempo é com precipitação. Ao longo do ano, em geral a temperatura varia de 9°C a 26°C e raramente é inferior a 4°C ou superior a 30°C.

3.4 ANÁLISES DE INCERTEZAS

Para análise dos dados comparativos entre o simulado e o experimental, foi necessário determinar as incertezas combinadas de cada temperatura e umidade. A incerteza é um parâmetro quantitativo que expressa a confiabilidade do resultado de uma medição, decorrente da falta de precisão e exatidão no conhecimento sobre o que está sendo mensurado. Vários fatores contribuem para essa incerteza. Assim, o resultado de uma medição é composto por diversos componentes de incerteza, agrupados em duas categorias conforme o método utilizado para estimar seu valor numérico: Tipo A, determinado por análise estatística em uma série de observações, e Tipo B, determinado por incertezas herdadas da calibração dos equipamentos e padrões.

Inicialmente, foi calculado a média e o desvio padrão das temperaturas por horário e por mês, considerando os meses de janeiro e fevereiro de 2024. Posteriormente foi aplicado o cálculo da incerteza do Tipo A (Equação 1) e do Tipo B (Equação 2). Então foi determinado a incerteza combinada (Equação 3)

e esse valor determinou a barra de erro nos gráficos encontrado na seção 5.3 deste trabalho.

$$U_A = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

$$U_B = \sqrt{\Sigma(U_{BN})^2} \quad (2)$$

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (3)$$

Sendo, U_A incerteza do Tipo A, S desvio padrão e N o número de medições. Na Equação 2, U_B é a incerteza do Tipo B e U_{BN} as incerteza indicadas Tipo B, neste caso a incerteza dos sensores indicada pelo fabricante é de $\pm 3\%$. Por fim, na Equação 3, U_C indica a incerteza combinada.

3.5 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

A norma NBR 15.220 (ABNT, 2005) fornece diretrizes sobre o desempenho térmico de edificações unifamiliares de interesse social com até três pavimentos. Ela estabelece um zoneamento bioclimático que divide o território brasileiro em oito zonas climáticas relativamente homogêneas. Para cada uma dessas zonas, a norma apresenta um conjunto de recomendações e estratégias de construção destinadas a otimizar o desempenho térmico das habitações, promovendo uma melhor adequação ao clima (ABNT, 2005). Entretanto, a norma não especifica procedimentos para a avaliação do desempenho térmico, indicando apenas que essa avaliação pode ser realizada por meio de medições in loco ou simulações computacionais.

Nesse sentido, a avaliação do desempenho térmico é fundamentada nas recomendações da norma NBR 15.575 (ABNT, 2013), que introduz o fator qualidade aos edifícios, abordando aspectos como expectativa de vida útil, desempenho, manutenção, eficiência e sustentabilidade (Sousa, 2020). Essa norma é aplicável a todas as edificações, relacionando a qualidade dos produtos ao impacto que eles têm no usuário e fornecendo diretrizes e procedimentos para a avaliação do desempenho térmico das construções.

A norma NBR 15.575 estabelece requisitos mínimos de desempenho (M) que devem ser atendidos. Para as condições de verão, por exemplo, a

temperatura máxima diária do ar nos ambientes de maior permanência deve ser igual ou inferior à temperatura máxima externa. Na Tabela 1 são apresentados os critérios de avaliação para essas condições. Além dos requisitos mínimos, a norma define níveis intermediário (I) e superior (S) de desempenho, que podem ser alcançados com a melhoria da qualidade das habitações (ABNT, 2013). Assim, os resultados obtidos para a temperatura interna da edificação são comparados aos critérios de desempenho estabelecidos pela NBR 15.575.

Tabela 1. Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.

Nível de Desempenho	Critérios	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i, \text{máx}} \leq T_{e, \text{máx}}$	$T_{i, \text{máx}} \leq T_{e, \text{máx}}$
I	$T_{i, \text{máx}} \leq (T_{e, \text{máx}} - 2^{\circ}\text{C})$	$T_{i, \text{máx}} \leq (T_{e, \text{máx}} - 1^{\circ}\text{C})$
S	$T_{i, \text{máx}} \leq (T_{e, \text{máx}} - 4^{\circ}\text{C})$	$T_{i, \text{máx}} \leq (T_{e, \text{máx}} - 2^{\circ}\text{C})$ e $T_{i, \text{máx}} \leq (T_{e, \text{máx}} + 1^{\circ}\text{C})$

Fonte: NBR 15.575 (ABNT, 2013).

Onde, $T_{i, \text{máx}}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius e $T_{e, \text{máx}}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no exterior da edificação, em graus Celsius.

O protótipo em estudo está situado na zona bioclimática 2. De acordo com a NBR 15.575, recomenda-se realizar ajustes como janelas para medições em protótipos, no entanto, dado que o ambiente está controlado, este requisito não se aplica. A norma também recomenda a realização de medições por pelo menos 3 dias consecutivos para uma análise robusta. Este estudo envolveu três meses de coleta de dados. Optou-se por não aplicar a versão mais recente da norma, pois esta propõe avaliação por meio de simulações, comparando do modelo real com o de referência, ou pelo método simplificado. Já a versão anterior, de 2013, sugere avaliação por meio de medições.

4 MODELO MATEMÁTICO E SIMULAÇÃO DO SISTEMA GRIPV

A metodologia matemática proposta neste estudo aborda uma lacuna de pesquisa identificada em diversos trabalhos anteriores. Embora existam estudos que abordem o desempenho térmico de telhados verdes e módulos fotovoltaicos individualmente, a combinação dessas duas tecnologias ainda carece de uma análise matemática abrangente. Nesse sentido, este estudo busca preencher essa lacuna ao desenvolver modelos matemáticos que permitam capturar os efeitos de transferência de calor e massa nos sistemas de telhado verde e fotovoltaico combinados. Além disso, observou-se uma carência de estudos voltados aos climas brasileiros.

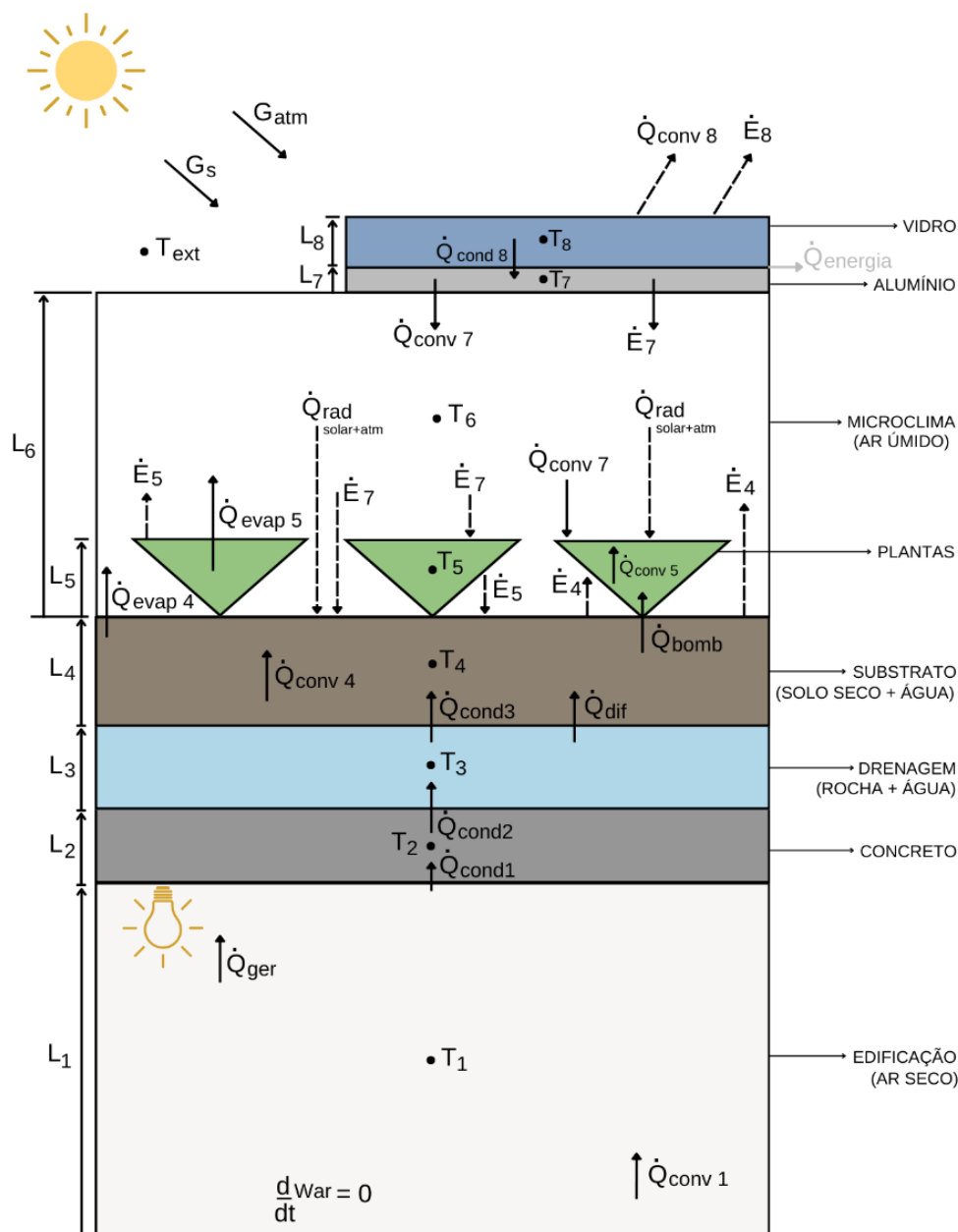
4.1 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático contempla as transferências de calor e massa de todas as camadas do sistema GRIPV com base nos trabalhos de Sailor (2008), Witmer e Brownson (2011) e Cavadini e Cook (2021). A Figura 12 representa esquematicamente o modelo que será abordado, contemplando todas as partes e todos os fenômenos físicos de transferência de calor e massa a serem estudados dentro do sistema GRIPV. Pode-se destacar que há um total de oito camadas que devem ser modeladas: 1) ambiente interno da edificação, 2) laje de concreto, 3) drenagem, 4) substrato, 5) camada das plantas, 6) espaço entre o módulo fotovoltaico e o telhado verde, região de microclima, 7) camada inferior do módulo fotovoltaico, feita de alumínio, e 8) camada superior do módulo fotovoltaico, feita de vidro.

Resumidamente, a Figura 12 mostra que a radiação solar (G_s) e atmosférica (G_{atm}) incidem sobre o módulo fotovoltaico, as plantas e parte do substrato que não está coberto pelas plantas. Uma fração da radiação incidente sobre o módulo fotovoltaico é convertida em potência elétrica pelas células fotovoltaicas e outra parcela é conduzida para a base do módulo fotovoltaico ($Q_{cond\ 8}$), que é feita de alumínio. Essa camada de alumínio perde calor por convecção ($Q_{conv\ 7}$), para o ar confinado entre módulo fotovoltaico e o telhado verde, e para as superfícies das plantas e substrato por radiação. Tanto as

plantas quanto o substrato emitem radiação e refletem a radiação incidente ($E_{4;5}$), além de receberem calor por convecção a partir do ar. Adicionalmente, como há transporte de água do substrato até as folhas das plantas, existe perda de calor por evaporação da água na superfície foliar, chamada de evapotranspiração, que contribui na termorregulação da planta ($Q_{\text{evap } 4}$).

Figura 12. Representação gráfica do modelo matemático GRIPV.



Fonte: Autora (2024).

O substrato também perde calor por evaporação, por causa da diferença de umidade com o ar adjacente ($Q_{\text{evap } 5}$). Na drenagem ocorre a transferência de

calor por condução ($Q_{\text{cond } 1}$) para o substrato e transferência de massa de água (Q_{dif}). Na laje de concreto ocorre a condução ($Q_{\text{cond } 2}$) para a drenagem. Dentro da edificação, há geração de calor em razão da presença de equipamentos e pessoas (Q_{ger}). Esse calor é transferido para a laje de concreto ($Q_{\text{cond } 1}$), camada de drenagem e, por fim, ao substrato. Cada uma das camadas citadas anteriormente possui características específicas, como alturas (L_i) e elementos diferentes.

A partir do modelo definido na Figura 12, cada uma das oito partes do sistema é definida como um elemento volume (EV), onde se realizam os balanços de energia e massa, quando necessário, para cada um deles. O objetivo é determinar a temperatura e teor de umidade nos EVs ao longo do tempo a partir da resolução das equações diferenciais. O módulo fotovoltaico (camadas 7 e 8) e a laje de concreto (camada 2) são tratados como elementos sólidos, por isso, não haverá balanço de massa, enquanto os demais EVs são tratados como misturas: sólido e fluido (plantas, substrato e camada de drenagem) ou gases (vapor de água mais ar seco, no caso das camadas 6 e 1).

O modelo matemático que foi desenvolvido, utilizou um método generalizado, com sistemas físicos simplificados, chamado de Método de Elemento de Volume – MEV (Vargas; Araki, 2017). No MEV, ao dividir o espaço em EVs que interagem por transferência de energia ou massa, cria-se uma dependência espacial no sistema. Cada EV é tratado como um volume com propriedades uniformes, e o campo de velocidades é determinado aproximadamente por equações algébricas. Isso resulta em um sistema de equações diferenciais ordinárias dependentes do tempo, eliminando a necessidade de resolver equações diferenciais parciais dependentes do tempo e espaço, como em métodos tradicionais. O MEV permite diferentes tipos de elementos de volume (sólidos, fluidos e mistos) e, para elementos mistos, oferece duas opções: tratar o conteúdo como uma mistura de substâncias ou como substâncias distintas, com um subsistema para cada uma, aplicando equações separadas (Vargas; Araki, 2017).

4.1.1 Hipóteses simplificadoras

Neste tópico, são apresentadas as hipóteses simplificadoras adotadas no estudo da transferência de calor e massa no sistema GRIPV. Essas hipóteses são fundamentais para simplificar o modelo matemático e as simulações computacionais, tornando-as mais viáveis e eficientes, considera-se:

- ✓ O teor de umidade dentro da edificação, da camada de drenagem e das plantas permanece constante;
- ✓ A radiação solar incidente G_s permanece constante;
- ✓ As paredes do ambiente interno serão isoladas, à exceção da laje;
- ✓ Supõe-se que toda a massa de água absorvida pelas plantas seja evaporada, logo, as plantas não apresentam crescimento nesse modelo;
- ✓ O ar nos ambientes, bem como o ar seco e o vapor de água, são tratados como gases ideais;
- ✓ Na camada de drenagem, considera-se a presença de rocha e água líquida;
- ✓ Para todas as substâncias os calores específicos e condutividades térmica são considerados constantes;
- ✓ A densidade das substâncias líquidas e sólidas são consideradas constantes, para a temperatura de 25°C.

4.1.2 Balanço de energia

Neste tópico as camadas do sistema GRIPV serão detalhadas através do balanço de energia e serão divididas em tópicos como EVs. Este modelo matemático foi determinado como “Modelo Matemático GRIPV”.

- 1) EV₁ – Edificação, descreve um ambiente isolado de ar seco com fontes internas de calor.

$$m_1 C_{p1} \frac{dT_1}{dt} = \dot{Q}_{ger} - \dot{Q}_{conv1} \quad (4)$$

A primeira parte da equação representa o fluxo de calor desta camada, onde m_1 é a massa do sistema no ambiente interno, C_{p1} é o calor específico do

ambiente interno a pressão constante e $\frac{dT_1}{dt}$ representa a taxa de variação da temperatura no ambiente interno T_1 em relação ao tempo t . Essa parte da expressão mostra como a temperatura do sistema está mudando à medida que o tempo passa. A primeira parte das demais equações de cada EV é semelhante com a Equação 4, sendo que apenas o número subscrito altera de acordo com o EV estudado. Posteriormente, \dot{Q}_{ger} é o termo fonte dos calores gerados, neste caso o calor de lâmpadas, equipamentos e pessoas que ocupam o ambiente e \dot{Q}_{conv1} é a convecção natural que ocorre dentro do EV₁. A equação da massa e do calor trocado por convecção são descritas como:

$$m_1 = \rho_1 A L_1 \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{conv1} = h_1 A (T_1 - T_2) \quad (6)$$

Na equação da massa, ρ_1 representa a densidade do fluido, neste caso, ar do ambiente interno, A indica a área da seção transversal da camada. Nesse sentido, as áreas das seções transversais são iguais, pois a largura e comprimento das camadas não apresentam diferenças, exceto nos EVs 7 e 8. O L indica a altura do EV. Em seguida, na equação da convecção natural no ambiente interno, h é o coeficiente de transferência de calor convectivo do ar interno, T é a temperatura do EV, neste caso, temperaturas do ar no ambiente interno e do concreto. Na Equação 6, o coeficiente de transferência de calor convectivo é encontrado com correlações empíricas simples, como o número de Nusselt, que é um número adimensional que descreve a convecção térmica em um fluido próximo a uma superfície sólida. O número de Nusselt médio na convecção natural é apresentado a seguir.

$$Nu = \frac{h_1 L_c}{k_1} = C Ra_L^n = C (Gr_L Pr)^n \quad (7)$$

Nessa equação, L_c é o comprimento característico, k é a condutividade térmica do fluido, C e n são constantes que dependem da geometria da superfície e do regime de escoamento, que é caracterizado pelo número de Rayleigh (Ra_L). O valor de n geralmente é $\frac{1}{4}$ para escoamento laminar e $\frac{1}{3}$ para escoamento turbulento, e o valor da constante C normalmente é inferior a 1. O número de Grashof (Gr_L) descreve a relação entre a flutuação e a viscosidade dentro do

fluido, já o número de Prandtl (Pr) descreve a relação entre a difusividade da quantidade de movimento e a difusividade térmica do fluido.

$$L_c = \frac{A_s}{p} \quad (8)$$

$$Gr_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\vartheta^2} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (10)$$

A área superficial conjunto é dada por $A_s = largura \cdot comprimento$ e o perímetro $p = 2(largura + comprimento)$. O g representa a aceleração da gravidade, β é o coeficiente de expansão volumétrica, $T_s - T_\infty$ representa a variação da temperatura entre a superfície e a vizinhança, neste caso T_∞ é igual a temperatura do ar no ambiente interno e ϑ é a viscosidade cinemática do fluido. Já, na Equação 10, μ é a viscosidade dinâmica do fluido. Çengel e Ghajar (2012) também apresenta uma relação entre o número de Grashof e o número de Reynolds (Re) com objetivo de determinar o tipo de convecção, sendo:

$$\frac{Gr_L}{Re^2} < 1 \rightarrow \text{Convecção forçada predomina}$$

$$\frac{Gr_L}{Re^2} > 1 \rightarrow \text{Convecção natural predomina}$$

$$\frac{Gr_L}{Re^2} \cong 1 \rightarrow \text{Convecções natural e forçada}$$

Nesse sentido é necessário encontrar o número de Reynolds e analisar em qual relação este se encontra, tendo em vista que o objetivo é considerar convecções naturais nas camadas que tem presença de ar.

$$Re = \rho \frac{V L_c}{\mu} \quad (11)$$

Onde, V é a velocidade característica do fluido. O número de Reynolds é usado para determinar o regime de escoamento. Çengel e Ghajar (2012) ressaltam que todas as propriedades do fluido devem ser consideradas na temperatura do filme $T_f = \frac{1}{2}(T_s + T_\infty)$, considera-se nessas equações que o fluido é o ar.

2) EV₂ – Laje de concreto.

Nesta, foi considerado um material uniforme, sólido e sem presença de ar ou umidade. A equação fundamental que representa essa camada está apresentada a seguir, onde há entrada de calor por condução da camada edificação, e perda de calor por condução para a camada de drenagem.

$$m_2 c p_2 \frac{dT_2}{dt} = \dot{Q}_{cond1} - \dot{Q}_{cond2} \quad (12)$$

\dot{Q}_{cond} indica a transferência de calor por condução, neste caso do ambiente interno para a camada de concreto e da camada de concreto para a camada de drenagem, respectivamente.

$$\dot{Q}_{cond1} = \frac{2(T_1 - T_2)}{R_2} \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{cond2} = \frac{2(T_2 - T_3)}{R_2 + R_3} \quad (14)$$

Onde, R representa a resistência térmica do concreto e da drenagem. A Equação 15 indica o cálculo das resistências térmicas dos EVs.

$$R_i = \frac{L_i}{k_i A} \quad (15)$$

3) EV₃ – Drenagem, composta por rochas e água no estado líquido.

Esta recebe calor por condução da camada de concreto (\dot{Q}_{cond2}) e perde calor por condução para a camada de substrato (\dot{Q}_{cond3}). O fluxo mássico difusivo \dot{Q}_{dif} , indica que a drenagem perde calor e massa para o substrato, sendo necessário analisar as condições físicas da água e a temperatura na camada.

$$m_3 c p_3 \frac{dT_3}{dt} = \dot{Q}_{cond2} - \dot{Q}_{cond3} - \dot{Q}_{dif} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{cond3} = \frac{2(T_3 - T_4)}{R_3 + R_4} \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{dif} = \dot{M}_{dif} c p_4 (T_3 - T_4) \quad (18)$$

O termo $T_3 - T_4$ indica a variação da temperatura entre os EVs da drenagem e do substrato. Na Equação 18, o termo \dot{M}_{dif} representa o fluxo de massa que se difunde na camada de drenagem para o substrato por conta da diferença de concentração de umidade.

$$\dot{M}_{dif} = -D_{AB} \frac{d^2 C_{AB}}{dx^2} \quad (19)$$

A Equação 19 proposta por Çengel e Ghajar (2012), apresenta D_{AB} é o coeficiente de difusão da água da camada de drenagem para o substrato, e $\frac{d^2 C_{AB}}{dx^2}$ é o gradiente de concentração entre diferentes substâncias A e B.

4) EV₄ – Substrato, composta por solo seco e água.

Esta foi considerada com uma taxa de sombreamento causado pelo módulo fotovoltaico e plantas, que recebe radiação solar e os efeitos da região de microclima.

$$m_4 c p_4 \frac{dT_4}{dt} = \dot{Q}_{rad,solar} + \dot{Q}_{rad,atm} + \dot{E}_5 + \dot{E}_7 + \dot{Q}_{conv 4} + \dot{Q}_{cond 3} + \dot{Q}_{dif} - \dot{Q}_{bomb} - \dot{E}_4 - \dot{Q}_{evap 4} \quad (20)$$

O termo $\dot{Q}_{rad,solar}$ indica a radiação do sol que atinge o solo nas partes sem sombreamento, $\dot{Q}_{rad,atm}$ é a radiação atmosférica que também atinge o solo de forma direta.

$$\dot{Q}_{rad,solar} = \alpha_s G_s A_{s4} (1 - x)(1 - \sigma_f) \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{rad,atm} = \varepsilon_4 \sigma T_{céu}^4 A_{s4} (1 - \sigma_f) \quad (22)$$

Na radiação solar, o primeiro termo α_s indica a absortividade, G_s é a radiação solar incidente, x é a fração de área sombreada pelo módulo fotovoltaico e σ_f a fração de cobertura vegetal, desta forma $(1 - x)$ representa a área não sombreada pelo módulo fotovoltaico e $(1 - \sigma_f)$ indica a área do substrato não coberta pelas plantas. A equação da radiação atmosférica é composta por ε que é a emissividade do EV, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, que tem o valor de aproximadamente $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$, $T_{céu}^4$ representa a temperatura do céu e conforme Fuentes (1987) a nebulosidade e a insolação do céu fazem com que a temperatura do céu seja 32% mais próxima da temperatura do ar ambiente.

$$T_{céu} = 0,037536 T_{ext}^{1,5} + 0,32 T_{ext} \quad (23)$$

Nesta equação, a temperatura T_{ext} refere-se ao ambiente fora do microclima, temperatura externa. Balvedi e Giglio (2023) propõem a fração de cobertura vegetal como:

$$\sigma_f = 1 - e^{(-0,75LAI)} \quad (24)$$

Sendo que *LAI* (*Leaf Area Index*) em português, índice de área foliar, determinado $LAI \cong 0,8549 (C \times L)$ segundo Bianco et al. (1983), onde o LAI é 85,49% do produto entre o comprimento da nervura principal e a largura máxima da folha. Analisando os próximos termos da Equação 20, \dot{E}_5 é a radiação emitida das plantas que chega até o solo, \dot{E}_7 é a radiação emitida da parte traseira do módulo fotovoltaico, feita de alumínio, para o solo.

$$\dot{E}_5 = \varepsilon_5 \sigma A_{s5} T_5^4 (1 - \sigma_f) \quad (25)$$

$$\dot{E}_7 = \varepsilon_7 \sigma A_{módulo} T_7^4 (1 - \sigma_f) \quad (26)$$

Nessas equações os termos são semelhantes, pois apresentam como diferença os materiais que serão estudados nos EVs, sendo plantas e a parte traseira do módulo fotovoltaico que é de alumínio. O termo $A_{módulo}$ é a área da superfície painel de alumínio. Continuando na Equação 20, o termo \dot{Q}_{conv4} representa a convecção natural a partir do substrato para o ar adjacente, que ocorre por causa das variações de temperatura e densidade que criam movimentos convectivos do ar.

$$\dot{Q}_{conv4} = h_6 A_{s4} (T_6 - T_4) (1 - \sigma_f) \quad (27)$$

Para cálculo do coeficiente de transferência de calor convectivo na camada de substrato deve-se considerar transferências de calor e massa por conta da água que está evaporando para o ambiente externo. Nesse sentido Çengel e Ghajar (2012) propõem que uma vez que a substância não é homogênea, isto é, fluidos sem gradiente de concentração, usam-se as densidades para cálculo do número de Grashof. Logo, considerando que os gases são ideais, para densidade do vapor de água, do ar seco e da mistura na superfície, as equações estão descritas abaixo, respectivamente.

$$\rho_{v,s} = \frac{P_{v,s}}{R_v T_4} \quad (28)$$

$$\rho_{a,s} = \frac{P_{a,s}}{R_a T_4} \quad (29)$$

$$\rho_s = \rho_{v,s} + \rho_{a,s} \quad (30)$$

Nessas equações, $P_{v,s}$ é a pressão de vapor de água em uma dada temperatura, sendo igual a pressão de saturação na interface que é $P_{v,s}^{sat} =$

$10^{\left(a - \left(\frac{b}{T+c}\right)\right)}$ definida como Equação de Antoine, $P_{a,s}$ é a pressão parcial do ar seco, sendo $P = P_{v,s} + P_{a,s}$, R_v e R_a são as constantes dos gases vapor de água e ar seco, respectivamente, e T_4 é a temperatura da superfície em estudo, no caso, a temperatura da superfície do substrato. Do mesmo modo para a densidade do vapor de água, do ar seco e da mistura longe da superfície, as equações estão descritas abaixo, respectivamente.

$$\rho_{v,\infty} = \frac{P_{v,\infty}}{R_v T_6} \quad (31)$$

$$\rho_{a,\infty} = \frac{P_{a,\infty}}{R_a T_6} \quad (32)$$

$$\rho_\infty = \rho_{v,\infty} + \rho_{a,\infty} \quad (33)$$

sendo $P_{a,\infty}$ a pressão parcial do ar seco longe da superfície ($P = P_{v,\infty} + P_{a,\infty}$), e $P_{v,\infty}$ é a pressão de vapor longe da superfície, calculada como o produto da umidade relativa do ar, φ , pela pressão de saturação na T_6 :

$$P_{v,\infty} = \varphi P_v^{sat}(T_6) \quad (34)$$

A umidade relativa pode ser escrita em termos do teor de umidade do ar, ω_6 , para a temperatura do ar, T_6 , da seguinte forma:

$$\varphi = \frac{\omega_6 P}{(0,622 + \omega_6 P_v^{sat})} \quad (35)$$

O ω_6 é definido como a razão da massa de vapor de água pela massa de ar seco:

$$\omega_6 = \frac{m_{vap}}{m_{ar,s}} = \frac{m_{vap}}{\rho_{a,\infty} V_{a,s}} \quad (36)$$

Nesse sentido, o número de Grashof pode ser calculado como:

$$Gr_L = \frac{g \beta (\rho_\infty - \rho_s) L_c^3}{\rho \vartheta^2} \quad (37)$$

Sendo que $\rho_\infty - \rho_s$ representa a variação da densidade entre a vizinhança e a superfície, L_c é o comprimento característico e ρ é igual a média das densidades ($\rho = (\rho_\infty + \rho_s)/2$). Considerando que a convecção natural ocorre na superfície horizontal quente para cima, o número de Nusselt, bem como o coeficiente de transferência de calor convectivo, são encontrados com as equações abaixo.

$$Nu = 0,15(Gr Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (38)$$

$$h_6 = \frac{Nu k}{L_c} \quad (39)$$

Na Equação 20 o \dot{Q}_{bomb} representa o balanço hídrico das plantas com o substrato. De acordo com Schwambach e Sobrinho, (2014), as raízes das plantas são responsáveis pelo processo de absorção de água e sais minerais. O metabolismo da água envolve absorção, transporte e transpiração, na camada de substrato ocorre a absorção. A entrada de água ocorre nas extremidades das raízes, na região pilífera, a água é absorvida por osmose.

$$\dot{Q}_{bomb} = \dot{M}_{abs} C p_5 (T_4 - T_5) \quad (40)$$

Nessa equação, o \dot{M}_{abs} representa o fluxo de massa de água que é removida do substrato e recebida nas plantas. O próximo termo da Equação 20, \dot{E}_4 é a radiação refletida do substrato, pode ser calculada com a Equação 25. O último termo é $\dot{Q}_{evap 4}$ que é a evapotranspiração, processo pelo qual a água presente no substrato se transforma em vapor de água e se move da superfície do solo para a atmosfera. Isso acontece quando a energia térmica, ou calor, é fornecida à água no substrato, aumentando a velocidade das moléculas de água e fazendo com que estas se transformem em vapor, escapando para o ar.

$$\dot{Q}_{evap 4} = \dot{m}_{evap 4} h_{vp} \quad (41)$$

Nessa equação, h_{vp} representa a entalpia de evaporação da água, que é uma propriedade termodinâmica que descreve a quantidade de energia contida em uma unidade de massa da substância, e $\dot{m}_{evap 4}$ é o fluxo de massa de água que se transforma em vapor, dado pela equação:

$$\dot{m}_{evap 4} = h_{massa} A_s (\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty}) \quad (42)$$

Utilizando a analogia entre convecção de calor e de massa, o coeficiente de transferência de massa (h_{massa}) é determinado da mesma maneira que o coeficiente de transferência de calor, porém substitui-se o número de Prandtl pelo número de Schmidt, descrito por:

$$Sc = \frac{\vartheta}{D_{H_2O-ar}} \quad (43)$$

A difusividade de massa do vapor de água no ar a uma temperatura média de 310,5 K é determinada, segundo Çengel e Ghajar (2012), por:

$$D_{H_2O-ar} = (1,87 \times 10^{-10}) \frac{T^{2,072}}{P} \quad (44)$$

Essa equação é válida para a condição: $280\text{ K} < T < 450\text{ K}$, e P indica a pressão total em atm. Logo, o número de Sherwood e os coeficientes de transferência de massa são determinados por:

$$Sh = 0,15(Gr Sc)^{\frac{1}{3}} \quad (45)$$

$$h_{massa} = \frac{Sh D_{AB}}{L_c} \quad (46)$$

5) EV₅ – Plantas.

Nesta camada ocorrem também transferências de calor e massa com as outras camadas. A equação da energia que rege esta camada está descrita abaixo.

$$m_5 C p_5 \frac{dT_5}{dt} = \dot{E}_7 + \dot{Q}_{conv\ 5} + \dot{E}_4 - \dot{E}_5 - \dot{Q}_{evap\ 5} + \dot{Q}_{rad,sol} + \dot{Q}_{rad,atm} + \dot{Q}_{bomb} \quad (47)$$

A maior parte dos termos da Equação 47 foram definidos anteriormente, sendo que o $\dot{Q}_{conv\ 5}$ é a convecção neste EV e foi determinado pela Equação 6 e o $\dot{Q}_{evap\ 5}$ determinado pela Equação 41. O $\dot{Q}_{evap\ 5}$ é o calor perdido em virtude da evapotranspiração da água que estava nas plantas e vai para a atmosfera, sendo $\dot{m}_{evap\ 5}$ o fluxo mássico de água que evapora das plantas, calculado pela Equação 42, porém com a substituição de T_4 por T_5 no cálculo da densidade $\rho_{v,s}$.

6) EV₆ – Ar confinado entre o módulo fotovoltaico e o telhado verde, região de microclima.

Nessa região ocorre a troca direta de efeitos da parte traseira do painel com as plantas e substrato.

$$m_6 C p_6 \frac{dT_6}{dt} = \dot{Q}_{conv\ 7} + \dot{Q}_{evap\ 4} + \dot{Q}_{evap\ 5} - \dot{Q}_{conv\ 5} - \dot{Q}_{conv\ 4} - \dot{Q}_{conv,ext} \quad (48)$$

Essa é a equação que rege essa camada, o termo $\dot{Q}_{conv\ 7}$ é a convecção que ocorre na parte traseira do painel que é de alumínio, indicando a multiplicação entre o coeficiente de transferência de calor convectivo do ar externo com a variação de temperatura entre o alumínio e o ar externo, determinado conforme a Equação 6 e $\dot{Q}_{conv,ext}$ representa a transferência de calor convectiva entre o microclima e o ambiente externo. Os demais termos foram definidos anteriormente.

7) EV₇ – Parte traseira do módulo fotovoltaico, alumínio.

$$m_7 C p_7 \frac{dT_7}{dt} = \dot{Q}_{cond\ 7} + j_4 + j_5 - \dot{E}_7 - \dot{Q}_{conv\ 7} \quad (49)$$

O termo $\dot{Q}_{cond\ 7}$ indica a transferência de calor por condução do alumínio, que é a camada superior do módulo fotovoltaico, para o alumínio.

$$\dot{Q}_{cond\ 7} = (1 - \eta)(\alpha_s G_s + \varepsilon_8 \sigma T_{céu}^4) A_{módulo} \quad (50)$$

Onde η representa a eficiência do módulo fotovoltaico. Os próximos termos $j_4 + j_5$ indicam as radiosidades das superfícies que é a soma dos fluxos de radiação emitida e refletida pela superfície de um corpo, nesse caso o substrato e as plantas.

$$j_4 + j_5 = \left(\varepsilon_4 \sigma T_4^4 A_{s4} + (1 - \varepsilon_4)(\alpha_s G_s(1 - x)A_{s4} + \sigma T_{céu}^4 A_{s4}) \right) (1 - \sigma_f) \\ + \left(\varepsilon_5 \sigma T_5^4 A_{s5} + (1 - \varepsilon_5)(\alpha_s G_s(1 - x)A_{s5} + \sigma T_{céu}^4 A_{s5}) \right) \quad (51)$$

Na Equação 47 os termos são semelhantes, porém na primeira parte da equação é tratado das propriedades do substrato e na segunda parte tratado sobre plantas. A multiplicação pelo termo $(1 - \varepsilon_i)$, nos dois materiais, ocorre por causa da parcela de radiação refletida, $(1 - x)$ indica a fração de área sombreada pelo módulo fotovoltaico sobre o telhado verde e $(1 - \sigma_f)$ é a fração de cobertura vegetal no solo.

8) EV₈ – Parte frontal do módulo fotovoltaico, vidro.

A última camada é o vidro do módulo fotovoltaico que recebe radiação de forma direta e com a tecnologia interna, transforma-a em energia.

$$m_8 C p_8 \frac{dT_8}{dt} = \alpha_s G_s A_{módulo} + \alpha_8 G_{atm} A_{módulo} - \dot{E}_8 - \dot{Q}_{conv\ 8} - \dot{Q}_{cond\ 8} \quad (52)$$

O termo $\alpha_s G_s A_{módulo}$ indica a radiação solar que atinge o vidro, $\alpha_8 G_{atm} A_{módulo}$ indica a radiação atmosférica que também chega até o vidro de forma direta, a radiação atmosférica pode ser descrita da seguinte forma: $\varepsilon_8 \sigma T_{céu}^4 A_8$, sendo que o primeiro termo foi substituído com a Lei de Kirchhoff e a radiação atmosférica descrita como a multiplicação a constante de Stefan-Boltzmann entre a temperatura do céu.

$$\dot{Q}_{cond\ 8} = \alpha_s G_s A (1 - \eta) \quad (53)$$

Esta equação é a condução de calor que ocorre no módulo fotovoltaico, $(1 - \eta)$ está relacionado com a eficiência de energia.

4.1.3 Balanço de massa

De acordo com as hipóteses simplificadoras apresentadas no item 3.2.1 deste trabalho, os EVs 1, 2, 3, 5, 7 e 8 foram consideradas sem variação da umidade, portanto:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = 0 \quad (54)$$

A transferência de massa que ocorre no substrato, EV₄, pode ser determinada de acordo com o teor de umidade do substrato:

$$\omega_4 = \frac{m_{\text{água}}}{m_{4s}} \quad (55)$$

A variação do teor de umidade do substrato com o tempo é dada por:

$$\frac{d\omega_4}{dt} = \frac{-\dot{m}_{evap\ 4} - \dot{m}_{evap\ 5} + \dot{M}_{dif}}{\rho_{4s} V_{4s}} \quad (56)$$

O \dot{M}_{dif} representa o fluxo de massa que se difunde na camada de drenagem para o substrato por conta da diferença de concentração de umidade, definido anteriormente, foi reescrita em termos dos teores de umidades das camadas adjacentes ao substrato.

$$\dot{M}_{dif} \approx -\frac{D_{AB}}{L_4^2} (\omega_3 - 2\omega_4 + \omega_6) \rho_{4s} V_{4s} \quad (57)$$

Na região do microclima, EV₆, existe ar confinado entre o módulo fotovoltaico e o telhado verde, a transferência de massa nessa camada ocorre com a evaporação da água que está no substrato e com a evaporação da água que está nas plantas. A massa de vapor pode ser encontrada na equação do teor de umidade do ar ω_6 descrito na Equação 42. Como o vapor de água e o ar seco são gases, eles ocupam o mesmo volume $V_{ar,seco} = V_{vapor}$.

A Equação 58 também pode ser reescrita em termos de teor de umidade do ar. Desta forma tem-se a seguinte expressão:

$$\frac{d\omega_6}{dt} = \frac{\dot{m}_{evap\ 4} + \dot{m}_{evap\ 5}}{\rho_{a,\infty} V_{ar,seco}} \quad (58)$$

Os cálculos dos fluxos de massa de água que evapora do substrato e das plantas foi calculado Equação 49, sendo que para o cálculo do $\dot{m}_{evap\ 5}$ deve-se efetuar a substituição de T_4 por T_5 no cálculo da densidade $\rho_{v,s}$.

4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Na fase de implementação e validação do modelo matemático, será utilizado a linguagem de programação *Fortran 90* para realização da simulação numérica. *Fortran* é uma linguagem clássica amplamente reconhecida por sua eficiência e desempenho em cálculos científicos e de engenharia.

As equações diferenciais ordinárias transientes, obtidas para cada elemento de volume em todos os processos físicos, são resolvidas de forma explícita no domínio do tempo até que o regime permanente seja alcançado. Nessas integrações, emprega-se o método numérico de Runge-Kutta de quarta-quinta ordem com passo adaptativo (Kincaid; Cheney, 1991), com condições iniciais pré-definidas para as variáveis de integração.

4.2.1 Condições iniciais, parâmetros geométricos e operacionais

O modelo matemático desenvolvido será utilizado para prever resultados numéricos da transferência de calor e massa do sistema GRIPV. Nesse contexto, códigos em linguagem *Fortran* serão escritos com base no modelo matemático para efetuar as simulações. Os dados de entrada, que são os parâmetros geométricos e operacionais e as condições iniciais e de contorno, serão utilizados nas simulações computacionais, esses foram selecionados de acordo com a literatura e são apresentados na Tabela 2.

Esses dados são fundamentais para a realização de simulações computacionais e análises quantitativas relacionadas ao comportamento térmico e de massa do sistema em questão. As características incluem dimensões físicas, densidades de materiais, capacidades térmicas, condutividades térmicas, entalpia de vaporização, absortividade solar, emissividade de superfícies, radiação solar, eficiência do módulo fotovoltaico, temperaturas

ambiente externa e interna, pressão atmosférica e teor de umidade do ar e do solo.

Tabela 2. Parâmetros geométricos e operacionais, condições iniciais e de contorno.

Parâmetros, condições iniciais e de contorno	Valor	Unidade	Parâmetros, condições iniciais e de contorno	Valor	Unidade
L_8	0,0032	m	C_p	3000,0	J/kg K
L_7	0,0020	m	$C_{sub,seco}$	2050,0	J/kg K
L_6	0,5000	m	$C_{p,vap}$	1875,0	J/kg K
L_5	0,1000	m	$C_{p,\text{água}}$	4178,0	J/kg K
L_4	0,1000	m	C_{arg}	800,0	J/kg K
L_3	0,0500	m	C_{conc}	900,0	J/kg K
L_2	0,1000	m	K_{ar}	0,0250	W/m K
L_1	2500,0	m	K_{al}	226,0	W/m K
$A_{al \text{ ou } V}$	2100,0	m ²	$K_{sub,seco}$	2,0	W/m K
A_{sub}	5800,0	m ²	K_{agua}	0,600	W/m K
A_{dre}	5800,0	m ²	K_{arg}	0,900	W/m K
A_{conc}	5800,0	m ²	K_{conc}	1,800	W/m K
LAI	0,5	-	h_{vp}	2556,0	kJ/kg
σ_f	0,5000	-	α_s	0,600	-
ρ_v	2500,0	kg/m ³	ε_v	0,900	-
ρ_{al}	2690,0	kg/m ³	ε_{al}	0,700	-
ρ_p	1000,0	kg/m ³	$\varepsilon_{p \text{ e } sub}$	1,0	-
$\rho_{sub,seco}$	1200,0	kg/m ³	G_s	2300,0	W/m ²
ρ_{agua}	998,0	kg/m ³	η	0,900	-
ρ_{arg}	500,0	kg/m ³	$T_{ar,e}$	298,0	K
ρ_{conc}	2500,0	kg/m ³	$T_{ar,i}$	293,0	K
μ	0,00018	kg/m.s	P_{atm}	101325	Pa
C_v	670,0	J/kg K	$W_{ar,amb}$	0,0080	kg água/kg ar seco
C_{al}	921,0	J/kg K	W_{sub}	1,0	kg água/kg solo seco
$C_{p,ar}$	1004,0	J/kg K	W_{dre}	1,0	kg água/kg argila
$C_{v,ar}$	717,0	J/kg K	Q_{ger}	3000,0	W

Fonte: Autora (2024).

Essas informações permitem calcular e prever como o calor é transferido entre os componentes do sistema GRIPV, como o vidro, o alumínio, as plantas,

o solo, a água e o concreto. Além disso, eles também são essenciais para determinar como a radiação solar é absorvida e refletida, como a temperatura ambiente afeta o sistema e como a umidade do ar e do solo influencia o processo de transferência de calor e massa.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

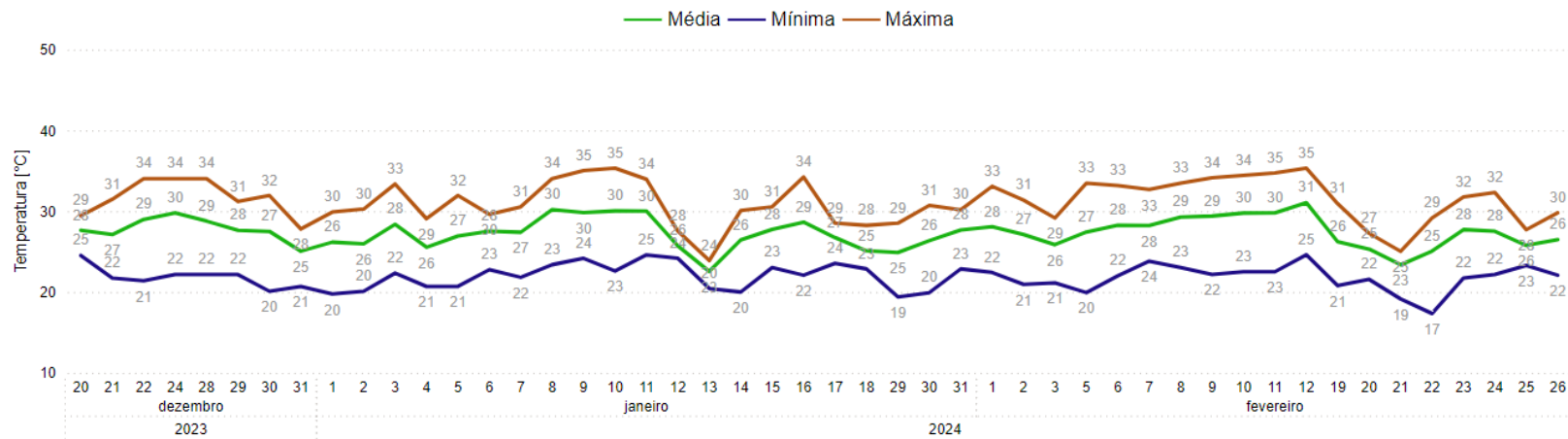
5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste tópico, estão apresentados os resultados experimentais dos dados de temperatura e umidade coletados no protótipo. O objetivo deste tópico é realizar uma análise detalhada das temperaturas e umidades registradas na coleta de dados, feita com sensores. Como filtros iniciais da análise, foram considerados os dados dos dias com 8, 9 e 10h de coleta, não foram coletados dados em dias de chuva visando a preservação do sistema. A coleta de dados iniciava entre 08h e 09h e finalizava entre 17h e 19h, também foram analisadas e registradas as condições climáticas de todos os dias que tiveram coleta de dados segundo o INMET, os dados foram coletados em dezembro de 2023, janeiro e fevereiro de 2024, onde a estação climática é o verão, totalizando 50 dias de coleta.

1) Edificação

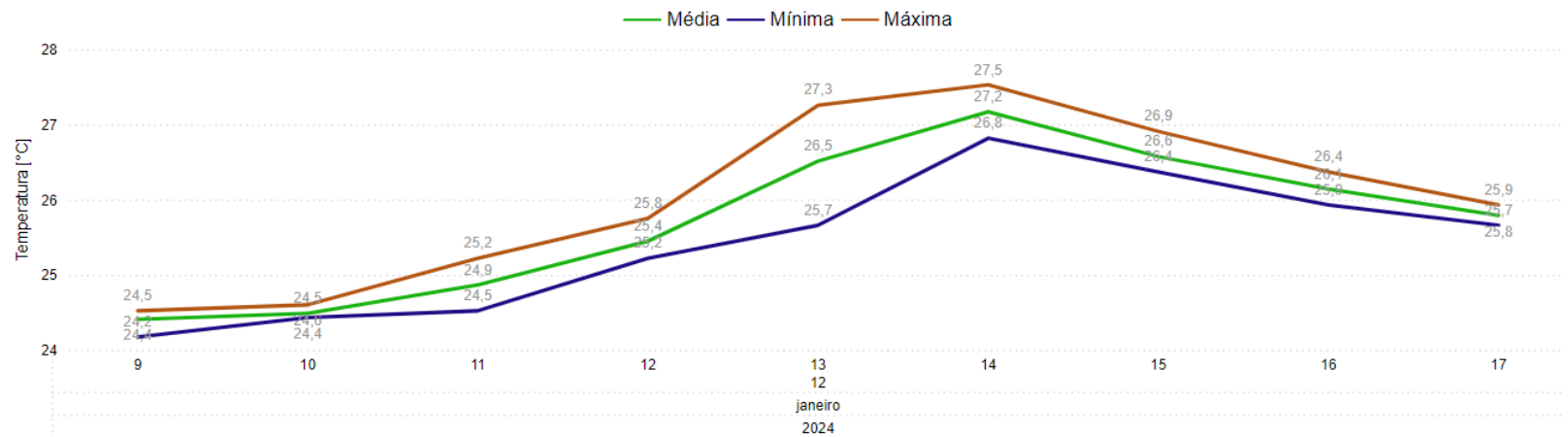
A edificação é considerada a primeira camada do sistema GRIPV, no protótipo foi feita de isopor nas paredes e base. Essa camada é essencial para a sustentação de todo o sistema e foi analisada com sensor de temperatura. A Figura 13 apresenta a coleta de dados nessa camada. A menor temperatura registrada foi de 17,34°C, a máxima foi de 35,32°C e a média geral foi de 27,41°C, com desvio padrão geral de $\pm 3,75^\circ\text{C}$. A média de edificação varia entre aproximadamente 22,55°C e 31,06°C, indicando uma faixa considerável de valores médios. O desvio padrão mostra a dispersão dos dados em torno da média, com valores variando de aproximadamente $\pm 1^\circ\text{C}$ a $\pm 4^\circ\text{C}$, sugerindo que alguns conjuntos de dados têm uma variação maior do que outros, isso ocorre porque foram coletados em grande número de dados e as condições climáticas se diversificaram bastante durante os três meses de coleta.

Figura 13. Registros diários da temperatura da edificação.



Fonte: Autora (2024).

Figura 14. Registros da temperatura da edificação por hora, no dia 12 de janeiro de 2024.

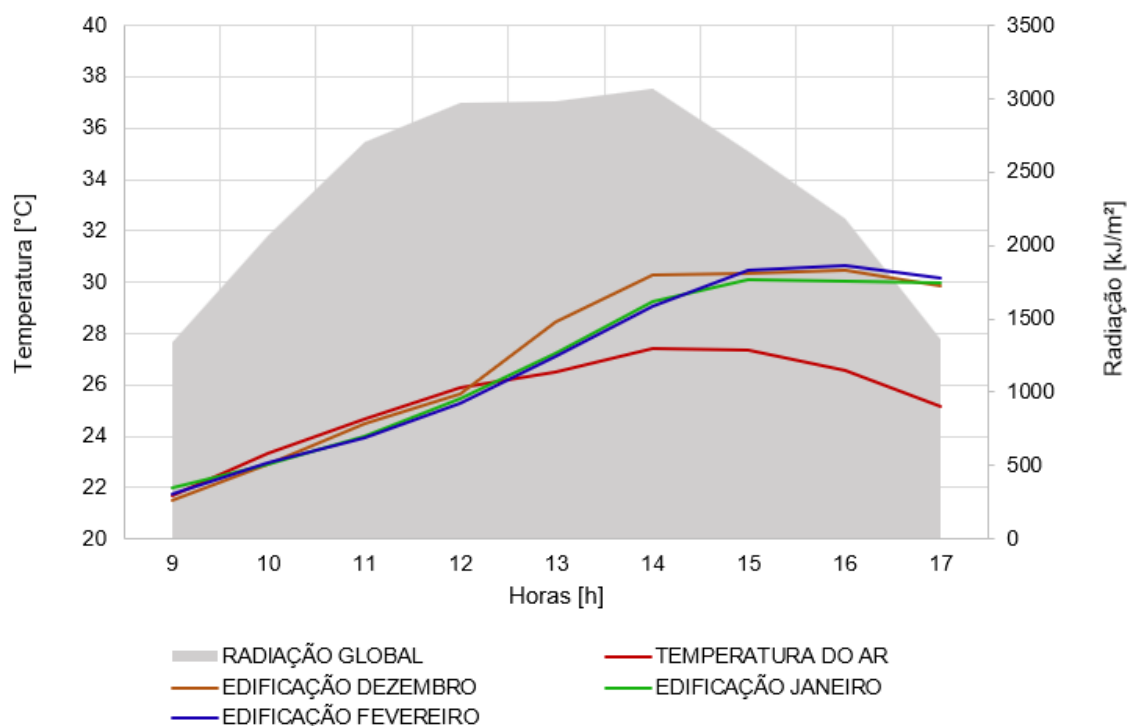


Fonte: Autora (2024).

Os valores máximos e mínimos da edificação variam significativamente entre os diferentes conjuntos de dados, enquanto o mínimo de edificação varia de aproximadamente 17°C a 25°C, o máximo varia de 30°C a 35°C. O menor desvio padrão ocorreu no dia 12 de janeiro, 2024, sendo de $\pm 0,97^{\circ}\text{C}$, a Figura 14 apresenta a curva de temperatura da edificação neste dia. Verifica-se que a temperatura tem uma tendência crescente até as 14h e depois começa a decrescer. Isso ocorreu porque as temperaturas máximas desse dia são registradas entre 12h e 14h, depois a tendência da temperatura é diminuir até o período da noite. Neste dia foram coletados dados durante 8h. Especialmente na Figura 14 o eixo y das temperaturas foi alterado para melhor visualização dos dados.

A Figura 15 apresenta uma análise comparativa entre os dados das médias de radiação global e temperatura do ar provenientes do banco de dados do INMET, no meses de dezembro de 2023, janeiro e fevereiro de 2024, e os registros obtidos da temperatura na edificação do protótipo.

Figura 15. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura edificação.



Fonte: Autora (2024).

O gráfico apresenta a variação diária da temperatura e da radiação global das 9h às 17h, indicando que a radiação global atinge seu pico por volta das 13h e depois diminui. A temperatura do ar aumenta gradualmente até as 13h, estabiliza-se até as 15h e, em seguida, começa a diminuir. As temperaturas da edificação em dezembro, janeiro e fevereiro seguem uma tendência semelhante à da temperatura do ar, especialmente em dezembro apresentando temperaturas ligeiramente mais altas. Todas as temperaturas da edificação permanecem acima da temperatura do ar, sugerindo uma retenção de calor pelos materiais de construção. Este fenômeno pode ser atribuído às características específicas da construção, que utiliza isopor de média densidade e não possui aberturas para circulação de ar. Essas condições favorecem a retenção de calor dentro da estrutura, destacando a influência direta da composição material e do design arquitetônico na dinâmica térmica do ambiente construído.

2) Laje de concreto

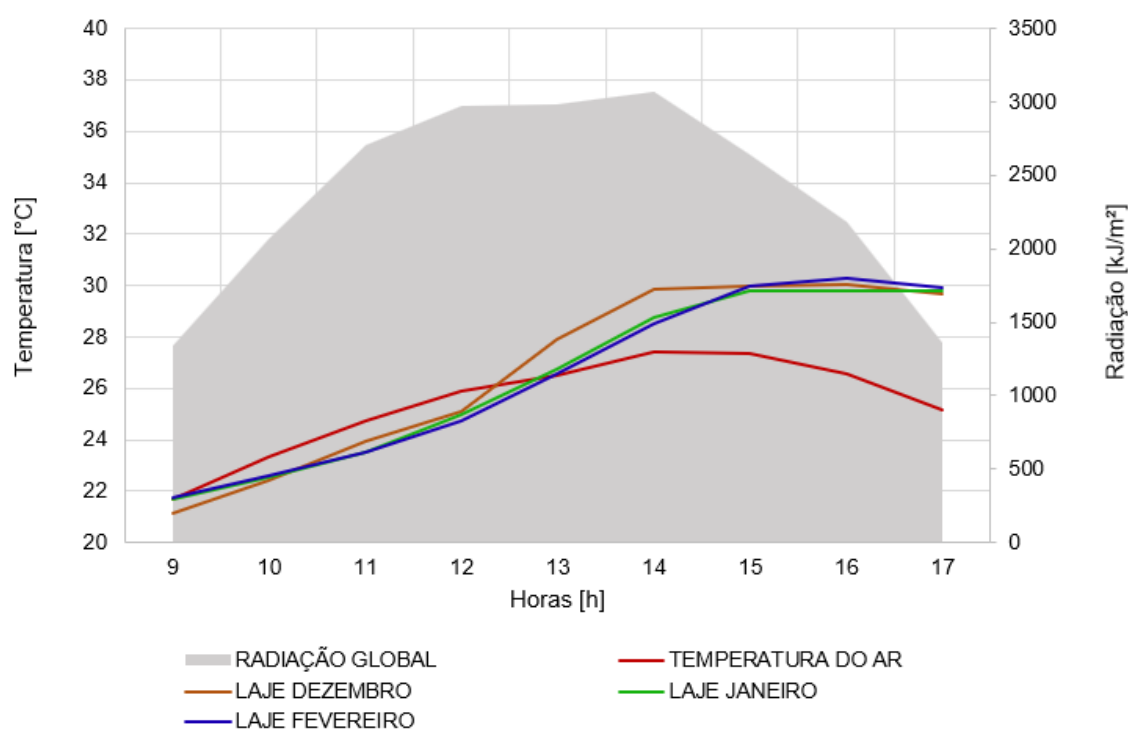
No protótipo, a laje de concreto possui um sensor de temperatura que foi instalado na parte inferior da laje e fica dentro da edificação. Não foi possível inserir o sensor exatamente dentro da camada de concreto devido a necessidade de perfuração e possível danificação no concreto, ocasionando vazamentos para dentro da edificação.

A Figura 17 apresenta os dados de temperatura coletados nessa camada. A média geral das temperaturas coletadas foi de 27,01°C sendo que a mínima foi de 19,06°C e a máxima de 35,12°C, com um desvio padrão de $\pm 3,76^\circ\text{C}$. O desvio padrão varia de aproximadamente $\pm 1,05^\circ\text{C}$ a $\pm 4,61^\circ\text{C}$, indicando que a dispersão dos dados em relação à média é variável. Alguns conjuntos de dados apresentam uma dispersão relativamente baixa, enquanto outros têm uma dispersão mais ampla, o que sugere uma variabilidade diferencial nas condições térmicas da laje de concreto. Isso ocorre porque alguns dias as temperaturas pela manhã eram baixas e no período das 12h até 14h ocorria um pico do aumento da temperatura, fatores climáticos que ocorrem no verão.

A Figura 16 é um comparativo entre os dados das médias de radiação global e temperatura do ar provenientes do banco de dados do INMET, no meses de dezembro de 2023, janeiro e fevereiro de 2024, e os registros da temperatura da laje de concreto do protótipo.

O gráfico na Figura 16 apresenta radiação e temperatura do ar nas mesmas condições da Figura 15, pois são dados das médias dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro com base no INMET, o mesmo segue para as demais camadas. Todas as temperaturas da laje permanecem acima da temperatura do ar, indicando uma maior retenção de calor pelos materiais de construção. Esse fenômeno pode ser atribuído ao posicionamento do sensor da laje de concreto dentro da edificação, em contato direto com a estrutura, levando em consideração as características construtivas específicas do protótipo. Este resultado sublinha a influência significativa da localização e das condições de medição na interpretação dos dados térmicos.

Figura 16. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura da laje de concreto.



Fonte: Autora (2024).

Observa-se um padrão semelhante entre os gráficos das Figuras 15 e 16, referentes às medições realizadas na edificação e na laje de concreto, respectivamente. Esta semelhança pode ser atribuída ao fato de ambos os sensores estarem localizados dentro da edificação, o que implica que as condições ambientais e as variáveis de medição, como temperatura e umidade, sejam praticamente idênticas para ambos. A presença de um ambiente

controlado e fechado tende a homogeneizar os dados coletados, resultando em gráficos com padrões comparáveis.

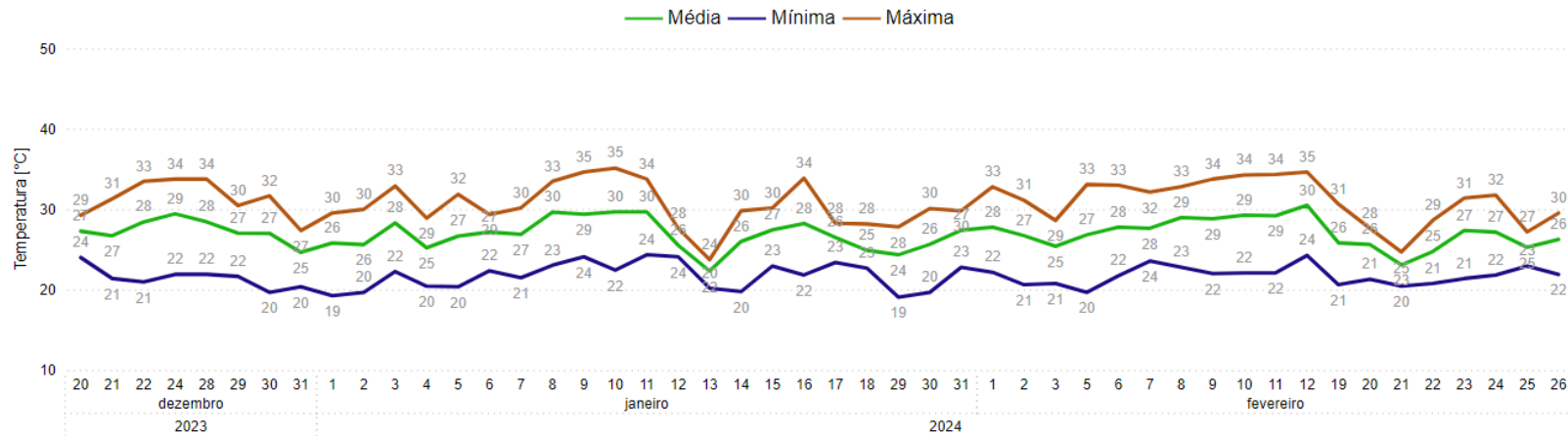
3) Drenagem

A terceira camada, drenagem, composta por argila expandida e água, possui um sensor exatamente entre as argilas, que recebe água toda vez que ocorre a rega das plantas. Os dados de temperatura coletados foram apresentados na Figura 18. A temperatura média geral registrada foi de 28,05°C, sendo que a mínima foi de 18,88°C e a máxima de 36,31°C. O desvio padrão médio foi de $\pm 4,04^\circ\text{C}$. Entre quarta-feira, 20 de dezembro, 2023 e segunda-feira, 26 de fevereiro, 2024, a temperatura máxima da drenagem teve o maior aumento (2,49%), enquanto a mínima teve a maior redução (8,65%). A temperatura máxima iniciou a tendência em segunda-feira, 19 de fevereiro, 2024, caindo 4,40% em 7 dias. A temperatura máxima também caiu de 31,94°C para 29,25°C durante a queda mais acentuada entre domingo, 14 de janeiro, 2024 e quarta-feira, 17 de janeiro, 2024.

A Figura 19 é um comparativo dos dados das médias de radiação global e temperatura do ar, obtidos da base de dados do INMET, no meses de dezembro de 2023, janeiro e fevereiro de 2024, com os dados coletados da temperatura na camada de drenagem, nos mesmos meses. A temperatura do ar aumenta gradualmente até as 13h, estabiliza-se até as 15h e então começa a cair. As temperaturas da drenagem em dezembro, janeiro e fevereiro seguem uma tendência similar, com a drenagem em dezembro alcançando temperaturas superiores.

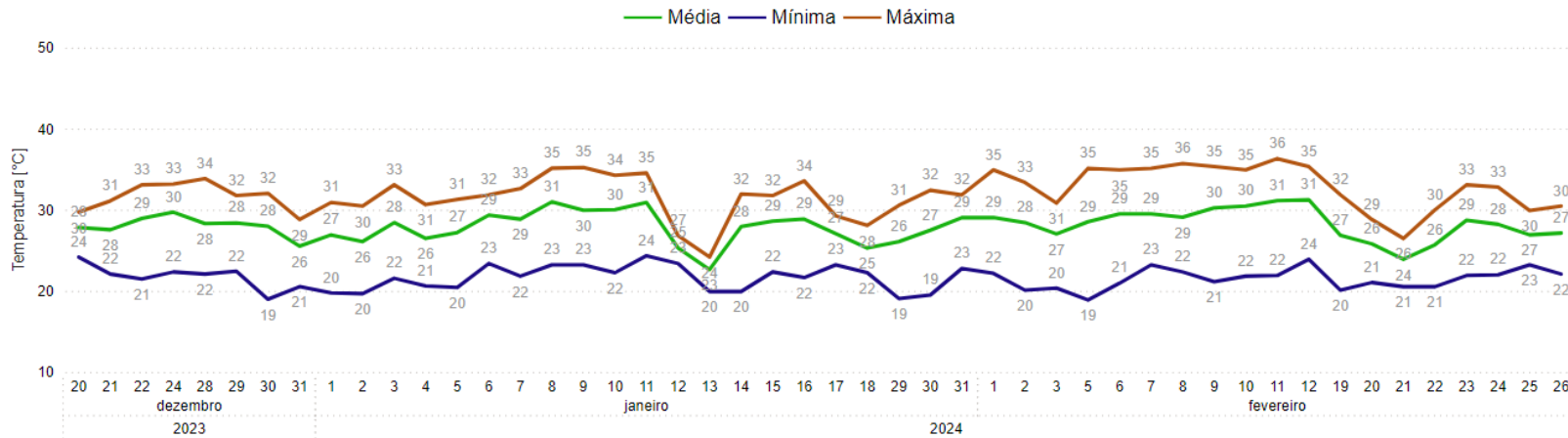
Após as 14h, a drenagem em fevereiro exibe o maior aumento de temperatura, além de que todas as temperaturas da drenagem ficam consistentemente acima da temperatura do ar. Este fenômeno pode ser explicado pela incidência solar direta sobre o telhado verde, onde a camada de drenagem foi instalada entre a camada de impermeabilização e o filtro, ambos compostos por materiais poliméricos que oferecem pouca permeabilidade ao ar. Essas condições favorecem a retenção de calor.

Figura 17. Registros diários da temperatura da laje de concreto.



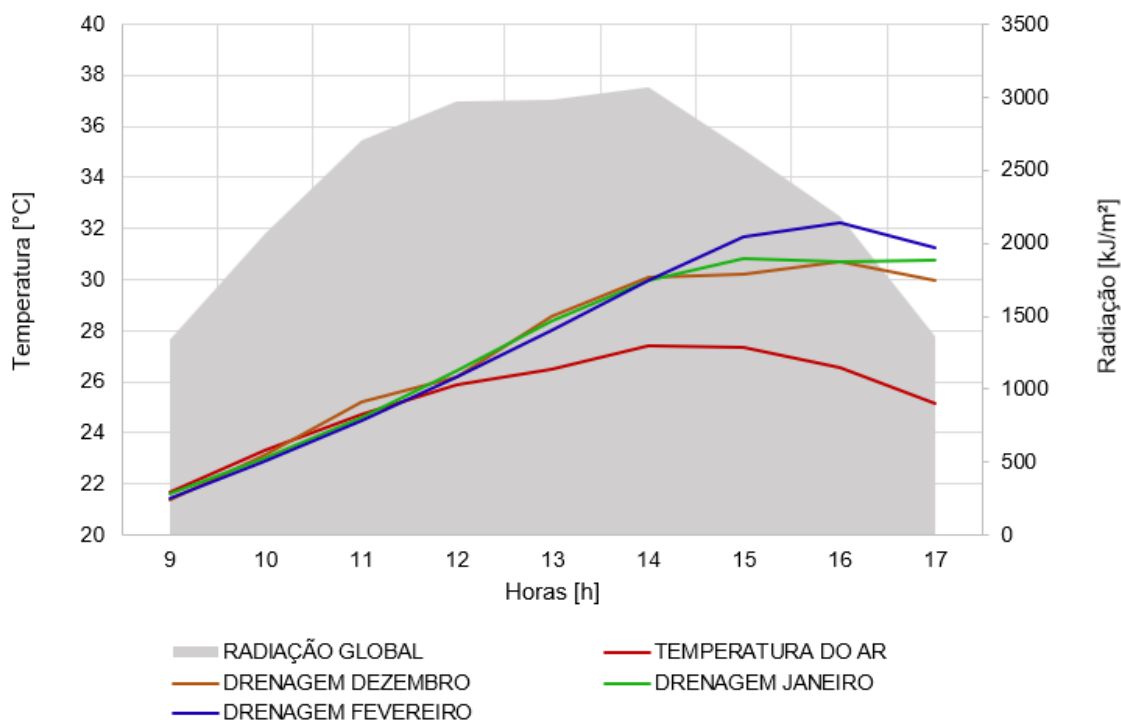
Fonte: Autora (2024).

Figura 18. Registros diários da temperatura da drenagem.



Fonte: Autora (2024).

Figura 19. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura da drenagem.



Fonte: Autora (2024).

Observa-se um padrão diferente entre os gráficos das Figuras 16 e 19, referentes às medições realizadas na laje de concreto e drenagem, respectivamente. A comparação entre os gráficos revela que, embora ambos mostrem padrões semelhantes de variação da radiação global e da temperatura do ar ao longo do dia, há diferenças notáveis nas temperaturas da laje e drenagem. As temperaturas da drenagem em dezembro, janeiro e fevereiro apresentam picos mais altos e uma dissipação mais rápida após o pico em comparação com as temperaturas da laje correspondentes. Especificamente, a drenagem em dezembro atinge uma temperatura máxima mais elevada e diminui mais rapidamente do que a laje em dezembro, enquanto a drenagem em janeiro mostra um aumento de temperatura mais precoce e uma diminuição mais rápida do que a laje em janeiro. A drenagem em fevereiro segue uma tendência semelhante, com um pico de temperatura mais alto e uma queda mais acentuada comparada à laje em fevereiro.

Esta discrepância pode ser atribuída ao fato de que o sensor da drenagem está localizado em um ambiente mais confinado, sem acesso às correntes de ar. A ausência de ventilação efetiva impede a dissipação do calor acumulado,

resultando em temperaturas mais elevadas. Portanto, a localização e as condições ambientais dos sensores são fatores determinantes na diferença observada nos padrões de temperatura entre os dois gráficos.

4) Substrato

O substrato é a quarta camada do telhado verde, nesta foi utilizado apenas substrato de terra vegetal feito com esterco, casca de pinus, terra e demais componentes que tornam ideal para as plantas. No substrato foram instalados dois sensores, temperatura e umidade do solo, ambos próximo a região de microclima. A Figura 20 apresenta as temperaturas média, mínima e máxima do substrato durante todos os dias de coleta de dados. A temperatura máxima foi de 32,3°C no dia 11 de fevereiro de 2024, a mínima de 18,3°C no dia 30 de janeiro e a temperatura média ficou em 25,3°C.

Em todas as métricas, a média teve a tendência inicial mais interessante e começou a criar tendências mais específicas na segunda-feira, 19 de fevereiro, 2024, subindo em 3,84% ($\pm 0,93$ °C) em 7 dias. A temperatura mínima saltou de 20,95 °C para 23,99 °C durante a inclinação mais acentuada entre terça-feira, 6 de fevereiro, 2024 e segunda-feira, 12 de fevereiro, 2024. A Tabela 3 apresenta um resumo das médias das temperaturas e desvio padrão por mês do substrato. A tabela destaca uma tendência de aumento nas temperaturas médias, máximas e mínimas de dezembro a fevereiro, com fevereiro registrando tanto as temperaturas mais altas.

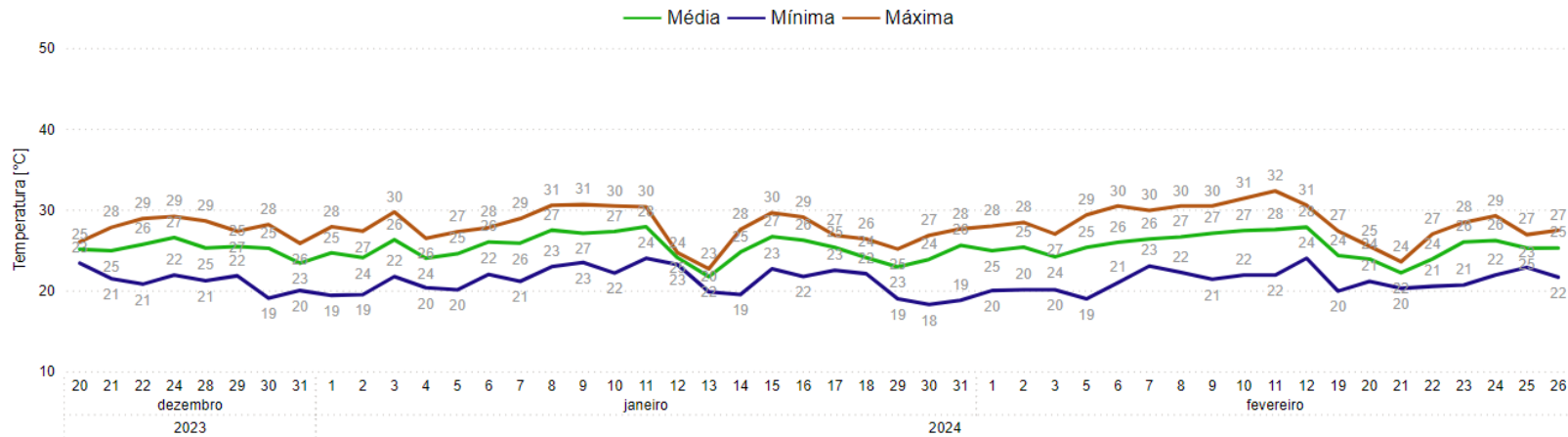
Tabela 3. Resumo das temperaturas e desvio padrão do substrato.

Mês	Média [°C]	Máxima [°C]	Mínima [°C]	Desvio Padrão [\pm °C]
Dezembro	25,22	29,16	19,06	2,23
Janeiro	25,29	30,63	18,28	2,63
Fevereiro	25,55	32,32	18,97	2,82

Fonte: Autora (2024).

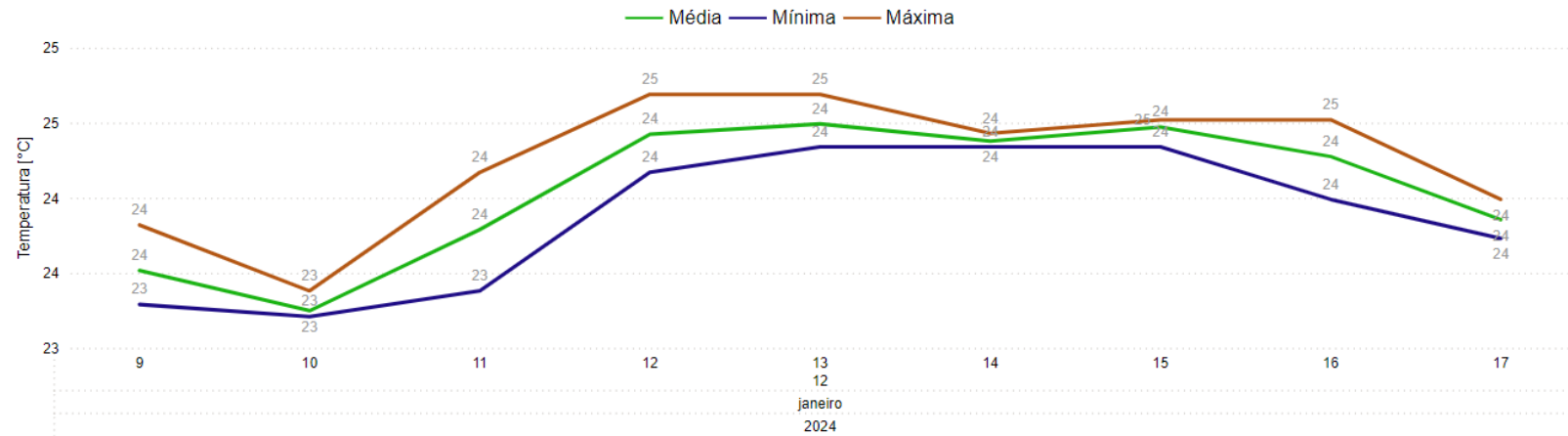
Em uma análise visual da Figura 20, verifica-se que no dia 12 de janeiro as temperaturas máxima e mínima se aproximam da média do mesmo dia, neste mesmo dia os registros de temperatura local marcaram tempo nublado com temperatura máxima de 26°C e mínima de 18°C.

Figura 20. Registros diários da temperatura do substrato.



Fonte: Autora (2024).

Figura 21. Registros da temperatura do substrato por hora, no dia 12 de janeiro de 2024.



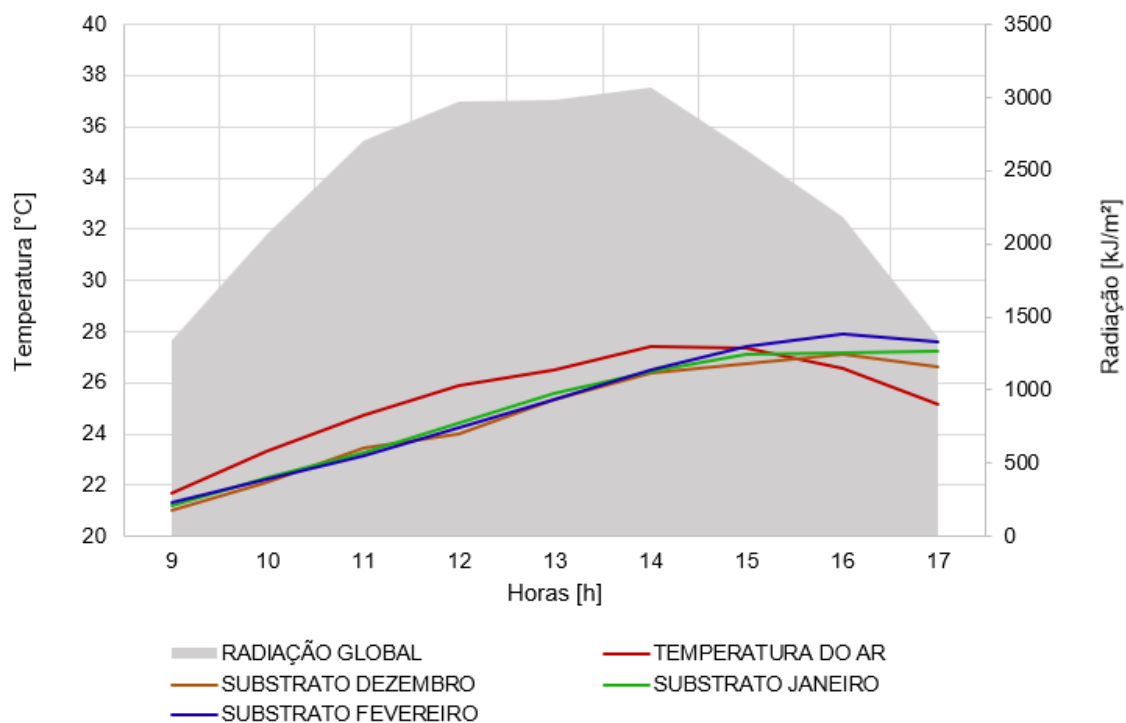
Fonte: Autora (2024).

A Figura 21 apresenta a curva de temperatura do substrato neste dia, o desvio padrão dessas temperaturas é de $\pm 0,46$ °C indicando que essas temperaturas têm uma variação relativamente pequena em torno de suas médias. Especialmente na Figura 21 o eixo y das temperaturas foi alterado para melhor visualização dos dados. A coleta de dados neste dia ocorreu durante 8 horas, sendo que os dados foram coletados a cada 10 segundos. Percebe-se uma queda de 1,3% da temperatura das 09h para às 10h, isso ocorre porque os sensores são ligados as 09h e depois ocorre o processo de rega das plantas, o que pode ter ocasionado essa queda de temperatura. A maior temperatura do substrato registrada neste dia foi de 24,7°C às 12h que é o horário com maior radiação solar global, sendo 1825,1 kJ/m², segundo registros do INMET.

Observa-se um padrão diferente entre as Figuras 18 e 20, referentes às medições realizadas na drenagem e no substrato, respectivamente. No substrato, as temperaturas registradas são aproximadamente 3°C menores em todas as médias medidas. Esta diferença pode ser explicada por diversos fatores ambientais e bioquímicos. O substrato está exposto às condições climáticas, incluindo radiação solar e ventilação, o que facilita a dissipação do calor. Além disso, a rega diária de 1 litro de água contribui significativamente para a redução da temperatura através do processo físico-químico de evaporação da água presente no substrato e nas plantas. Esses fatores combinados promovem um microclima mais ameno no substrato, em contraste com o ambiente confinado e menos ventilado do sistema de drenagem.

A Figura 22 analisa os valores médios mensais de radiação global e temperatura do ar nos meses de dezembro de 2023, janeiro e fevereiro de 2024, utilizando dados do INMET, em comparação com os registros de temperatura do substrato obtidos no protótipo. Os resultados revelam uma similaridade nas tendências das temperaturas até as 15h, sendo a temperatura do ar mais alta do que as temperaturas do substrato. Após as 15h a temperatura do ar diminui, enquanto as temperaturas do substrato permanecem constantes com pouca variação.

Figura 22. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura do substrato.

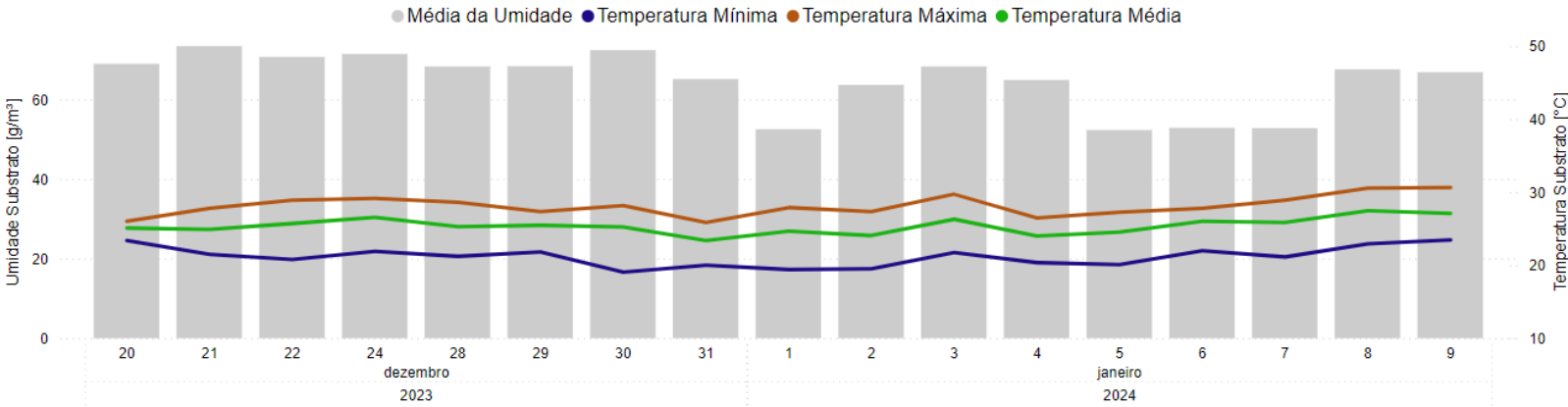


Fonte: Autora (2024).

Observa-se um padrão distinto entre as Figuras 19 e 22, que comparam a radiação e a temperatura do ar, com as temperaturas da drenagem e do substrato, respectivamente. As temperaturas medidas na drenagem no mês de fevereiro de 2024 ultrapassam os 32°C, enquanto no substrato não excedem os 28°C. Esta diferença significativa pode ser atribuída a várias condições ambientais. No substrato, a exposição direta ao sol e à ventilação promove uma maior dissipação de calor, além do efeito resfriador da evaporação da água proveniente da rega diária. A análise desses gráficos evidencia como as variáveis ambientais, como radiação solar e ventilação, influenciam diretamente as temperaturas registradas nas diferentes camadas do telhado verde.

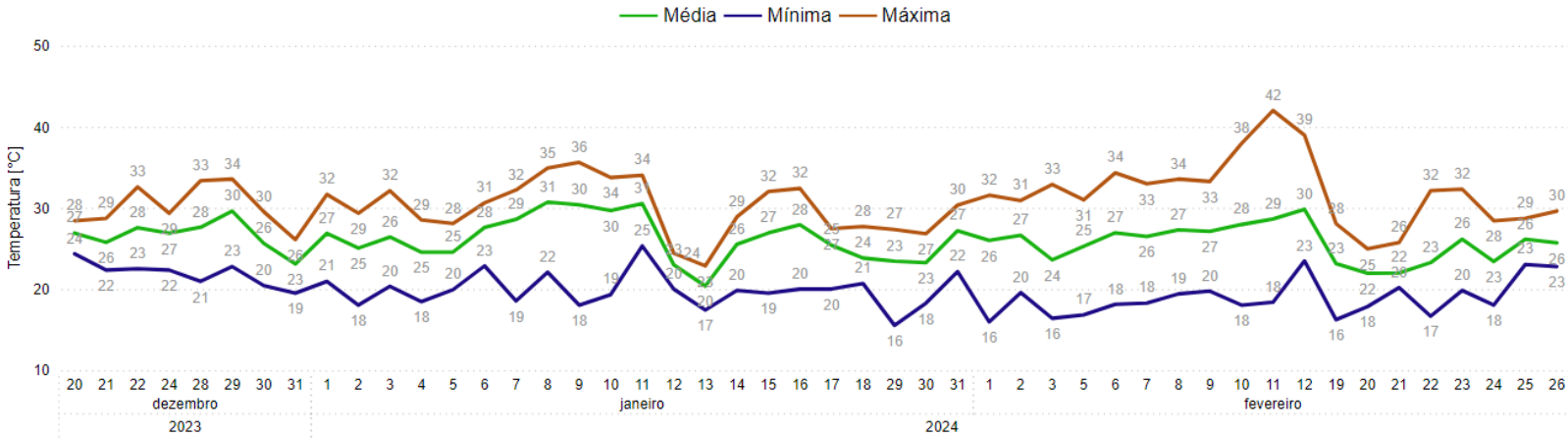
No substrato também ocorreram por 16 dias a coleta de dados da umidade do solo. A Figura 23 apresenta os dados de temperatura, máxima, média e mínima e os dados de umidade do substrato e a Tabela 4, apresenta o resumo de valores das temperaturas, umidades e desvios padrão. Foram apresentados os valores médios da temperatura e da umidade em cada dia, sendo que as barras em cinza indicam a umidade e as linhas temperatura.

Figura 23. Registros diários das temperaturas e umidade do substrato.



Fonte: Autora (2024).

Figura 24. Registros da temperatura da planta no microclima.



Fonte: Autora (2024).

Tabela 4. Coleta de dados temperatura e umidade do substrato.

Data	Temperatura Média [°C]	Desvio Padrão Temperatura [±°C]	Umidade Média [g/m³]	Desvio Padrão Umidade [±g/m³]
21/12/2023	24,91	2,11	73,40	5,12
22/12/2023	25,71	2,50	70,70	1,28
24/12/2023	26,56	2,19	71,41	7,52
28/12/2023	25,27	2,40	68,28	1,30
29/12/2023	25,46	1,59	68,35	8,17
30/12/2023	25,23	2,83	72,38	3,71
31/12/2023	23,38	2,02	65,12	1,86
01/01/2024	24,66	2,72	52,51	2,62
02/01/2024	24,06	2,39	63,65	1,68
03/01/2024	26,29	2,18	68,29	1,29
04/01/2024	24,00	2,10	64,90	1,88
05/01/2024	24,54	2,45	52,32	2,77
06/01/2024	26,01	1,76	52,86	2,25
07/01/2024	25,86	2,36	52,77	2,49
08/01/2024	27,47	2,30	67,56	0,88
09/01/2024	27,08	2,52	66,85	1,40

Fonte: Autora (2024).

Como tendências temporais verifica-se que a temperatura média variou entre 23,38°C e 27,47°C ao longo do período de coleta. Observa-se uma flutuação considerável na temperatura média diária, com um desvio padrão variando de $\pm 1,59^\circ\text{C}$ a $\pm 2,83^\circ\text{C}$, indicando certa instabilidade nas condições climáticas durante o período.

A umidade média do solo variou entre 52,32% e 73,40% durante o período de coleta. Houve uma variação significativa na umidade do solo ao longo dos dias, com desvio padrão variando de 0,88% a 8,17%, sugerindo flutuações consideráveis nas condições do solo. A partir do dia 10 de janeiro, 2024, houve instabilidade nas medições de umidade, devido a uma provável danificação do sensor, logo os dados não foram mais utilizados.

Destaca-se que, durante o período de 01/01/2024 a 07/01/2024, houve uma redução contínua na umidade média, coincidindo com uma manutenção de temperaturas relativamente estáveis, o que pode indicar um período de baixa precipitação e alta evapotranspiração. A análise dos desvios padrão sugere que, apesar das flutuações nas médias diárias, a dispersão dos dados de temperatura e umidade é moderada, refletindo variações ambientais típicas do período estudado.

5) Plantas

A camada das plantas possui dois sensores, sendo um para uma planta que está na região do microclima e o outro para a planta que está longe do microclima, nesse sentido este tópico foi dividido em duas partes. Os sensores foram dispostos entre as folhas da planta, pois não havia como colocar dentro da folha porque iria danificar a planta e a folha secaria devido à falta de nutrientes na região do furo.

5.A) Planta no microclima

A planta na região do microclima está apresentada na Figura 25 e o gráfico das temperaturas medidas pelo sensor está apresentado na Figura 24.

Figura 25. Sensor na planta do microclima.



Fonte: Autora (2024).

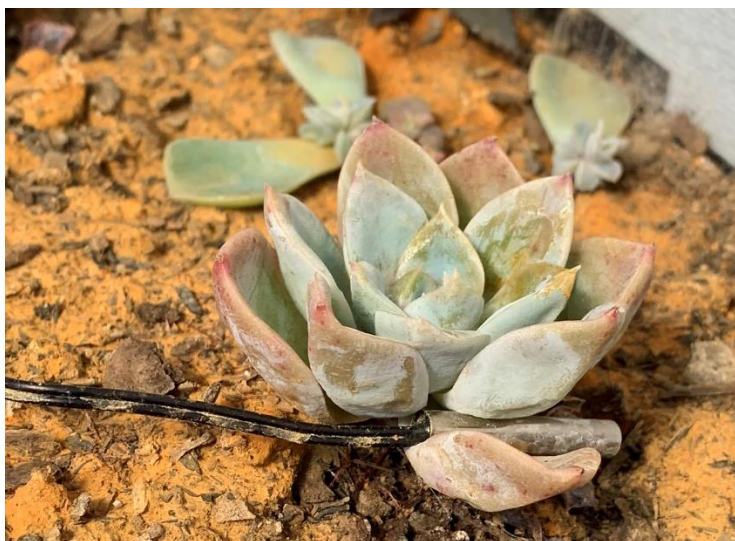
O valor máximo da temperatura na planta no microclima foi de 42,01°C registrado no dia 11 de fevereiro, 2024, já a menor temperatura registrada foi de 15,52°C registrada no dia 29 de janeiro, 2024 no primeiro de coleta, a média geral é de 26,10°C e o desvio padrão de $\pm 3,78^\circ\text{C}$. Entre quarta-feira, 20 de

dezembro, 2023 e segunda-feira, 26 de fevereiro, 2024, a temperatura máxima teve o maior aumento (4,19%), enquanto a temperatura mínima teve a maior redução (6,45%). A temperatura mínima iniciou a tendência de quinta-feira, 22 de fevereiro, 2024, subindo em 36,76% (6,12) em 4 dias, também saltou de 16,65°C para 22,77°C durante a inclinação mais acentuada entre quinta-feira, 22 de fevereiro, 2024 e segunda-feira, 26 de fevereiro, 2024. O menor desvio padrão registrado foi de $\pm 0,69^{\circ}\text{C}$ no dia 12 de janeiro, 2024, sendo que a temperatura média neste dia foi de 23,00°C.

5.B) Planta longe do microclima

A planta longe do microclima que foi selecionada para coletar os dados com o sensor está apresentada na Figura 26, a Figura 27 apresenta as temperaturas desse sensor.

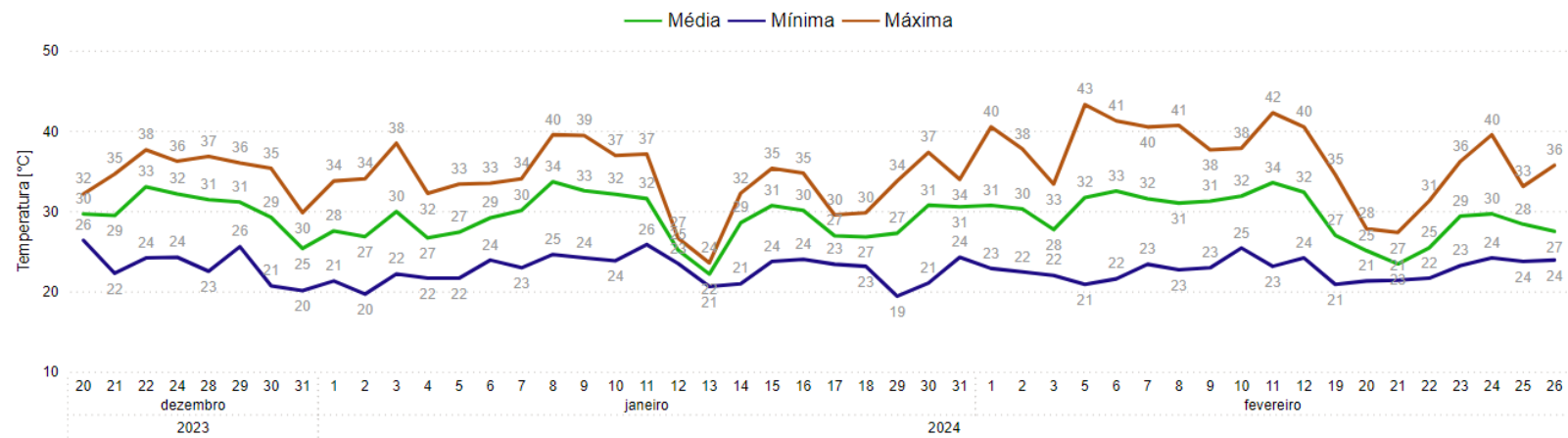
Figura 26. Sensor na planta longe do microclima.



Fonte: Autora (2024).

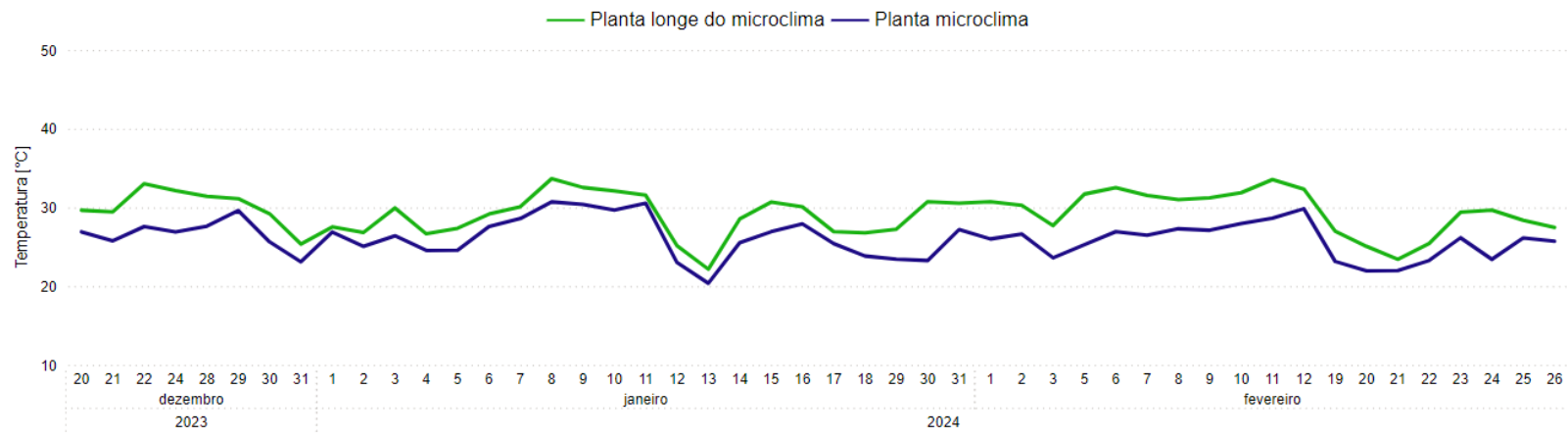
O valor máximo da temperatura registrada nesta planta foi de 43,26°C registrado no dia 05 de fevereiro, 2024, o valor mínimo foi de 19,40°C registrado no dia 29 de janeiro, 2024, o valor médio geral da temperatura ficou em 29,35°C e o desvio padrão $\pm 4,66^{\circ}\text{C}$. Entre quarta-feira, 20 de dezembro, 2023 e segunda-feira, 26 de fevereiro, 2024, a temperatura máxima teve o maior aumento (11,14%), enquanto a temperatura mínima teve a maior redução (9,37%). Em todas as métricas, a temperatura média teve a tendência recente mais interessante e começou a criar tendências em segunda-feira, 19 de fevereiro, 2024, subindo em 1,80% ($\pm 0,49^{\circ}\text{C}$) em 7 dias.

Figura 27. Registros diários da temperatura da planta longe do microclima.



Fonte: Autora (2024).

Figura 28. Comparação das temperaturas das plantas no microclima e longe do microclima.



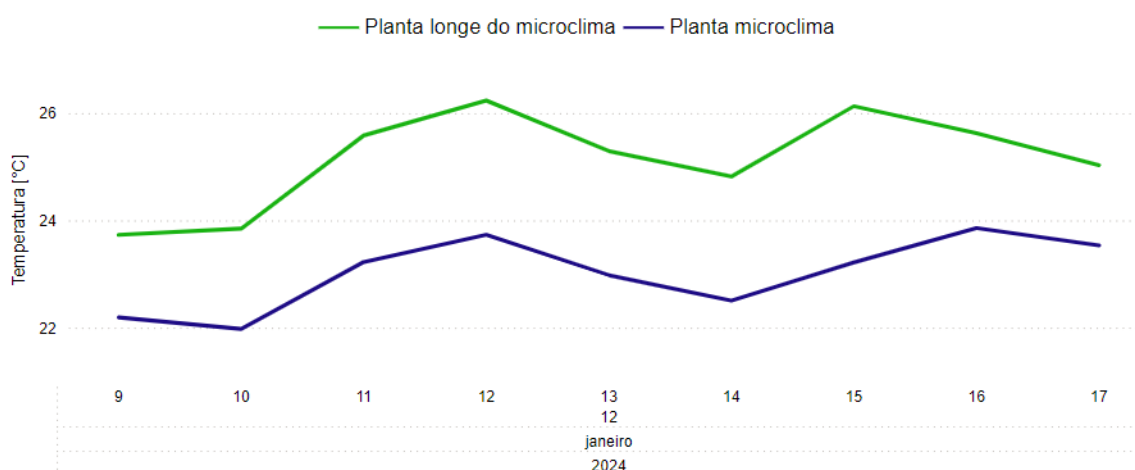
Fonte: Autora (2024).

O menor desvio padrão registrado foi de $\pm 0,89$ °C registrado no dia 13 de janeiro, 2024, nesse mesmo dia a temperatura média foi de 22,16°C. Os sensores foram dispostos na mesma camada, porém com localizações diferentes, em uma análise visual e comparativa das Figuras 25 e 26, verifica-se que a planta no microclima teve um crescimento vertical e a planta longe do microclima teve um crescimento horizontal, isso ocorreu devido à ausência de sol na planta do microclima, pois fica sempre com a sombra do módulo fotovoltaico. Foi elaborado um gráfico comparativo das temperaturas ao longo do tempo do dois sensores, exposto na Figura 28.

Nota-se que a temperatura da planta que está no microclima em todos os dias é menor do que a temperatura da planta que está longe do microclima. Isso ocorre devido a presença de sombra e devido ao efeito de evapotranspiração que ocorre na região do microclima, onde as plantas e o solo evaporaram a água como processo biológico e este vapor tende a permanecer na região de microclima por mais tempo até ir para a atmosfera.

Outra análise a ser feita é a observação da proximidade das temperaturas que ocorrem entre os dias 11, 12 e 13 de janeiro. Especialmente no dia 12 de janeiro, os desvios padrão foram de $\pm 0,92$ °C para a planta longe do microclima e $\pm 0,69$ °C para a planta do microclima. A Figura 29 apresenta a comparação das temperaturas neste dia.

Figura 29. Análise da temperatura no dia 12 de janeiro, 2024 – Planta longe do microclima X Planta no microclima.



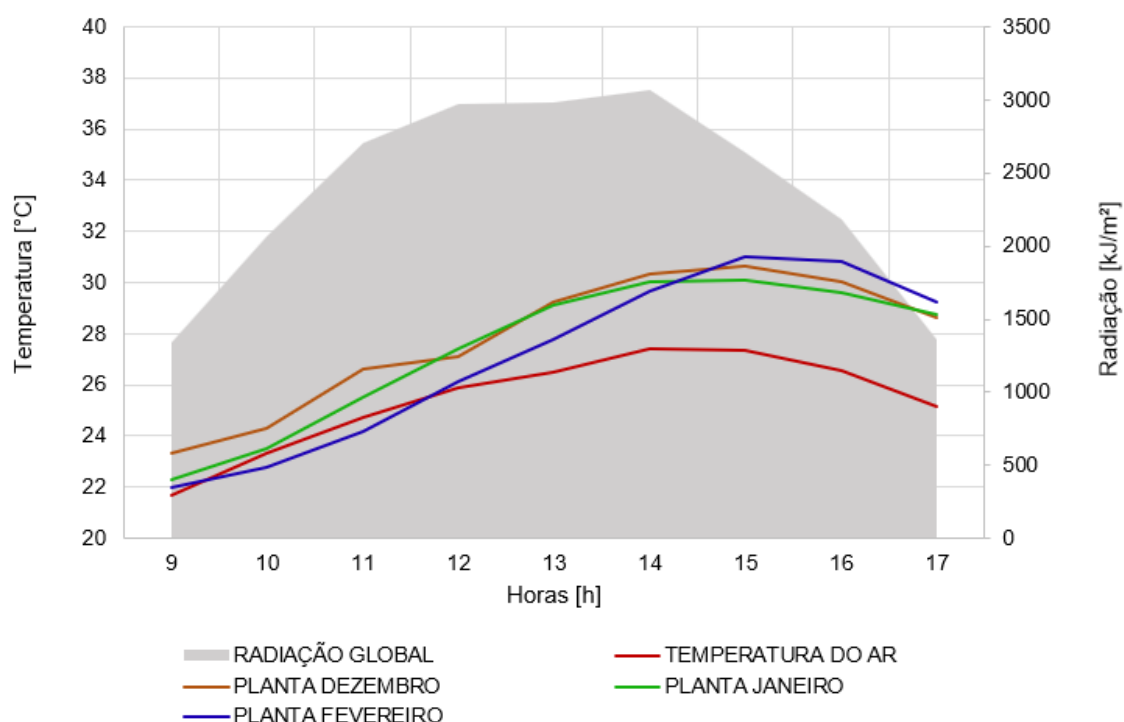
Fonte: Autora (2024).

Neste dia, foram coletados 8 horas de dados, iniciando às 09h e finalizando às 17h. Os registros de temperatura neste dia apresentam que a

temperatura máxima foi de 26°C e a mínima de 18°C, a umidade relativa média de 86% e com vento de 6 km/h. Verifica-se na Figura 29 que as curvas são constantes entre si, concordando com o desvio padrão baixo. Especialmente na Figura 29 o eixo y das temperaturas foi alterado para melhor visualização dos dados.

Na Figura 30 é possível analisar os valores médios mensais de radiação global e temperatura do ar nos meses de dezembro de 2023, janeiro e fevereiro de 2024, utilizando dados do INMET, em comparação com a média das temperaturas das plantas no microclima e longe do microclima.

Figura 30. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura média das plantas.



Fonte: Autora (2024).

As temperaturas das plantas em dezembro, janeiro e fevereiro mostram um padrão de aumento gradual durante a manhã, atingindo picos entre 14h e 15h, antes de começar a diminuir no final da tarde. Notavelmente, a temperatura das plantas em fevereiro tende a ser ligeiramente mais alta em comparação com dezembro e janeiro, especialmente durante as horas de pico. A temperatura do ar também segue um padrão similar, embora permaneça consistentemente abaixo das temperaturas das plantas ao longo do dia. A comparação das

temperaturas das plantas entre os três meses indica que as plantas em fevereiro estão expostas a condições um pouco mais quentes, refletindo possivelmente uma variação sazonal na resposta das plantas à radiação global.

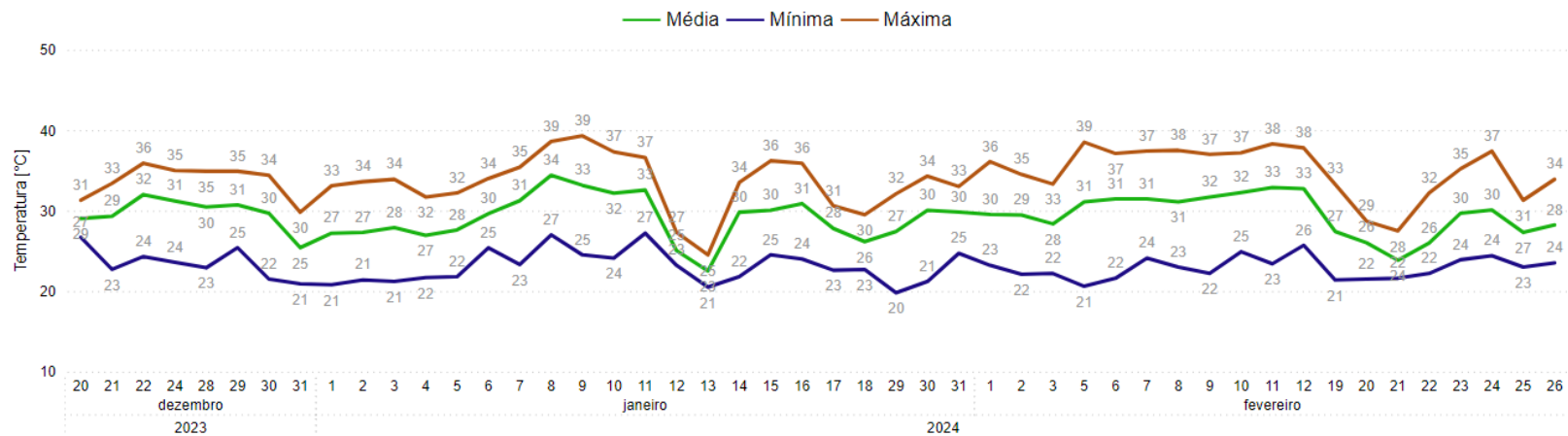
Observa-se um padrão distinto entre as Figuras 22 e 30, que comparam a radiação e a temperatura do ar com as temperaturas do substrato e das plantas, respectivamente. Na Figura 22, as temperaturas do substrato até as 15h são consistentemente menores do que a temperatura do ar em todos os meses, sendo a temperatura máxima registrada de aproximadamente 28°C às 16h em fevereiro. Em contraste, as temperaturas das plantas, conforme ilustrado na Figura 30 são superiores à temperatura do ar, com valores máximos variando entre 30°C e 32°C. Esta diferença pode ser atribuída ao fato de que o substrato, exposto à ventilação e umidade, beneficia-se da evaporação da água tanto do substrato quanto das plantas, resultando em temperaturas mais baixas. Por outro lado, as plantas absorvem a radiação solar e conforme apresentado nas Figuras 25 e 26 o sensor das plantas ficou entre as folhas, ou seja, recebendo radiação solar direta, enquanto o sensor do substrato estava enterrado. Esses dados evidenciam como as diferentes propriedades físicas e biológicas do substrato e das plantas influenciam diretamente as variações térmicas observadas.

6) Microclima

O microclima é a região entre as plantas e a parte traseira do módulo fotovoltaico. Nesta região ocorrem os efeitos de evaporação da água do substrato e das plantas, que demoram escoar para a atmosfera devido ao módulo fotovoltaico que cria uma região confinada. A Figura 31 mostra as curvas de temperaturas do dados coletados nesta camada.

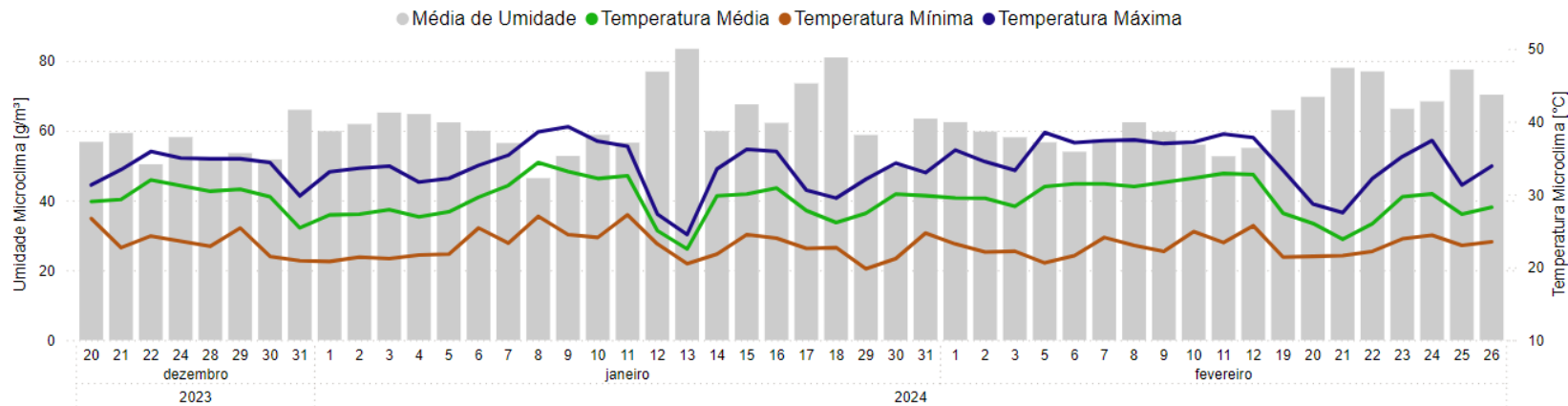
A média geral da temperatura foi de 29,38°C, enquanto a máxima registrada foi de 39,30°C, a mínima 19,80°C e o desvio padrão geral $\pm 3,97^\circ\text{C}$. O dia com menor desvio padrão foi 13 de janeiro, 2024, registrando $\pm 1,00^\circ\text{C}$, neste dia verifica-se que a temperatura máxima registrada foi de 24,50°C, a média de 22,52°C e a mínima de 20,50°C, variando aproximadamente 2°C entre si, explicando o desvio padrão baixo.

Figura 31. Registros diários da temperatura do microclima.



Fonte: Autora (2024).

Figura 32. Registros diários das temperaturas e umidade do microclima.



Fonte: Autora (2024).

Na região de microclima também foi coletado os dados de umidade do ar. A Figura 33 apresenta o sensor de coleta desses dados instalado no protótipo e a Figura 32 apresenta os dados de umidade e temperaturas coletados na região do microclima.

Figura 33. Sensor de temperatura e umidade da região de microclima.



Fonte: Autora (2024).

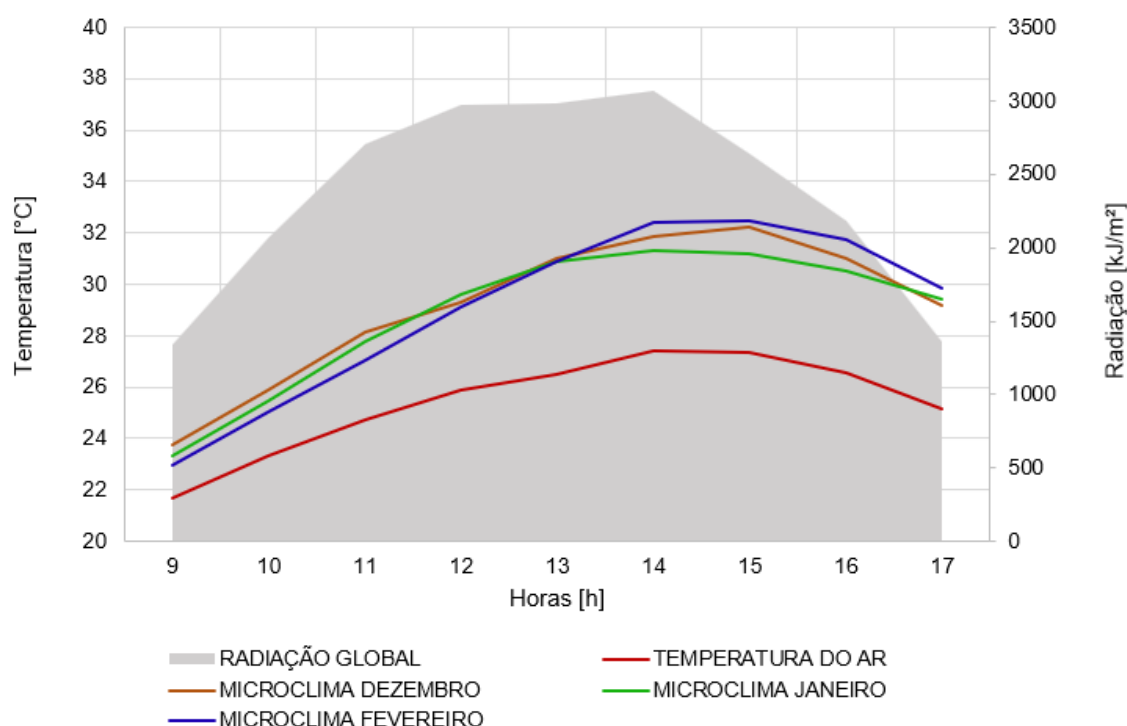
O gráfico da Figura 32 ilustra a variação da média de umidade e das temperaturas ao longo dos dias de dezembro de 2023 a fevereiro de 2024. A temperatura máxima mostra picos notáveis em meados de janeiro e novamente em fevereiro, enquanto a temperatura mínima se mantém mais estável, com menores variações ao longo do período. A temperatura média apresenta uma tendência intermediária, refletindo um padrão mais suave de variação diária. Observa-se que a média de umidade tem flutuações significativas, com alguns picos acentuados, especialmente no início e no final de janeiro. A relação entre a umidade e as temperaturas indica que, nos dias com maior umidade, as temperaturas máximas tendem a ser mais altas, sugerindo um impacto direto das condições de umidade nas variações térmicas do microclima.

O valor médio da umidade foi de 61,84%, o menor desvio padrão registrado ocorreu no dia 13 de janeiro, 2024, neste dia a umidade média foi de 83,45%. Em todas as métricas, a média da umidade do microclima teve a tendência recente mais interessante e começou a criar tendências em segunda-feira, 19 de fevereiro, 2024, subindo em 6,69% ($\pm 4,41\%$) em 7 dias.

Observa-se um padrão distinto entre as Figuras 24, 27 e 32, que comparam as temperaturas de uma planta no microclima, uma planta longe do microclima e o próprio microclima, respectivamente. A temperatura do microclima é semelhante à da planta longe do microclima, ambas apresentando temperaturas mais altas em comparação com a planta no microclima. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que a planta no microclima permanece constantemente na sombra, o que reduz sua exposição direta à radiação solar, resultando em temperaturas mais baixas. Em contrapartida, o sensor da planta longe do microclima está exposto à incidência solar direta, o que aumenta suas temperaturas.

A Figura 34 é um comparativo dos dados das médias de radiação global e temperatura do ar, obtidos da base de dados do INMET, no meses de dezembro de 2023, janeiro e fevereiro de 2024, com os dados coletados da temperatura no microclima.

Figura 34. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura do microclima.



Fonte: Autora (2024).

Observa-se que até as 14h ocorre um aumento contínuo tanto nas temperaturas quanto na radiação, chegando no pico de todos os dados

exatamente às 14h. A temperatura registrada no mês de fevereiro se destaca como a mais alta após às 14h, atribuído a um verão intenso e sem precipitações. Além disso, nota-se que as temperaturas do microclima é aproximadamente cerca de 4°C superior à temperatura do ar no final do dia.

Verifica-se um padrão distinto entre as Figuras 30 e 34, que comparam a radiação e a temperatura do ar com as temperaturas das plantas e do microclima, respectivamente. As temperaturas no microclima são consistentemente maiores do que a temperatura do ar, apresentando uma diferença de aproximadamente 2°C no início do dia e aumentando para cerca de 4°C no final do dia. Em contraste, as temperaturas das plantas são semelhantes à temperatura do ar no início do dia, mas começam a aumentar após as 13h, resultando em uma diferença de aproximadamente 3°C às 17h. Essa variação pode ser explicada pela influência da radiação solar direta e pelos processos metabólicos das plantas. Durante a manhã, a radiação ainda é moderada, e as temperaturas das plantas acompanham a do ar. No entanto, à medida que a radiação solar se intensifica, a temperatura das plantas aumenta devido à absorção de calor e aos processos fisiológicos. Já o microclima, exposto constantemente ao sol, acumula calor ao longo do dia, resultando em temperaturas consistentemente mais altas.

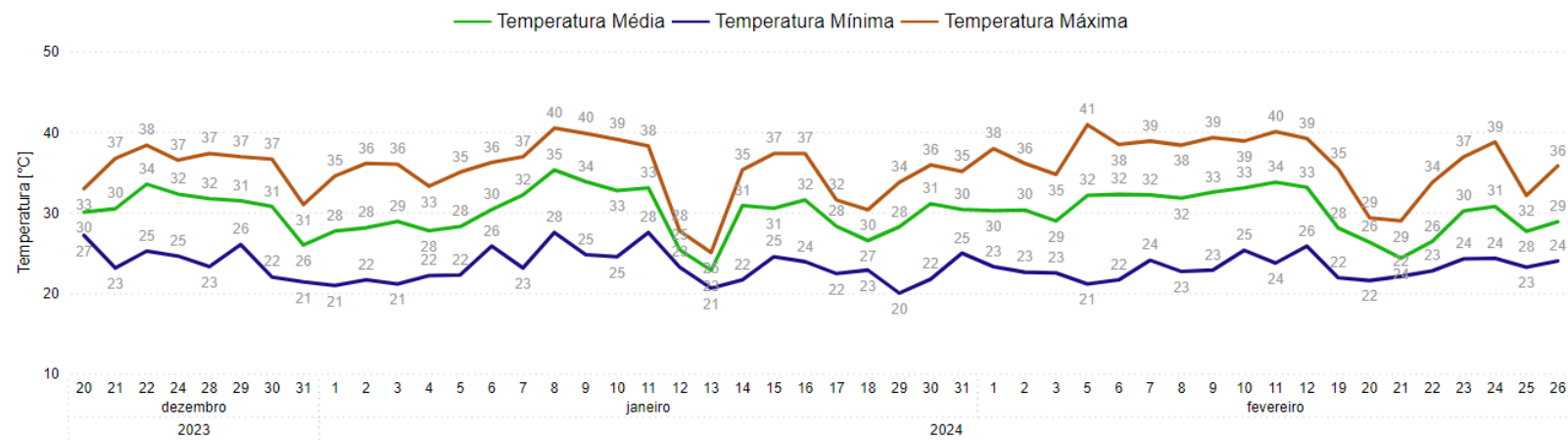
7) Módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico foi equipado com dois sensores de temperatura, um instalado na parte traseira e outro na parte frontal. Os dados estão apresentados em tópicos sendo “A” para traseira e “B” para parte frontal do módulo fotovoltaico.

7.A) Parte traseira do módulo fotovoltaico

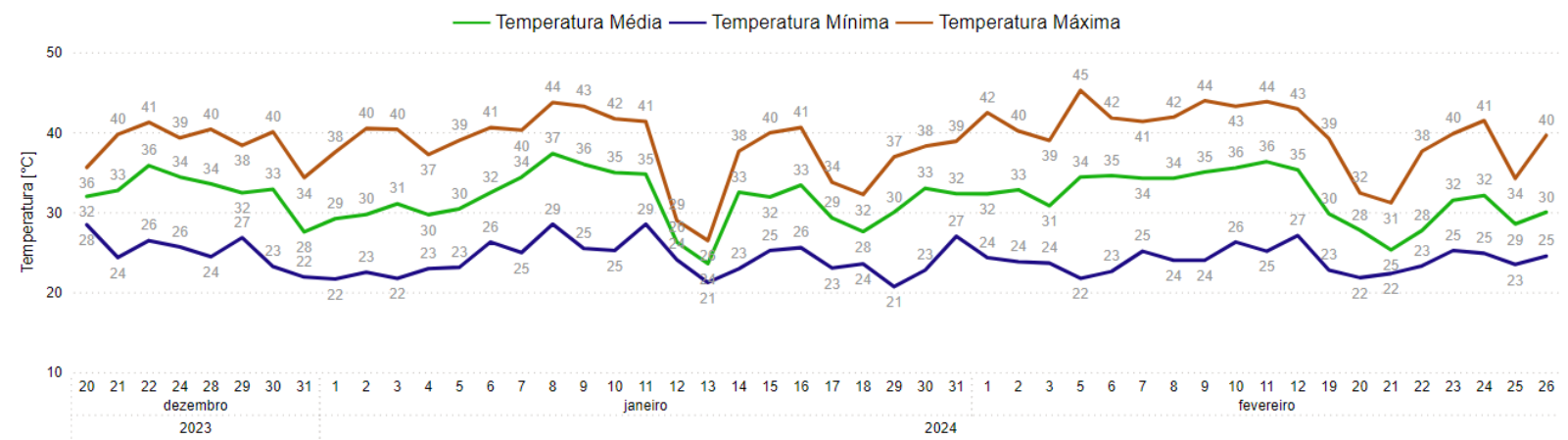
A Figura 35 exibe os dados de temperatura coletados na parte traseira do módulo. A temperatura média registrada na parte traseira foi de 30,11°C, com uma máxima de 40,91°C e uma mínima de 20,00°C. O menor desvio padrão observado foi de $\pm 1,15^\circ\text{C}$, registrado em 13 de janeiro de 2024. Entre todas as métricas, a temperatura mínima exibiu a tendência recente mais interessante, iniciando um aumento de 9,54% (2,09°C) em sete dias a partir de segunda-feira, 19 de fevereiro de 2024.

Figura 35. Registros diários da temperatura da parte traseira do módulo fotovoltaico.



Fonte: Autora (2024).

Figura 36. Registros diários da temperatura da parte frontal do módulo fotovoltaico.

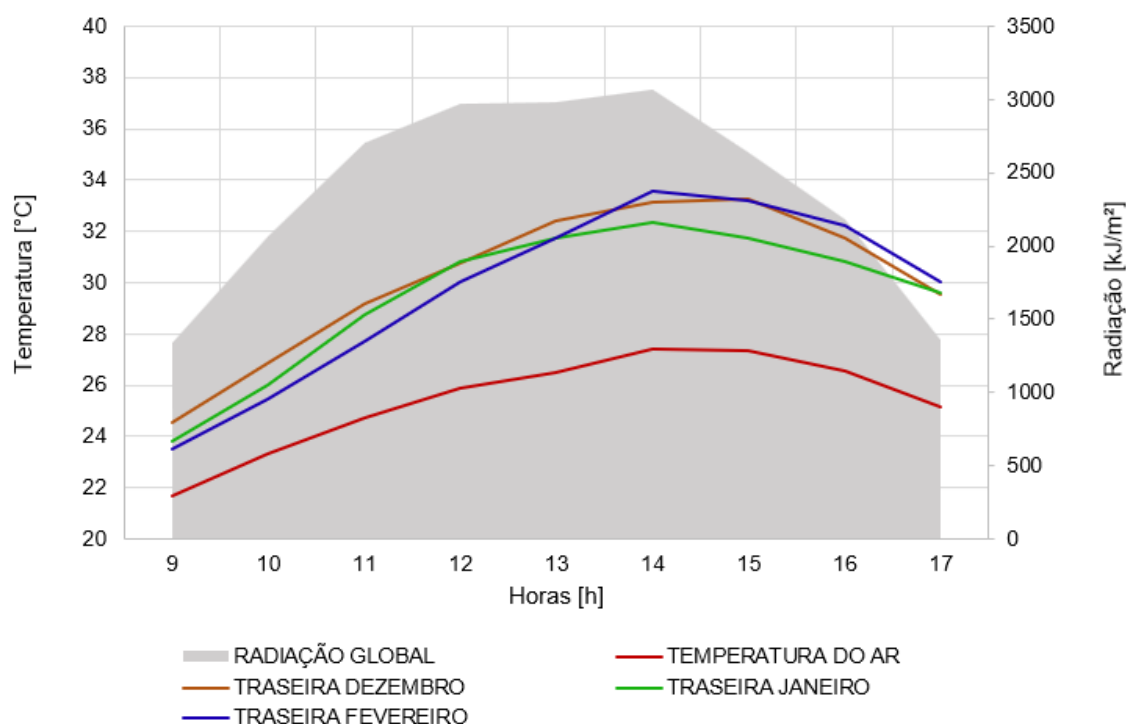


Fonte: Autora (2024).

Analisando a Figura 35, a temperatura máxima aumentou de forma contínua entre segunda-feira, 29 de janeiro de 2024, e segunda-feira, 12 de fevereiro de 2024, com um incremento de $5,45^{\circ}\text{C}$, mas sofreu uma mudança significativa na tendência, caindo $3,29^{\circ}\text{C}$ a partir de segunda-feira, 19 de fevereiro de 2024. A temperatura mínima registrou uma queda acentuada de $23,29^{\circ}\text{C}$ para $21,13^{\circ}\text{C}$ entre quinta-feira, 28 de dezembro de 2023, e quarta-feira, 3 de janeiro de 2024.

A Figura 37 analisa os valores médios mensais de radiação global e temperatura do ar nos meses de dezembro de 2023, janeiro e fevereiro de 2024, utilizando dados do INMET, em comparação com os registros de temperatura da traseira do módulo fotovoltaico obtidos no protótipo.

Figura 37. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura da traseira do módulo fotovoltaico.



Fonte: Autora (2024).

O gráfico acima mostra que as temperaturas e a radiação aumentam ao longo do dia, atingindo seu pico máximo às 14h. A temperatura na parte traseira do módulo fotovoltaico é consistentemente maior, superando a temperatura do ar em aproximadamente 4°C até as 17h. Esse comportamento pode ser

explicado pela acumulação de calor na superfície traseira devido à exposição prolongada à radiação solar direta.

7.B) Parte frontal do módulo fotovoltaico

A Figura 36 apresenta os dados de temperatura coletados na parte frontal do módulo fotovoltaico. A temperatura média da parte frontal foi de 31,92°C, com uma máxima de 45,24°C e uma mínima de 20,96°C. O menor desvio padrão registrado foi de $\pm 1,34^\circ\text{C}$ em 13 de janeiro de 2024. Em todas as métricas, a temperatura mínima mostrou a tendência mais interessante, iniciando um aumento significativo em 19 de fevereiro de 2024, subindo 7,69% (1,75°C) em sete dias. A temperatura média aumentou entre terça-feira, 30 de janeiro de 2024, e segunda-feira, 12 de fevereiro de 2024, com um incremento de 2,30°C, mas sofreu uma alteração significativa na tendência, caindo 1,28°C a partir de 19 de fevereiro de 2024. A temperatura mínima registrou uma queda acentuada de 24,43°C para 21,73°C entre quinta-feira, 28 de dezembro de 2023, e quarta-feira, 3 de janeiro de 2024.

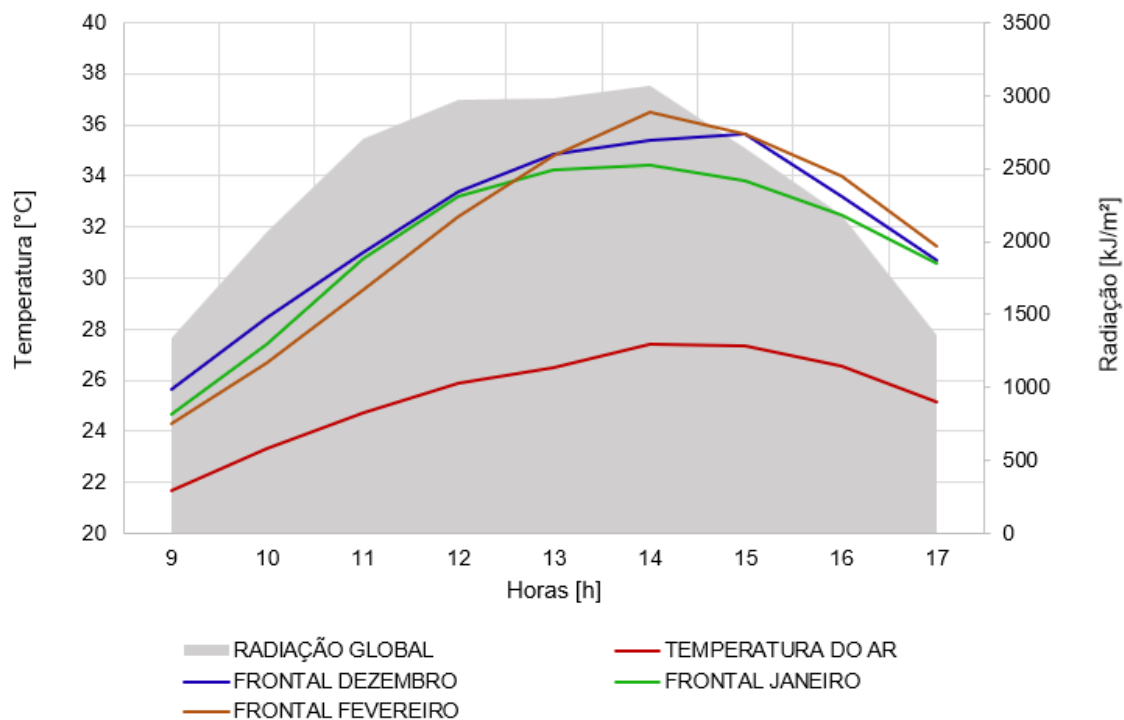
A Figura 38 realiza uma análise comparativa entre os valores médios mensais de radiação global e temperatura do ar, utilizando dados do INMET para os meses de dezembro de 2023, janeiro e fevereiro de 2024, e os registros de temperatura frontal do módulo fotovoltaico obtidos no protótipo.

Os resultados indicam que as temperaturas na parte frontal do módulo são consistentemente superiores. Ambos os conjuntos de dados exibem um padrão crescente ao longo do dia, atingindo o pico máximo às 14h. Além disso, observa-se que a temperatura na parte frontal é, em média, 5°C mais alta do que a temperatura do ar ambiente. Essas observações destacam a influência significativa da radiação solar direta na elevação das temperaturas no módulo fotovoltaico devido aos materiais que compõe.

A Figura 39 apresenta uma comparação entre as temperaturas frontal e traseira do módulo fotovoltaico. Entre quarta-feira, 20 de dezembro de 2023, e segunda-feira, 26 de fevereiro de 2024, a temperatura frontal do módulo diminuiu 6,18%, enquanto a temperatura traseira apresentou uma redução de 3,94%. Em termos de tendência, a temperatura frontal mostrou uma variação mais interessante, começando a cair significativamente a partir de segunda-feira, 19 de fevereiro de 2024, com uma redução de 4,30% ($\pm 1,28^\circ\text{C}$) em seis dias. A temperatura traseira do módulo registrou a queda mais acentuada, de 31,74°C

para 28,90°C, entre quinta-feira, 28 de dezembro de 2023, e quarta-feira, 3 de janeiro de 2024. Esses resultados confirmam a expectativa de que a temperatura frontal seria maior do que a traseira.

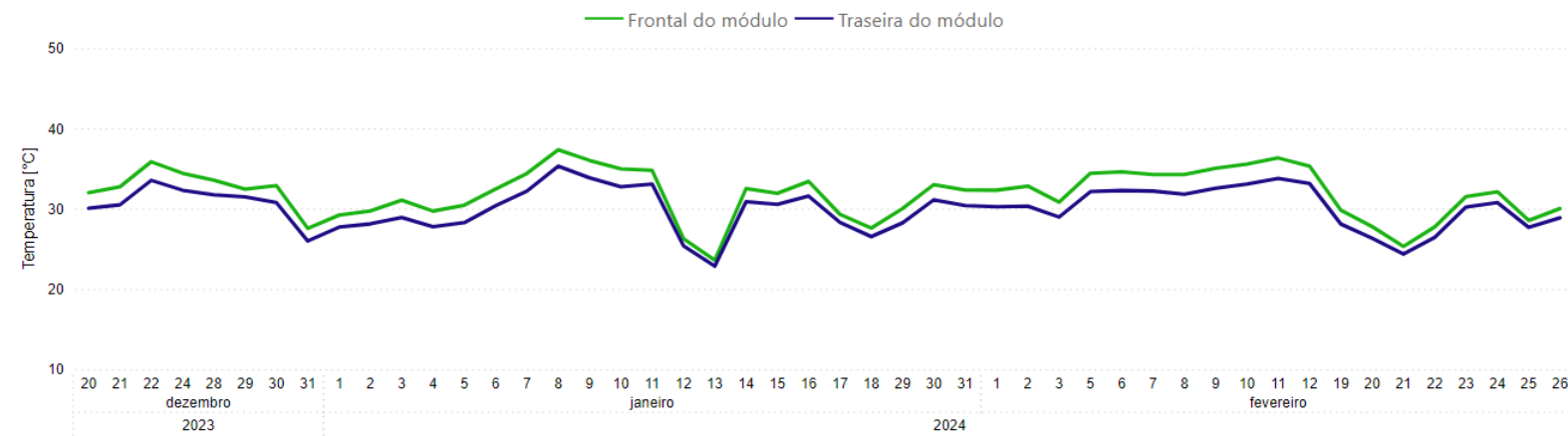
Figura 38. Radiação global e temperatura do ar do INMET comparado com a temperatura frontal do módulo fotovoltaico.



Fonte: Autora (2024).

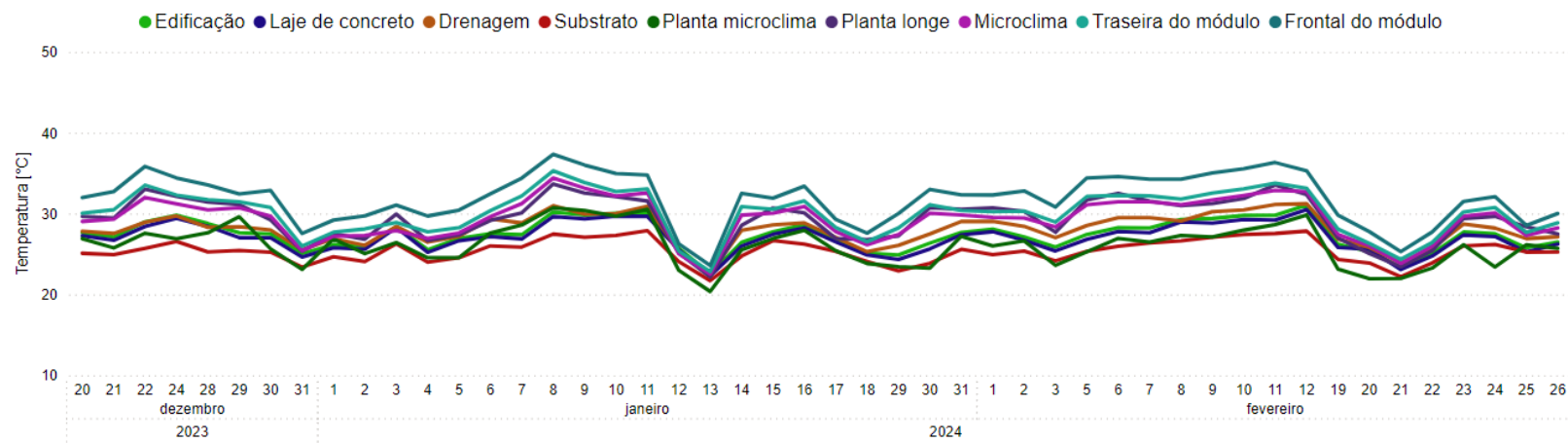
A Figura 40 apresenta uma análise abrangente das médias de temperatura coletadas no protótipo. Observa-se que a temperatura mais elevada é registrada na parte frontal do módulo fotovoltaico. Em contraste, as temperaturas mais baixas são encontradas no substrato e na planta localizada no microclima. Esta variação pode ser atribuída à exposição diferencial à radiação solar, onde a parte frontal do módulo fotovoltaico recebe incidência direta, enquanto o substrato e a planta no microclima beneficiam-se de sombreamento e ventilação, resultando em temperaturas mais amenas. A análise desses dados permite uma compreensão detalhada das dinâmicas térmicas presentes no protótipo, evidenciando a importância do posicionamento e das condições ambientais na modulação das temperaturas registradas.

Figura 39. Comparação das temperaturas traseira e frontal do módulo fotovoltaico.



Fonte: Autora (2024).

Figura 40. Relação total da coleta de dados do protótipo.

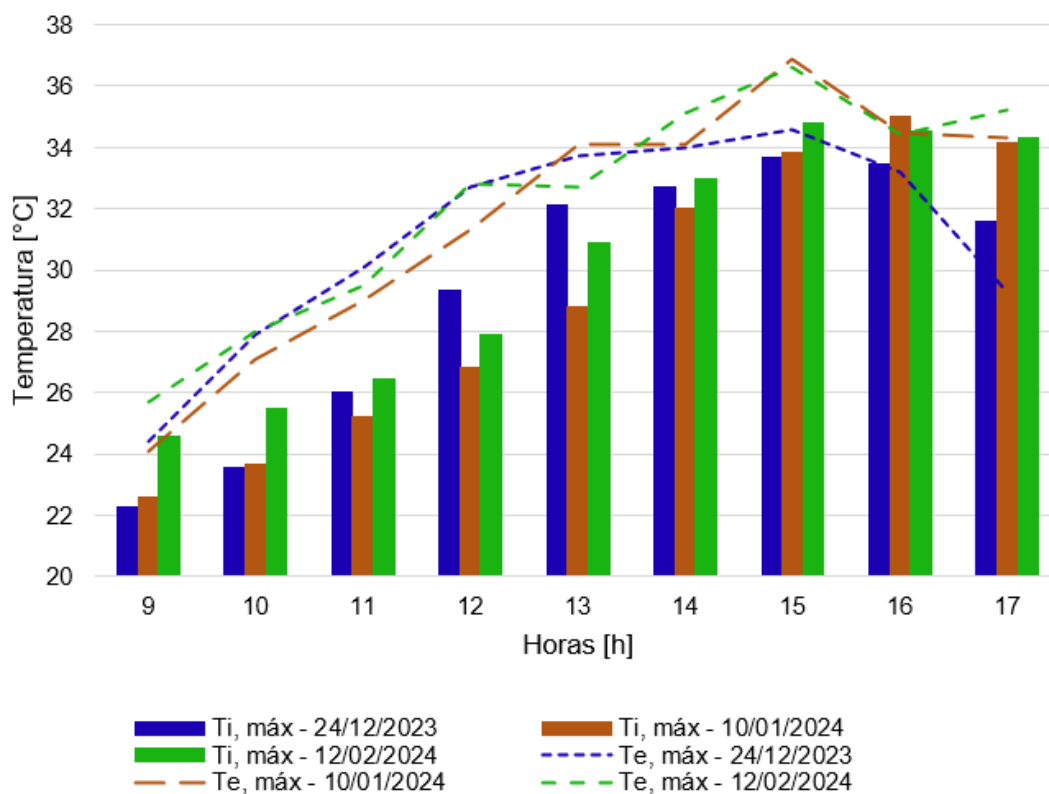


Fonte: Autora (2024).

5.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

A aplicação da avaliação de desempenho térmico conforme a NBR 15.575 envolve a análise das temperaturas da edificação e do ar externo para os dias mais quentes de cada mês do verão (temperatura máxima e maior radiação solar). Para esta avaliação foram utilizados os dados coletados no protótipo, sendo da edificação como temperatura interna e do microclima como temperatura externa. O microclima foi considerado para esta análise pela localização do sensor de temperatura, que estava junto ao protótipo e fora da edificação. A Figura 41 mostra a evolução da temperatura interna e externa da edificação para o dia mais quente de janeiro e fevereiro.

Figura 41. Evolução temporal das temperaturas máximas interna e externa da edificação.



Fonte: Autora (2024).

A Tabela 5 apresenta uma comparação detalhada entre os critérios exigidos pela norma e os resultados obtidos.

Tabela 5. Comparação dos critérios de avaliação de desempenho térmico e dos resultados.

Nível de Desempenho	Norma	Data	Temperatura [°C]	
			Edificação ($T_{i, \text{máx}}$)	Ar externo ($T_{e, \text{máx}}$)
M	$T_{i, \text{máx}} \leq T_{e, \text{máx}}$	24/12/2023	29,41	31,10
I	$T_{i, \text{máx}} \leq (T_{e, \text{máx}} - 2^{\circ}\text{C})$	10/01/2024	29,12	31,71
S	$T_{i, \text{máx}} \leq (T_{e, \text{máx}} - 4^{\circ}\text{C})$	12/02/2024	30,22	32,22

Fonte: Autora (2024).

Analisando a tabela, verifica-se que em 21/12/2024 é atingido o nível mínimo (M), sendo $29,41^{\circ}\text{C} \leq 31,10^{\circ}\text{C}$. Já em janeiro e fevereiro o nível intermediário (I) é atingido, sendo as temperaturas em 10/01/2024 correspondentes a $29,12^{\circ}\text{C} \leq 29,71^{\circ}\text{C}$, e em 12/02/2024 sendo $30,22^{\circ}\text{C} \leq 30,22^{\circ}\text{C}$. Esses resultados são um ponto positivo, pois demonstram que a edificação consegue atender aos requisitos mínimo e intermediário de conforto térmico, proporcionando um ambiente interno adequado durante os meses mais quentes. A conformidade com esses níveis de desempenho térmico evidencia a eficácia das estratégias de projeto e construção adotadas, garantindo um melhor desempenho térmico da edificação.

Esses resultados mostram que, apesar da edificação não possuir aberturas, como janelas, e ser construída com um material denso como o isopor, o sistema GRIPV mostra ser eficiente nas condições ambientais encontradas. A ausência de aberturas e as propriedades isolantes do isopor são compensadas pela capacidade do telhado verde de reduzir a temperatura interna. Apesar a norma não estar atualizada, esta foi única forma de avaliar o comportamento térmico, visto que a versão atualizada da mesma norma (NBR 15.575:2021) não apresenta o procedimento por meio de medições para avaliar o desempenho térmico da edificação.

5.3 RESULTADOS NUMÉRICOS E COMPARAÇÕES COM DADOS EXPERIMENTAIS

Inicialmente, procedeu-se com o ajuste do modelo. Baseando-se nos resultados experimentais, observou-se que era necessário ajustar os valores

estimados para as seguintes variáveis externas: temperatura ambiente (T_{ext}), umidade relativa do ar ambiente ($\varphi_{ar,amb}$) ou teor de umidade ($\omega_{ar,amb}$) e radiação solar (G_s), os quais eram considerados inicialmente constantes. Desta forma, para cada período simulado, foi necessário descrever um polinômio da variável externa em função do tempo, considerando os dados do INMET da estação meteorológica de Rio Negrinho (26°15'38.3"S 49°30'39.7"W).

Os períodos escolhidos para fazer as análises foram considerados as médias das temperaturas horárias de cada mês, entre às 9h e 17h. Assim, para os meses de janeiro e fevereiro de 2024, as funções para cada variável externa são apresentadas conforme equações do quadro abaixo.

Quadro 3. Equações polinomiais para descrever as variações temporais da temperatura externa, umidade relativa e radiação solar.

	Janeiro/2024	Fevereiro/2024
T_{ext} [K]	$-0,00235t^4 + 0,0306t^3 - 0,284t^2 + 1,789t + 296,08$	$0,00243t^4 - 0,0573t^3 + 0,218t^2 + 0,807t + 295,14$
$\varphi_{ar,amb}$ [%]	$0,0215t^4 - 0,299 \times 10^{-3}t^3 + 1,956t^2 - 8,806t + 80,13$	$-0,0028t^4 + 0,127 \times 10^{-3}t^3 - 0,284t^2 - 4,84t + 89,11$
G_s [W/m ²]	$-0,131t^4 + 2,71t^3 - 44,33t^2 + 246,17t + 301,76$	$0,389t^4 - 6,73t^3 + 10,50t^2 + 133,91t + 325,42$

Fonte: Autora (2024).

Na sequência é apresentada uma análise comparativa detalhada entre os resultados experimentais e numéricos. Este confronto tem como objetivo avaliar a precisão e a validade do modelo matemático utilizado, bem como identificar possíveis discrepâncias e suas causas. A comparação é fundamentada em dados coletados a partir do experimento controlado e das simulações numéricas, permitindo uma avaliação crítica dos métodos adotados.

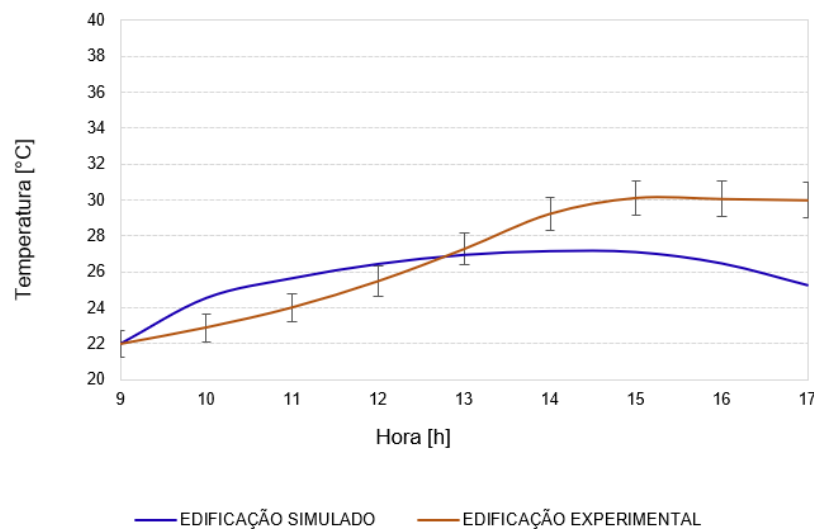
Para esta análise foi necessário inserir nos gráficos as barras de erro do experimento. Então foi realizado os cálculos de incerteza do tipo A, incerteza do tipo B e incerteza combinada. Os dados simulados têm como origem os dados da coleta do protótipo, bem como base de dados do INMET e foram estudados os meses de janeiro e fevereiro de 2024. Os gráficos comparam as temperaturas registradas na edificação experimental (curva laranja) com as temperaturas simuladas para a mesma edificação (curva azul), ao longo do dia, das 9h às 17h,

para os meses de janeiro e fevereiro. A temperatura é expressa em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) e o tempo em horas (h). Há também barras de erro associadas às medições experimentais, indicando a variabilidade das leituras.

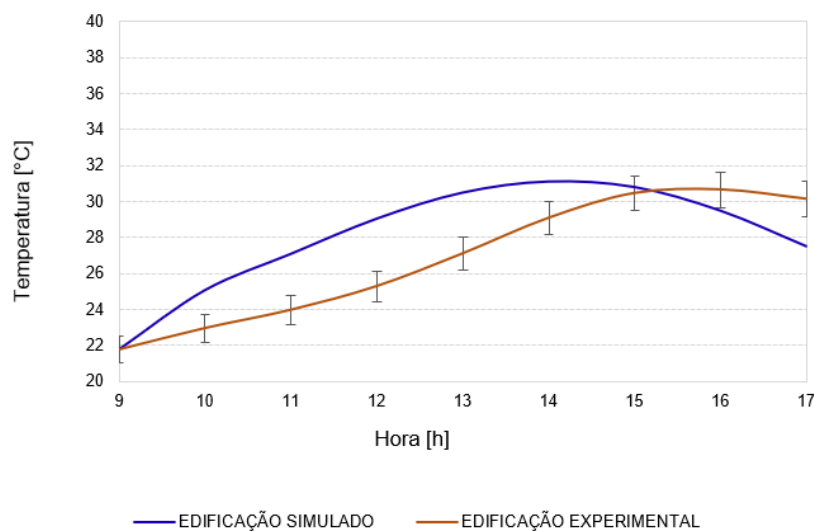
1) Edificação

A Figura 42 apresenta as comparações entre as temperaturas dentro da edificação, simuladas e experimentais. Sendo (a) para o mês de janeiro e (b) para o mês de fevereiro.

Figura 42. Temperaturas dentro da edificação (a) janeiro e (b) fevereiro.



(a)



(b)

Fonte: Autora (2024).

Uma análise geral da Figura 42 (a) indica que a temperatura experimental começa em torno de 22°C às 9h e aumenta gradualmente até um pico próximo de 31°C às 14h, estabilizando-se em torno de 30°C até às 17h, e temperatura simulada começa similarmente a 22°C, mas atinge um pico de cerca de 27°C às 14h, e depois diminui gradualmente. A maior diferença entre as temperaturas simuladas e experimentais ocorre entre 13h e 15h, com a temperatura experimental sendo consistentemente mais alta. As barras de erro indicam que as medições experimentais têm variabilidade, especialmente entre 11h e 14h, onde a variação é mais pronunciada.

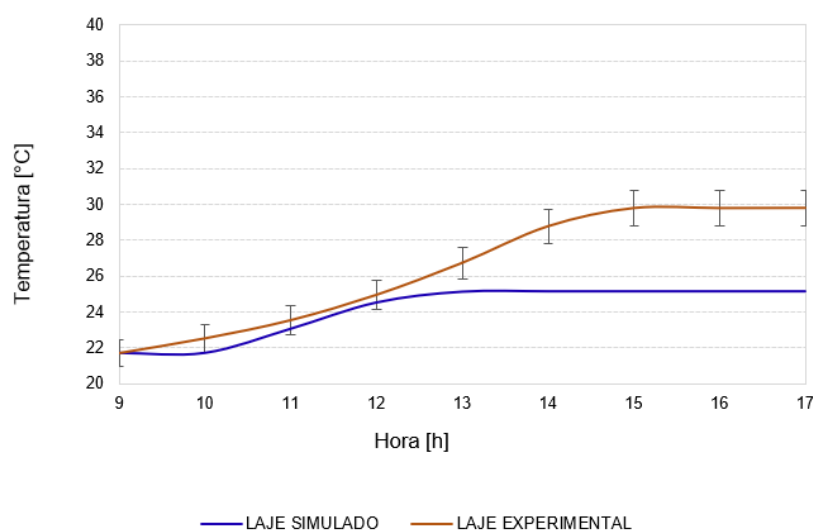
No mês de fevereiro a Figura 42 (b) apresenta que a temperatura experimental começa em torno de 22°C às 9h e aumenta progressivamente até um pico de aproximadamente 30°C às 15h, mantendo-se estável até às 17h. A temperatura simulada segue uma trajetória similar até às 12h, mas continua aumentando até alcançar cerca de 32°C às 15h, e depois diminui levemente até às 17h. Neste gráfico, a curva simulada atinge temperaturas mais altas do que a experimental entre 13h e 16h, invertendo o padrão observado em janeiro. As barras de erro são menores e mais consistentes ao longo do dia, sugerindo menor variabilidade nas medições experimentais em fevereiro comparado a janeiro. Em janeiro, as temperaturas experimentais são consistentemente mais altas que as simuladas no período da tarde, enquanto em fevereiro, as temperaturas simuladas superam as experimentais na mesma faixa horária.

2) Laje de concreto

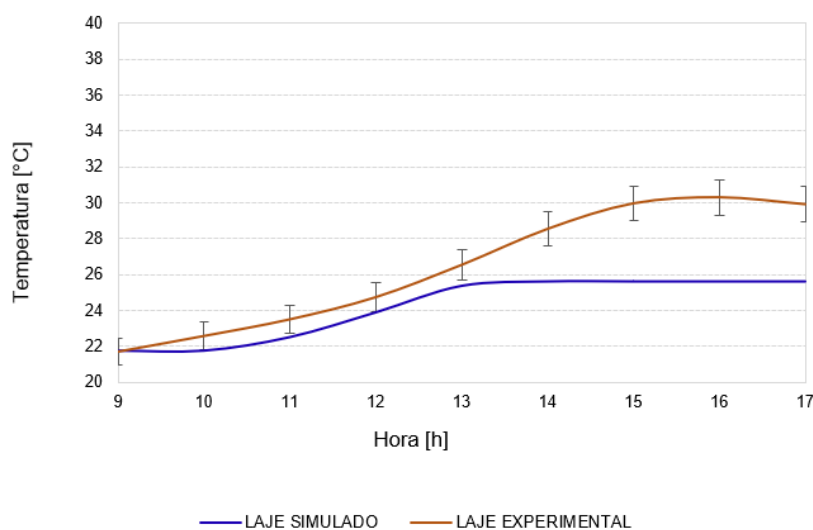
Os gráficos apresentados na Figura 43 comparam as temperaturas medidas experimentalmente e as temperaturas simuladas da laje de concreto ao longo dos meses de janeiro e fevereiro, com a Figura 43 (a) representando os dados de janeiro e a Figura 43 (b) os dados de fevereiro.

A Figura 43 (a) indica que a temperatura experimental começa em torno de 22°C às 9h e aumenta gradualmente até um pico próximo de 30°C às 15h, estabilizando-se até às 17h. Em contraste, a temperatura simulada começa similarmente a 22°C, mas atinge um pico de cerca de 25°C às 13h, e permanece estável. A maior diferença entre as temperaturas simuladas e experimentais ocorre entre 14h e 17h, com a temperatura experimental sendo consistentemente mais alta.

Figura 43. Temperaturas da laje de concreto (a) janeiro e (b) fevereiro.



(a)



(b)

Fonte: Autora (2024).

No mês de fevereiro, a Figura 43 (b) apresenta que a temperatura experimental começa em torno de 22°C às 9h e aumenta progressivamente até um pico de aproximadamente 30°C às 15h, diminuindo minimamente até às 17h. A temperatura simulada segue uma trajetória similar até às 13h, permanecendo constante em aproximadamente 26°C.

Observa-se que, em ambos os meses, as temperaturas experimentais começam em torno de 22°C às 9h e aumentam gradualmente até atingir um pico de aproximadamente 32°C por volta das 14h a 15h, seguido por uma estabilização até as 17h. Em contraste, as temperaturas simuladas também começam em 22°C, mas aumentam de maneira mais lenta e atingem um máximo

de cerca de 28°C, apresentando uma diferença de aproximadamente 4°C em relação às medições experimentais. A análise comparativa entre janeiro e fevereiro revela que, apesar das possíveis variações nas condições climáticas, o padrão de aquecimento da laje permanece consistente.

Comparando as Figuras 42 e 43 observa-se que ambas apresentam que as temperaturas experimentais e simuladas começam em torno de 22°C às 9h e descrevem um aumento gradual até atingir um pico entre 14h e 15h, seguido por uma estabilização ou leve queda até às 17h. Também concordam que as temperaturas simuladas são consistentemente mais baixas que as experimentais, concluindo que o padrão de aquecimento é consistente entre os meses, apesar das variações climáticas.

3) Drenagem

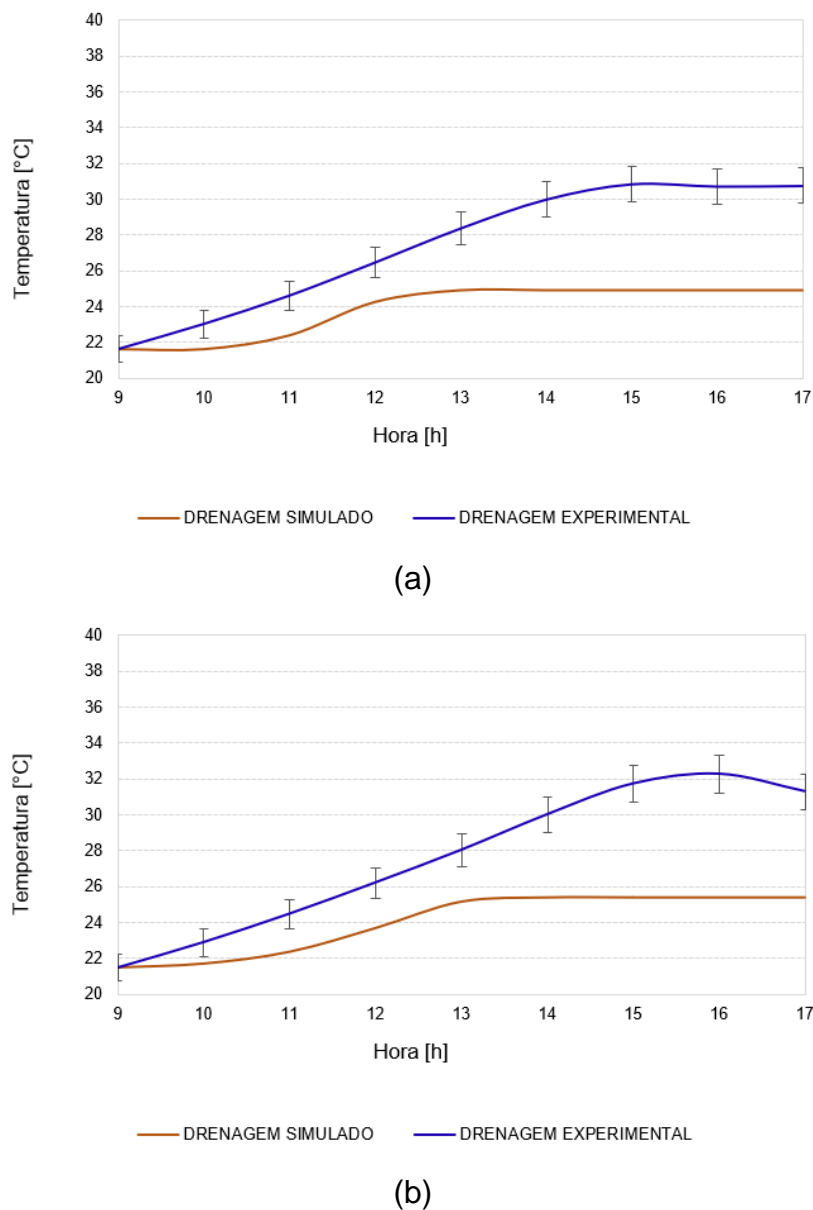
A Figura 44 (a) e (b) apresenta a análise das temperaturas da drenagem em janeiro e fevereiro, respectivamente, mostrando que as medições experimentais e simuladas começam em torno de 22°C às 9h.

Na Figura 44 (a) a temperatura experimental aumenta gradualmente, atingindo um pico de cerca de 32°C por volta das 15h, e estabiliza-se levemente até às 17h. Em contraste, a temperatura simulada apresenta um aumento mais gradual, alcançando um máximo de aproximadamente 26°C, mantendo-se relativamente constante após esse ponto. A maior discrepância entre as temperaturas simuladas e experimentais ocorre entre 13h e 17h, com a temperatura experimental sendo consistentemente mais alta, atingindo uma diferença máxima de cerca de 6°C. As barras de erro indicam uma variabilidade considerável nas medições experimentais, especialmente entre 12h e 15h.

Na Figura 44 (b), referente ao mês de fevereiro, a temperatura experimental segue um padrão semelhante ao de janeiro, aumentando gradualmente até cerca de 32°C por volta das 15h, e depois diminuindo levemente até às 17h. A temperatura simulada, por sua vez, também apresenta um aumento gradual, atingindo um pico máximo de aproximadamente 26°C, e permanece estável após esse ponto. Assim como em janeiro, a maior diferença entre as temperaturas simuladas e experimentais ocorre entre 13h e 17h, com a temperatura experimental sendo mais alta e a diferença máxima atingindo cerca de 6°C. No entanto, as barras de erro em fevereiro são menores e mais

consistentes ao longo do dia, sugerindo menor variabilidade nas medições experimentais em comparação a janeiro.

Figura 44. Temperaturas da drenagem (a) janeiro e (b) fevereiro.



Fonte: Autora (2024).

A comparação entre janeiro e fevereiro revela que os padrões de aquecimento são semelhantes nos dois meses, com as temperaturas experimentais aumentando gradualmente até um pico de cerca de 32°C, seguidas por uma leve estabilização ou queda. As temperaturas simuladas em ambos os meses também seguem um padrão similar, com um aumento gradual até cerca de 26°C, mantendo-se estáveis após o pico. As barras de erro em janeiro indicam maior variabilidade nas medições experimentais, especialmente

entre 12h e 15h, enquanto em fevereiro as barras de erro são mais consistentes, indicando menor variabilidade nas medições experimentais. A maior variabilidade nas medições experimentais em janeiro pode ser atribuída a fatores externos, enquanto em fevereiro a menor variabilidade sugere condições mais estáveis.

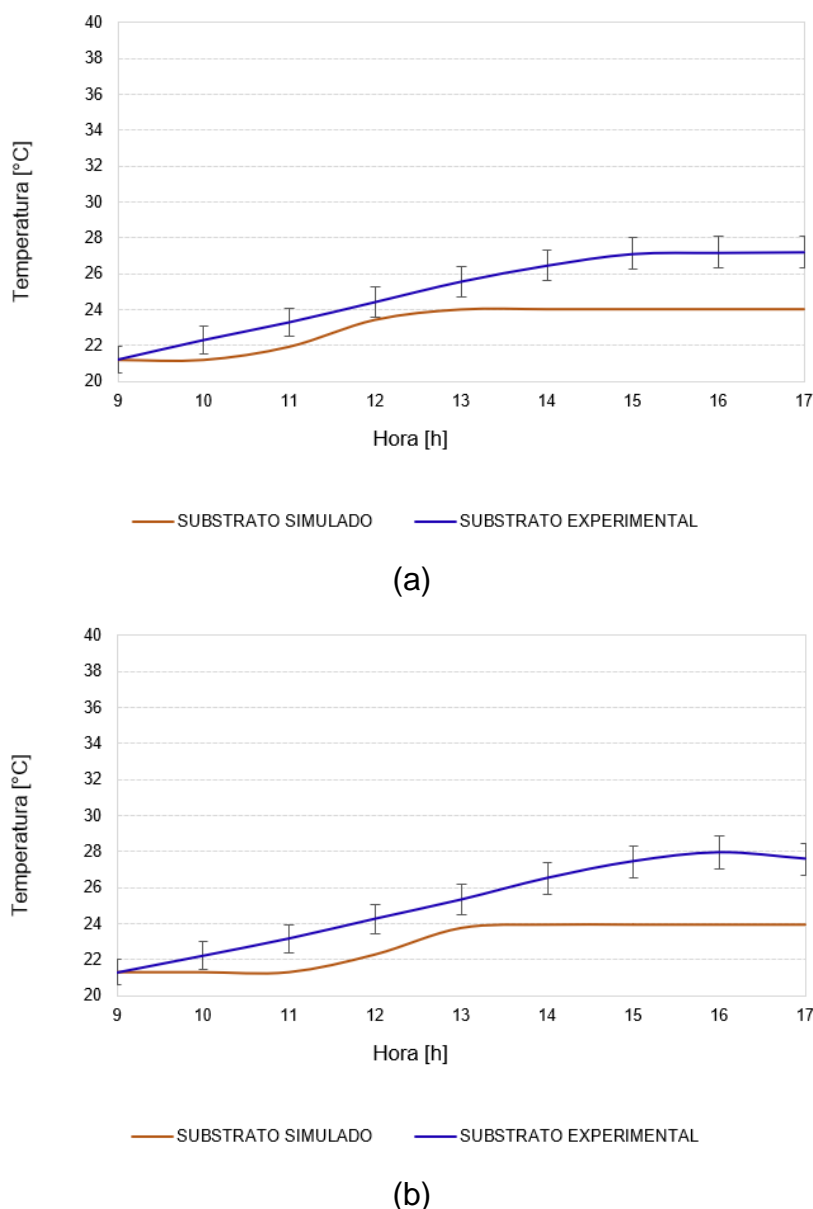
4) Substrato

A Figura 45 apresenta as comparações entre as temperaturas do substrato, simuladas e experimentais. Sendo Figura 45 (a) para o mês de janeiro e Figura 45 (b) para o mês de fevereiro.

A Figura 45 (a) apresenta que a temperatura experimental aumenta gradualmente, atingindo um pico próximo de 28°C por volta das 15h, e estabiliza-se até às 17h. Em contraste, a temperatura simulada mostra um aumento mais gradual, alcançando um pico máximo de cerca de 24°C às 13h e permanecendo relativamente constante após esse ponto. A maior discrepância entre as temperaturas simuladas e experimentais ocorre entre 12h e 15h, com a temperatura experimental sendo consistentemente mais alta, atingindo uma diferença máxima de cerca de 3°C. As barras de erro indicam uma variabilidade considerável nas medições experimentais, especialmente entre 11h e 15h.

Na Figura 45 (b), referente ao mês de fevereiro, observa-se que a temperatura experimental segue um padrão semelhante ao de janeiro, aumentando gradualmente até cerca de 28°C por volta das 15h, e estabilizando-se até às 17h. A temperatura simulada, por sua vez, também apresenta um aumento gradual, atingindo um pico máximo de aproximadamente 24°C, e mantém-se estável após esse ponto. Assim como em janeiro, a maior diferença entre as temperaturas simuladas e experimentais ocorre entre 14h e 17h, com a temperatura experimental sendo mais alta e a diferença máxima atingindo cerca de 3°C. No entanto, as barras de erro em fevereiro são menores e mais consistentes ao longo do dia, sugerindo uma menor variabilidade nas medições experimentais em comparação a janeiro.

Figura 45. Temperaturas da substrato (a) janeiro e (b) fevereiro.



Fonte: Autora (2024).

Comparando os meses de janeiro e fevereiro, verifica-se que os padrões de aquecimento são semelhantes, com as temperaturas experimentais aumentando gradualmente até um pico de cerca de 28°C, seguido por uma estabilização. As temperaturas simuladas em ambos os meses também seguem um padrão similar, com um aumento gradual até cerca de 24°C, mantendo-se estáveis após o pico. As barras de erro em janeiro indicam maior variabilidade nas medições experimentais, especialmente entre 14h e 17h, enquanto em fevereiro as barras de erro são mais consistentes, indicando uma menor variabilidade nas medições experimentais.

5) Plantas

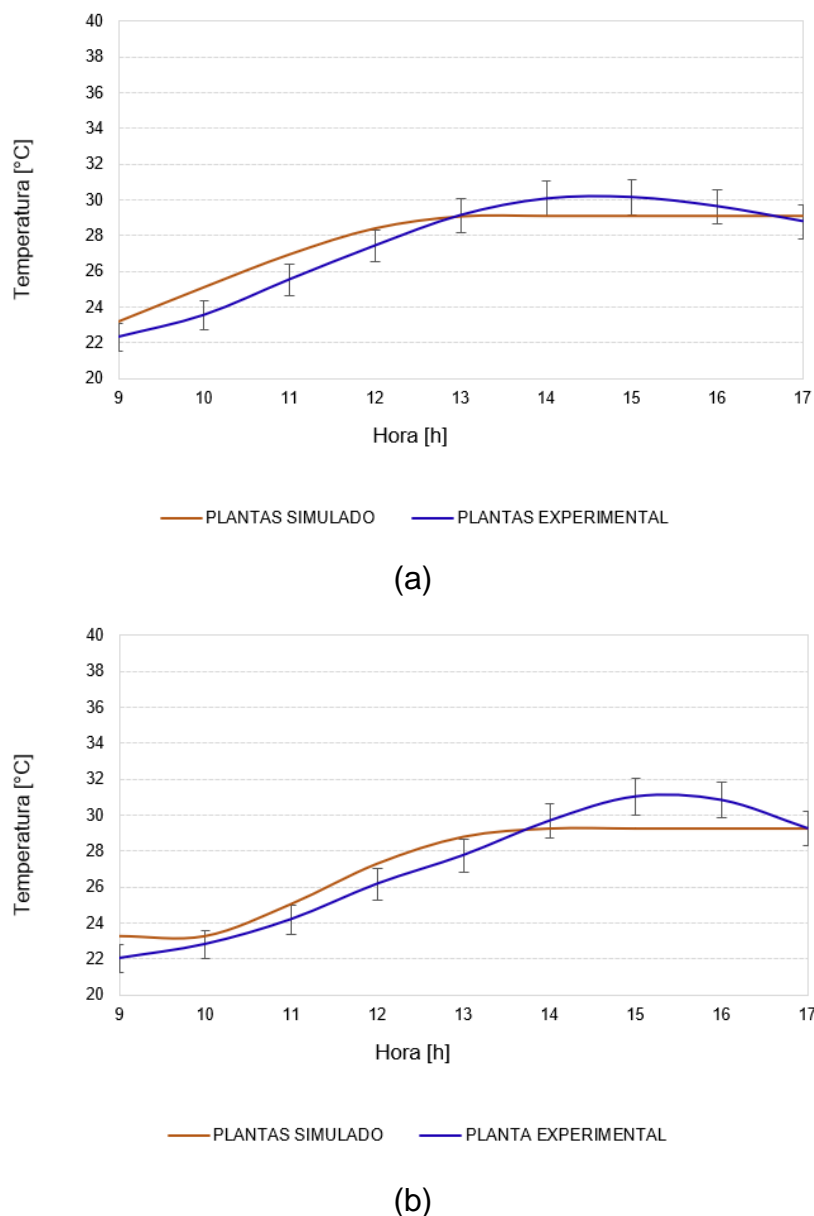
A Figura 46 apresenta as variações de temperatura das plantas ao longo dos meses de janeiro e fevereiro, destacando tanto os dados simulados quanto os experimentais.

No gráfico da Figura 46 (a), referente a janeiro, observa-se que a temperatura das plantas, tanto nos dados simulados quanto nos experimentais, inicia-se em torno de 22°C às 9h. A temperatura aumenta gradualmente, atingindo seu pico por volta das 14h na curva experimental, com valores próximos a 30°C, e diminui levemente até as 17h. Enquanto a curva simulada atinge seu pico às 13h e se mantém estável entre 28°C e 30°C.

Na Figura 46 (b), correspondente ao mês de fevereiro, a tendência de variação da temperatura é semelhante. A temperatura inicia-se levemente abaixo de 22°C às 9h, aumenta progressivamente até atingir um pico ligeiramente superior a 30°C por volta das 15h, e diminui novamente até as 17h.

Ao comparar os dois gráficos, verifica-se que as curvas simuladas e experimentais seguem um padrão diurno similar em ambos os meses, começando com temperaturas mais baixas pela manhã, atingindo um pico no meio da tarde, e diminuindo até o final da tarde. Essa consistência sugere uma boa correlação entre os dados simulados e os experimentais. Contudo, há algumas diferenças observáveis. Em janeiro, as temperaturas iniciais das plantas estão exatamente em 22°C, enquanto em fevereiro, as temperaturas começam levemente abaixo desse valor. Além disso, embora os picos de temperatura das curvas experimentais sejam ligeiramente superiores aos das curvas simuladas em ambos os meses, essa diferença é mais pronunciada em janeiro. As pequenas diferenças nas temperaturas iniciais e nos picos entre os meses podem ser atribuídas a variações sazonais e condições ambientais específicas.

Figura 46. Temperaturas das plantas (a) janeiro e (b) fevereiro.



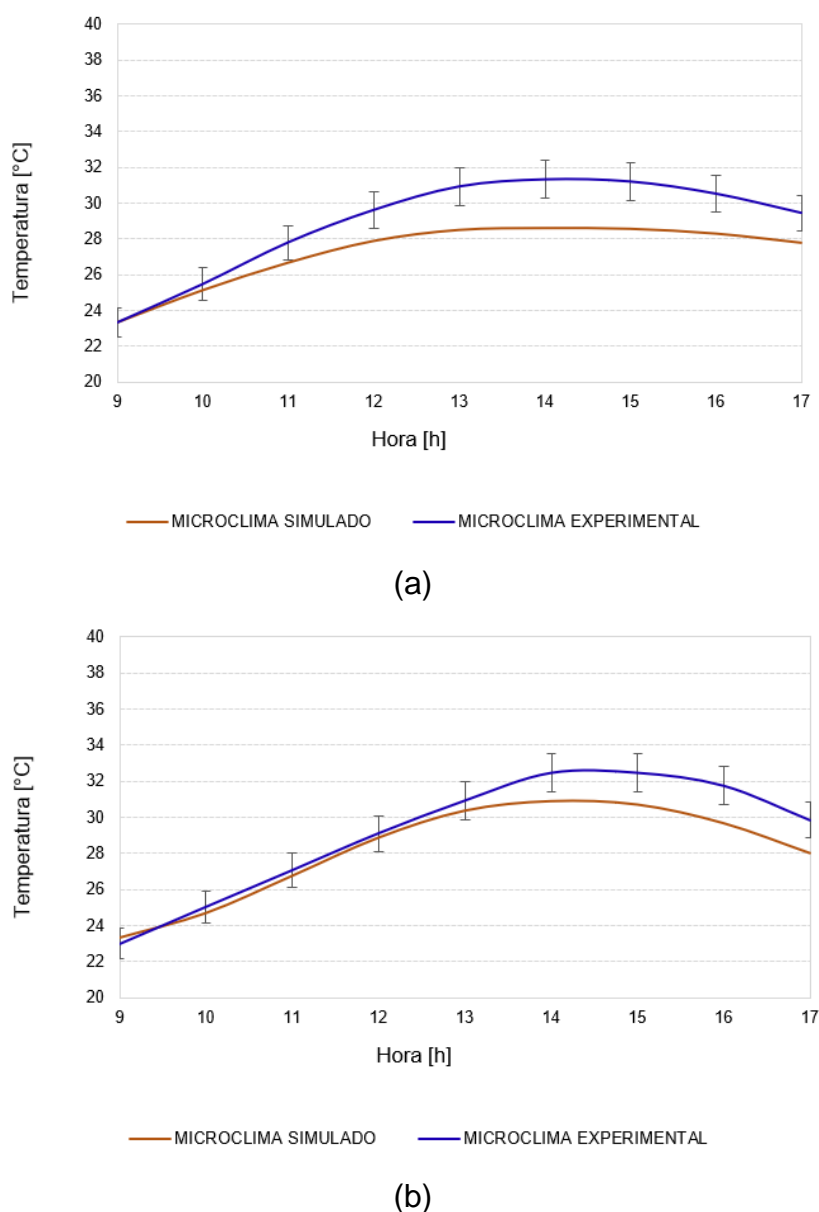
Fonte: Autora (2024).

6) Microclima

Os gráficos apresentados na Figura 47 comparam as temperaturas medidas experimentalmente e as temperaturas simuladas da região do microclima ao longo dos meses de janeiro e fevereiro, com a Figura 47 (a) representando os dados de janeiro e a Figura 47 (b) os dados de fevereiro.

Na Figura 47 (a) entre 9h e 11h, ambas as curvas começam próximas a 23°C, contudo, a temperatura simulada aumenta gradualmente até aproximadamente 26°C às 11h, enquanto a temperatura experimental apresenta um incremento mais rápido, atingindo cerca de 28°C.

Figura 47. Temperaturas do microclima (a) janeiro e (b) fevereiro.



Fonte: Autora (2024).

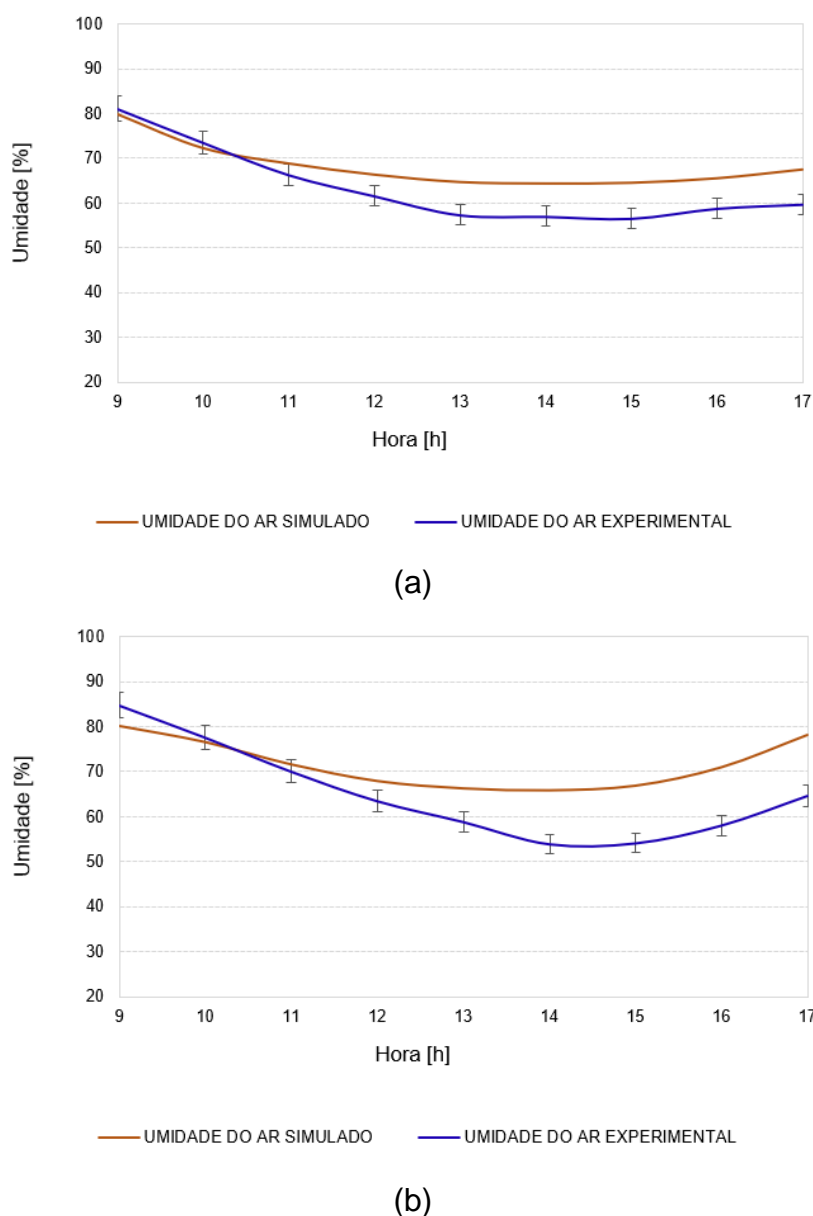
Também na Figura 47 (a), no intervalo de 11h às 14h, observa-se que a temperatura simulada continua a aumentar, embora de forma mais lenta, alcançando cerca de 29°C às 14h. Em contrapartida, a temperatura experimental atinge seu pico por volta das 14h, com aproximadamente 32°C. Após esse horário, ambas as curvas apresentam uma queda, com a temperatura simulada diminuindo gradualmente para cerca de 28°C às 17h, e a temperatura experimental decrescendo mais lentamente, encerrando o dia em torno de 30°C. As barras de erro indicam uma maior variabilidade nas medições experimentais, especialmente entre 11h e 14h.

Na Figura 47 (b) entre 9h e 11h, ambas as curvas iniciam próximas a 23°C. A temperatura simulada aumenta gradualmente até cerca de 27°C às 11h, enquanto a temperatura experimental apresenta um aumento mais rápido, atingindo cerca de 28°C. No período das 11h às 14h, a temperatura simulada continua a aumentar, alcançando aproximadamente 30°C às 14h, enquanto a temperatura experimental atinge um pico de cerca de 32°C no mesmo horário. Após as 14h, ambas as curvas mostram um declínio, com a temperatura simulada diminuindo gradualmente para cerca de 28°C às 17h, e a temperatura experimental permanecendo mais elevada, encerrando o dia em torno de 29°C. As barras de erro indicam uma variabilidade maior nas medições experimentais, especialmente entre 11h e 14h.

A comparação entre as Figuras 47 (a) e 47 (b) revela padrões gerais semelhantes nos meses de janeiro e fevereiro. Em ambos os gráficos, as temperaturas experimentais são consistentemente mais altas e apresentam maior variabilidade em comparação com as temperaturas simuladas. As curvas seguem um comportamento similar, com aumento de temperatura durante a manhã, atingindo um pico por volta das 14h, seguido por uma queda gradual. No entanto, há algumas diferenças específicas: a temperatura experimental em janeiro é ligeiramente mais alta do que em fevereiro durante a maior parte do dia, e a temperatura simulada em fevereiro mostra um aumento mais rápido durante a manhã em comparação com janeiro. A variabilidade nas medições experimentais é maior em janeiro, conforme indicado pelas barras de erro. Esses resultados sugerem que, embora o comportamento geral das temperaturas simuladas e experimentais seja consistente entre os dois meses, variações nas condições climáticas ou em fatores não capturados pelo modelo simulado podem explicar as pequenas diferenças observadas.

No microclima também houve coleta dos dados da umidade relativa do ar. A Figura 48 (a) ilustra a variação da umidade relativa do ar ao longo do dia no mês de janeiro. A Figura 48 (b) apresenta a variação da umidade relativa do ar ao longo do dia no mês de fevereiro.

Figura 48. Umidade relativa do ar no microclima (a) janeiro e (b) fevereiro.



Fonte: Autora (2024).

Na Figura 48 (a) no início do período (9h), as umidades simulada e experimental começam próximas, em torno de 80% a 85%. Ambas as linhas mostram uma tendência de queda na umidade até cerca de 12h, com a umidade simulada sempre ligeiramente acima da experimental. O ponto mais baixo de umidade ocorre por volta das 13h, com a umidade experimental caindo um pouco abaixo de 60% e a simulada ligeiramente acima de 60%. Após as 13h, a umidade começa a subir novamente até as 17h, com a umidade experimental atingindo cerca de 65%, enquanto a simulada continua subindo de forma mais pronunciada, chegando perto de 75%.

Já na Figura 48 (b) no início do período (9h), as umidades simulada e experimental também começam próximas, em torno de 80% a 85%, semelhante ao observado em janeiro. Ambas as linhas mostram uma tendência de queda na umidade até cerca de 12h. No entanto, a diferença entre a umidade simulada e experimental é um pouco mais pronunciada do que em janeiro, com a umidade simulada sempre um pouco acima da experimental. O ponto mais baixo de umidade ocorre por volta das 13h, com a umidade experimental caindo um pouco abaixo de 60%, enquanto a simulada permanece um pouco acima de 60%. Após as 13h, a umidade começa a subir novamente até as 17h. A recuperação da umidade é mais evidente em fevereiro, com a umidade experimental chegando a cerca de 70% e a simulada subindo para cerca de 80%.

Comparando as figuras 48 (a) e 48 (b), observa-se que ambas apresentam um padrão similar de variação da umidade ao longo do dia, com um declínio pela manhã, atingindo um mínimo ao redor de 13h e uma recuperação à tarde. A umidade simulada é consistentemente mais alta do que a experimental em ambas as figuras. No entanto, a amplitude de variação da umidade ao longo do dia é ligeiramente maior em janeiro em comparação a fevereiro. Além disso, a recuperação da umidade à tarde é mais acentuada em fevereiro, com a umidade experimental e simulada subindo de maneira mais pronunciada após 14h, enquanto em janeiro, a recuperação é mais gradual. Em termos de valores absolutos, a umidade relativa do ar é mais alta em fevereiro durante todo o dia em comparação a janeiro.

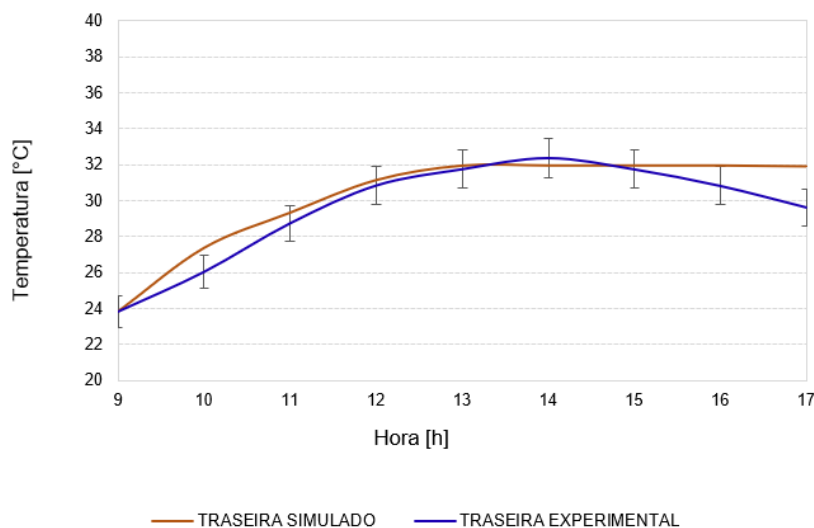
As curvas de temperatura e umidade simuladas demonstram uma boa concordância com os dados experimentais, evidenciando a precisão dos modelos utilizados. A semelhança entre as linhas simuladas e experimentais sugere que as simulações capturam precisamente a tendência das variáveis ao longo do tempo.

7) Módulo fotovoltaico

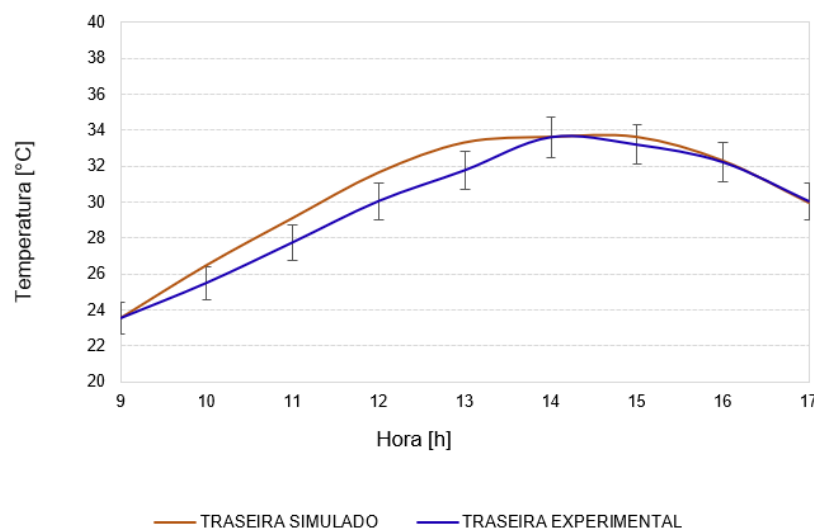
7.A) Parte traseira do módulo fotovoltaico

A Figura 49 (a) e (b) apresenta a análise das temperaturas da parte traseira do módulo fotovoltaico em janeiro e fevereiro, respectivamente.

Figura 49. Temperaturas da traseira do módulo fotovoltaico (a) janeiro e (b) fevereiro.



(a)



(b)

Fonte: Autora (2024).

Na Figura 49 (a) as temperaturas experimental e simulada aumentam gradualmente, atingindo um pico de cerca de 32°C por volta das 13h. No final do dia a temperatura experimental diminui levemente enquanto a temperatura simulada permanece constante próxima de 32°C. Diferente das outras camadas do telhado verde, a traseira do módulo fotovoltaico apresente curvas de temperatura semelhantes, isso mostra que o modelo numérico utilizado está adequado nesta camada.

Na Figura 49 (b), referente ao mês de fevereiro, a temperatura experimental aumenta gradualmente até o pico máximo próximo de 34°C às 14h,

e depois diminuindo até às 17h. A temperatura simulada apresente a mesma tendência da curva experimental, validando novamente o modelo numérico. As barras de erro nos dois meses são menores e consistentes ao longo do dia, sugerindo pouca variabilidade nas medições experimentais.

A comparação entre janeiro e fevereiro revela que os padrões de aquecimento são semelhantes nos dois meses, com as temperaturas experimentais aumentando gradualmente até um pico de cerca de 32°C e 34°C, seguidas por uma leve estabilização ou queda. As temperaturas simuladas em ambos os meses também seguem um padrão similar.

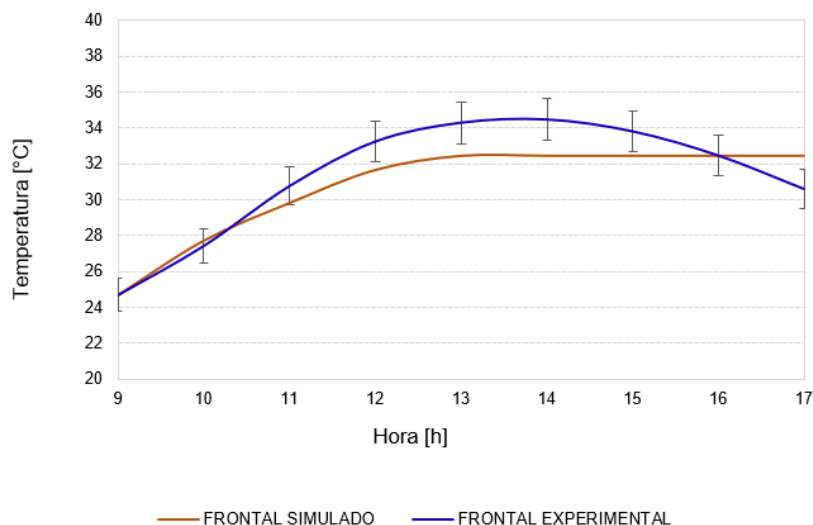
7.B) Parte frontal do módulo fotovoltaico

As Figuras 50 (a) e (b) ilustram a comparação entre os resultados experimentais e simulados das variações de temperatura frontal do módulo fotovoltaico ao longo dos meses de janeiro e fevereiro, 2024.

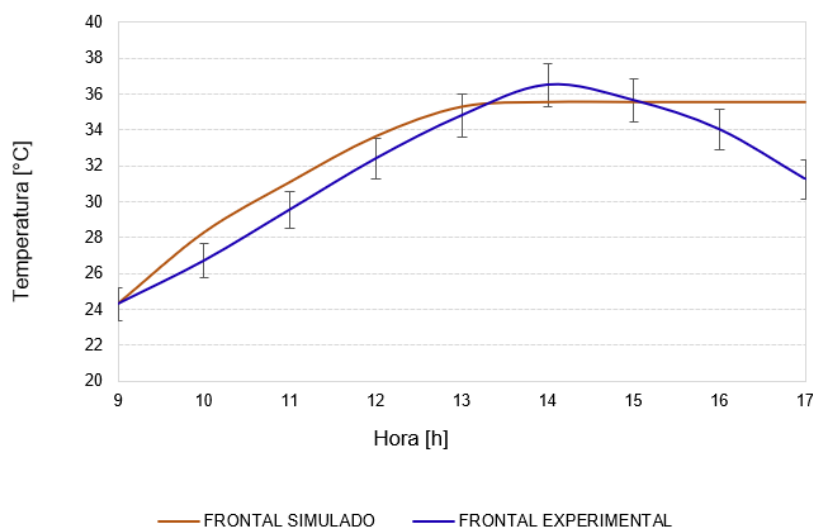
Como ilustrado na Figura 50 (a), as variações de temperatura ao longo do dia no mês de janeiro de 2024 apresentam uma tendência similar, onde a temperatura aumenta a partir das 9h até cerca das 14h, seguida por uma diminuição até as 17h mais aparente na curva experimental. No entanto, observa-se que os dados experimentais mostram um aumento mais acentuado na temperatura em comparação com a curva da simulação. A partir das 12h, a temperatura experimental é consistentemente mais alta que a temperatura simulada até aproximadamente 16h, onde as temperaturas começam a convergir novamente. A temperatura máxima no experimento ocorre por volta das 14h, atingindo cerca de 34°C. A temperatura máxima na simulação ocorre aproximadamente no mesmo horário, mas atinge um valor ligeiramente menor, cerca de 32°C.

Na Figura 50 (b) observa-se que ambas as curvas seguem uma tendência similar, com aumento de temperatura até cerca das 14h, seguido de um decréscimo mais evidente na curva experimental. Os dados experimentais indicam um pico de temperatura mais alto, atingindo aproximadamente 36°C, o mesmo ocorre com os dados numéricos.

Figura 50. Temperaturas parte frontal do módulo fotovoltaico (a) janeiro e (b) fevereiro.



(a)

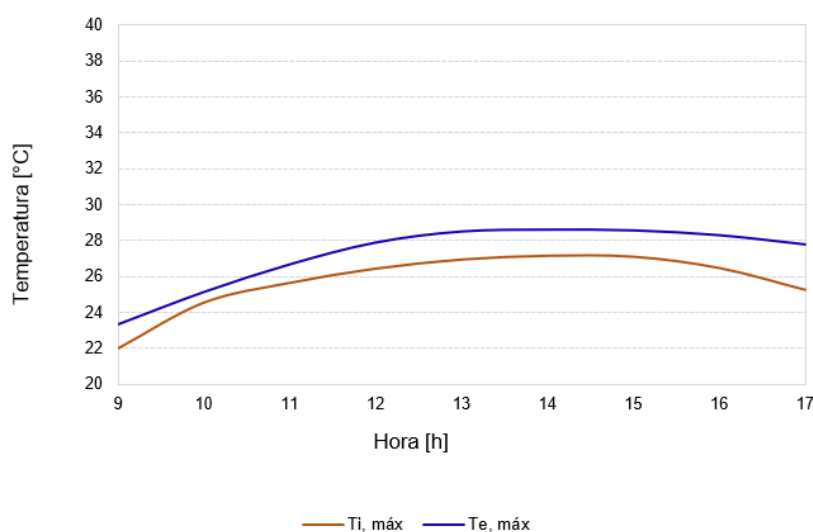


(b)

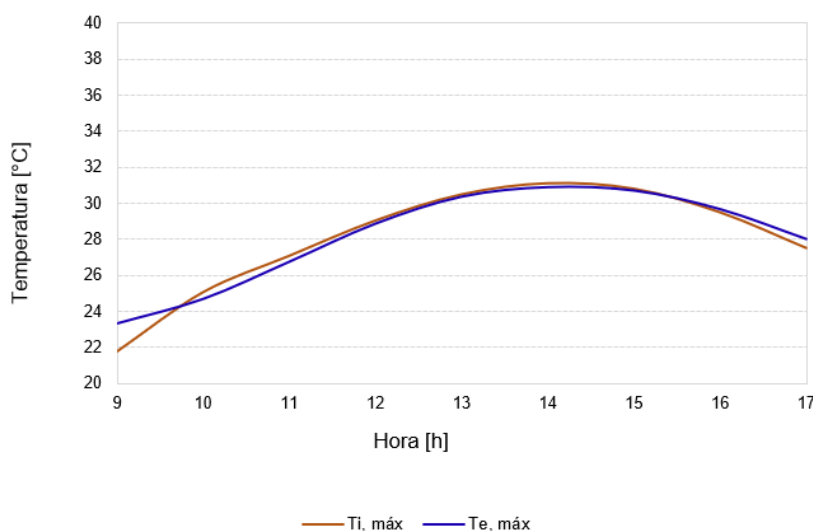
Fonte: Autora (2024).

As barras de erro são mais elevadas durante o período de maior temperatura (entre 12h e 15h), sugerindo uma maior variabilidade nos dados experimentais durante esse período. Notavelmente, as barras de erro são menores nas extremidades do dia, sugerindo medições mais consistentes pela manhã e no final da tarde. As discrepâncias entre os resultados podem ser atribuídas a várias fontes, além disso, fatores ambientais específicos de fevereiro de 2024, como condições climáticas atípicas, podem ter influenciado as medições experimentais.

Figura 51. Análise do desempenho térmico simulado (a) janeiro e (b) fevereiro.



(a)



(b)

Fonte: Autora (2024).

Para todos os gráficos apresentados neste tópico, são considerados os dados de entrada fornecidos pelo INMET. A estação do INMET mais próxima do protótipo está localizada a cerca de 4 km de distância, em uma área verde próxima a um rio. Esses fatores podem causar variações nas medições de temperatura devido à umidade do ar e às condições bioclimáticas locais, tornando difícil considerar essas condições como entradas precisas na simulação. Outra análise relevante é que os dados mais precisos são os do módulo fotovoltaico, uma vez que não envolvem outras características bioquímicas, como a evaporação da água, proporcionando uma medida mais direta e confiável das condições ambientais.

Em relação ao desempenho térmico simulado, considerando as médias dos meses de janeiro e fevereiro, observou-se que em janeiro a temperatura máxima interna da edificação foi 1,4 °C inferior à temperatura máxima externa, Figura 51. Assim, o desempenho térmico da edificação pode ser caracterizado como mínimo (M), mas próximo ao intermediário. No entanto, em fevereiro, os valores máximos interno e externo foram quase idênticos, caracterizando um desempenho mínimo (M).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os principais achados deste estudo indicam que os objetivos formulados no início foram alcançados com êxito. O primeiro objetivo, que era construir um sistema GRIPV fundamentado nas características ótimas de telhado/coberturas verdes e módulos fotovoltaicos, foi concretizado com a construção de um protótipo conforme as melhores práticas e recomendações da literatura. Em relação ao segundo objetivo, que consistia em instrumentar o sistema GRIPV para coleta de dados de temperatura e umidade ao longo dos meses de verão, o protótipo foi equipado com sensores apropriados, conforme detalhado no tópico 3 deste trabalho, e a coleta de dados ocorreu de dezembro de 2023 a fevereiro de 2024 durante 50 dias. O terceiro objetivo envolveu o desenvolvimento de um modelo matemático abrangente que captasse os efeitos de transferência de calor e massa em telhados verdes com a integração de módulos fotovoltaicos. Esse modelo foi desenvolvido e apresentado no tópico 4, incorporando os efeitos da transferência de massa e calor das plantas e do substrato.

Por fim, o quarto objetivo visava simular o comportamento das temperaturas tanto no telhado verde quanto no módulo fotovoltaico e na edificação, comparando os resultados experimentais. Após a coleta de dados, foram definidos os parâmetros de entrada para a simulação numérica, cujos resultados, apresentados no tópico 5.3, indicam que, na edificação e na laje, os dados podem ter sido influenciados pelo material da construção, que reteve calor durante o período da tarde. Nas camadas do telhado verde, diversos fatores, como a quantidade de vapor de água liberado pelas plantas e pelo substrato, são difíceis de considerar na simulação. No entanto, os dados do módulo fotovoltaico se mostraram consistentes, indicando que a simulação está adequada para a parte frontal e traseira do módulo, conforme verificado nas Figuras 46 e 47.

Este estudo oferece várias contribuições significativas para a área de pesquisa em telhados verdes e sistemas fotovoltaicos integrados. Primeiramente, preenche uma lacuna de pesquisa ao apresentar um modelo matemático abrangente sobre o sistema GRIPV, permitindo uma melhor compreensão dos processos de transferência de calor e massa envolvidos. Além

disso, detalha todas as etapas para a construção de um telhado verde e fotovoltaico, servindo como um guia para futuros projetos similares. O estudo também identifica a planta mais utilizada em telhados verdes, fornecendo uma base sólida para seleção de vegetação em novos projetos. Com a coleta de dados ao longo de três meses, foram geradas curvas de temperatura detalhadas para o sistema GRIPV, oferecendo uma base de dados robusta para futuras análises. Por fim, a simulação com o modelo numérico aplicado mostrou-se próxima dos resultados experimentais, validando a eficácia do modelo desenvolvido.

Os resultados deste estudo têm várias implicações práticas. A revisão de literatura demonstra que o sistema GRIPV é uma solução eficaz para coberturas, combinando benefícios de telhados verdes e módulos fotovoltaicos. O detalhamento do protótipo facilita sua aplicação em diferentes climas e escalas dimensionais, servindo como referência para outros pesquisadores e profissionais da área. A instrumentação e o uso de sensores descritos podem ser aplicados em qualquer estudo que envolva a coleta de dados de temperatura. Além disso, o modelo matemático desenvolvido pode ser implementado em diferentes softwares, ampliando sua aplicabilidade.

Como qualquer pesquisa, este estudo possui algumas limitações que devem ser reconhecidas. A primeira limitação refere-se ao tempo de coleta e análise dos dados, uma coleta mais prolongada poderia fornecer resultados ainda mais robustos. Outra limitação é a programação do Arduino, que poderia ser otimizada para permitir a coleta contínua de dados sem a necessidade de intervenção manual diária. O sistema de coleta de dados poderia ser isolado dentro da edificação para permitir a coleta de dados em dias de chuva, uma vez que as condições climáticas adversas impediram a coleta em várias ocasiões. Além disso, a necessidade de coleta de dados apenas em dias de bom tempo limitou a abrangência dos dados, especialmente em um clima tropical com frequentes dias de chuva.

Para ampliar o conhecimento adquirido neste estudo, sugere-se a realização de coletas de dados mais extensivas, incluindo uma maior variedade de condições climáticas. Alterações nos materiais de construção da edificação poderiam fornecer *insights* adicionais sobre o desempenho térmico e a retenção de calor. Inserir sensores de temperatura e umidade próximos ao protótipo

eliminar a necessidade de depender dos dados do INMET, permitindo medições mais precisas das condições locais. Outras sugestões incluem a incorporação de sistemas de reaproveitamento de água da chuva, tornando o sistema mais sustentável, e a instalação de irrigação automática no telhado verde para manter a umidade do substrato. A adição de mais módulos fotovoltaicos e o estudo do caminho do sol para analisar a sombra no telhado verde também poderiam oferecer novas perspectivas sobre a eficiência do sistema. Também, pode-se melhorar o modelo matemático com inclusão de mais parâmetros variáveis (não constantes), a inclusão de fenômenos biológicos relativos às funções das plantas e troca térmica tridimensional.

As dimensões geométricas, operacionais, o número de plantas e outras características adotados no modelo matemático são próximas aos do protótipo. Esse alinhamento é um diferencial significativo em relação a outros estudos, que frequentemente comparam dados experimentais de geometrias completamente diferentes das simuladas no modelo.

Além dos benefícios técnicos e científicos, este projeto destaca-se por sua contribuição significativa para a sustentabilidade ambiental. A integração de telhados verdes com módulos fotovoltaicos não apenas melhora o desempenho térmico das edificações, reduzindo a demanda por energia elétrica convencional, mas também promove a biodiversidade urbana e a mitigação dos impactos ambientais. Ao capturar CO₂, filtrar poluentes atmosféricos e reduzir o efeito de ilhas de calor nas áreas urbanas, o sistema GRIPV demonstra um compromisso com práticas construtivas mais responsáveis e ecologicamente conscientes. Essa abordagem holística não apenas beneficia o ambiente local imediato, mas também estabelece um padrão para futuras inovações em construção sustentável.

Conclui-se que este estudo é de grande importância pois considera a utilização de duas tecnologias sustentáveis que podem ser trabalhadas em conjunto, oferecendo uma solução inovadora para a construção de coberturas. A necessidade de estudar as características do sistema GRIPV de maneira mais aprofundada é evidente, incluindo a quantidade de plantas necessárias e o efeito da evapotranspiração do telhado verde no sistema como um todo. Os resultados obtidos reafirmam a relevância deste tema e a necessidade contínua de

exploração para otimizar a integração de telhados verdes e sistemas fotovoltaicos, promovendo construções mais sustentáveis e eficientes.

Referências Bibliográficas

ABDALAZEEM, M. E. et al. Review on integrated photovoltaic-green roof solutions on urban and energy-efficient buildings in hot climate. **Sustainable Cities and Society**, v. 82, p. 103919, 1 jul. 2022.

ABDALAZEEM, M. E. et al. Enhancing energy efficiency in hot climate buildings through integrated photovoltaic panels and green roofs: An experimental study. **Solar Energy**, v. 270, p. 112419, 1 mar. 2024.

ABDALLAH, A. S. H.; HUSSEIN, S. W.; NAYEL, M. The impact of outdoor shading strategies on student thermal comfort in open spaces between education building. **Sustainable Cities and Society**, v. 58, p. 102124, 1 jul. 2020.

AHMED, M. O. et al. Optimizing the Artificial Lighting in a Smart and Green Glass Building-integrated Semi-Transparent Photovoltaics: A Multifaceted Case Study in Egypt. [s.d.].

ALONSO-MARROQUIN, F.; QADIR, G. Synergy between Photovoltaic Panels and Green Roofs. **Energies**, v. 16, n. 13, p. 5184, 1 jul. 2023.

ASCIONE, F. Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling. **Solar Energy**, v. 154, p. 34–100, 15 set. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-3:2005. Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. ABNT NBR 15220-3:2005**Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: edifícios habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2013.

AZEÑAS, V. et al. Thermal regulation capacity of a green roof system in the mediterranean region: The effects of vegetation and irrigation level. **Energy and Buildings**, v. 164, p. 226–238, 1 abr. 2018.

BALDI, F. DESENVOLVIMENTO DA PARTE AÉREA DE xGRAPTOSEDUM “FRANCESCO BALDI” (SEDUM CARNICOLOR) SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE SOMBREAMENTO. . 2019.

BALVEDI, N.; GIGLIO, T. Influence of green roof systems on the energy performance of buildings and their surroundings. **Journal of Building Engineering**, v. 70, p. 106430, 1 jul. 2023.

BEVILACQUA, P.; BRUNO, R.; ARCURI, N. Green roofs in a Mediterranean climate: energy performances based on in-situ experimental data. **Renewable Energy**, v. 152, p. 1414–1430, 1 jun. 2020.

BIANCO, S. et al. Nota científica: métodos para estimativa da area foliar de plantas daninhas: 2: *Wissadula subpeltata* (Kuntze) Fries. **Planta Daninha**, v. 6, n. 1, p. 21–24, jun. 1983.

CASCONE, S. et al. Thermal performance assessment of extensive green roofs investigating realistic vegetation-substrate configurations. **Building Simulation**, v. 12, n. 3, p. 379–393, 1 jun. 2019.

CAVADINI, G. B.; COOK, L. M. Green and cool roof choices integrated into rooftop solar energy modelling. **Applied Energy**, v. 296, p. 117082, 15 ago. 2021.

CHEMISANA, D.; LAMNATOU, C. Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. **Applied Energy**, v. 119, p. 246–256, 15 abr. 2014.

COOK, L. M.; LARSEN, T. A. Towards a performance-based approach for multifunctional green roofs: An interdisciplinary review. **Building and Environment**, v. 188, p. 107489, 15 jan. 2021.

COSTANZO, V.; EVOLA, G.; MARLETTA, L. Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 247–255, 15 fev. 2016.

DUPRÉ, O.; VAILLON, R.; GREEN, M. A. Physics of the temperature coefficients of solar cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 140, p. 92–100, 1 set. 2015.

FAHMY, M. et al. A Review and Insights for Eleven Years of Urban Microclimate Research Towards a New Egyptian ERA of Low Carbon, Comfortable and Energy-Efficient Housing Typologies. **Atmosphere 2020, Vol. 11, Page 236**, v. 11, n. 3, p. 236, 28 fev. 2020.

FLECK, R. et al. Urban green roofs to manage rooftop microclimates: A case study from Sydney, Australia. **Building and Environment**, v. 209, p. 108673, 1 fev. 2022.

FUENTES, M. K. A simplified thermal model for Flat-Plate photovoltaic arrays. 1 maio 1987.

GAUTAM, B. R.; LI, F.; RU, G. Assessment of urban roof top solar photovoltaic potential to solve power shortage problem in Nepal. **Energy and Buildings**, v. 86, p. 735–744, 1 jan. 2015.

HABIBI, S.; OBONYO, E. A.; MEMARI, A. M. Design and development of energy efficient re-roofing solutions. **Renewable Energy**, v. 151, p. 1209–1219, 1 maio 2020.

HACHEM, C. Impact of neighborhood design on energy performance and GHG emissions. **Applied Energy**, v. 177, p. 422–434, 1 set. 2016.

HSIEH, C. M. et al. Simulation analysis of site design and layout planning to mitigate thermal environment of riverside residential development. **Building Simulation 2010 3:1**, v. 3, n. 1, p. 51–61, 5 mar. 2010.

JAHANFAR, A. et al. Evaluating the shading effect of photovoltaic panels on green roof discharge reduction and plant growth. **Journal of Hydrology**, v. 568, p. 919–928, 1 jan. 2019.

JAMEI, E. et al. Review on the cooling potential of green roofs in different climates. **Science of The Total Environment**, v. 791, p. 148407, 15 out. 2021.

JIRAPONGPHATAI, S. et al. Electrical and thermal performance analysis of photovoltaic module having evaporating surface for cooling. **Energy Reports**, v. 9, p. 4734–4748, 1 dez. 2023.

KHOTBEHSARA, E. M.; DAEMEI, A. B.; MALEKJAHAN, F. A. Simulation study of the eco green roof in order to reduce heat transfer in four different climatic zones. **Results in Engineering**, v. 2, p. 100010, 1 jun. 2019.

KINCAID, D.; CHENEY, W. **Numerical Analysis, Brooks**. [s.l.] Cole Publishing Company, 1991. v. 20

KING, D. L.; KRATOCHVIL, J. A.; BOYSON, W. E. Temperature coefficients for PV modules and arrays: Measurement methods, difficulties, and results. **Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, p. 1183–1186, 1997.

KOKOGIANNAKIS, G.; DARKWA, J.; YUAN, K. A combined experimental and simulation method for appraising the energy performance of green roofs in Ningbo's Chinese climate. **Building Simulation**, v. 7, n. 1, p. 13–20, 25 set. 2014.

KOURA, J. et al. Seasonal variability of temperature profiles of vegetative and traditional gravel-ballasted roofs: A case study for Lebanon. **Energy and Buildings**, v. 151, p. 358–364, 15 set. 2017.

LAMNATOU, C.; CHEMISANA, D. Photovoltaic-green roofs: a life cycle assessment approach with emphasis on warm months of Mediterranean climate. **Journal of Cleaner Production**, v. 72, p. 57–75, 1 jun. 2014.

LEAL FILHO, W. et al. Coping with the impacts of urban heat islands. A literature based study on understanding urban heat vulnerability and the need for resilience in cities in a global climate change context. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1140–1149, 10 jan. 2018.

LEAL FILHO, W. et al. Addressing the Urban Heat Islands Effect: A Cross-Country Assessment of the Role of Green Infrastructure. **Sustainability 2021, Vol. 13, Page 753**, v. 13, n. 2, p. 753, 14 jan. 2021.

MAIA, M. R. DOS S. G. Análise das ilhas de calor urbanas de superfície na cidade de Salvador-BA. 8 mar. 2023.

MAURER, B.; LIENERT, J.; COOK, L. M. Comparing PV-green and PV-cool roofs to diverse rooftop options using decision analysis. **Building and Environment**, v. 245, p. 110922, 1 nov. 2023.

MAYRAND, F.; CLERGEAU, P. Green Roofs and Green Walls for Biodiversity Conservation: A Contribution to Urban Connectivity? **Sustainability 2018, Vol. 10, Page 985**, v. 10, n. 4, p. 985, 27 mar. 2018.

MÜLLER, G.; FRIEDRICH, J. Optimization and Modeling of Photovoltaic Silicon Crystallization Processes. **AIP Conference Proceedings**, v. 1270, n. 1, p. 255–281, 22 jul. 2010.

NAGENGAST, A.; HENDRICKSON, C.; SCOTT MATTHEWS, H. Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 493–502, 1 set. 2013.

OBERNDORFER, E. et al. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. <https://doi.org/10.1641/B571005>, v. 57, n. 10, p. 823–833, 1 nov. 2007.

OGAILI, H.; SAILOR, D. J. Measuring the Effect of Vegetated Roofs on the Performance of Photovoltaic Panels in a Combined System. **Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME**, v. 138, n. 6, 1 dez. 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**, 2015. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 15 jul. 2024.

OSMA-PINTO, G.; ORDÓÑEZ-PLATA, G. Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates. **Solar Energy**, v. 185, p. 112–123, 1 jun. 2019.

PANDEY, S.; HINDOLIYA, D. A.; MOD, R. Experimental investigation on green roofs over buildings. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 8, n. 1, p. 37–42, 1 mar. 2013.

PERMPITUCK, S.; NAMPRAKAI, P. The energy consumption performance of roof lawn gardens in Thailand. **Renewable Energy**, v. 40, n. 1, p. 98–103, 1 abr. 2012.

RAHMANIAH, F. et al. Effect of Module Elevation Height on Incident Solar Irradiance and Plant Growth in a Tropical Photovoltaic-Green Roof (PV-GR) system. **Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, p. 2397–2402, 20 jun. 2021.

RAMOS COSTA, E.; SCHUCK DE OLIVEIRA, F. **DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR SOLAR PARA EXPOSIÇÃO CONTINUA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**. [s.l.: s.n.].

RINCÓN, L. et al. Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative Life Cycle Assessment. **Building and Environment**, v. 74, p. 22–30, 1 abr. 2014.

ROCK, B. A.; ASHRAE, F. COMPARING BUILDING SURFACES' ORIENTATIONS TO OPTIMIZE SOLAR ENERGY COLLECTION. **Journal of Green Building**, v. 15, n. 2, p. 3–28, 1 mar. 2020.

SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 8, p. 1466–1478, 1 jan. 2008.

SATTLER, S.; ZLUWA, I.; ÖSTERREICHER, D. The “PV Rooftop Garden”: Providing Recreational Green Roofs and Renewable Energy as a Multifunctional System within One Surface Area. **Applied Sciences** 2020, Vol. 10, Page 1791, v. 10, n. 5, p. 1791, 5 mar. 2020.

SCHWAMBACH, C.; SOBRINHO, G. C. **Fisiologia vegetal : Introdução às características, funcionamento e estruturas das plantas e interação com a natureza**. 1. ed. São Paulo: Editora Erica, 2014.

SCOLARO, T. P.; GHISI, E. Life cycle assessment of green roofs: A literature review of layers materials and purposes. **Science of The Total Environment**, v. 829, p. 154650, 10 jul. 2022.

SILVA, R. et al. Conception and design of a sustainable green roof for car parks with integrated solar tracking photovoltaic system. **2018 9th International Renewable Energy Congress, IREC 2018**, p. 1–4, 21 maio 2018.

SMITH, S. E. et al. Increased panel height enhances cooling for photovoltaic solar farms. **Applied Energy**, v. 325, p. 119819, 1 nov. 2022.

SOUSA, L. R. DE. Análise do desempenho térmico de habitações multifamiliares de interesse social com paredes verdes. 2020.

STATLER, N. E.; ADAMS, A. M.; ECKMANN, T. C. Optimizing angles of rooftop photovoltaics, ratios of solar to vegetated roof systems, and economic benefits, in Portland, Oregon, USA. **Environment Systems and Decisions**, v. 37, n. 3, p. 320–331, 1 set. 2017.

SUSAN, S.; WARDHANI, D. Building integrated photovoltaic as GREENSHIP'S on site renewable energy tool. **Results in Engineering**, v. 7, p. 100153, 1 set. 2020.

SUSCA, T. Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. **Building and Environment**, v. 162, p. 106273, 1 set. 2019.

VARGAS, J. V. C.; ARAKI, L. K. **Cálculo numérico aplicado**. São Paulo: [s.n.].

VAZ MONTEIRO, M. et al. Functional green roofs: Importance of plant choice in maximising summertime environmental cooling and substrate insulation potential. **Energy and Buildings**, v. 141, p. 56–68, 15 abr. 2017.

VILA, A. et al. Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental green roofs. **Building and Environment**, v. 48, n. 1, p. 101–106, 1 fev. 2012.

WITMER, L.; BROWNSON, J. R. S.; BROWNSON, J. An Energy Balance Model of Green Roof Integrated Photovoltaics: A Detailed Energy Balance Including Microclimatic Effects. 2011.

YANG, Jiachuan et al. Effect of pavement thermal properties on mitigating urban heat islands: A multi-scale modeling case study in Phoenix. **Building and Environment**, v. 108, p. 110-121, 2016.

YUNUS A. ÇENGEL; AFSHIN J. GHAFAR. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, McGraw Hill, 2012.

ZLUWA, I.; PITHA, U. The Combination of Building Greenery and Photovoltaic Energy Production—A Discussion of Challenges and Opportunities in Design. **Sustainability** 2021, Vol. 13, Page 1537, v. 13, n. 3, p. 1537, 1 fev. 2021.



Assinaturas do documento



Código para verificação: **QXZT2614**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:



FERNANDA PERAZZOLO DISCONZI (CPF: 004.XXX.520-XX) em 15/08/2024 às 14:53:46

Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:42:51 e válido até 30/03/2118 - 12:42:51.

(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/VURFU0NfMTIwMjJfMDAwMzUxMDBfMzUxNDNfMjAyNF9RWFPUMjYxNA==> ou o site <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **UDESC 00035100/2024** e o código **QXZT2614** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.