



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO (UFPE)
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MAIANA BORBA VILARIM

**DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADO VERDE DE BAIXO CUSTO
EM REGIÃO DE CLIMA TROPICAL ÚMIDO**

Recife - PE

2022

MAIANA BORBA VILARIM

**DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADO VERDE DE BAIXO CUSTO
EM REGIÃO DE CLIMA TROPICAL ÚMIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Sylvana Melo dos Santos

Recife - PE

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

V697d Vilarim, Maiana Borba.
Desempenho térmico de telhado verde de baixo custo em região de clima tropical úmido / Maiana Borba Vilarim. 2022.
139 f: figs., tabs., abrev. e siglas.

Orientadora: Profa. Dra. Sylvana Melo dos Santos.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.
Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia Civil. 2. Técnica construtiva sustentável. 3. Desempenho térmico. 4. Telhado ecológico. 5. Garrafas PET. I. Santos, Sylvana Melo dos (Orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022 - 342

MAIANA BORBA VILARIM

**DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADO VERDE DE BAIXO CUSTO
EM REGIÃO DE CLIMA TROPICAL ÚMIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em 29/08/2022

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Sylvana Melo dos Santos
Universidade Federal de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Dr. Diego César dos Santos Araújo (examinador externo)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Leidjane Maria Maciel de Oliveira (examinadora interna)

Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha família, ao meu noivo e a todos aqueles que possam se beneficiar com os telhados verdes de baixo custo.

AGRADECIMENTOS

A Deus por toda minha existência, pelas pessoas em minha vida e por todas as coisas, pois tudo que sou e consegui até hoje, foi Ele que me agradeceu.

Agradeço aos meus pais por todo ensinamento e criação que me deram. Por todo amor, carinho, suporte, apoio e por estarem sempre ao meu lado, acreditando em mim. Sem vocês, nada disso seria possível. À minha irmã, que é umas das pessoas que mais acredita no meu potencial, me apoia nas decisões e se alegra com minhas vitórias como se fossem dela. A vocês, minha gratidão por tudo.

A Pedro, que desde a faculdade é meu porto seguro e meu apoio em todas as áreas da minha vida. Obrigada por me incentivar e acreditar tanto em mim, por estar ao meu lado, me ajudando nos momentos difíceis, por estar sempre comigo, até no mestrado, e por compartilharmos os mesmos sonhos. À minha sogra, pelas palavras de conforto e por sempre estar disposta a ajudar com a maior felicidade e amor do mundo. Sem vocês, o caminho seria muito mais difícil.

À minha orientadora, Sylvana Santos, por toda orientação e conhecimento passado, por toda paciência, amparo e carinho em cada etapa. Também à professora Leidjane Oliveira, pelos conselhos e suporte nos momentos que precisei.

Aos amigos que fiz durante a pesquisa, que além de se disponibilizarem e me ajudarem nas etapas da dissertação, tornaram os dias mais leves com suas presenças, principalmente a Haylla Rebeka, Camila Oliveira, Raquel Ferreira, Marina Moura e Lysanne Moura.

A FACEPE, pelo apoio e amparo financeiro que proporcionou a realização da pesquisa por meio do financiamento do projeto e concessão da bolsa de mestrado.

Ao PPGE da UFPE, que me possibilitou a realização do mestrado acadêmico.

E a todos que me auxiliaram na realização desta pesquisa.

RESUMO

Em geral, a urbanização resulta em diversos problemas ao meio urbano e, principalmente, ao meio-ambiente, tais como inundações e ilhas de calor urbano. A busca por um desenvolvimento a partir de tecnologias sustentáveis, que possam tornar o avanço da sociedade menos acelerado e prejudicial ao meio, está sendo cada vez maior. As tecnologias verdes podem ser utilizadas para amenizar os impactos ambientais causados pela urbanização, e entre tais tecnologias, estão os telhados ecológicos. Nesse contexto, se inserem os telhados verdes, que são capazes de contribuir para o conforto térmico e para a redução do volume de escoamento superficial. Entretanto, existem poucos telhados verdes, e isso pode estar associado ao desconhecimento da técnica por parte da população, ou mesmo pelo elevado custo de implantação, limitando seu uso às famílias de melhores condições financeiras. Assim sendo, esta pesquisa propõe-se a replicar e analisar um telhado verde de baixo custo construído com garrafas PET, proposto originalmente para clima Semiárido, em clima tropical úmido na cidade do Recife - PE, para a análise de seu desempenho térmico em relação a outras coberturas e ao meio externo. Foram investigadas três coberturas distintas (uma cobertura convencional de laje e duas de telhados verdes), visando comparar o comportamento térmico abaixo delas. Sobre os telhados verdes investigados, um deles foi implantado de forma convencional e o outro com garrafas PET como estrutura suporte. A vegetação de Aranto (*Kalanchoe laetivirens*) foi escolhida pela grande resistência à escassez hídrica e à insolação, pelas fáceis propagação e aquisição, e pelo baixo valor. Com o uso de termômetros e termohigrômetros, as temperaturas foram monitoradas de março a maio de 2021. As temperaturas abaixo do telhado verde de baixo custo apresentaram valores intermediários em relação às outras coberturas, entretanto, mais semelhantes aos valores observados pelo telhado verde convencional. As máximas temperaturas no telhado verde convencional foram até 2,7°C e 3,4°C a menos que as máximas externas e as obtidas com a cobertura convencional, respectivamente. No caso do telhado verde de baixo custo, esses valores foram até 2,3°C e 1,6°C inferiores às máximas externas e da cobertura convencional, respectivamente. No que se refere à NBR 15.575-1 para o período analisado, os telhados verdes garantiram o atendimento de, no máximo, 80,6% dos dias, enquanto a cobertura convencional atingiu apenas 51,6%. Devido à facilidade e simplicidade de sua construção, por seus baixos custos

de aquisição e manutenção, e pelos benefícios térmicos observados, a cobertura vegetada com PET indicou ser uma boa tecnologia sustentável e acessível.

Palavras-chave: Técnica construtiva sustentável; Desempenho térmico; Telhado ecológico; Garrafas PET.

ABSTRACT

In general, urbanization results in several problems for the urban environment and, mainly, for the environment, such as floods and urban heat islands. The search for development based on sustainable technologies, which can make society's progress less accelerated and harmful to the environment, is increasing. Green technologies can be used to mitigate the environmental impacts caused by urbanization, and among such technologies are ecological roofs. In this context, green roofs are inserted, which are able to contribute to thermal comfort and to reduce the volume of surface runoff. However, there are few green roofs, and this may be associated with the lack of knowledge of the technique by the population, or even the high cost of implementation, limiting its use to families with better financial conditions. Therefore, this research proposes to replicate and analyze a low-cost green roof built with PET bottles, originally proposed for a semi-arid climate, in a humid tropical climate in the city of Recife - PE, for the analysis of its thermal performance in relation to other coverages and the external environment. Three different roofs (a conventional slab roof and two green roofs) were investigated, aiming to compare the thermal behavior below them. On the green roofs investigated, one of them was implanted in a conventional way and the other with PET bottles as a support structure. The Aranto vegetation (*Kalanchoe laetivirens*) was chosen for its great resistance to water scarcity and insolation, for its easy propagation and acquisition, and for its low value. With the use of thermometers and thermohygrometers, temperatures were monitored from March to May 2021. The temperatures below the low-cost green roof showed intermediate values in relation to the other roofs, however, more similar to the values observed by the conventional green roof. The maximum temperatures in the conventional green roof were up to 2.7°C and 3.4°C less than the external maximums and those obtained with the conventional roof, respectively. In the case of the low-cost green roof, these values were up to 2.3°C and 1.6°C lower than the external maximums and the conventional roof, respectively. With regard to NBR 15.575-1 for the analyzed period, green roofs ensured service for a maximum of 80.6% of the days, while conventional coverage reached only 51.6%. Due to the ease and simplicity of its construction, its low acquisition and maintenance costs, and the thermal benefits observed, the PET vegetated roof indicated to be a good sustainable and affordable technology.

Keywords: Sustainable building technique; Thermal performance; Ecological roof; PET bottles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas de um telhado verde convencional.....	26
Figura 2 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	42
Figura 3 – Localização da Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife- UETER.....	43
Figura 4 – Precipitação acumulada mensal média de 1969 a 2018 na cidade do Recife-PE.....	44
Figura 5 – Protótipos da UETER.....	45
Figura 6 – Disposição das coberturas nas CTs, na UETER.....	46
Figura 7 – Espécie <i>Kalanchoe laetivirens</i> escolhida para experimento.....	47
Figura 8 – Espécie <i>Kalanchoe laetivirens</i> com mudas.....	48
Figura 9 – Componentes do substrato utilizados nos telhados.....	49
Figura 10 – Telhado de baixo custo com PET desenvolvido no Semiárido pernambucano.....	51
Figura 11 – Etapas da montagem do telhado verde ecológico com garrafa PET.....	52
Figura 12 – Montagem do telhado verde de baixo custo, na CT 1.....	53
Figura 13 – Disposição final da CT 1 com telhado verde de baixo custo.....	53
Figura 14 – Montagem do telhado verde convencional, na CT 5.....	55
Figura 15 – Telhado verde convencional, com vegetação <i>Kalanchoe laetivirens</i> , na CT 5.....	55
Figura 16 – Equipamentos utilizados para a medição de dados internos.....	58
Figura 17 – Layout do software do Datalogger IP-747RH.....	59
Figura 18 – Layout do software do Escort iMINI MX-IN-S-8-L.....	59
Figura 19 – Disposição dos equipamentos dentro CTs.....	61
Figura 20 – Localização da Estação A301 do INMET, no bairro do Curado - Recife/PE.....	62
Figura 21 – Boxplot das temperaturas médias diárias entre 2011 e 2020 e temperaturas médias mensais representativas de cada mês (estação A301 - INMET).....	66

Figura 22 – Variação das temperaturas médias mensais representativas com relação à média anual de referência entre os anos 2011 e 2020 (estação A301 - INMET).....	67
Figura 23 – Temperaturas médias, mínimas e máximas representativas e históricas por mês (estação A301 - INMET).....	69
Figura 24 – Precipitação diária acumulada e umidade relativa do ar média para os meses de coleta de dados (estação A301 – INMET).....	71
Figura 25 – Temperatura média diária no período de coleta de dados (estação A301 – INMET).....	72
Figura 26 – Temperatura horária por dia para os meses de coleta de dados (estação A301 – INMET).....	73
Figura 27 – Radiação média diária e velocidade dos ventos média diária para os meses de coleta de dados (estação A301 – INMET).....	75
Figura 28 – Desvio de temperatura entre a média e o valor de cada parede - análise de calibração.....	78
Figura 29 – Temperatura (°C) nos tetos (dataloggers IP-747RH) - análise de calibração.....	79
Figura 30 – Temperatura das paredes das CTs - dia mais quente de março – 08/03/2021.....	80
Figura 31 – Boxplot de temperaturas diárias com dados dos sensores de teto.....	82
Figura 32 – Temperaturas internas e externas - dia com maior temperatura máxima de março - 08/03/2021.....	85
Figura 33 – Temperaturas internas e externas - dia com maior temperatura máxima de abril - 22/04/2021.....	87
Figura 34 – Temperaturas internas e externas - dia com maior temperatura máxima de maio - 07/05/2021.....	90
Figura 35 – Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor temperatura mínima de março - 17/03/20.....	93
Figura 36 – Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor temperatura mínima de abril - 12/04/2021.....	94
Figura 37 – Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor temperatura mínima de maio - 23/05/2021.....	96

Figura 38 – Temperaturas internas do teto e externas - dia com maior amplitude térmica de abril - 27/04/2021.....	98
Figura 39 – Temperaturas internas do teto e externas - dia com maior amplitude térmica de maio - 25/05/2021.....	100
Figura 40 – Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor amplitude térmica de março - 12/03/2021.....	102
Figura 41 – Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor amplitude térmica de abril - 18/04/2021.....	104
Figura 42 – Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor amplitude térmica de maio – 13/05/2021.....	105
Figura 43 – Temperaturas máximas, mínimas e precipitação, com respectivas normais climatológicas provisórias da estação automática (2000-2018).....	106
Figura 44 – Temperaturas internas do teto e externas - dia com maior precipitação de março – 28/03/2021.....	108
Figura 45 – Temperaturas internas do teto e externas - dia com maior precipitação de abril – 11/04/2021.....	110
Figura 46 – Temperaturas internas do teto e externas - dia com maior precipitação de maio – 13/05/2021.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos telhados verdes.....	27
Tabela 2 – Percentuais de descontos do IPTU verde de acordo com municípios brasileiros.....	34
Tabela 3 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.....	35
Tabela 4 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno.....	35
Tabela 5 – Pesquisas que usam garrafas PET e embalagens Tetra Pak em telhados verdes.....	39
Tabela 6 – Pesquisas em telhados verdes e ecológicos realizadas na UFPE.....	41
Tabela 7 – Características dos equipamentos utilizados nas medições.....	60
Tabela 8 – Dias de análise de acordo com critério escolhido, datas no ano de 2021.....	76
Tabela 9 – Temperaturas (°C) nas paredes para análise da calibração.....	77
Tabela 10 – Temperaturas (°C) médias diárias nos meses de análise.....	83
Tabela 11 – Amplitudes térmicas (°C) médias diárias nos meses de análise....	83
Tabela 12 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 08/03/2021.....	86
Tabela 13 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 22/04/2021.....	88
Tabela 14 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 07/05/2021.....	91
Tabela 15 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 17/03/2021.....	93
Tabela 16 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 12/04/2021.....	95
Tabela 17 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 23/05/2021.....	96
Tabela 18 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 27/04/2021.....	99

Tabela 19 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 25/05/2021.....	100
Tabela 20 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 12/03/2021.....	103
Tabela 21 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 18/04/2021.....	104
Tabela 22 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 13/05/2021.....	107
Tabela 23 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 28/03/2021.....	109
Tabela 24 – Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 11/04/2021.....	111
Tabela 25 – Porcentagem de dias que atenderam aos níveis de desempenho térmico da NBR 15.575-1.....	113
Tabela 26 – Dias de análise específicos verificados quanto ao atendimento à NBR 15.575-1.....	114
Tabela 27 – Quantitativos e custos para a construção do telhado verde de baixo custo.....	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abrelpe	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos do INMET
CT	Célula-teste
CTCA	Câmara Técnica de Compensação Ambiental
CTG	Centro de Engenharia e Geociência
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MEG	Monoetilenoglicol
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PEAD	Polietileno de alta densidade
PET	Politereftalato de Etileno
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PTA	Ácido Tereftálico
RMR	Região Metropolitana do Recife
RSU	Resíduo Sólido Urbano
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UHI	Ilha de Calor Urbano
UHT	<i>Ultra-high temperature</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus celsius
CH ₄	Metano
Cm	Centímetros
gC/m ²	Gramas de carbono por metro quadrado
h	Hora
há	Hectares
hab/km ²	Habitantes por quilômetro quadrado
kg	Quilograma
kg/ano	Quilograma por ano
Kg/m ²	Quilograma por metro quadrado
Kj/m ²	Quilojoule por metro quadrado
kN/m ²	Quilonewton por metro quadrado
kWh/m ² /ano	Quilowatts-hora por metro quadrado por ano
L	Litros
m ²	Metro quadrado
N°	Número
W/m ²	Watt por metro quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	OBJETIVOS.....	23
2.1	Objetivo geral.....	23
2.2	Objetivos específicos.....	23
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
3.1	Região Metropolitana do Recife.....	24
3.2	Telhados verdes.....	25
3.2.1	Conceito e classificação.....	25
3.2.2	Benefícios e desafios.....	27
3.2.3	Normas e legislações.....	31
3.2.3.1	<i>NBR 15.575-1/2013.....</i>	<i>34</i>
3.3	Telhados ecológicos com materiais reutilizáveis e de baixo custo.....	35
3.3.1	Reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos.....	35
3.3.2	Utilização de materiais reutilizáveis nos telhados ecológicos.....	37
3.4	Pesquisas desenvolvidas na UFPE relacionadas aos telhados ecológicos.....	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
4.1	Área de estudo.....	42
4.2	Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife (UETER).....	44
4.2.1	Descrição das CTs existentes.....	44
4.2.2	Cobertura das CTs.....	45
4.2.2.1	<i>Vegetação e substrato.....</i>	<i>46</i>
4.2.2.2	<i>Estrutura suporte de baixo custo.....</i>	<i>49</i>
4.2.3	Configuração dos telhados ecológicos.....	51
4.2.3.1	<i>Montagem do telhado verde de baixo custo.....</i>	<i>51</i>
4.2.3.2	<i>Montagem do telhado verde convencional.....</i>	<i>54</i>
4.3	Análise do comportamento meteorológico da cidade do Recife – PE.....	55
4.3.1	Análise de temperatura de série histórica.....	55

4.3.2	Análise meteorológica do período de coleta de dados.....	57
4.4	Aquisição de dados.....	58
4.4.1	Dados internos.....	58
4.4.2	Dados externos.....	62
4.5	Estudo simplificado de viabilidade econômica do telhado verde de baixo custo com garrafas PET.....	62
4.6	Análise da interferência das paredes na temperatura interna dos protótipos da UETER.....	63
4.7	Análise do desempenho térmico na comparação entre o telhado verde de baixo custo, a cobertura convencional e o telhado verde convencional.....	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
5.1	Desempenho térmico – telhado verde de baixo custo x telhado verde tradicional x telhado convencional x temperatura externa..	66
5.1.1	Caracterização do comportamento térmico da cidade do Recife – PE.	66
5.1.2	Dados meteorológicos externos do Recife-PE para o período de coleta de dados.....	69
5.1.3	Análise da discrepância entre medições dos equipamentos <i>Escort iMINI MX-IN-S-8-L</i> e <i>Datalogger IP-747RH</i>	76
5.1.4	Análise da interferência das paredes na temperatura interna dos protótipos da UETER.....	79
5.1.5	Comparação do comportamento térmico entre coberturas a partir de dados internos diários.....	81
5.1.6	Comparação do desempenho térmico das CTs para os dias de análise investigados a partir de dados horários.....	84
5.1.6.1	<i>Análise do dia com maior temperatura máxima de cada mês de coleta.....</i>	<i>84</i>
5.1.6.2	<i>Análise do dia com menor temperatura mínima de cada mês de coleta.....</i>	<i>91</i>
5.1.6.3	<i>Análise do dia com maior amplitude térmica de cada mês de coleta.....</i>	<i>97</i>
5.1.6.4	<i>Análise do dia com menor amplitude térmica de cada mês de coleta...</i>	<i>101</i>
5.1.6.5	<i>Análise do dia com maior precipitação acumulada de cada mês de coleta.....</i>	<i>107</i>

5.2	Análise da temperatura ambiente e atendimento à NBR 15.575-1.	112
5.3	Avaliação simplificada do uso do telhado verde de baixo custo investigado pela comunidade de baixa renda.....	114
6	CONCLUSÕES.....	117
7	TRABALHOS FUTUROS.....	119
	REFERÊNCIAS.....	120
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DE TEMPERATURA NAS CÉLULAS- TESTE.....	131

1 INTRODUÇÃO

O rápido processo de urbanização que atinge diversos centros urbanos emergentes traz consigo diversas modificações para o meio ambiente. Segundo Song *et al.* (2018), de todas as mudanças no uso e cobertura da terra, 60% são causadas por atividades antrópicas diretas e 40% por fatores indiretos como as mudanças climáticas, e entre as principais formas de alteração do meio, está a urbanização. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), através do relatório *World Urbanization Prospects*, 55% da população mundial residia em áreas urbanas em 2018, valor esse que atinge uma projeção de 68% para 2050 (NAÇÕES UNIDAS, 2019). De acordo com Wei *et al.* (2015), esse processo intensificou a conversão de terras nas aglomerações urbanas e áreas adjacentes nas últimas décadas, com consequente diminuição das áreas de cultivo e transformação de superfícies naturais e seminaturais em estruturas urbanas impermeáveis (YU *et al.*, 2019).

A América Latina é o segundo continente mais urbanizado, com 81% da sua população vivendo em áreas urbanas. No Brasil, conforme Oliveira (2013), o processo de urbanização teve seu início com o êxodo rural entre os anos de 1940 e 1980. A partir da busca por melhores condições de vida, a ocupação dos centros urbanos causou significativa elevação na densidade demográfica, com uma ocupação aleatória de espaços marginais. Enquadrando-se no conceito de “sociedade urbana”, segundo Brito, Horta e Amaral (2018), houve no país um salto populacional de 18.782.891 para 137.697.439 habitantes entre os anos 1950 e 2000, o correspondente a um aumento de 4,1% anual, que causou um forte inchaço urbano, principalmente nas capitais São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais e em seus municípios circunvizinhos, no Sudeste, como também nos estados da Bahia, do Ceará e de Pernambuco, no Nordeste, e do Rio Grande do Sul, no Sul.

Devido ao processo de urbanização rápida e não planejada, diversos problemas ambientais foram se desenvolvendo, principalmente nos meios urbanos. De acordo com Araújo, Silva e Machado (2016), o aumento desordenado da população, juntamente à retirada da cobertura vegetal e à construção de superfícies asfaltadas, que favorecem a impermeabilização do solo, modificaram o microclima urbano. Os materiais que substituíram a vegetação nesses ambientes, como asfaltos, concretos e telhas, possuem baixa capacidade térmica, ocasionando elevações nas temperaturas observadas nas cidades quando comparadas ao meio rural.

Com a elevação térmica causada por essas alterações espaciais, houve o desencadeamento do fenômeno das “Ilhas de Calor Urbano” (IMRAN *et al.*, 2018), caracterizado como o aumento da temperatura do centro urbano em relação a periferia e a zona rural que a circunda, tornando-se uma consequência da intensa urbanização característica das grandes e médias cidades brasileiras (OLIVEIRA *et al.*, 2013). Além disso, as alterações no microclima, devido a expansão urbana desalinhada ao planejamento ambiental, levaram a um aumento no desconforto térmico, prejudicando a qualidade de vida da população (FALCÃO *et al.*, 2019).

A cidade do Recife, assim como outras áreas urbanizadas no Brasil, sofreu nas últimas décadas um processo de ocupação urbana desordenado (SILVA; SILVA JUNIOR; OLIVEIRA, 2020). Essa ocupação irregular, principalmente pela população de baixa renda, que muitas vezes se estabelece fisicamente em áreas de proteção ambiental, ocorre geograficamente próxima a outros núcleos urbanos, gerando uma conurbação, também caracterizada por uma integração socioeconômica entre esses núcleos (GONÇALVES *et al.*, 2013). Com isso, Recife e suas áreas adjacentes são acometidos por problemas como os diversos pontos de alagamento devido às complicações no sistema de drenagem (SILVA JUNIOR; SILVA, 2016), a ocorrência de ilhas de calor pelas alterações nas características paisagísticas (NÓBREGA; VITAL, 2010) e aumento nas temperaturas e desconforto térmico causados pelo adensamento de prédios, impermeabilização do solo e pouca arborização (NÓBREGA; LEMOS, 2011; MENDES *et al.*, 2018; FALCÃO *et al.*, 2019)

Como forma de amenizar as consequências da urbanização, principalmente as questões sobre aumento das temperaturas e drenagem urbana, e de incentivar e promover tecnologias sustentáveis, surgiram os telhados verdes. Essa técnica compensatória instalada nas coberturas das edificações, atenua o estresse térmico em regiões urbanizadas (FEITOSA; WILKINSON, 2018) e amortecem o escoamento superficial, devido à coleta e ao armazenamento de água da chuva (SANTOS *et al.*, 2013). Segundo estudos de Cristiano, Deidda e Viola (2021), a tecnologia tem sido amplamente investigada por sua alta capacidade de retenção, mitigando o risco de inundações pluviais e aumentando o isolamento térmico do edifício, com redução das temperaturas e das ilhas de calor urbano. Segundo Imran *et al.* (2018), a redução de temperatura garante economia de energia, além de contribuir para restaurar a vegetação em meio urbano, aumentar a biodiversidade e agregar valor estético.

De acordo com Teotónio, Silva e Cruz (2018), apesar de ser uma técnica benéfica ao meio urbano, por proporcionar soluções a alguns problemas causados pela urbanização, as coberturas vegetadas são técnicas ainda pouco difundidas, inclusive no Brasil, principalmente por seu alto custo quando comparado às coberturas convencionais de laje de concreto e telhas de ficrocimento. Segundo os autores, esse valor mais elevado desmotiva sua instalação pelo setor privado, seja pelo alto custo de instalação e manutenção, como pelo desconhecimento sobre a técnica, o que gera dúvidas quanto ao possível retorno financeiro e às vantagens do telhado.

Para maior disseminação dos telhados verdes, principalmente entre as famílias de baixa renda, estão sendo desenvolvidas pesquisas com telhados verdes que utilizam materiais de baixo-custo (MARY *et al.*, 2010; ALBERTO, 2017), e materiais de reuso que seriam descartados dentre os resíduos sólidos urbanos, como as garrafas de Politerefitalato de Etileno (PET) e as embalagens Tetra Pak® (PANZIERA *et al.*, 2015; FENSTERSEIFER *et al.*, 2017; ROCHA, 2020; ALTOÉ *et al.*, 2019). Em geral, o objetivo dessas pesquisas com telhados verdes foi tornar a inconveniência do alto custo de implantação e manutenção um empecilho a menos para a sua implantação, e fornecer um destino mais adequado e sustentável a esses materiais, no contexto dos resíduos sólidos urbanos, que geralmente são descartados de forma inadequada e prejudicam o meio ambiente.

Com isso, esta pesquisa implanta um telhado verde de baixo custo com garrafas PET, originalmente construído em clima Semiárido, em clima tropical úmido, de forma a analisar seu desempenho térmico em relação à cobertura convencional de laje e ao telhado verde convencional. Também foi realizada a comparação da técnica com as temperaturas externas e verificado seu atendimento quanto à NBR 15.575-1.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento da temperatura no interior de ambientes abaixo de telhados verdes construídos com material de baixo custo visando a difusão da tecnologia em habitações de baixa renda.

2.2 Objetivos específicos

- Replicar um arranjo suporte de baixo custo (originalmente para clima Semiárido) para cultivo vegetal a ser utilizado como cobertura de um telhado ecológico sob perspectiva de clima tropical úmido;
- Identificar o telhado verde, entre o ecológico e o tradicional, com melhor desempenho térmico;
- Avaliar o desempenho térmico dos telhados verdes em relação ao telhado convencional;
- Avaliar o desempenho térmico dos telhados verdes e convencional em relação à temperatura externa;
- Avaliar o desempenho térmico das coberturas investigadas (telhados ecológicos e convencional) à luz da NBR 15.575-1;
- Discutir de forma preliminar e simplificada o uso do telhado verde de baixo custo investigado pela a comunidade de baixa renda.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Região Metropolitana do Recife

A Região Metropolitana do Recife (RMR), assim como outras Regiões Metropolitanas do país, é uma área onde diversas cidades interagem entre si com frequência e intensidade, com uma interdependência funcional baseada na unidade das infraestruturas urbanas. Seus municípios são integrados entre si por uma mancha urbana contínua com elevado fluxo de pessoas, complementariedade funcional e integração econômica.

A RMR é formada por 14 municípios: Abreu e Lima, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Igarassu, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Itapissuma, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista, Recife e São Lourenço da Mata. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o município do Recife, capital pernambucana, possui área territorial com extensão de 218.843 km² e população estimada de 1.661.017 pessoas, com densidade demográfica de 7.039,64 hab/km². Comparados aos números do censo realizado em 2010, a população do município teve um aumento de 8% em 12 anos.

O crescimento da população foi acompanhado da urbanização rápida e desordenada da cidade, com organização espacial desigual, resultado de uma lógica de organização baseada no aumento dos fluxos econômicos e expansão do capital, sem priorizar a qualidade de vida da população (CASTILHO, 2011), levando à ocupação de áreas inapropriadas para habitação e sendo um dos principais problemas urbanísticos da RMR, como afirma Galvão (2014). Segundo Silva *et al.* (2015), entre os anos de 1975 e 2015 ocorreu uma notável consolidação e estabilização das áreas densamente construídas em Recife. Em 1975 cerca de 34,27% do município, equivalente a 76 km², estava densamente urbanizado com a presença de edificações e sistemas viários pavimentados. Em 2015, essa área impermeabilizada chegou a 76%, englobando áreas construídas e em construção.

Uma das principais consequências do processo de urbanização acelerado e não planejado em Recife são os impactos negativos na drenagem urbana, que por aumentar as áreas impermeabilizadas do solo, causa o aumento e aceleração do escoamento superficial das águas pluviais e reduz a infiltração da água no solo, gerando diversos pontos de alagamentos. No município, por seu relevo em planície e sua localização litorânea, o sistema de drenagem é altamente vulnerável às

oscilações das marés, que causam graves cenários de inundações em períodos de chuvas intensas combinados com maré alta, conforme relatado por Silva Junior (2015).

3.2 Telhados verdes

3.2.1 Conceito e classificação

Também conhecidos como coberturas ou telhados vegetados, ou ainda genericamente como telhados ecológicos, os telhados verdes consistem na implantação de uma camada de substrato e vegetação sobre uma estrutura suporte adequada na cobertura plana ou inclinada das edificações. São estruturas instaladas no meio urbano principalmente devido à busca por técnicas mais sustentáveis, capazes de devolver parte da vegetação natural retirada com as novas construções do processo de urbanização. A retirada da vegetação natural de uma região ocasiona diversos problemas comuns aos meios urbanos, como alagamentos e inundações, piora da qualidade do ar e aumento das temperaturas ambientes, e os telhados verdes são umas das possíveis alternativas para amenizar esses impactos. Segundo Susca (2019), a técnica sustentável em questão é capaz de auxiliar na adaptação e na mitigação das mudanças climáticas e sua implementação, de acordo com Dimitrijević *et al.* (2016), é uma estratégia capaz de diminuir os efeitos das ilhas de calor, proporcionar conforto térmico para ocupantes das edificações e reduzir o consumo de energia, sendo uma técnica de resfriamento passivo, que impede a radiação solar recebida de atingir os pavimentos inferiores às coberturas das edificações.

O telhado verde é um dos tipos de telhados ecológicos, que de acordo com Rogers (2013), são coberturas que possuem o objetivo de contribuir com a sustentabilidade das edificações e com as interações com o meio ambiente, podendo ser constituído de diversos materiais e englobando diversos tipos de coberturas além das vegetadas, como telhados marrons, telhados frios, telhados azuis, telhados solares, entre outros. A adoção dos telhados ecológicos como uma técnica sustentável oferece diversos benefícios para a edificação e o ambiente em seu entorno, como redução do consumo de energia elétrica e consequente redução de custos, ganho de valor imobiliário, benefícios para a saúde, além de contribuir com a preservação do meio ambiente.

Shafique, Kim e Rafiq (2018) destacaram que os telhados verdes surgem como uma alternativa de grande potencial para atenuar os efeitos adversos da urbanização. A forma tradicional de implantação dos telhados verdes é composta por várias camadas, como descrito pelos autores e por Vijayaraghavan (2016), de acordo com a Figura 1. A primeira camada, mais profunda, consiste de uma membrana impermeável, geralmente de PEAD, que protege a laje de infiltrações em consequência da água da chuva. Acima da camada impermeável tem-se uma camada de isolamento, seguida por uma camada de proteção contra raízes, usada a depender da espessura do substrato e do tipo de vegetação. Acima dessas, está a camada drenante, que garante a remoção e armazenamento do excesso de água no telhado. Entre a camada drenante e o substrato, é colocado um filtro para impedir o entupimento pelos finos do solo. Por fim, acima do substrato, é colocada a vegetação componente do telhado verde, que deve ser preferencialmente nativa a região de implantação e sua escolha deve observar o clima local, o tipo de solo, a estrutura suporte escolhida e o tipo de manutenção adotada (SANTOS, 2016).

Figura 1 - Camadas de um telhado verde convencional.



Fonte: Traduzido de Vijayaraghavan (2016).

De acordo com Santos (2016), a elaboração de um projeto de telhado verde deve levar em consideração diversos fatores, como a capacidade da carga máxima da edificação, a manutenção, a seleção da vegetação, o substrato e o orçamento. Em estruturas já existentes onde planeja-se implementar a tecnologia, o tipo de telhado verde a ser escolhido deve possuir carga total capaz de ser suportada pela cobertura

existente. Quanto a sua classificação, os telhados verdes são divididos em três tipos mais comuns, descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos telhados verdes.

Parâmetros	Tipos de telhado verde		
	Extensivo	Semi-Intensivo	Intensivo
Manutenção	Pouca ou inexistente	Periodicamente	Grande frequência
Irrigação	Inexistente	Periodicamente	Regularmente
Retenção de águas pluviais	Baixa	Intermediária	Alta
Diversidade de plantas	Baixa	Intermediária	Alta
Altura das plantas	Pequeno porte (5 – 30 cm)	Médio porte (30 – 60 cm)	Portes diversos (> 30 cm)
Comunidade de Plantas	Musgo, <i>Sedum</i> , ervas e gramas	Gramas, ervas e arbustos	Gramado, arbustos e árvores
Profundidade do substrato	4 – 15 cm	10 – 50 cm	>10 – 200 cm
Peso saturado do solo	48,8 – 170 kg/m ²	170 – 244 kg/m ²	244 – 1467 kg/m ²
Custo	Baixo	Médio	Alto
Inclinação do telhado	Até 30°	Pequenas inclinações ou plano	
Uso/finalidade	Camada de proteção ecológica	Telhado verde sem visitação	Jardim de lazer/passeio

Fonte: Adaptado de Santos (2016) e Leonardo (2021).

3.2.2 Benefícios e desafios

Conforme Susca (2019) e Gomes (2019), os telhados verdes oferecem diversos benefícios ao meio urbano no qual é inserido, como melhorias na qualidade do ar, retenção de água como dispositivo de drenagem, mitigação das ilhas de calor e a redução de ruído, como também apresenta vantagens à própria edificação onde é implementado, como melhorias estéticas, acústicas e térmicas e redução de custos com energia elétrica.

Um dos benefícios obtidos com a implantação da técnica é a maior estabilidade térmica no ambiente tanto interno como externo. Conforme Besir e Cuce (2018), por sua composição de substrato e vegetação, o telhado verde possui a capacidade de dissipar o calor recebido com a radiação solar por radiação de ondas longas, da evapotranspiração e da fotossíntese. De acordo com Parizotto e Lamberts (2011), o substrato juntamente a vegetação conseguem absorver grandes quantidades de calor, além de retardar a transferência de calor do exterior para o interior, diminuindo a variação diária da temperatura. O isolamento reduz a perda de calor no período do inverno, entretanto, o sombreamento e a evapotranspiração da vegetação reduzem o

ganho de calor no verão. Os autores observaram uma diferença média de 4°C nas temperaturas máximas internas entre uma cobertura verde e um telhado convencional de cerâmica. As temperaturas do ar acima dos edifícios podem ser até 30°C mais baixas quando comparadas de um telhado convencional (WONG *et al.*, 2003). O estudo de Karachaliou, Santamouris e Pangalou (2016) relatou que a temperatura da superfície de um telhado verde intensivo e com grande variedade de plantas de baixa necessidade de irrigação chega a ser 15°C inferior à de um telhado convencional. Sun *et al.* (2013), ao comparar as reduções da temperatura superficial de telhados verdes em diferentes regiões, observaram em seus resultados que as regiões mais quentes e secas relataram máxima redução de temperatura na superfície das coberturas. Com a redução da temperatura do ar acima da cobertura das edificações, a instalação de telhados verdes em grande escala é capaz de amenizar o fenômeno das Ilhas de Calor Urbano (UHI), conforme cita em seus estudos Vijayaraghavan (2016). De acordo com Hathway e Sharples (2012), o processo de evapotranspiração das plantas consome energia solar e pode resfriar o ambiente circundante através da transpiração das plantas e evaporação da superfície de seus substratos.

Decorrente da redução da temperatura do ar, a diminuição do consumo de energia elétrica é outro benefício obtido com os telhados verdes. Karachaliou, Santamouris e Pangalou (2016) verificaram em seus experimentos que a diminuição do consumo de energia de um edifício com telhado verde durante o período de verão e inverno é muito significativa, a ponto de reduzir as cargas anuais de resfriamento de todo o edifício em 41,8 kWh/m²/ano para 33,8 kWh/m²/ano, o equivalente a uma redução de 19,1%. Quanto a energia gasta com aquecimento, a carga anual total é reduzida de 14,8 kWh/m²/ano para 13,1 kWh/m²/ano, correspondendo a 11,4%. Silva, Gomes e Silva (2016), a partir de uma pesquisa experimental e numérica realizada em um edifício com telhado verde de Lisboa, Portugal, relataram que a economia de energia com aquecimento e resfriamento a longo de um ano pode chegar a até 70%. Francis e Jensen (2017), em uma revisão sistemática dos benefícios dos telhados verdes, relataram que em 20 dos 41 estudos analisados confirmaram a redução do consumo anual de energia em até 70%. Saiz *et al.* (2006), em estudo em edifício residencial de Toronto, Canadá, afirmaram que a carga de refrigeração para a edificação foi reduzida em 25%, chegando a 60% no piso abaixo do telhado.

O desempenho hidrológico dos telhados verdes também oferecem benefícios de grande valia para o meio urbano. Segundo Santos *et al.* (2013), a estrutura

apresenta capacidade de retenção do volume total precipitado superior ao telhado convencional, reduzindo entre 15% e 30% o escoamento superficial, que será lançado no sistema de drenagem de forma distribuída no tempo. Mentens, Raes e Hermy (2005) afirmaram que esses valores dependem das características do telhado, como profundidade do substrato, inclinação, tipo de comunidade vegetal, além da intensidade das precipitações, possuindo maior escoamento aqueles com menores espessuras de substrato e mais inclinados. Persch (2019) analisou quatro telhados extensivos de 1 m², 3 m², 6 m² e 12 m² quanto à capacidade de redução do escoamento superficial. O telhado com área de 12 m² foi o de melhor efetividade na retenção e controle de escoamento, confirmando a vantagem de maiores telhados em armazenar e reter grandes volumes de águas e, conseqüentemente, na redução e no atraso do escoamento superficial. De acordo com Moraes *et al.* (2021), os telhados verdes são eficientes na gestão das águas pluviais urbanas, contribuindo na mitigação das inundações das cidades, e seu desempenho ainda é aumentado quando se faz uso de mais de uma técnica sustentável de gestão das águas pluviais, como a utilização de telhados verdes e pavimentos permeáveis.

A melhoria na qualidade do ar também é um ponto positivo associado ao uso dos telhados verdes. A vegetação presente na cobertura dos edifícios possui a capacidade de reter as partículas em suspensão e poluentes, reduzindo a carga poluidoras presente no ar (ROCHA, 2020). Screnski (2015) ratificou a eficácia na captura de gás carbônico em sistemas de telhados verdes extensivo, semi-intensivo e intensivo, relacionado com a emissão de gases em dois tipos de concretos divergentes. Estudo realizado por Getter *et al.* (2009) constatou que um sistema de telhados verdes extensivos, com espécies do gênero *Sedum* e substrato rico em matéria orgânica, conseguiu armazenar o carbono do ar numa taxa de 375 gC/m². Um estudo na cidade de Chicago, nos Estados Unidos, realizado por Yang, Yu e Gong (2008) demonstrou que um total de 1675 kg de poluentes do ar foram removidos por 19,8 ha da estrutura, podendo chegar a 2046,89 toneladas, se todos os telhados da cidade fossem cobertos por telhados verdes intensivos.

Há ainda diversas outras vantagens para áreas urbanas com o uso de telhados verdes. Galbrun e Scerri (2017) relataram, em experimentos com telhados verdes extensivos de 1 m², que a técnica é capaz de oferecer isolamento acústico para as edificações residenciais e sua eficiência pode variar de acordo com a densidade superficial, a espessura da camada de substrato e o tipo de camada de drenagem.

Outros benefícios são: melhoria estética do meio urbano e combate à poluição visual das cidades, gerando bem-estar na população (JOBIM, 2013). Williams *et al.* (2019) afirmaram que há evidências claras dos benefícios psicológicos oferecidos pelos telhados verdes, que variam de acordo com as características do telhado, da edificação, da cidade no qual é inserido, do ambiente físico e do clima social, bem como dependem das atividades e recursos individuais e da margem de adaptação. Segundo Ulrich *et al.* (1991), ao enxergar a natureza e a vegetação, benefícios a saúde, redução do estresse, redução na pressão arterial e liberação de tensões musculares são evidenciados na população.

Embora apresente diversas vantagens à infraestrutura e à dinâmica social urbanas, os telhados verdes encontram diversos desafios que dificultam sua implantação. Segundo Berardi, Ghaffarianhoseini e Ghaffarianhoseini (2014), as barreiras econômicas que dificultam a instalação dos telhados verdes são os altos custos de construção e de manutenção, especialmente com telhados verdes intensivos, a complexidade de construção, os riscos de falha e o alto custo para instalação em edifícios existentes com a necessidade de ajustes estruturais. No Brasil, ainda são pouco encontrados nos edifícios e residências, muitas vezes pelo desconhecimento da técnica. Henn e Cagliari (2016) afirmaram que tal dispositivo não é muito divulgado e nem implantado nas construções devido à falta de profissionais capacitados ou especializados na construção dessa cobertura.

Como evidenciado por Almeida, Brito e Santos (2018), os desafios técnicos, sociais e econômicos são fatores que geram resistência ao emprego da técnica, mesmo com a aceitação por parte da população do seu ganho ambiental. Os desafios podem estar associados a fatores como o desconhecimento da população sobre a forma de seu emprego, como também dos benefícios de seu uso, expectativas de custo elevado devido a contratação de engenheiros e arquitetos, resistência do mercado voltado para a venda e instalação de telhados convencionais, entre outros. Segundo os autores, a divulgação da técnica e de seus benefícios, a partir de diretrizes, da educação ambiental e de boas práticas, contribuiria para a ampliação de seu uso.

Um dos principais pontos questionáveis quanto a instalação dos telhados verdes é o seu custo quando comparado as coberturas convencionais. De acordo com Vittorino e Uchôa (2013), o custo de uma cobertura verde, ao considerar material e mão de obra para execução, é de R\$ 145,00 por m², enquanto uma laje exposta com

sistema de impermeabilização e sistema de ralos, custa R\$ 19,30 por m². Os custos com manutenção também são discrepantes, de R\$ 8,50 e R\$ 2,40 por m², para telhados verdes e laje convencional, respectivamente. Além disso, estudos realizados por Savi (2012) e Costa, Poletto e Ramme (2016) demonstraram que o alto custo com essas coberturas é dado pelo aumento no peso da estrutura suporte. No entanto, de acordo com Castleton *et al.* (2010), não são necessárias modificações estruturais adicionais para edifícios com laje de concreto armado ou deck de aço perfilado, uma vez que essas estruturas podem suportar 5–10 kN/m² de carga morta, valor que suporta um telhado verde com vegetação de até 80 cm.

3.2.3 Normas e legislações

Políticas e instrumentos de incentivo ao uso de práticas sustentáveis, como os telhados verdes, estão presentes em diversas localidades no mundo. Alguns países se destacam por apresentarem medidas governamentais bem definidas e aplicadas pela população. Conforme Lopes, Vitalli e Vecchia (2007), países como Alemanha, Holanda, Canadá e Áustria possuem regulamentação que incentivam a instalação de telhados verdes, através de iniciativas oficiais e de parcerias com empresas privadas que promovem políticas de preservação ambiental. A Alemanha foi o primeiro país a desenvolver padrões nacionais de telhado verde na década de 1970, com apoio em níveis nacional, regional e local. Mais de 80 cidades alemãs oferecem programas de incentivo de telhado verde e possuem cerca de 100 mil hectares de coberturas vegetais, mais de 15% de todo o seu território (RANGEL; ARANHA; SILVA, 2015).

De acordo com Kist (2015), a Dinamarca possui o objetivo de ser a primeira cidade do mundo livre da emissão de carbono em níveis de degradação para o meio ambiente até 2025 e, para isso, estão os incentivos aos telhados verdes, presentes em mais de 40.000 m² de coberturas no país. Na Holanda, a cidade de Amsterdam busca atingir um total de 800.000 m² de telhados verdes até 2030, enquanto na cidade de Rotterdam já existem mais de 200.000 m² da cobertura vegetada, além de uma campanha para reduzir 50% das emissões de gás carbônico. Toronto, no Canadá, foi a primeira cidade da América do Norte a ter lei municipal para exigir e controlar a implantação da tecnologia verde nas edificações comerciais, institucionais, condomínios residenciais e industriais. Na cidade, há mais de 196.000 m² de telhados verdes. Outros países, como EUA, Japão e Argentina, também possuem projetos para

a implantação da tecnologia, que fornecem aos proprietários descontos em impostos ou créditos para implantação da estrutura.

No Brasil, as legislações existentes que citam os telhados verdes incentivam sua instalação através das seguintes formas: obrigatoriedade, incentivos fiscais, selos de qualificação ambiental ou apresentação da tecnologia como uma das formas de compensação ambiental. O estado do Rio de Janeiro, com a Lei Estadual Nº 6.349 (RIO DE JANEIRO, 2012a), prevê a construção desta cobertura em prédios públicos, autarquias e fundações, do tipo extensivo ou intensivo, sendo considerada como área permeável para a contabilização do lote. A Lei Municipal Nº 5.840 (CANOAS, 2014) possibilita a todos os prédios do município de Canoas (RS) prever a instalação de sistema de telhado verde sobre suas coberturas com a finalidade de compensar parcialmente a construção sobre Área Livre Obrigatória mínima necessária para o terreno. De forma semelhante, a Lei Estadual Nº 6.888 (PIAUÍ, 2016) prevê o emprego de técnicas sustentáveis, inclusive telhado verde, em todas as construções. A Lei Estadual Nº 10.047 (PARAÍBA, 2013) exige que os projetos de edificações com mais de três pavimentos, residenciais ou não, prevejam a construção de coberturas verdes. No estado de Santa Catarina, a Lei Estadual Nº 14.243 (SANTA CATARINA, 2007) promove a instalação da técnica em no mínimo 40% da área total do lote como forma de compensação ambiental, para amenizar as ilhas de calor, poluição atmosférica e consumo de energia elétrica.

O município de Porto Alegre, na Lei Complementar Nº 434 (PORTO ALEGRE, 1999), com acréscimo de redação dada pela Lei Complementar Nº 646 (PORTO ALEGRE, 2010), prevê o uso de terraços e coberturas vegetadas em pelo menos o dobro da área livre não atendida no terreno, como alternativa para a área livre obrigatória de terrenos de edificações. O Decreto Municipal Nº 55.994 (SÃO PAULO, 2015) regulamenta o Termo de Compromisso Ambiental, no qual admite a conversão da compensação em obras e serviços, jardins verticais e coberturas verdes, mediante decisão fundamentada do Colegiado da Câmara Técnica de Compensação Ambiental (CTCA). Outros municípios que apresentam incentivo da técnica são Jundiaí (SP), Curitiba (PR), Governador Valadares (MG), Blumenau (SC) e Niterói (RJ). Em Recife, a Lei Municipal Nº 18.112 (RECIFE, 2015) obriga a implantação de telhados verdes em projetos de edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não habitacionais com mais de 400 m² de área de coberta. Esta Lei estabelece ainda que em lotes com área superior a 500 m² e com área

impermeabilizada superior a 25% da área total do lote deverão ser executados reservatórios de águas pluviais, que podem ser de acumulação ou de retenção. Em Guarulhos (SP), a Lei Municipal Nº 7.031 (GUARULHOS, 2012) determina que os projetos de edificações, residenciais ou não, com mais de três pavimentos, a partir da data de promulgação, deverão instalar o telhado verde.

Salvador (BA), Goiânia (GO) e Rio de Janeiro (RJ) oferecem incentivos fiscais a partir da concessão de selos ambientais. O Rio de Janeiro, com o Decreto Municipal Nº 35.745 (RIO DE JANEIRO, 2012b), criou o programa QUALIVERDE, que fornece certificação para empreendimentos sustentáveis, incluído o uso de telhados verdes. Em Salvador (BA), o Decreto Nº 29.100 (SALVADOR, 2017) cria o Programa de Certificação Sustentável para edificações denominado “IPTU VERDE”, com o objetivo de incentivar empreendimentos que contemplem ações e práticas sustentáveis destinadas à redução do consumo de recursos naturais e redução dos impactos ambientais. A Lei Municipal Nº 6.793 (GUARULHOS, 2010) instaura o fornecimento de descontos de 3% no IPTU para os imóveis que adotarem medidas sustentáveis, incluindo o telhado verde. Macedo (2022) realizou um levantamento sobre os municípios brasileiros que promovem a instalação de telhados verdes e outras técnicas sustentáveis a partir de descontos no IPTU das edificações, que podem variar de 3% a até 63%, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Percentuais de descontos do IPTU verde de acordo com municípios brasileiros.

Município (Estado)	Legislação/ano	Desconto
Colatina (ES)	Lei Nº 4.537/1999	40% a 50%
Rio de Janeiro (RJ)	LC Nº 482/2002	10% a 20%
São Carlos (SP)	Lei Nº 13.692/2005	1% a 4%
Americana (SP)	Lei Nº 4.448/2007	10% a 20%
Campos do Jordão (SP)	Lei Nº 3.157/2008	10% a 50%
Natal (RN)	Lei Nº 301/2009	até 50%
Barretos (SP)	Lei Complementar Nº122/2009	até 10%
Ipatinga (MG)	Lei Nº 2.646/2009	3% a 5 %
São Vicente (SP)	Lei Complementar Nº 634/2010	0,3% a 1%
Guarulhos (SP)	Lei Nº 6.793/2010	3% a 5%
Sorocaba (SP)	Lei Nº 9.571 /2011	10%
Goiana (GO)	Lei Complementar Nº 235/2012	2% a 27%
Cabo Frio (RJ)	Lei Nº 2.443/2012	5% a 63%
Florianópolis (SC)	Decreto Nº12.608/2014	5%
Seropédica (RJ)	Lei Nº 526/2014	até 15%
Maringá (PR)	Lei Nº 9.860/2014	3% a 20%
Santos (SP)	Lei Complementar Nº 913/2015	1,5% a 10%
Vitória da Conquista (BA)	Lei Nº 2.157/2017	10%
Salvador (BA)	Decreto Nº 29.100/2017	10%
Distrito Federal	Lei Nº 5.965/2017	2% a 15%
Mauá (SP)	Lei Nº 5.199 /2017	1% a 20%
Araraquara (SP)	Lei Complementar Nº889/2018	10% a 40%
Caruaru (PE)	Lei Complementar Nº 62 /2018	10%
Porto Velho (RO)	Lei Complementar Nº 759/2019	4% a 20%
Balneário Camboriú (SC)	Lei Nº 4.303/2019	2% a 6%
Tietê (SP)	Lei Nº 3.730/2019	10% a 50%
Teresina (PI)	Lei Complementar Nº 5.465/2019	5% a 20%

Fonte: Macedo (2022).

3.2.3.1 NBR 15.575-1/2013

A NBR 15.575-1 (ABNT, 2013a) estabelece requisitos aos sistemas que compõem edificações habitacionais, de até cinco pavimentos, independentemente dos seus materiais constituintes e do sistema construtivo utilizado, quanto aos seus comportamentos em uso. A norma distingue requisitos de desempenho para duas épocas do ano, verão e inverno, de forma que as condições térmicas no interior do edifício habitacional sejam melhores ou iguais às do ambiente externo, à sombra.

Na análise do desempenho térmico do edifício para atendimento das exigências dos usuários, são considerados três níveis de desempenho, são eles: o requisito mínimo de desempenho (M), que deve ser considerado e atendido em todos os casos; o intermediário (I) e superior (S), sendo esses dois últimos mais recomendados para o conforto dos usuários. Esses níveis são empregados de acordo com a classificação da zona bioclimática, definida na NBR 15.220-3 (ABNT, 2005), que divide o país em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima. Nas Tabelas 3 e 4 estão presentes os critérios de avaliação para as condições de verão e

de inverno, respectivamente. No verão, são analisados os valores máximos diários de temperatura do ar no interior dos recintos de permanência prolongada, sem a presença de fontes internas de calor, que devem ser sempre inferiores ao indicado na Tabela 3. No inverno, são analisados os valores mínimos diários da temperatura do ar no interior de recintos de permanência prolongada, como salas e dormitórios, em um dia típico de inverno, que devem ser sempre maiores do que o indicado na Tabela 4. Pode-se observar que nas zonas bioclimáticas 6, 7 e 8 não é necessário realizar a avaliação de desempenho térmico para o inverno, devido as características mais quentes dessas regiões.

Tabela 3 - Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.

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

$T_{i,máx.}$ = valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius.

$T_{e,máx.}$ = valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius.

$T_{e,mín.}$ = valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius.

M = requisito mínimo de desempenho.

I = requisito intermediário de desempenho.

S = requisito superior de desempenho.,

Fonte: ABNT NBR 15.575-1 (2013a).

Tabela 4 - Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno.

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas bioclimáticas 1 a 5	Zonas bioclimáticas 6, 7 e 8
M	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 3^{\circ}\text{C})$	Nestas zonas, este critério não precisa ser verificado
I	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 5^{\circ}\text{C})$	
S	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 7^{\circ}\text{C})$	

$T_{i,máx.}$ = valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius.

$T_{e,máx.}$ = valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius.

$T_{e,mín.}$ = valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius.

M = requisito mínimo de desempenho.

I = requisito intermediário de desempenho.

S = requisito superior de desempenho.

Fonte: ABNT NBR 15.575-1 (2013a).

3.3 Telhados ecológicos com materiais reutilizáveis e de baixo custo

3.3.1 Reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é de extrema importância do ponto de vista da segurança sanitária e possui relação direta com as mudanças climáticas. A eficiência dos processos de gestão dos resíduos, como coleta, transporte

e descarte está diretamente relacionada à redução das emissões de gases de efeito estufa. Melhorias nesses processos podem ser alcançadas com a aprovação e implementação efetivas de políticas de gestão de resíduos (COSTA; DIAS, 2020). No Brasil a gestão dos resíduos sólidos está fundamentada na Lei Federal Nº 11.445 (BRASIL, 2007), que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, como abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto, sistemas de drenagem de águas pluviais, limpeza urbana e gestão de resíduos sólido. Dentre esses temas, a gestão dos resíduos sólidos urbanos é de grande importância, principalmente devido ao aumento na sua geração pelos padrões de consumo da sociedade.

Em 2010, foi criada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) a partir da Lei Nº 12.305 (BRASIL, 2010), que visa, entre outros objetivos, a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final adequada dos resíduos sólidos, como o também incentivo à indústria da reciclagem, incentivando o uso de matérias-primas recicláveis. De acordo com Mannarino, Ferreira e Gandolla (2016), a PNRS representa um grande marco para o país, pois pela primeira vez foram introduzidas na legislação nacional diretrizes específicas para a gestão integrada de resíduos sólidos envolvendo as responsabilidades dos geradores e do poder público, além dos instrumentos econômicos aplicáveis.

Apesar da criação da PNRS, de acordo com Costa e Dias (2020) e Ghesla *et al.* (2018), a otimização na gestão de resíduos ainda não é uma realidade, e um dos motivos é que as regiões brasileiras são bastante diferentes no que diz respeito à capacidade de investimento. Desde a aprovação da política em 2010, identifica-se uma baixa evolução nos quatro processos básicos de gestão (geração, coleta, coleta seletiva e disposição final de resíduos). Os impactos de uma gestão ineficiente oferecem danos irreparáveis ao meio ambiente, incluindo a emissão descontrolada de gases como o metano (CH₄), um dos principais responsáveis pelo aquecimento global. Costa e Dias (2020) relataram a baixa aplicação da Lei Nº 12.305 na Região Nordeste, materializada na baixa efetividade nos processos, com o segundo menor índice de cobertura de coleta de RSU do país, de 81,5% (ABRELPE, 2021).

De acordo com a Abrelpe (2021), a geração de RSU no Brasil aumentou de 66,7 milhões para 82,5 milhões de toneladas por ano entre 2010 e 2022, o equivalente a um acréscimo de 23,7%, enquanto a geração per capita aumentou de 348 kg/ano para 390 kg/ano. A quantidade de resíduos coletados cresceu em todas as regiões do país e, nesse período, passou de 58,8 milhões de toneladas para 76,1 milhões de

toneladas, enquanto a cobertura de coleta passou de 88% para 92,2%. No Brasil, a maior parte dos RSU coletados segue para aterros sanitários, com aumento de 10 milhões de toneladas em uma década, passando de 33 milhões de toneladas por ano para 43 milhões de toneladas. Entretanto, a quantidade de resíduos que segue para unidades inadequadas, como lixões e aterros controlados, passou de 25 milhões de toneladas por ano para pouco mais 29 milhões de toneladas por ano.

De acordo com Dauvergne (2018), o desenvolvimento industrial tem contribuído significativamente para a difusão de resíduos plásticos como fontes de poluição, além de prejudicar o meio com as propriedades desse componente, como longevidade, toxicidade e propensão a se desintegrar em microplásticos, agregando mais complexidade aos processos de gestão de RSU. Um exemplar desse material que causa bastante impacto no meio ambiente devido às suas características são as garrafas de Politereftalato de Etileno (PET), um polímero termoplástico da família dos poliésteres, formado pela reação do Ácido Tereftálico (PTA) e Monoetilenoglicol (MEG). Segundo Rocha (2020), por suas particularidades, as embalagens PET têm causado um problema grave com seus descartes após uso, sendo muitas vezes destinadas aos aterros sanitários e/ou aos mananciais hídricos, levando séculos para se decompor.

A Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2019) informa que em 2019, de um descarte aproximado de 565.455 toneladas de PET pela população, apenas 55% foram recicladas, o equivalente a 311 mil. A grande dificuldade para a ampliação da reciclagem do PET no Brasil está no sistema de coleta do RSU, com empresas de reciclagem que trabalham com ociosidade superior a 30%. De acordo com a associação, o Brasil ainda possui posição de destaque na reciclagem das embalagens, com desempenho superior aos Estados Unidos e diversos países da União Europeia e Ásia, sendo um dos melhores exemplos de economia circular.

3.3.2 Utilização de materiais reutilizáveis nos telhados ecológicos

A construção de ambientes sustentáveis a partir de métodos construtivos ecológicos, a utilização de artigos recicláveis e a implantação de aparatos de reaproveitamento ou de reflexão de raios solares estão cada vez mais populares e podem reduzir de maneira significativa os impactos ambientais (BARTH *et al.*, 2017). Pesquisas sobre telhados verdes constituídos por materiais reaproveitados ou

reciclados e de baixo custo ainda são recentes na literatura. A ideia de conceber telhados verdes de baixo custo envolve primeiramente a escolha de materiais que possuam conjuntamente as características exigidas por cada uma das camadas necessárias, como impermeabilização e rigidez ou filtração e drenagem, e a facilidade de obtenção, tanto em disponibilidade, como em custo.

A Tabela 5 mostra algumas pesquisas sobre telhados verdes com garrafas PET e embalagens Tetra Pak® como estruturas suporte. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2019), o PET possui alta resistência mecânica estrutural e de impacto e boa resistência química, suportando o contato com agentes agressivos, além ser excelente barreira para gases e odores. Já a embalagem Tetra Pak® ao ser usada como suporte para a vegetação e o substrato, impede a transferência de calor para o interior da cobertura pelo processo de radiação devido a sua camada de alumínio, servindo como uma manta térmica ecológica e de menor custo (FERNANDES; DANIELEWICZ; SECCO, 2014). Essas características são adequadas para as especificações necessárias de uma estrutura suporte de telhado verde, que requer tanto a resistência de sua estrutura, como a capacidade térmica de dificultar as trocas de calor. Ambos os materiais são facilmente encontrados como descarte do consumo doméstico brasileiro.

Para Visentin, Neckel e Breda (2015), a reutilização das garrafas PET oferece um ambiente adequado para o cultivo de plantas de pequeno porte e de raízes pouco profundas, além de adequar-se à formatação necessária, por ser fabricada em material maleável que permite vários tipos de cortes e montagens. Nunes *et al.* (2009) destacaram que o uso da Tetra Pak® em construções sustentáveis, além de afirmar a presença do material diariamente nas embalagens dos produtos alimentícios de 94,7% dos lares brasileiros. Com o grande volume descartado, as caixas de Tetra Pak® tornam-se um grande problema ambiental, fato ainda agravado por sua composição multifoliada, que dificulta os processos de decomposição, reciclagem e reprocessamento.

Tabela 5 - Pesquisas que usam garrafas PET e embalagens Tetra Pak em telhados verdes.

Fonte de informação	Metodologia para emprego da garrafa PET
Trindade e Martini (2009)	Utilização de 21 caixas de leite abertas e desinfetadas unidas com fita adesiva para a confecção de subcoberturas fixadas em uma estrutura de madeira, abaixo de telhas de cimento-amianto. Foram realizadas medições de temperatura acima da telha e baixo da subcobertura.
Pereira Júnior e Silva (2011)	Garrafas PET com mudas de batata doce (<i>Ipomoea batatas</i>) e amendoim (<i>Arachis hypogaea</i> L) dispostas em fileiras longitudinais, onde a primeira garrafa tinha apenas a parte posterior cortada, as do centro tinham a parte frontal e posterior cortadas, e a última apenas a parte frontal. Foi feita uma abertura no centro da garrafa para o acondicionamento do substrato e da vegetação, porém apenas em três sentidos, deixando sua aba, sendo unidas umas às outras por meio de rebite e arames.
Cortés e Castillo (2011)	Utilização de garrafas PET de 3L, dispostas no sentido longitudinal, com três aberturas na parte lateral medindo 7 cm x 10 cm servindo como recipiente para o substrato e a vegetação, e três perfurações no bocal da garrafa para o funcionamento no sistema de drenagem. As espécies utilizadas foram a alface crespa (<i>Lactuca sativa</i>) com rabanete (<i>Rhaphanus sativus</i>), cebola longa (<i>Allium fistulosum</i>), coentro (<i>Coriandrum sativum</i>) com alface crespa, espinafre (<i>Spinaca oleracea</i>) e salsa (<i>Petroselinum crispum</i>).
Funfgelt <i>et al.</i> (2012)	Garrafas PET com gramíneas e crassuláceas dispostas no sentido longitudinal cortadas ao meio, perfuradas na base para drenagem, unidas por meio do bocal em um semicírculo no fundo da mesma. Foram fixadas por meio de uma malha de fios de nylon presa nas extremidades.
Jobim (2013)	Garrafas PET de 2 L, cortadas ao meio, com furos em toda a sua circunferência a 3 cm da base para drenagem. Foram dispostas de forma vertical e intercaladas por um espaço vazio e no interior havia camadas com: argila expandida, manta geotêxtil, areia, substrato e a vegetação de Calanchôe (<i>Kalanchoe blossfeldiana</i>).
Panziera <i>et al.</i> (2015)	Anéis de garrafas PET de 2,0 e 2,5 L, com 5 cm de altura no sentido vertical, com a finalidade de armazenar água da chuva e servir como suporte para o substrato e a vegetação de grama do gênero <i>Axonopus compressus</i> , ou por Grama-São-Carlos.
Martins e Pinto (2016)	Utilização de garrafas PET no sentido vertical medindo 7 cm de altura. Na parte inferior continham manta geotêxtil do tipo <i>Bidim</i> , seguidos pelo substrato e vegetação de grama esmeralda.
Fensterseifer <i>et al</i> (2017)	Aplicação de embalagens Tetra Pak® com medidas de 20x7x7 cm e tampa tipo rosca como módulos de suporte para o telhado verde. As garrafas foram dispostas longitudinalmente, agrupadas em cinco unidades e interligadas pela abertura da tampa, com a finalidade de drenar a água. As arestas recortadas foram forradas com manta geotêxtil e as embalagens fixadas entre si por abraçadeiras plásticas.
Altóe <i>et al</i> (2019)	Módulos para suporte de telhados verde confeccionados com caixas Tetra Pak® com recorte de uma das fases de maior dimensão e abertura circular na parte inferior da face lateral para união e confecção de um sistema de drenagem utilizando as aberturas das tampas rosqueáveis. Os módulos foram forrados por manta geotêxtil.
Rocha (2020)	Utilização de garrafas PET de 2L cortadas longitudinalmente como módulo suporte de telhados verdes ecológicos. As garrafas foram perfuradas na base para a drenagem e unidas por meio de grampos metálicos localizados em furos nas bordas laterais das garrafas.
Gonçalves <i>et al</i> (2021)	Telhado verde com dimensão de 1x1x0,1m construído com camada de drenagem oriunda de material reutilizado (Polietileno Tereftalato - PET) sobre telhas de fibrocimento impermeabilizadas, camada filtrante, substrato e vegetação. A camada de drenagem foi formada por 100 fundos de garrafa PET com 4 cm de espessura, cortadas longitudinalmente.

Fonte: Adaptado de Rocha (2020) e Leonardo (2021).

3.4 Pesquisas desenvolvidas na UFPE relacionadas aos telhados ecológicos

O grupo de pesquisa de telhados ecológicos do Grupo de Recursos Hídricos, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPE vem desenvolvendo diversos estudos sobre o tema, que abordam análises de desempenho térmico, capacidade de retenção hídrica e qualidade da água escoada dos telhados ecológicos. Na pesquisa de Rocha (2020) foi desenvolvido um telhado verde ecológico de baixo custo com emprego de garrafas PET e vegetação *Kalanchoe laetivirens* com a finalidade de avaliar seu desempenho térmico no clima semiárido da cidade de Caruaru-PE. As médias mensais do telhado ecológico foram inferiores às do telhado convencional de laje para todo período analisado. Observou-se redução na amplitude térmica do telhado verde ecológico em até 3°C nos horários mais quentes do dia.

Leonardo (2021) avaliou o desempenho térmico de um telhado verde e três tipos de telhados ecológicos utilizando embalagens Tetra Pak e garrafas PET como materiais de reutilização na comparação com uma cobertura convencional. O telhado verde apresentou as menores temperaturas no interior do ambiente e as menores amplitudes térmicas, enquanto o telhado convencional apresentou os maiores valores de temperatura. Já os três telhados ecológicos implantados apresentaram desempenhos semelhantes entre si, com uma variação da temperatura diária intermediária às outras coberturas. Na Tabela 6 apresentam-se de forma sucinta e cronológica algumas publicações que mostram a evolução do tema até os dias atuais.

Tabela 6 - Pesquisas em telhados verdes e ecológicos realizadas na UFPE.

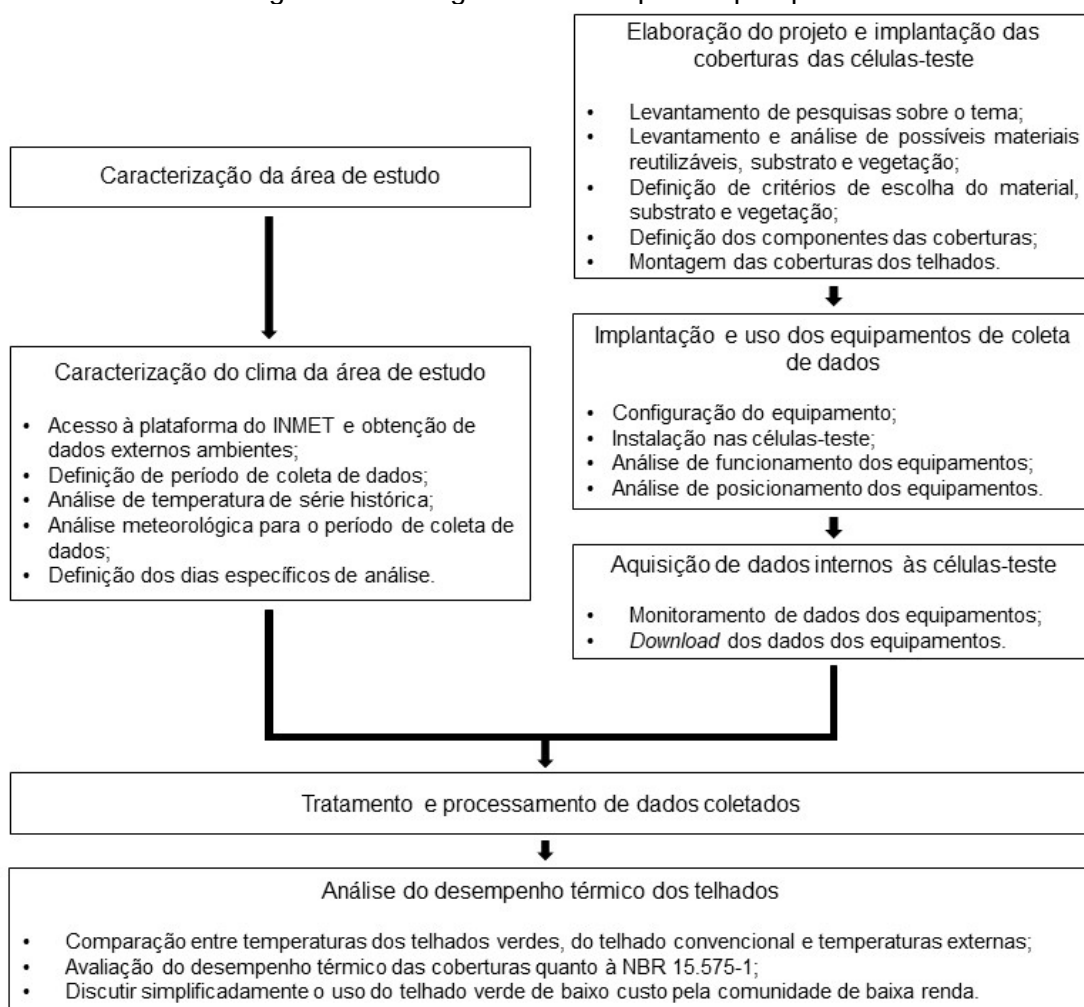
Fonte de informação	Título	Conclusões
Santos <i>et al.</i> (2009)	Determinação da utilidade do uso de telhado verde no Agreste Pernambucano	Foi implantado um sistema de captação e armazenamento de água para análises físico-químicas e microbiológicas da água coletada para investigação sobre seu reuso. Verificou-se a necessidade de tecnologia viável econômica e tecnicamente para o ganho de conforto térmico.
Santos (2011)	Balanço hídrico em teto com cobertura vegetal no semiárido pernambucano	Foi implantado um sistema de simulação de chuvas e realizada simulação numérica com Hydrus. Observou-se que os telhados verdes possuem capacidade de retenção maior em precipitações de menor intensidade.
Silva (2017)	Tecnologia alternativa em drenagem urbana: telhado verde	Os telhados verdes apresentaram-se como alternativas para minimização dos problemas decorrentes de alagamentos, contribuindo para o melhor desempenho dos sistemas de drenagem.
Santos (2016)	Desempenho térmico de telhados verdes no agreste pernambucano	Nos horários com maiores temperaturas, o telhado verde diminuiu a temperatura ambiente se comparado a um telhado convencional, diminuindo 4,95°C em relação ao valor de pico da temperatura externa.
Rocha (2020)	Desempenho térmico de telhado verde ecológico de baixo custo em clima semiárido	Primeiro uso do telhado verde com PET do grupo de pesquisa da UFPE. A cobertura apresentou melhor desempenho para a atenuação térmica nos horários de pico máximo de temperatura e amplitude térmica até 5,9°C a menos que a externa.
Leonardo (2021)	Desempenho de telhados ecológicos em área urbana	Uso de garrafas PET e embalagens Tetra Pak. Observou-se que o telhado verde de referência atingiu as menores temperaturas e menores variações térmicas em relação aos ecológicos.
Macedo (2022)	Telhados ecológicos: avaliação do desempenho térmico e hidrológico em clima tropical úmido	Os telhados ecológicos funcionaram como amortecedores de temperatura interna de ambientes e contribuíram para a retenção hídrica de água de chuva.

Fonte: Adaptado de Leonardo (2021).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão descritas as etapas executadas para a elaboração da pesquisa, desde a montagem dos telhados, até a obtenção dos resultados. No fluxograma, presente na Figura 2, está um resumo dos processos de desenvolvimento do estudo realizado.

Figura 2 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



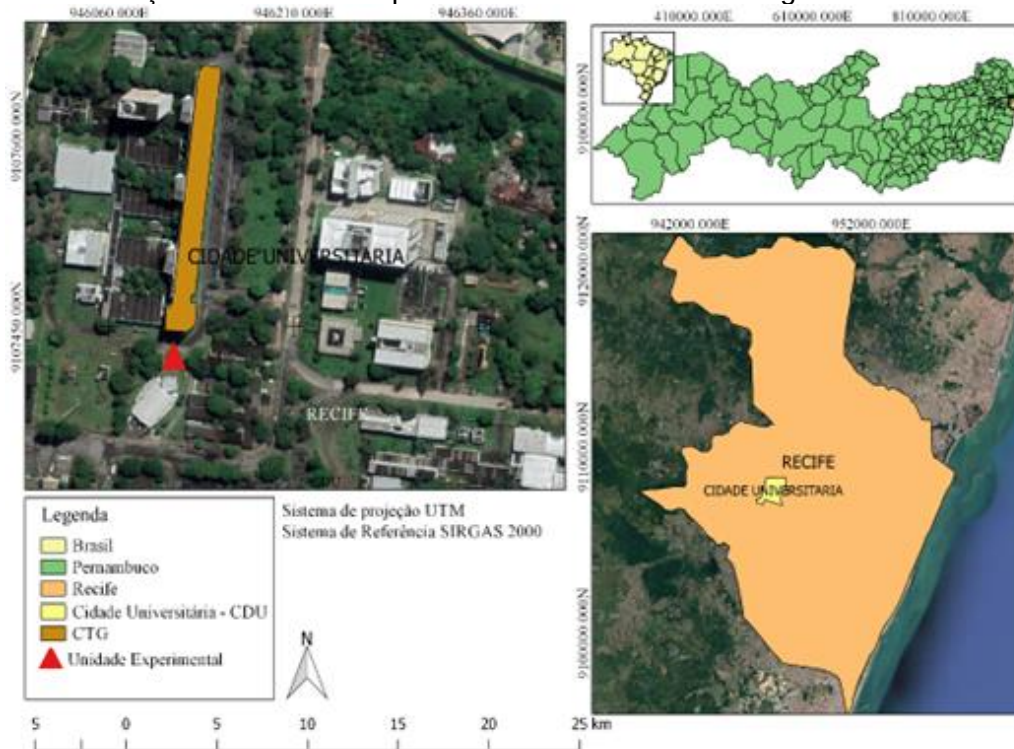
Fonte: Autor.

4.1 Área de estudo

Os experimentos realizados nessa pesquisa foram desenvolvidos nas células-teste (CT) da Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife (UETER), no *campus* Recife da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). As CTs foram construídas ao lado do Laboratório de Hidráulica do Centro de Tecnologia e

Geociências (CTG) da UFPE, nas coordenadas 8° 03' 16" Sul e 34° 57' 17" Oeste (Figura 3).

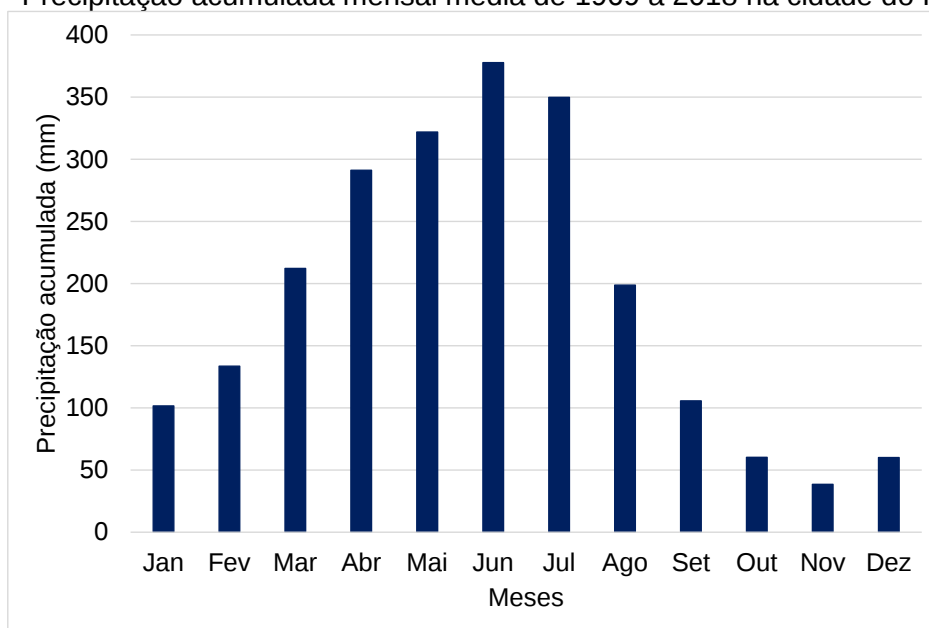
Figura 3 - Localização da Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife- UETER.



Fonte: Autor.

A cidade do Recife, com área de 218,843 km², é limitada ao norte pelas cidades de Olinda e Paulista, ao sul pelo município de Jaboatão dos Guararapes e ao oeste por São Lourenço da Mata e Camaragibe. O clima litorâneo quente e úmido da cidade é o As', de acordo com a classificação climática de Köppen, caracterizado por um clima tropical com estação chuvosa no inverno (ALVARES *et al.*, 2013). Esse clima litorâneo apresenta um período chuvoso concentrado entre abril e julho, e intenso período de seca na primavera, entre os meses de setembro e dezembro. Na Figura 4 é possível observar as precipitações acumuladas mensais médias obtidas a partir da série histórica diária entre os anos de 1969 e 2018, da estação pluviométrica do Recife – Curado (código 834007), disponibilizada na plataforma Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O município possui temperatura do ar e umidade relativa do ar médias de 25,5°C e 79,8%, respectivamente, de acordo com estação meteorológica (código 82900) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Figura 4 - Precipitação acumulada mensal média de 1969 a 2018 na cidade do Recife-PE.



Fonte dos dados: Estação pluviométrica 834007 (ANA,2021).

4.2 Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife (UETER)

4.2.1 Descrição das CTs existentes

Nos experimentos foram utilizadas três dos cinco protótipos existentes na UETER. As estruturas foram construídas entre 2016 e 2017 para os experimentos realizados no estudo de Macedo (2022), no âmbito do grupo de pesquisa sobre telhados ecológicos da UFPE, que analisou o desempenho térmico e hidrológico de telhados ecológicos verde e marrom em clima tropical úmido. De acordo com Macedo (2022), cada protótipo da UETER foi construído com paredes de alvenaria de tijolos cerâmicos e cobertura de laje pré-moldada de bloco cerâmico, com 1,30 m x 1,30 m de medidas externas, 1 m² de área útil e altura de 2,75 m, separados entre si pela distância de 1,00 m (Figura 5), de forma a permitir a circulação de ar entre eles e evitar o compartilhamento de paredes e a consequente transferência de calor. Os referidos protótipos possuem pé direito de 1,80 m, laje de 0,50 m de espessura e 0,50 m de platibanda. Na cobertura de cada protótipo há laje impermeabilizada que serve de base para o estudo, que foi nomeada como célula-teste. Assim os protótipos são iguais e diferem entre si sobre o tipo de arranjo colocado sobre a célula-teste (CT).

Conforme apresentado por Macedo (2022), cada CT possui superfície rebocada, com contrapiso, além possuir tubulação de drenagem para escoamento da água da chuva. No acesso ao interior dos protótipos, foram utilizados portões de aço

vedados na metade superior, e telados com esquadria aberta na parte inferior, de forma a permitir a circulação de vento no interior do ambiente.

Figura 5 - Protótipos da UETER.



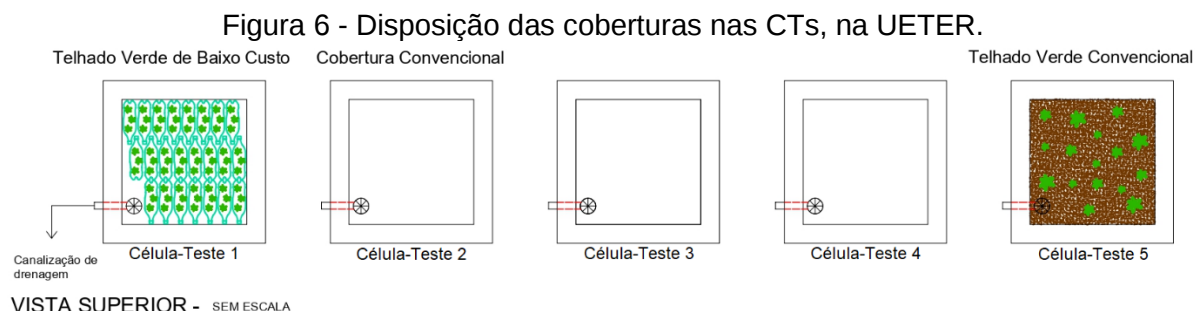
Fonte: Autor.

Após sua construção, no andamento dos projetos iniciais de Macedo (2022), foram realizados procedimentos para impermeabilização das lajes, com a aplicação do aditivo Vedacit na argamassa e do impermeabilizante Sika Top-100, um impermeabilizante à base de cimento, areias e resina acrílica. Testes de estanqueidade foram executados de acordo com a NBR 15.575-3 (ABNT, 2013b), que dispõe sobre o desempenho de edificações habitacionais. O teste foi realizado com a análise da face interna da cobertura que, submetida a uma lâmina de água de 10 mm por, no mínimo, 72 horas, deve permanecer seca, assim como o encontro entre as paredes e os pisos adjacentes. Após a verificação de inexistência de vazamentos, a laje tornou-se apta para receber os diferentes tipos de cobertura investigados.

4.2.2 Cobertura das CTs

Os experimentos foram realizados em três tipos de coberturas distintas: um telhado verde convencional, um telhado verde com materiais de baixo custo e uma cobertura convencional (de laje pré-moldada, sem substrato e vegetação) nas posições mostradas no arranjo da Figura 6. Essa configuração foi baseada na utilizada por Rocha (2020), com o intuito de verificar o desempenho térmico dos telhados

verdes convencional e de baixo custo sob uma nova perspectiva no clima tropical úmido do Recife - PE, uma vez que a autora realizou seu estudo com base na análise de telhados convencionais e de baixo custo na cidade de Caruaru, na região semiárida de Pernambuco.



Fonte: Autor.

4.2.2.1 Vegetação e substrato

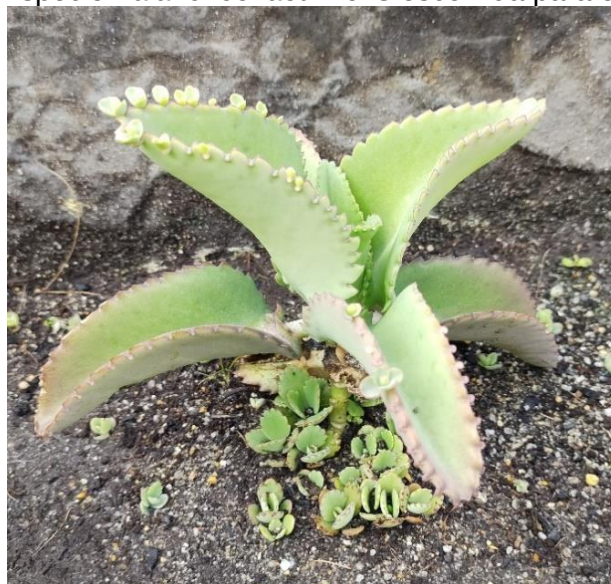
As vegetações mais utilizadas em estudos sobre telhados verdes são gramíneas, cactos, suculentas e hortaliças, de acordo com Dvorak e Volder (2010). Os autores afirmam que o gênero *Sedum*, da família *Crassulaceae*, é um dos mais investigados pois possuem sistemas radiculares rasos, capacidade de usar a água de forma eficiente e por serem capazes de tolerar as condições extremas encontradas nos telhados, podendo tolerar de um a quatro meses sem chuvas. De acordo com Butler e Orians (2011), tal gênero é uma das escolhas mais adequadas e populares, por ser extremamente tolerante às condições de uma cobertura, com bom desenvolvimento mesmo em déficit hídrico e forte exposição ao sol, sendo capaz de reduzir o pico de temperatura do solo e aumentar o desempenho de outras espécies que possam ser cultivadas em conjunto. De acordo com Emilsson e Rolf (2005), as espécies da família *Crassulaceae*, popularmente conhecidas como suculentas, são capazes de resistir a longos períodos sem água, por meio de adaptações bioquímicas e morfológicas, uma vez que suas estruturas permitem armazenar grandes quantidades de fluido, mesmo em substrato simples com pouca umidade.

A vegetação utilizada nos telhados foi escolhida levando-se em consideração os mesmos critérios definidos na pesquisa realizada por Rocha (2020), visando comparar os resultados obtidos em ambas as pesquisas, e avaliar o desempenho em diferentes climas (semiárido e tropical úmido), já que os protótipos têm as mesmas características construtivas. Assim sendo, para escolha da vegetação levou-se em

consideração: facilidade de manutenção e adaptação em elevadas temperaturas e em situações de escassez hídrica; resistência à insolação direta diariamente; baixo custo de manutenção; facilidade de reprodução e propagação de mudas; e possibilidade de retorno socioeconômico com sua comercialização. Tais características conferem resistência suficiente para adaptação ao clima semiárido e, consequentemente ao clima do município do Recife.

Diante do exposto, optou-se pelo uso da espécie *Kalanchoe laetivirens* (Figura 7), popularmente conhecida como Aranto ou “Mãe de Milhares”, uma espécie comum de suculenta caracterizada por seu potencial de naturalização. Esse comportamento ocorre devido ao grande número de mudas que crescem em suas folhas e se alastram em seus próprios vasos ou próximo ao local onde a planta-mãe cresce, conforme Gutiérrez, López-Pujol e Gómez-Bellver (2019), que afirmam a observação de várias mudas da espécie em telhados de Santa Clara, em Cuba. Segundo Almeida e Almeida (2018), a *Kalanchoe* é uma espécie não embrionária (adventícia), cujas células já diferenciadas de um ramo podem sofrer desdiferenciação, fazendo com que uma célula madura (célula viva) contendo o núcleo origine uma planta inteira, voltando a se dividir e originando novos órgãos sem origem embrionária (Figura 8).

Figura 7 - Espécie *Kalanchoe laetivirens* escolhida para experimento



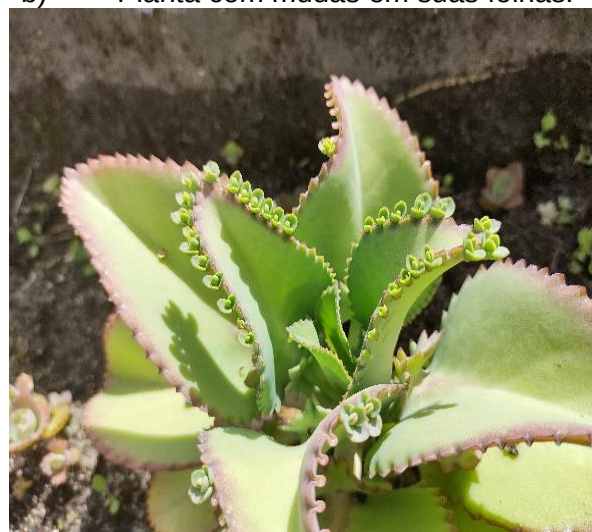
Fonte: Autor.

Figura 8 - Espécie *Kalanchoe laetivirens* com mudas.

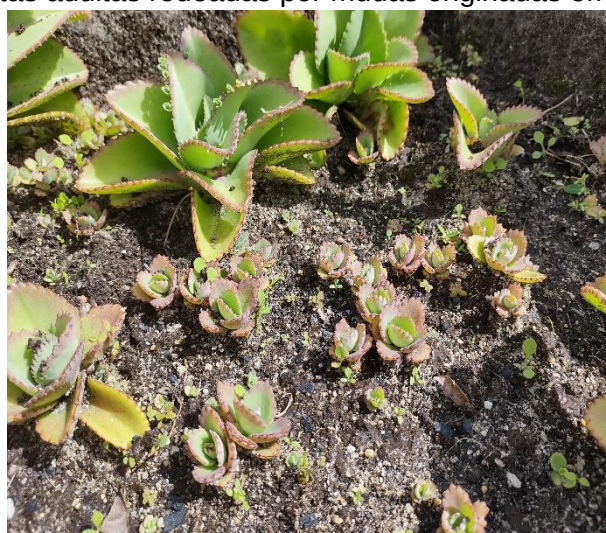
a) Mudras retiradas das folhas.



b) Planta com mudas em suas folhas.



c) Plantas adultas rodeadas por mudas originadas em suas folhas.



Fonte: Autor.

De acordo com o Terral (2022), a *Kalanchoe laetivirens* é de fácil cultivo e fácil multiplicação, já que nas bordas das folhas há uma grande quantidade de mudas, que chegam a ter pequenas folhas e algumas pequenas raízes. Essas mudas vão se soltando e caindo no substrato, onde se enraízam e continuam seu/ pleno desenvolvimento. É uma espécie originária da África, com bom desenvolvimento em sol pleno e também em meia sombra, bem como com bom desenvolvimento em vasos e jardins. Sua rega pode ser feita 1 vez por semana no verão e a cada 15 dias no inverno. Com relação ao seu valor econômico, visando um retorno socioeconômico para a população de baixa renda a partir da comercialização, o mercado de suculentas e a sua procura têm crescido ao longo dos últimos anos. As suculentas têm sido

consideradas como as plantas do futuro, por serem uma boa alternativa para minimizar o uso dos recursos hídricos (LESSA; PAIVA; SCHUCH, 2009).

O substrato foi escolhido com base na capacidade de drenagem e fornecimento de nutrientes suficientes para a vegetação, de preferência com predomínio de materiais vegetais aos orgânicos, para evitar proliferação de fungos e parasitas nos períodos entre manutenções. Em estudo que analisou o desenvolvimento da *Kalanchoe laetivirens* em diversas combinações de substrato formadas por areia, solo e esterco, Pêgo e Ferreira (2020) observaram que a espécie apresentou um melhor desenvolvimento em altura, diâmetro, quantidade de folhas e peso fresco no substrato de areia, mas com índices também semelhantes no formado pela combinação de areia com solo. Dessa forma, optou-se por utilizar como substrato uma mistura de areia lavada com terra vegetal, composta também por pó de carvão, calcário, dolomítico, pó de coco e adubo orgânico (Figura 9). Em ambos os telhados vegetados, no verde de baixo custo e no verde convencional, foi utilizada a mistura de 1:1 de areia e terra vegetal.

Figura 9 - Componentes do substrato utilizados nos telhados.

a) Areia lavada.



b) Terra vegetal.



Fonte: Autor.

4.2.2.2 Estrutura suporte de baixo custo

A estrutura de suporte para a vegetação e o substrato foi escolhida entre materiais que são comumente descartados dentre os resíduos sólidos urbanos. Com isso, buscou-se contribuir diretamente com o meio ambiente e desenvolver uma tecnologia sustentável com elementos reciclados. O material também deveria ser de fácil acesso e de baixo ou nenhum custo, para garantir sua facilidade de obtenção pelas famílias de baixa renda interessadas na implantação dos telhados verdes.

Entre as possíveis estruturas a serem escolhidas, as garrafas PET e as embalagens Tetra Pak® se destacam por terem sido objeto de outros estudos sobre telhados verdes de baixo custo já mencionados na Tabela 5. As embalagens Tetra Pak® são formadas por sobreposições de camadas de diferentes materiais, sendo 75% de lâminas de papel, 20% de polietileno e 5% de alumínio (UEMURA, 2014 *apud* FENSTERSEIFER *et al.*, 2017). Com sua reutilização, as camadas de polietileno protegem contra a umidade e favorecem a hermeticidade, as de papel oferecem resistência e estabilidade mecânica, as de alumínio resistem à passagem de oxigênio e de luz, e em conjunto, impedem a entrada de ar e uma consequente oxidação de lipídios e contaminação microbiótica (TETRA PAK®, 2022). Em estudos realizados por Fensterseifer *et al.* (2017), ao utilizar caixas Longa Vida (UHT) como estrutura de suporte para telhados verdes de baixo custo, foi observado que o material se tornou mais maleável com a exposição a grandes volumes de chuva e ventos fortes. Parte do conjunto apresentou aparência enrugada e perdeu a camada de polietileno de sua composição, devido à hidratação causada pelas precipitações.

Estudos que analisaram o uso de garrafas PET como componente estrutural dos telhados verdes são mais comuns quando comparados às embalagens Tetra Pak®. Os recipientes são de fácil obtenção, com baixo ou nenhum custo, além de seus usos contribuírem com um desenvolvimento sustentável, por serem de difícil decomposição e simples reutilização. Além disso, em comparação à embalagem de Tetra Pak®, a garrafa PET não sofre alteração em sua estrutura física ao longo dos dias quando exposta à umidade do solo e à alta insolação (FENSTERSEIFER *et al.*, 2017). Assim como utilizado por Rocha (2020) no Semiárido pernambucano, optou-se pela utilização de garrafas PET de 2 L como estrutura suporte para o substrato e a vegetação do telhado verde de baixo custo, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Telhado de baixo custo com PET desenvolvido no Semiárido pernambucano.



Fonte: Rocha (2020).

De forma análoga ao que foi realizado por Fünfgelt *et al.* (2012), Cortés e Castillo (2011 e 2012), Galarza-Molina *et al.* (2017) e Pereira Junior e Silva (2011), as garrafas foram dispostas longitudinalmente para abrigar mais mudas da vegetação e garantir a profundidade necessária para o respectivo desenvolvimento, uma vez que a espécie escolhida não necessita de vasto espaço vertical pois as raízes não são profundas. Quanto à camada de drenagem e filtragem no interior dos arranjos com as garrafas PET, optou-se pela não colocação, devido à estreita camada de solo em seu interior e ao clima tropical úmido da região, que favorecem um solo mais seco e sem acúmulo de água. Para o escoamento da água da rega, realizada manualmente uma vez por semana, foram feitos pequenos orifícios na base das garrafas.

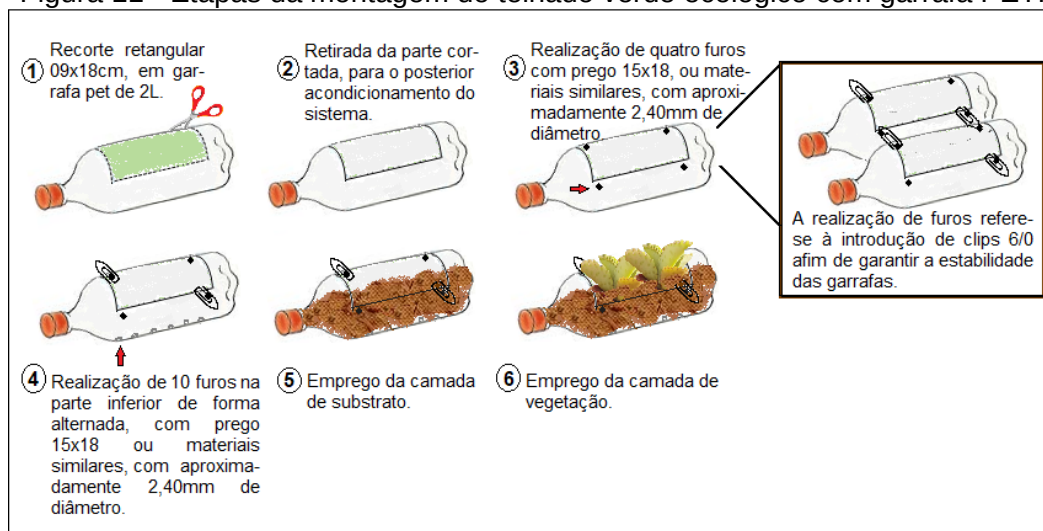
4.2.3 Configuração dos telhados ecológicos

4.2.3.1 Montagem do telhado verde de baixo custo

Assim como na pesquisa realizada por Rocha (2020), para a montagem do telhado de baixo custo com as garrafas PET de 2 L, foi necessário definir um material de fixação entre as peças, para que após a disposição das garrafas e montagem dos telhados, elas não se deslocassem e alterassem a configuração escolhida. As garrafas foram então fixadas umas às outras por clips de papel 6/0 de arame de aço

galvanizado. A escolha dos clips foi baseada na durabilidade e resistência do material, na facilidade de obtenção e de manuseio, em seu baixo custo de compra, na sua fácil aplicação e flexibilidade, que permite a retirada das garrafas PET por unidade de forma fácil, como módulos, para o caso reparos futuros. As garrafas foram lavadas com água e detergente neutro, e secadas ao natural. Foram realizados recortes retangulares de 9 cm por 18 cm na parte superior das garrafas, para colocação do substrato e da vegetação. Em seguida, foram feitos 10 furos onde seria a base longitudinal de cada garrafa, com o auxílio de um prego 15x18 aquecido, e mais quatro furos nas extremidades da abertura retangular superior, para o encaixe dos clips (ROCHA, 2020). A Figura 11 ilustra a preparação da estrutura suporte e montagem das garrafas (recorte e armazenamento do substrato e da vegetação).

Figura 11 - Etapas da montagem do telhado verde ecológico com garrafa PET.



Fonte: Rocha (2020).

O substrato e a vegetação foram dispostos nas garrafas ainda ao nível do solo, com posterior deslocamento para a superfície dos telhados. O peso total de cada garrafa ficou em torno de 940 g, com a maioria das mudas recém retiradas da planta mãe e plantadas em seguida, possuindo assim dimensões bem pequenas. Esse peso tende a variar com o tempo, devido ao crescimento das mudas e à perda de substrato com a ação do vento. A instalação das garrafas na CT e a fixação com os clips foi realizada 18 dias após o preenchimento delas com substrato e vegetação, afim de garantir uma boa adaptação das mudas no novo substrato e seu crescimento mais avançado (Figura 12). A quantidade de garrafas colocadas no telhado foi definida de forma a colocar o maior número possível dentro do 1 m² de área útil e manter o ralo

de escoamento livre. Assim foi possível dispor 23 garrafas da forma apresentada na Figura 13, com foto retirada no dia de início das medições.

Figura 12 - Montagem do telhado verde de baixo custo, na CT 1.

a) Garrafas antes da instalação e fixação na CT.



b) Instalação e fixação das garrafas na CT.



Fonte: Autor.

Figura 13 - Disposição final da CT 1 com telhado verde de baixo custo.



Fonte: Autor.

A manutenção do telhado verde de baixo custo era realizada com a mesma frequência das regas, uma vez por semana, e consistia no simples processo de retirada das folhas secas caídas de árvores próximas as CT, oriundas de plantas de outras espécies e ervas daninhas que cresciam no substrato das garrafas, e

observação do funcionamento do telhado, como a condição do ralo de drenagem e verificação visual da umidade do substrato, de forma a evitar o encharcamento da vegetação.

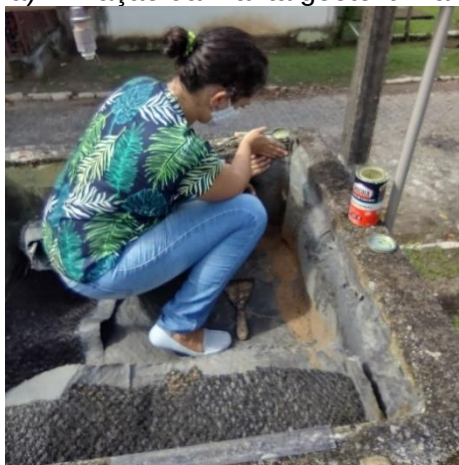
4.2.3.2 Montagem do telhado verde convencional

O telhado verde convencional é formado por diversas camadas que permitem o bom funcionamento do sistema. De forma semelhante à realizada por Macedo (2022), foi utilizado o geocomposto de drenagem *MacDrain*[®] J, formado por um filtro geotêxtil e um núcleo drenante de pequena espessura, que reduz a capacidade de vazão, favorecendo a manutenção da umidade natural do solo, sem causar danos às raízes das plantas. Essa camada, instalada em contato com a laje impermeabilizada, possui as funções de filtragem e drenagem, impedindo o carreamento de partículas do substrato e drenando as águas infiltradas para a saída do sistema. A manta foi reutilizada dos experimentos feitos por Macedo (2022), realizados na mesma CT, sendo retirada do telhado onde estava instalada, lavada e retirados os excessos de cola das laterais antes fixadas na platibanda. Após secagem, a manta foi reaplicada na laje limpa, e fixada à platibanda nas laterais com cola contato (Figura 14a).

Em seguida a fixação da manta geotêxtil, foi colocado o substrato dividido em duas camadas: uma camada de areia lavada de 5 cm de altura, para facilitar a drenagem de água, e uma camada superior de terra vegetal misturada a areia lavada na proporção 1:1 com 10 cm de espessura, como mostra a Figura 14b. Em seguida, foram plantadas as mudas da *Kalanchoe laetivirens* com níveis de desenvolvimento diversos, finalizando a montagem do telhado verde convencional (Figura 15).

Figura 14 - Montagem do telhado verde convencional, na CT 5.

a) Fixação da manta geotêxtil na CT.



b) Camada de areia e de substrato.



Fonte: Autor.

Figura 15 - Telhado verde convencional, com vegetação *Kalanchoe laetivirens*, na CT 5.



Fonte: Autor.

4.3 Análise do comportamento meteorológico da cidade do Recife – PE

4.3.1 Análise de temperatura de série histórica

De forma semelhante à realizada por Rocha (2020) no município de Caruaru - PE, no Semiárido pernambucano, o comportamento térmico será descrito a partir da análise estatística de dados horários de uma série de 10 anos (janeiro de 2011 a dezembro de 2020), coletados da estação A301 do INMET. Com a caracterização do

comportamento térmico no município do Recife, é possível observar os períodos mais quentes e frios ao longo do ano, para assim comparar com os dados obtidos nos telhados verdes convencional e de baixo custo e com o telhado de referência.

Os dados obtidos pelo INMET foram processados em planilhas eletrônicas no *software Microsoft Excel*. Seguindo estudos realizados por Diniz, Ramos e Rebello (2018), o cálculo para obtenção das temperaturas médias diárias X_{ij} de cada mês foi realizado a partir das médias diárias, de acordo com a Equação 1.

$$X_{ij} = \frac{\sum k X_{ijk}}{N} \quad (1)$$

Em que: X_{ijk} é o valor da temperatura, em graus Celsius, do dia k , do mês i , do ano j ; e N é o número de dias do mês i , do ano k .

Para análise do comportamento térmico no município do Recife, de forma a obter um conjunto de dados que caracterizem as temperaturas ao longo dos anos em questão, foi calculada a tendência mensal em um ano representativo, com os valores mensais intitulados de temperaturas médias mensais representativas, de acordo com a Equação 2.

$$\bar{X}_i = \frac{\sum j X_{ij}}{M_i} \quad (2)$$

Em que: $\bar{X}_i$ é o valor da temperatura média mensal, em graus Celsius, do mês representativo i e M_i é o número de anos para os quais os dados de temperatura X_{ij} estão disponíveis.

A partir da média aritmética dos valores mensais representativos, calculou-se o valor da temperatura média mensal de referência, o $\bar{X}$, que permite analisar os períodos quentes e frios através dos desvios das temperaturas. Outros parâmetros calculados foram as médias mensais máximas e mínimas representativas, que representam a média dos maiores e dos menores valores diários de cada mês ao longo do período, e a máximas e mínimas mensais históricas, com os valores extremos de cada mês nos anos em estudo. Para a visualização e interpretação dessa

caracterização, foram criados gráficos *Boxplot* e gráficos de colunas e de linhas com o uso do *software Microsoft Excel*.

4.3.2 Análise meteorológica do período de coleta de dados

Segundo Amorim (2005), cada cidade possui um clima diferenciado, com variáveis climatológicas de temperatura do ar, velocidade dos ventos, umidade do ar e precipitação próprios, de acordo com as características de cada localidade. Com isso, há a geração de um clima próprio, resultado de processos que ocorrem em seus limites físicos e que agem no sentido de interferir no clima em escala local. Identificar e quantificar os fenômenos climáticos de uma cidade e relacioná-los com suas modificações ao longo do tempo, como a urbanização, são de grande importância para projetos de planejamento urbano, de forma a melhorar a qualidade de vida de sua população. Dessa forma, foi realizada a caracterização meteorológica da cidade do Recife com dados do mesmo período em que foram obtidas medições dos equipamentos interiores aos protótipos, ou seja, de março a maio de 2021. As informações foram obtidas do Banco de Dados Meteorológicos (BDMEP) do INMET, coletados da estação automática de código A301 em Recife, e tratados e processados pelo *software Microsoft Excel*, com posterior confecção de gráficos para cada uma das seguintes variáveis meteorológicas: precipitação, umidade relativa do ar, temperatura, radiação global e velocidade do vento.

Os dados horários foram posteriormente transformados em dados horários médios (X_j) a partir da média horária, calculada para todas as variáveis a partir da Equação 3 a seguir, com exceção da precipitação diária, obtida a partir da soma das precipitações horárias, gerando a precipitação diária acumulada.

$$X_j = \frac{\sum X_{ij}}{24} \quad (3)$$

Em que: X_{ij} é o valor dos dados horários de umidade relativa do ar (%); de temperatura (°C); de radiação global (Kj/m²); e de velocidade dos ventos (m/s) na hora i , do dia j e N é o número de dias do mês i .

A análise foi realizada com o objetivo de entender as variáveis meteorológicas no período de coleta de dados e auxiliar na análise do desempenho dos telhados. Além disso, foi possível identificar e selecionar os dias de análise para o estudo, sendo os dias de maior e menor temperaturas, os dias de maior e menor amplitudes térmicas, e também os de maior precipitação para cada mês de análise.

4.4 Aquisição de dados

4.4.1 Dados internos

A coleta de dados no interior das CTs foi realizada no período de 08 de março a 31 de maio de 2021. Os dados internos foram obtidos com a utilização de dois tipos de equipamentos: para análise das temperaturas e umidades internas do ar, foram utilizados os termohigrômetros *Datalogger* IP-747RH, com uma unidade posicionada no teto de cada CT, e para as medições das temperaturas superficiais das paredes internas foram usados os termômetros *Escort* iMINI MX-IN-S-8-L, com um equipamento em cada uma das três paredes internas das CTs. Os aparelhos, apresentados na Figura 16, foram programados para coletar os dados de forma simultânea a cada 30 minutos, para a visualização do comportamento dos dados com maior detalhamento e precisão da variação térmica ao longo dos dias.

Figura 16 - Equipamentos utilizados para a medição de dados internos.

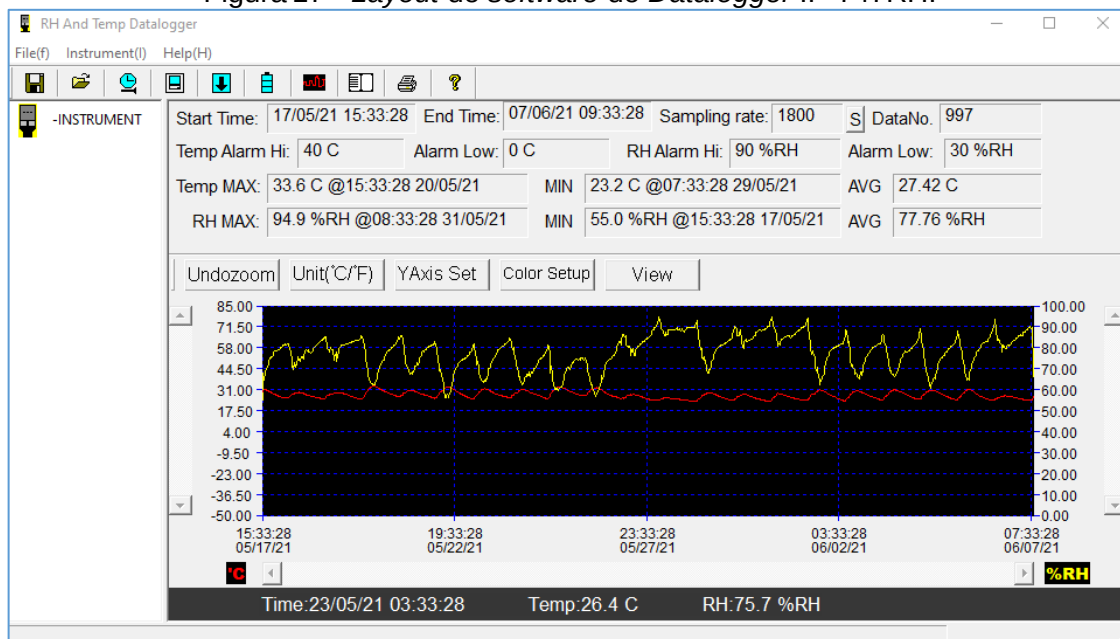
- a) *Datalogger* IP-747RH instalado nos tetos das CT. b) *Escort* iMINI MX-IN-S-8-L instalado nas paredes das CT.



Fonte: Autor.

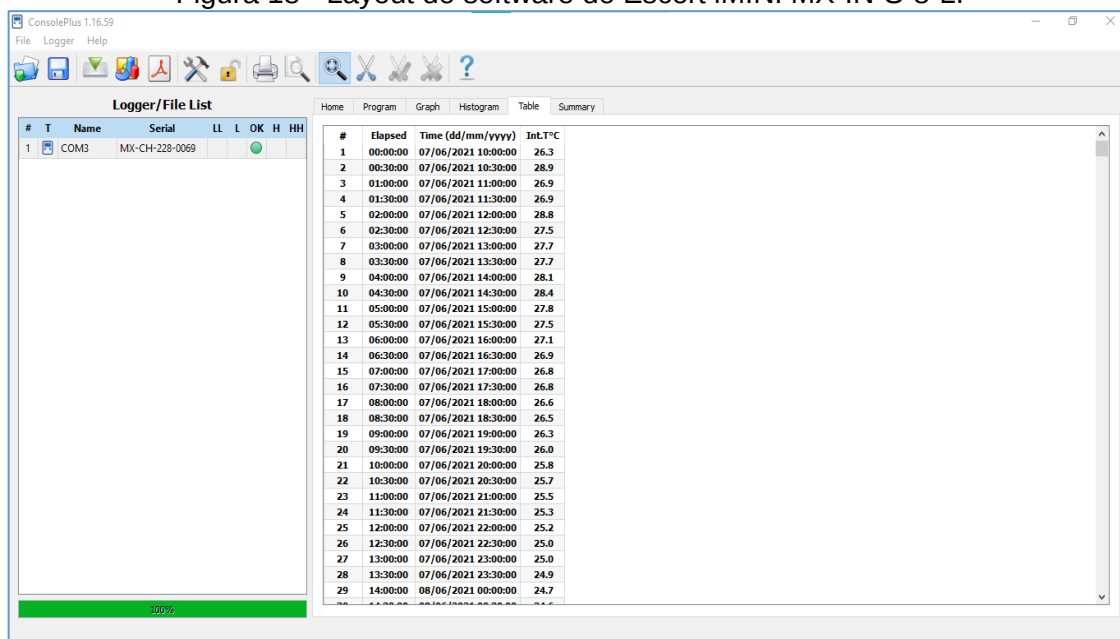
Os dados foram extraídos dos equipamentos em planilhas do *Microsoft Excel*, para posterior processamento e análise. Ambos possuem a capacidade de medir e armazenar os dados de temperatura, possuem seus próprios *softwares* para as manipulações, com *layouts* mostrados nas Figuras 17 e 18, além de fornecerem relatórios sobre os dados coletados. Na Tabela 7 estão descritas as características dos instrumentos utilizados.

Figura 17 - Layout do software do Datalogger IP-747RH.



Fonte: Autor.

Figura 18 - Layout do software do Escort iMINI MX-IN-S-8-L.



Fonte: Autor.

Tabela 7 - Características dos equipamentos utilizados nas medições.

Parâmetros	Datalogger IP-747RH	Escort iMINI MX-IN-S-8-L
Amplitude de temperatura	- 40°C ~ 70°C	-40°C ~ 80°C
Precisão da Temperatura	± 1°C (-10 ~ 40°C) ± 2°C (-40 ~ -10°C e 40 ~ 70°C)	± 0,3°C (-10°C ~ 70°C) ± 0,5°C (-40 °C ~ -10°C)
Amplitude de Umidade	0% ~ 100%	-
Precisão da Umidade	± 3% (40 ~ 60%) ± 3,5% (20 ~ 40% e 60 ~ 80%) ± 5% (0 ~ 20% e 80 ~ 100%)	-
Resolução	0,1°C ou %	0,1°C
Capacidade de Medições	32700	7806
Unidade de Medição	°C ou °F	°C ou °F
Formato do Relatório	XPS	PDF, TXT, CSV e CVT
Tipo de conexão com o computador	USB	USB

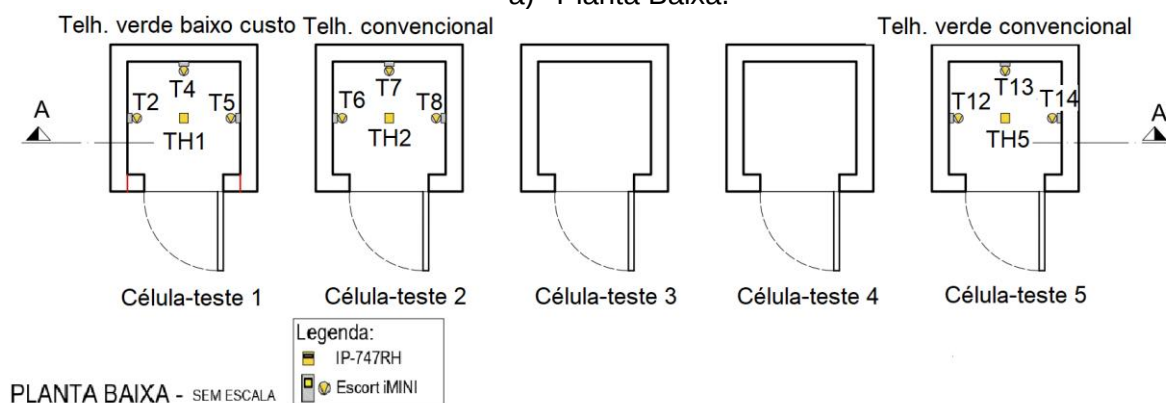
Fonte: Autor.

Os *Escort iMINI MX-IN-S-8-L* foram dispostos em ganchos metálicos nas paredes das CTs, com exceção da que possui a grade para acesso ao seu interior. Eles foram instalados a uma altura de 1,50 m do piso interno, segundo recomendações da ISO 7726 (ABNT, 1998), que determina as orientações para uso e instalação de diversos instrumentos de medição de parâmetros físicos ambientais relacionados a temperaturas. Os *Datalogger IP-747RH* foram posicionados no centro dos tetos em suportes próprios. A disposição dos equipamentos durante os meses de março, abril e maio está representada na Figura 19.

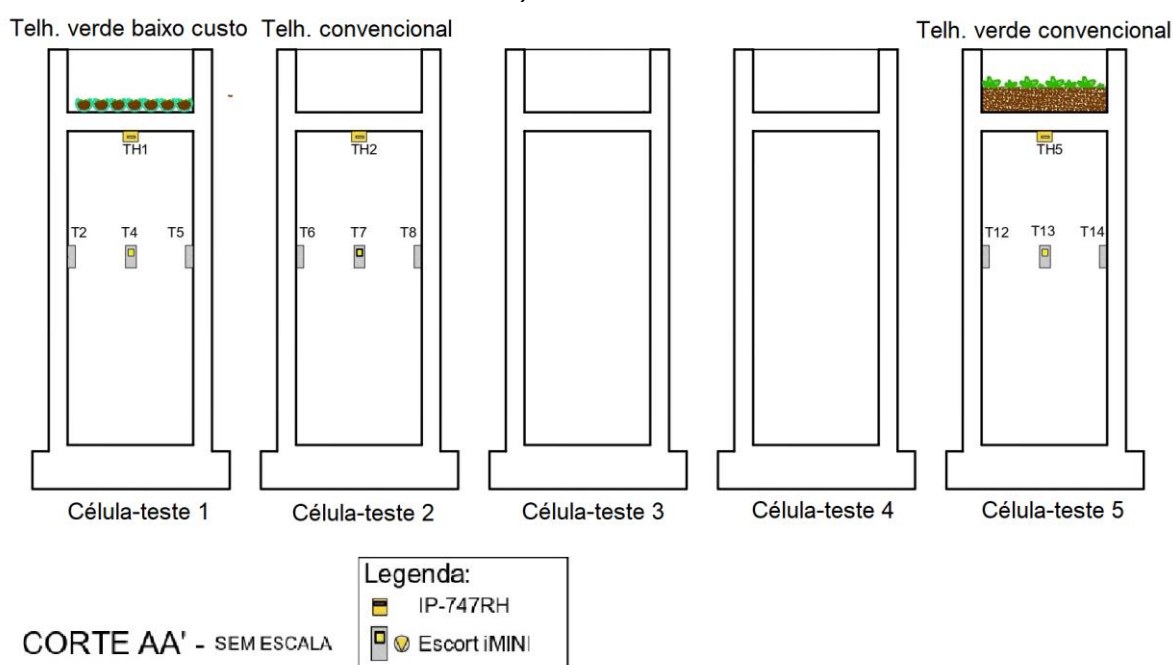
Para descartar a existência de medidas discrepantes devido exclusivamente aos instrumentos antes do período de coleta de dados, foram realizadas diversas medições nas quais os aparelhos tinham suas localizações no interior das CTs alternadas, na forma de um rodízio. Os valores foram obtidos durante três dias, às 8 horas da manhã, em um total de três coletas. Os *Escort iMINI MX-IN-S-8-L* foram instalados em quatro das cinco CTs e, a cada coleta de dados, suas posições eram alteradas em sentido horário, até que cada aparelho fosse posicionado nas três paredes de uma mesma CT. Esse processo foi realizado para verificar se as temperaturas informadas estavam condizentes entre si, sem valores discrepantes entre as medições. Também foi analisado o comportamento térmico das paredes, de forma a observar se alguma apresentava temperatura destoante das demais, por incidência direta dos raios solares ou pela sombra projetada em sua superfície externa.

Figura 19 - Disposição dos equipamentos dentro CTs.

a) Planta Baixa.



b) Corte frontal.



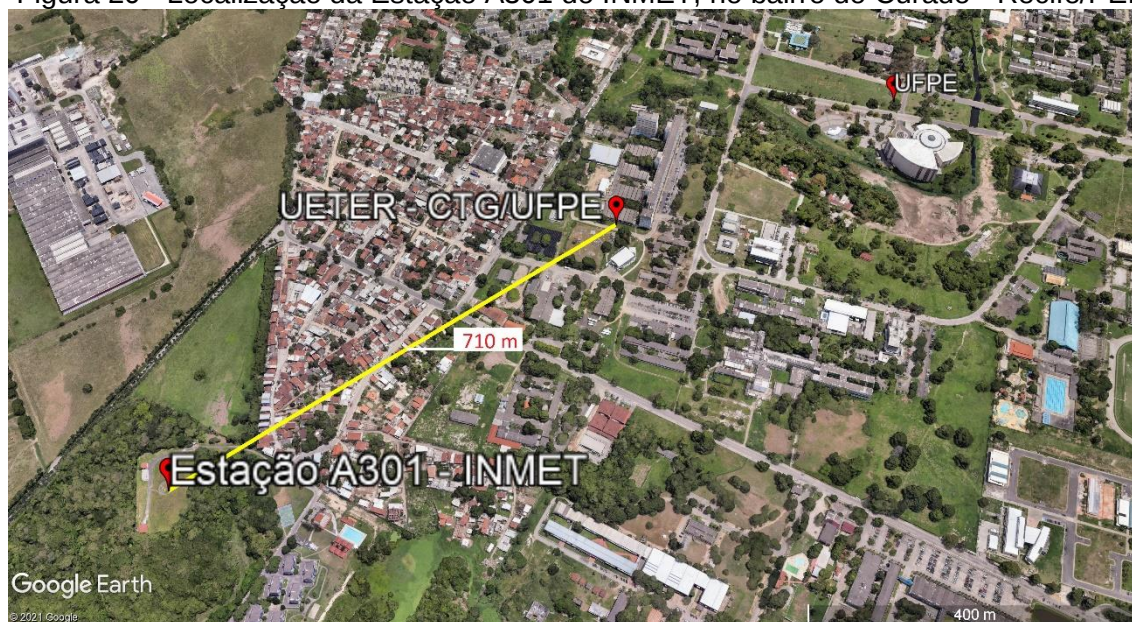
Fonte: Autor.

Os termohigrômetros *Datalogger* IP-747RH foram analisados durante o mesmo período e, após cada coleta de dados durante esses três dias, foram deslocados para a CT a direita, sendo o do último deslocado para o primeiro. Foram coletadas medições com cada equipamento em três posições distintas, simultaneamente à coleta dos dados nos *Escort iMINI* MX-IN-S-8-L. Ao final do processo, os *dataloggers* ficaram na posição indicada na Figura 19.

4.4.2 Dados externos

Os dados meteorológicos externos às CTs foram coletados da estação automática do Recife (código A301), do INMET, localizada no bairro do Curado, a aproximadamente 710 m da UETER, Figura 20. Devido à proximidade, a estação consegue representar adequadamente os dados externos às CTs. A estação A301 possui observação automática de grandezas como precipitação, pressão atmosférica, radiação global, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, com operação desde 2004. As medições podem ser horárias, diárias ou mensais, disponibilizadas a cada hora, e são oferecidas por meio de planilhas eletrônicas do *Microsoft Excel*.

Figura 20 - Localização da Estação A301 do INMET, no bairro do Curado - Recife/PE.



Fonte: Autor.

4.5 Estudo simplificado de viabilidade econômica do telhado verde de baixo custo com garrafas PET

O estudo simplificado de viabilidade econômica do telhado verde de baixo custo visa um levantamento dos custos médios para a montagem e manutenção da cobertura e, a partir disso, uma análise de compensação em relação à sua adoção frente ao telhado convencional. Os telhados verdes convencionais tendem a possuir um alto valor de construção, tornando-o inviável para a população de baixa renda que busca soluções mais sustentáveis e um possível retorno financeiro a longo prazo,

quando comparado a cobertura convencional de fibrocimento ou de laje. De acordo com Berardi, Ghaffarianhoseini e Ghaffarianhoseini (2014), o alto investimento inicial com estruturas verdes ainda limita o seu uso em grandes centros urbanos de diversos locais do mundo. De forma geral, a implantação de um telhado verde convencional tem sua implantação dificultada devido ao custo elevado dos componentes de suas camadas, à frequente necessidade de uma mão de obra especializada para sua montagem, além da possível necessidade de avaliação estrutural da edificação devido ao seu peso. O uso de garrafas PET como estrutura suporte do telhado verde de baixo custo permite a redução do investimento em relação aos gastos iniciais de material e implantação e de manutenção, além de evitar a necessidade de avaliação estrutural devido ao baixo peso do sistema.

Para o levantamento dos custos dos materiais e de montagem do telhado verde de baixo custo, foram considerados o valor da estrutura suporte, juntamente com a vegetação e o substrato, em quantidades suficientes para a cobertura de 1 m² de telhado. Os valores obtidos para cada material foram resultados de uma pesquisa de valores em diversos pontos de comércio do Recife, cidade da pesquisa. Os custos da construção das unidades de CTs não foram contabilizados visto que os arranjos investigados podem ser implantados sobre quaisquer superfícies niveladas.

4.6 Análise da interferência das paredes na temperatura interna dos protótipos da UETER

Para verificar a interferência das paredes na temperatura interna das CTs e mudanças em seus desempenhos devido a fatores externos, como incidência direta de raios solares, projeção de sombras e ventos, foram comparadas as temperaturas internas medidas pelos *Escort* iMINI MX-IN-S-8-L, instalados nas paredes, nos dias de maior temperatura máxima de cada mês de análise. Foram construídos gráficos de linha no *software Excel*, com as curvas de temperatura de cada uma das três paredes de cada CT, para assim verificar as diferenças nos valores horários ao longo de todo o dia.

4.7 Análise do desempenho térmico na comparação entre o telhado verde de baixo custo, a cobertura convencional e o telhado verde convencional

Para analisar o comportamento dos telhados e realizar a comparação de seus desempenhos, foram utilizadas ferramentas gráficas do *software Excel*, para as quais a observação das curvas permite verificar as discrepâncias, vantagens e desvantagens de cada configuração estudada. A análise das temperaturas diárias ao longo de todo os três meses de coleta foi realizada a partir de gráficos *BoxPlot*, que oferecem uma visualização da variação e da distribuição dos dados de temperatura ao longo dos dias, assim como sua média e suas temperaturas extremas. Esse tipo de gráfico é formado pelo quartil Q1, que corresponde a 25% dos menores valores, pelo quartil Q3, correspondente a 75% das menores medidas, pela mediana (segundo quartil Q2), e os chamados *whisker*, ou fios de bigodes, que representam os limites inferior e superior dos dados.

Como parâmetro para um estudo mais específico dos dados fornecidos pelos equipamentos, foram analisadas as relações das paredes entre si, as temperaturas dos tetos de cada CT, como também a comparação entre as medidas das paredes e dos tetos, verificando as diferenças entre os tipos de telhados a partir de dados horários de temperatura. Essas comparações entre os comportamentos dos telhados a partir de diversas medições foi realizada para dias específicos de cada mês. Os critérios utilizados foram os dias com a ocorrência das maiores e menores temperaturas, das maiores e menores amplitudes e os dias de maiores precipitações acumuladas. Nessa parte do estudo, foram utilizados gráficos de linha do *software Microsoft Excel*, que permitem a visualização da evolução das temperaturas ao longo de todo o dia analisado. Além disso, também foi feita a análise do comportamento das coberturas verdes em comparação com a cobertura convencional quanto ao cumprimento dos requisitos da NBR 15.575-1 (ABNT, 2013a). Realizada a partir do processamento dos dados de temperatura internos e externos no *software Excel*, foi observado quais dias, dentro do período de coleta de dados, atenderam os requisitos de desempenho térmico definidos na norma, para os níveis mínimo, intermediário e superior, conforme as Tabelas 3 e 4, mostradas anteriormente.

A variável utilizada para a verificação do atendimento a norma foi a temperatura ambiente, dada pelas temperaturas medidas nos tetos e nas paredes das CTs, conforme a Equação 4. Foram analisadas as temperaturas ambientes máximas diárias

atingidas por cada CT, assim como a temperatura máxima externa de cada dia de coleta.

$$Temperatura\ ambiente = \frac{\frac{(\sum T_{Tn})}{3} + T_{THm}}{2} \quad (4)$$

Em que: T_{Tn} é a temperatura (°C) medida pelo *Escort* iMINI MX-IN-S-8-L na parede n da CT; e T_{THm} é a temperatura (°C) medida pelo termohigrômetros *Datalogger* IP-747RH no teto m da CT.

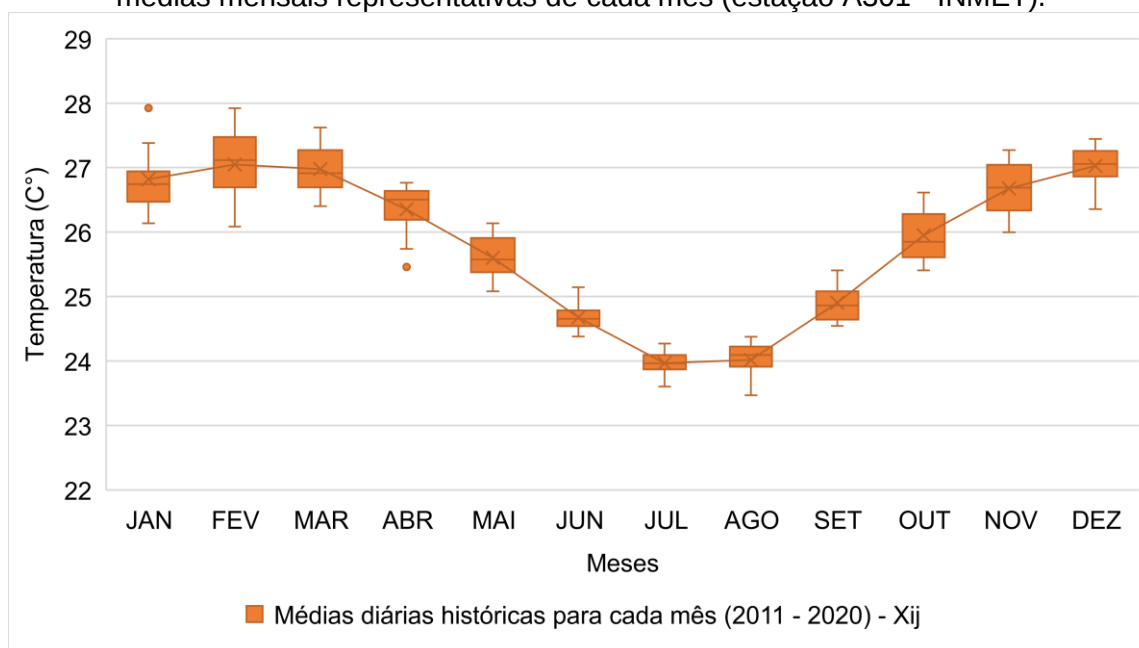
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Desempenho térmico – telhado verde de baixo custo x telhado verde tradicional x telhado convencional x temperatura externa

5.1.1 Caracterização do comportamento térmico da cidade do Recife - PE

A análise estatística do comportamento das temperaturas no município do Recife foi realizada com base nos dados horários de uma série histórica de 10 anos, entre janeiro de 2011 e dezembro de 2020. Na Figura 21, pode-se observar as temperaturas ao longo de um ano a partir de um gráfico *Boxplot*. O gráfico foi formado com os valores das temperaturas médias diárias históricas para cada mês X_{ij} e a linha média, formada pela junção dos marcadores de média, corresponde às temperaturas médias mensais representativas $\bar{X}_i$ de cada mês do período em estudo.

Figura 21 - *Boxplot* das temperaturas médias diárias entre 2011 e 2020 e temperaturas médias mensais representativas de cada mês (estação A301 - INMET).

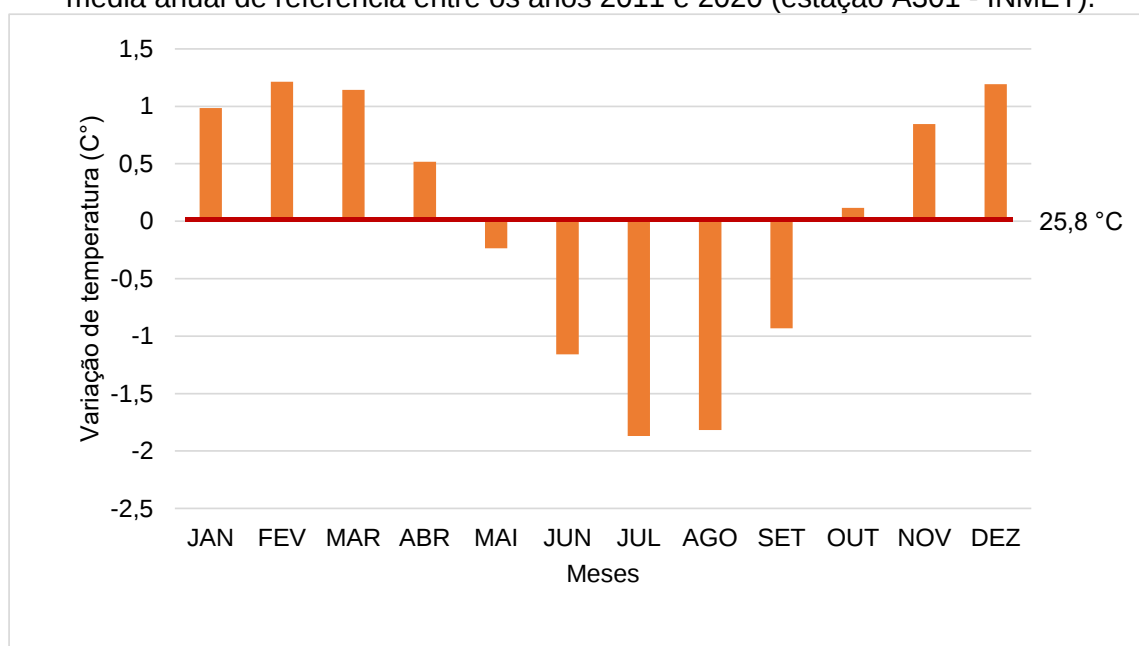


Fonte dos dados: INMET (2021).

Com a média aritmética dos valores das temperaturas médias mensais representativas, obteve-se o valor de 25,8°C para a temperatura média anual de referência $\bar{X}$, parâmetro esse que auxilia na determinação dos períodos quentes e frios ao longo do ano no município do Recife. A Figura 22 apresenta a variação das temperaturas médias mensais representativas com relação à média anual de

referência $\bar{X}$. É possível observar que o período mais quente do ano ocorre entre os meses de outubro e abril, com maior intensidade entre dezembro e março, que alcançam médias mensais representativas em torno de 1°C acima da média anual de referência. O período com menores temperaturas ao longo do ano ocorre entre maio e setembro, com os menores valores nos meses de julho e agosto, que apresentam médias mensais representativas aproximadamente 2°C abaixo da média anual de referência.

Figura 22 - Variação das temperaturas médias mensais representativas com relação à média anual de referência entre os anos 2011 e 2020 (estação A301 - INMET).



Fonte dos dados: INMET (2021).

Resultado semelhante para os períodos mais quentes e frios em Recife foram constatados por França, Holanda e Medeiros (2019), ao analisarem o comportamento das temperaturas em diferentes períodos de tempo. Os autores observaram que tanto para o intervalo de 1962-1990, como para 1991-2016, o período do ano mais quente ocorre entre os meses de janeiro e março, enquanto o de temperaturas mais baixas ocorre nos meses de julho e agosto. No estudo, a partir da análise das temperaturas em cada intervalo de tempo, foi possível constatar temperaturas mais elevadas em todos os meses do ano entre 1962-1990, além das temperaturas mínimas estarem subindo desde 1966 até os dias atuais, fato justificado pela tendência de urbanização e crescimento não planejados que alteram o microclima urbano.

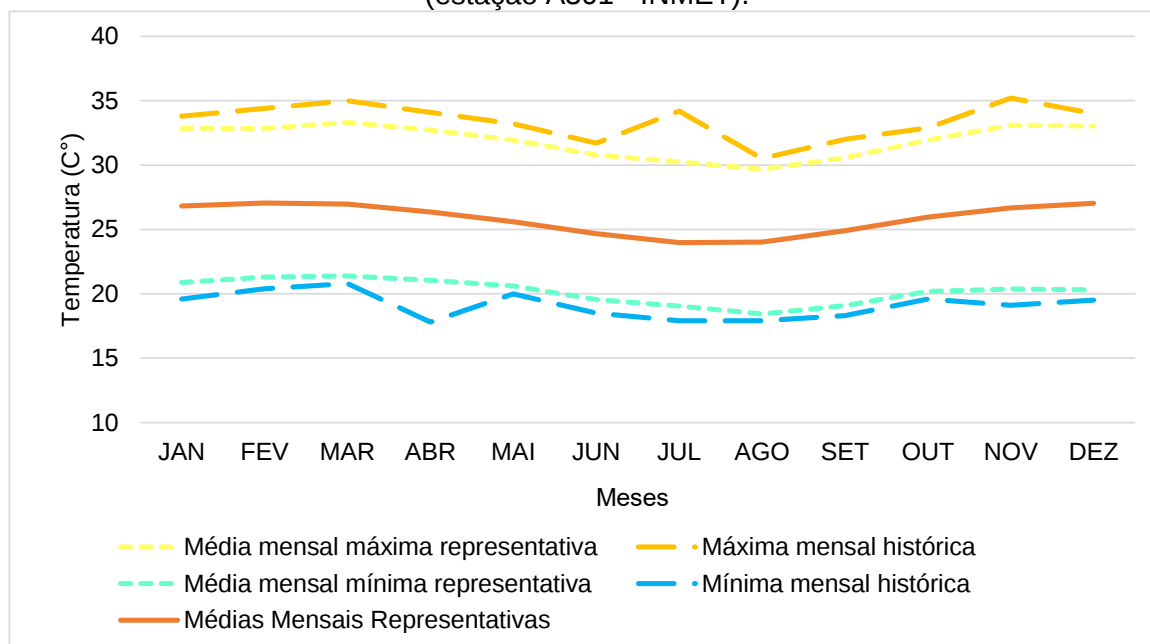
Entre os meses mais quentes do ano representativo, destaca-se o mês de fevereiro (27,05°C), que apresentou a maior variação positiva de temperatura (1,21°C)

quando comparada à temperatura média anual de referência ($25,83^{\circ}\text{C}$). Para o período mais frio, o mês de julho ($23,96^{\circ}\text{C}$) apresentou a maior variação negativa de temperatura ($-1,87^{\circ}\text{C}$), quando comparada à média anual de referência ($25,83^{\circ}\text{C}$).

A Figura 23 apresenta as temperaturas médias mensais, as médias mensais máximas e mínimas representativas, e as máximas e mínimas mensais históricas. Todas as variáveis mostradas apresentam curvas semelhantes entre si, exceto por alguns meses que tiveram temperaturas históricas discrepantes. A média mensal máxima representativa, calculada a partir da média dos maiores valores mensais ao longo do período, apresenta comportamento qualitativo semelhante à média mensal representativa, porém com valores aproximadamente 5°C mais elevados ao longo de todo ano representativo. A curva das temperaturas máximas históricas se apresenta muito próxima da de temperaturas médias mensais máximas representativas, com diferença máxima de $1,68^{\circ}\text{C}$, à exceção dos meses de julho e novembro, que tiveram diferenças de $3,95^{\circ}\text{C}$ e $2,11^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Assim como ocorreu com as temperaturas mensais máximas, a curva das temperaturas médias mensais mínimas apresenta tendência semelhante à média mensal representativa, com uma diferença de 5°C abaixo ao longo de todo ano representativo. A curva das temperaturas mínimas históricas aproximou-se da de temperaturas médias mensais mínimas representativas, com diferença máxima de $-1,28^{\circ}\text{C}$, a exceção do mês de abril, que teve diferença de $-3,25^{\circ}\text{C}$.

Em estudo sobre tendências nas séries temporais de temperatura em Recife realizado por Silva Junior, Fonseca Neto e Cabral (2020), foi observado um acréscimo anual de $0,016^{\circ}\text{C}$, $0,020^{\circ}\text{C}$ e $0,021^{\circ}\text{C}$ nas temperaturas mínima, média e máxima, respectivamente, entre 1961 e 2017, com um aumento em torno de 1°C ao longo do período. Os autores afirmam que, a partir dos anos 2000, os valores médios de temperatura mínima, média e máxima são superiores à média histórica do período analisado.

Figura 23 - Temperaturas médias, mínimas e máximas representativas e históricas por mês (estação A301 - INMET).



Fonte dos dados: INMET (2021).

5.1.2 Dados meteorológicos externos do Recife-PE para o período de coleta de dados

No estudo das condições meteorológicas durante o período de coleta de dados internos foram analisadas as variáveis de precipitação, umidade relativa do ar, temperatura, radiação global e velocidade do vento. Os gráficos com os valores acumulados diários de precipitação e com os valores diários médios de umidade relativa do ar média para cada mês estão na Figura 24. O mês de março foi o de menor precipitação entre os meses de coleta, com um total de 222,2 mm acumulados. O dia de maior precipitação de março foi o dia primeiro, com 67,4 mm, entretanto, dentro dos dias de análise, que iniciaram no dia 8 de março, o dia de maior precipitação foi o 28, com 32,4 mm.

O mês de abril teve uma precipitação acumulada mensal de 439,4 mm, com maior volume diário no dia 11, de 165,8 mm, posterior ao segundo dia de maior precipitação, com total diário de 72,4 mm. O mês de maio, com o maior volume de chuvas entre os três meses de coleta, apresentou precipitação acumulada de 531,4 mm, e o dia 13 sendo o de maior precipitação, com total de 154 mm, ainda inferior ao dia mais chuvoso de abril.

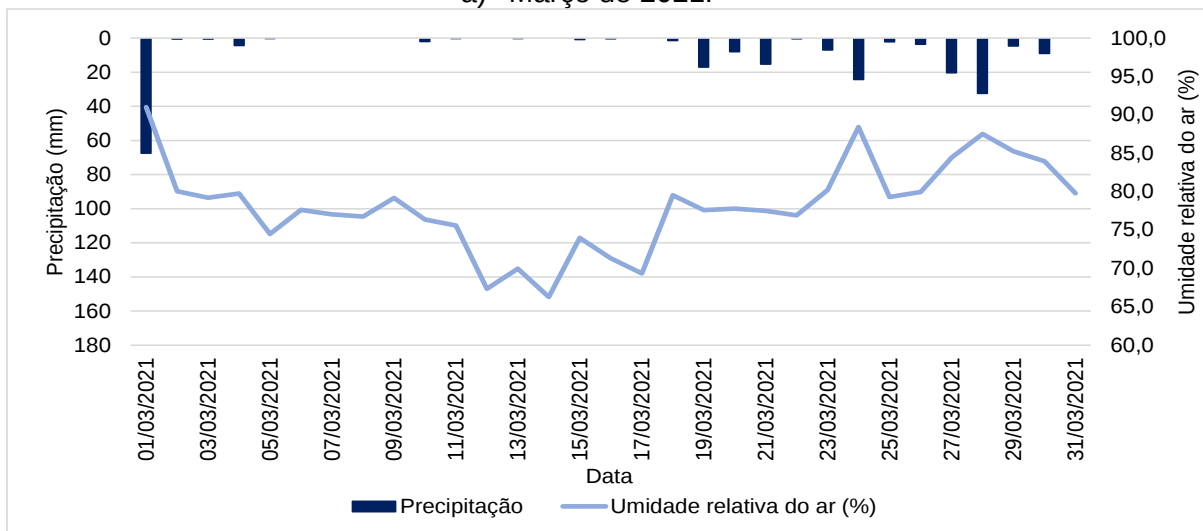
O mês de março apresentou a menor média mensal entre os três, de 78,2%. O dia de maior umidade do mês foi o dia primeiro, com 91,0%, entretanto, para o período

de medições, iniciado no dia 08, a maior umidade relativa do ar média ocorreu no dia 24, com 88,4%. O menor valor, ocorreu no dia 14, com 66,3%. A umidade relativa do ar média em abril foi de 84,1%, com maior valor médio diário no dia 18, de 93,1%, e menor valor no dia 08, de 72,5%. O mês de maio teve a maior média mensal, de 85,4%. A maior média diária ocorreu no dia 13, com 94,9%, mesmo dia de maior precipitação, e a menor no dia 26, com 74,4%.

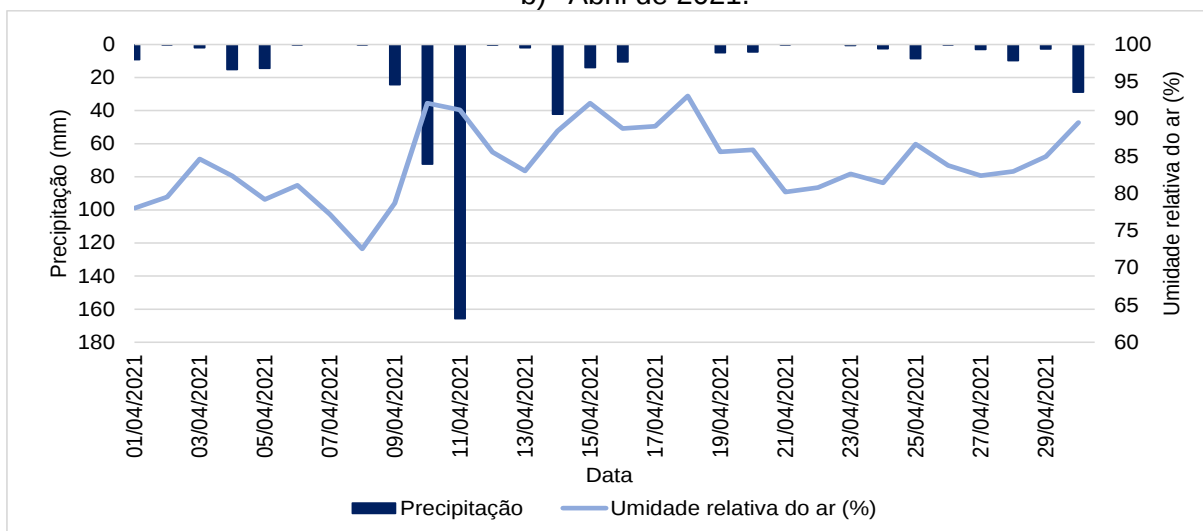
Na Figura 25, estão as curvas de temperaturas médias para cada dia de cada um dos três meses de análise. É possível observar que há uma redução de temperatura a cada mês, com valores mais elevados durante o período de coleta de dados de março e uma redução significativa no mês de maio, assim como ocorreu com a umidade relativa do ar e a precipitação mensal acumulada, mostrando a relação entre as variáveis.

Figura 24 - Precipitação diária acumulada e umidade relativa do ar média para os meses de coleta de dados (estação A301 – INMET).

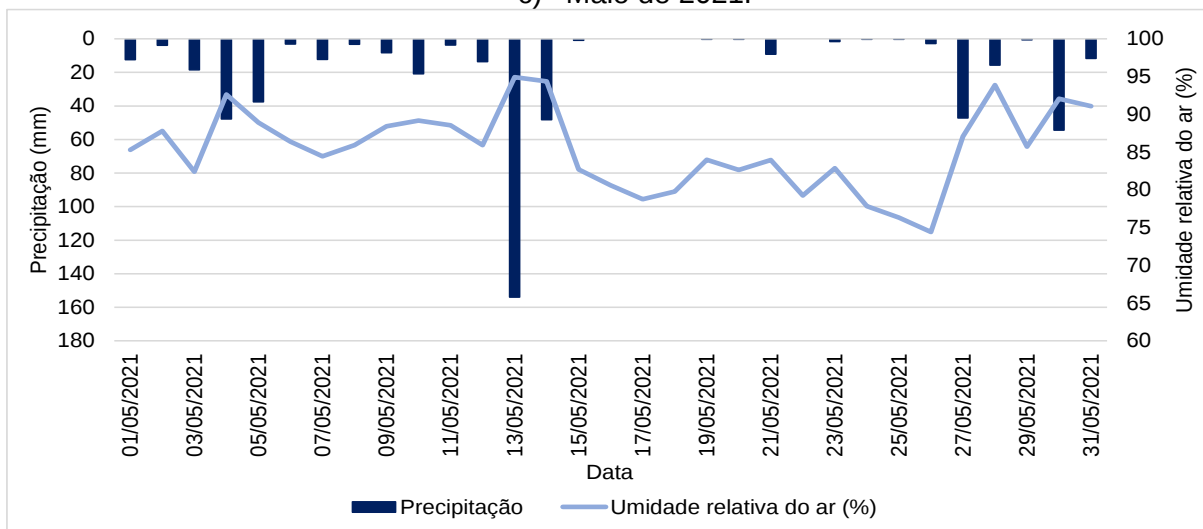
a) Março de 2021.



b) Abril de 2021.

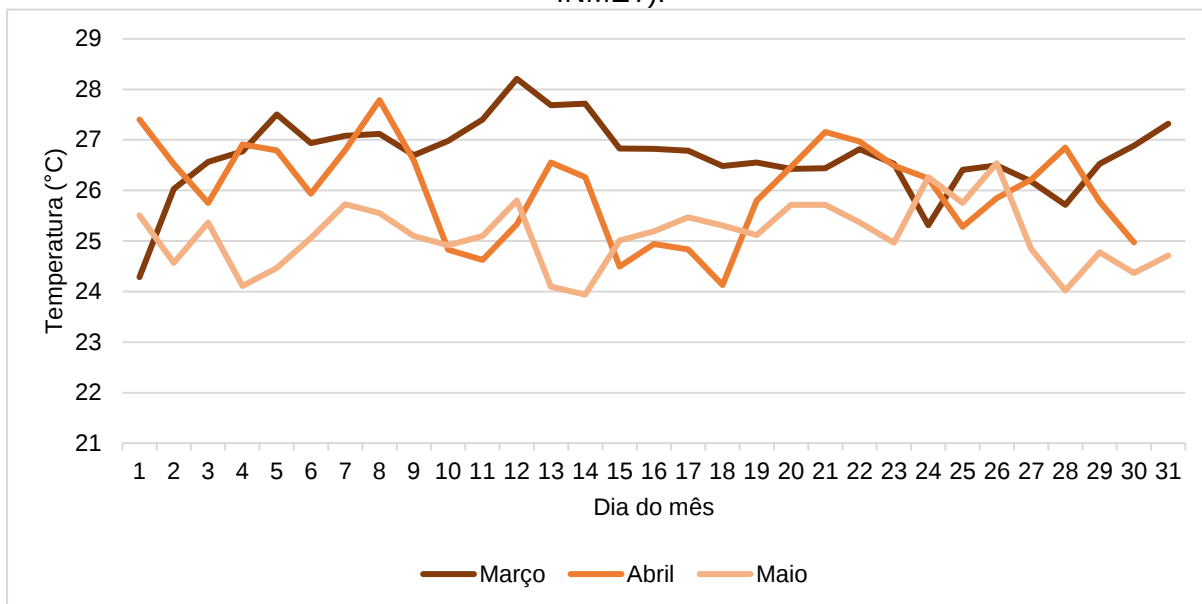


c) Maio de 2021.



Fonte dos dados: INMET (2021).

Figura 25 - Temperatura média diária no período de coleta de dados (estação A301 – INMET).

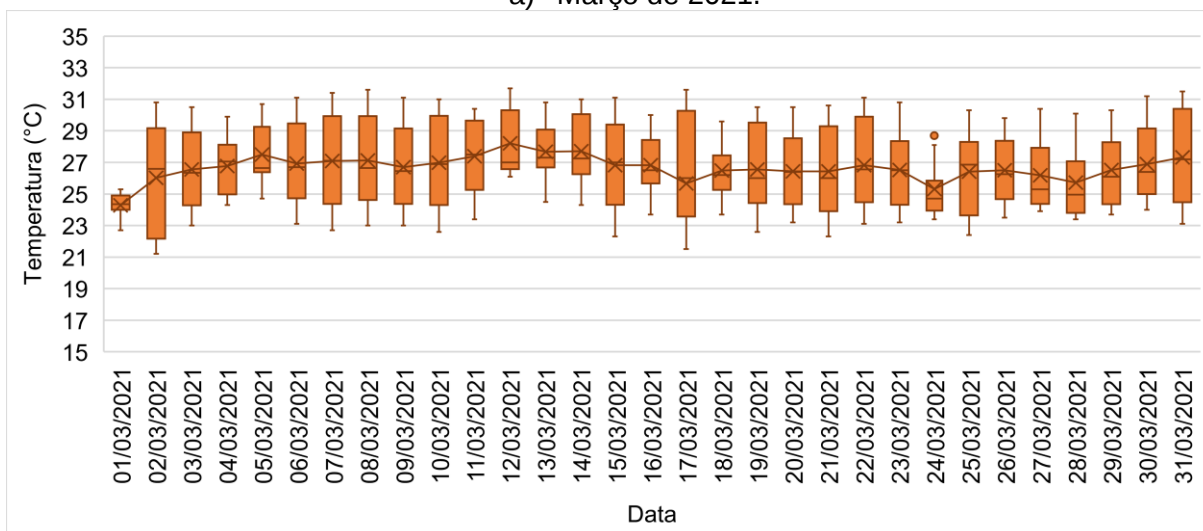


Fonte dos dados: INMET (2021).

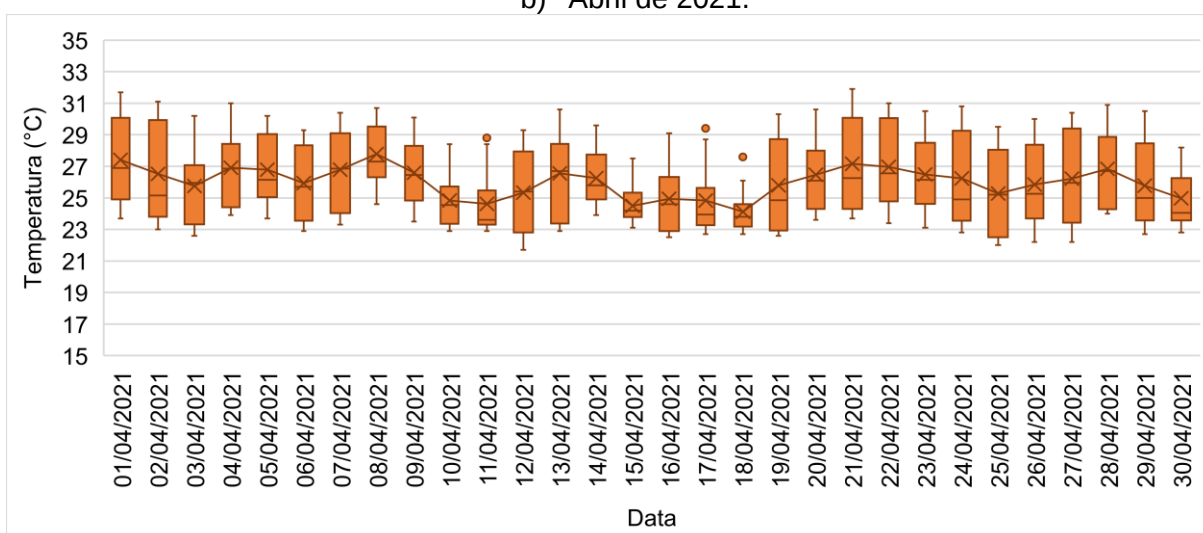
Na Figura 26 estão os *Boxplots* com as temperaturas diárias externas de cada mês, nos quais são possíveis identificar os dias com temperaturas e amplitudes térmicas mais elevadas e mais baixas. O mês de março apresentou temperatura média diária de 26,7°C e amplitude térmica média diária de 7,2°C. O dia 08 apresentou a maior temperatura dentro do período de análise, enquanto o dia 17 atingiu a menor temperatura mínima. Quanto à amplitude térmica, observa-se pela Figura 26a que o dia 17 também foi o de maior amplitude térmica, enquanto o dia 12 foi o de menor amplitude a partir do dia 8. O mês de abril teve temperatura média diária de 26,0°C e amplitude térmica média diária de 6,9°C. O dia 22 apresentou a maior temperatura máxima externa, e o dia 12 a menor mínima externa. A maior amplitude térmica foi alcançada no dia 27, enquanto a menor ocorreu no dia 18, como mostra a Figura 26b. O mês de maio apresentou temperatura média diária de 25,1°C e amplitude térmica média diária de 6,4°C. O dia 07 apresentou a maior temperatura máxima externa, enquanto o dia 23 atingiu a menor temperatura mínima. Quanto à amplitude térmica, observa-se pela Figura 26c que o dia 25 foi o de maior amplitude térmica, enquanto o dia 13 foi o de menor amplitude, além de também ter apresentado a maior precipitação diária e maior umidade relativa do ar. Nos dias 24 de março, 11, 17 e 18 de abril e 14 de maio foram observados valores destoantes do conjunto de temperaturas diárias, denominados nos gráficos *boxplots* como *outliers*. De acordo com Rocha (2020), esses desvios são causados por anomalias climáticas.

Figura 26 - Temperatura horária por dia para os meses de coleta de dados (estação A301 – INMET).

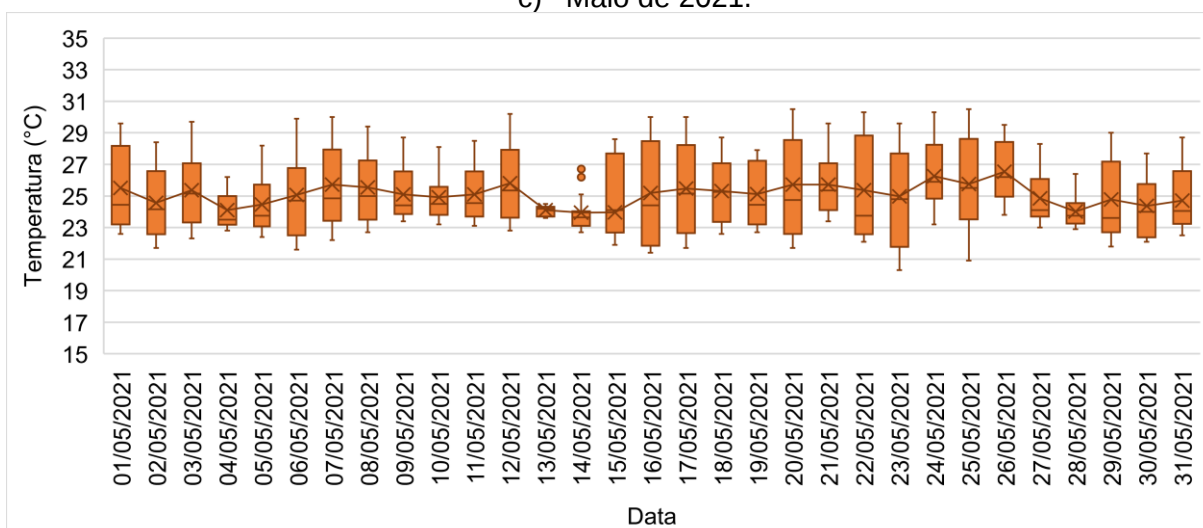
a) Março de 2021.



b) Abril de 2021.



c) Maio de 2021.



Fonte dos dados: INMET (2021).

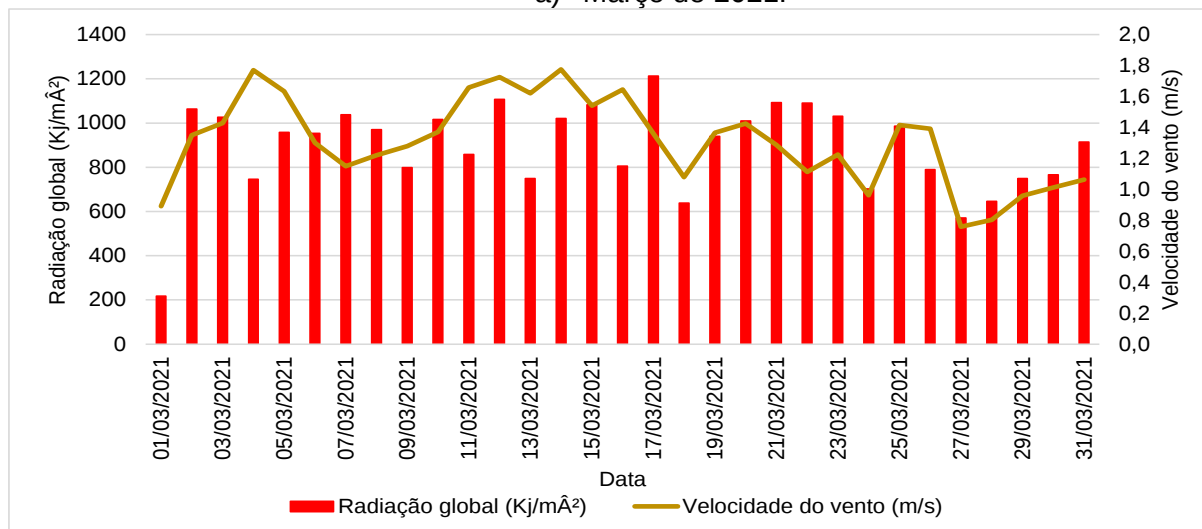
A Figura 27 apresenta os valores médios diários para a radiação global e para os valores diários médios da velocidade dos ventos. Estudos realizados por Tiba e Leal (2017), sobre índices de radiação global e UV na cidade do Recife, relataram uma forte dependência horária e sazonal peculiar da região Nordeste do Brasil. Os valores mais altos de radiação são geralmente atingidos ao meio-dia e durante o verão, quando há pouca nebulosidade, principalmente no mês de março quando ocorre a transição de um tempo seco para um período de precipitação mais intensa. Seguindo o relatado pelos autores, o mês de março apresentou a maior radiação global diária média entre os três meses de coleta, com um valor de $888,66 \text{ Kj/m}^2$. O dia 17, também dia da menor temperatura mínima e maior amplitude térmica, obteve a maior média de março, de $1212,3 \text{ Kj/m}^2$, enquanto o dia primeiro atingiu o menor valor, de $216,9 \text{ Kj/m}^2$, sendo também o dia de maior precipitação acumulada e maior umidade relativa do ar média do mês. Entretanto, dentro do período de coleta de dados, o dia 12 obteve a menor radiação global, com valor de $1107,6 \text{ Kj/m}^2$.

No mês de abril, que atingiu média de $766,8 \text{ Kj/m}^2$, o dia de maior radiação global foi o 02, com valor de $1029,9 \text{ Kj/m}^2$, enquanto o dia 15 foi o de menor valor, de $421,5 \text{ Kj/m}^2$. Já o mês de maio atingiu a menor média diária, de $664,45 \text{ Kj/m}^2$. O dia 16 atingiu a maior radiação global média, de $950,2 \text{ Kj/m}^2$, enquanto o menor valor, de $31,0 \text{ Kj/m}^2$, foi alcançado no dia 13, que corresponde ao mesmo dia de maior umidade e precipitação acumulada, e a menor amplitude térmica. Segundo Palmeira (2016), a variação térmica diária depende, entre vários outros fatores, da radiação solar, da umidade e da velocidade do vento, o que confirma o ocorrido no dia 13 de maio.

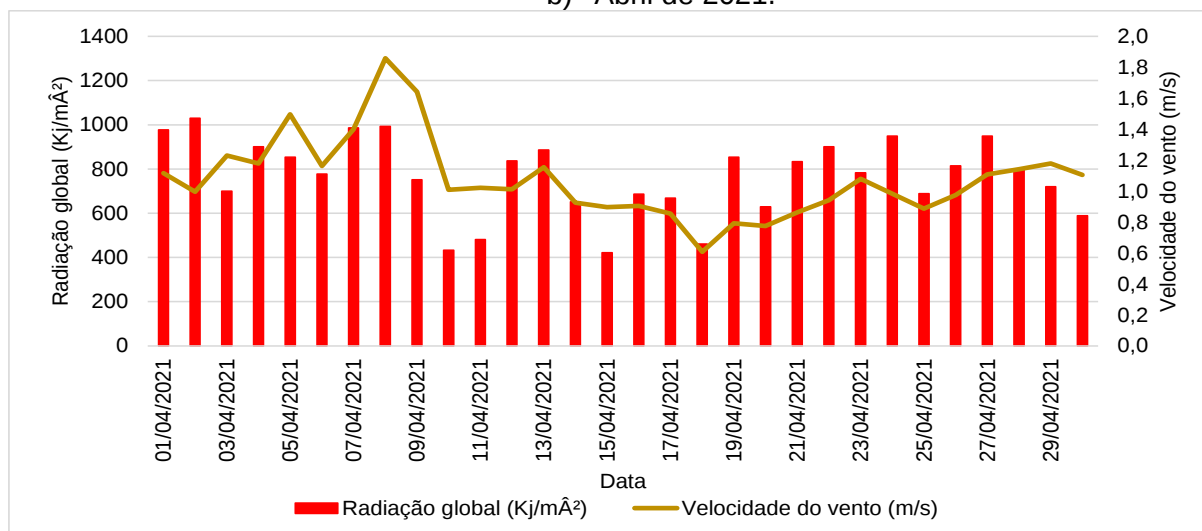
Quanto à velocidade dos ventos, o mês de março atingiu o maior valor médio, de $1,3 \text{ m/s}$, e teve a maior média diária no dia 14, mesmo dia de menor umidade relativa do ar média, e o menor valor no dia 27. Em abril, a média mensal foi de $1,1 \text{ m/s}$, com o maior valor diário no dia 08, também dia de menor umidade relativa do ar, e menor valor de velocidade do vento no dia 18, mesmo dia de maior umidade relativa do ar. Para o mês de maio, com média mensal semelhante à de abril, o dia de maior velocidade dos ventos foi o 26, também dia de menor umidade, e o dia de menor valor foi o 04.

Figura 27 - Radiação média diária e velocidade dos ventos média diária para os meses de coleta de dados (estação A301 – INMET).

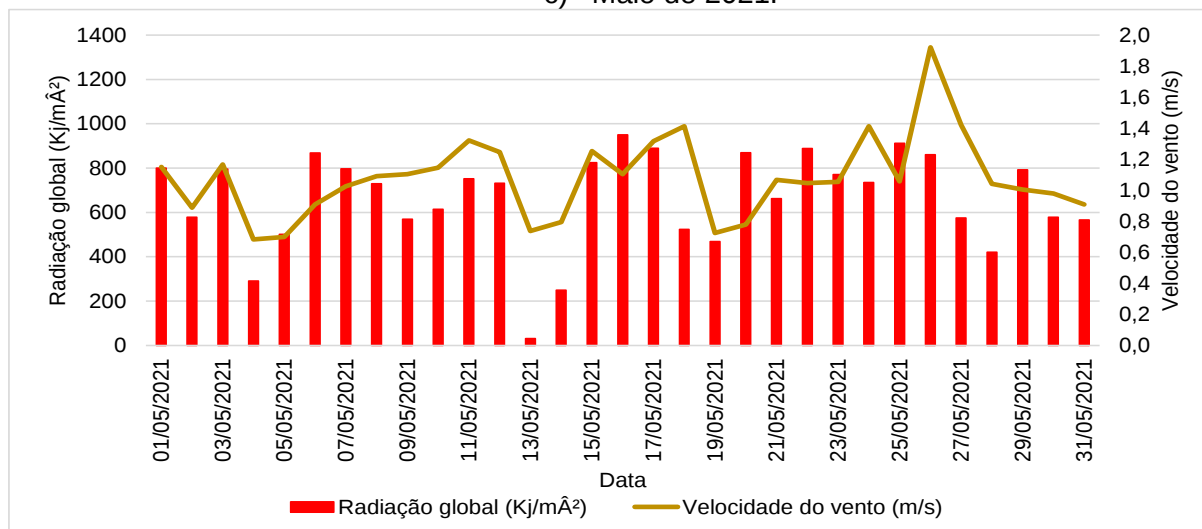
a) Março de 2021.



b) Abril de 2021.



c) Maio de 2021.



Fonte dos dados: INMET (2021).

A partir dos dados de precipitação e temperatura dos meses de coleta de dados, foram escolhidos os dias de eventos extremos para análise do desempenho dos telhados verdes convencional e de baixo custo em comparação com a cobertura convencional. Foram selecionados os dias que atingiram as temperaturas máximas mais elevadas e as mínimas mais baixas; os dias com maiores e menores amplitudes térmicas e o dia com maior precipitação diária de cada mês de coleta, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 - Dias de análise de acordo com critério escolhido, datas no ano de 2021.

Evento analisado	Datas (dia e mês)		
	Março	Abril	Maio
Dia com maior temperatura externa	08/03	22/04	07/05
Dia com menor temperatura externa	17/03	12/04	23/05
Dia com maior amplitude térmica	17/03	27/04	25/05
Dia com menor amplitude térmica	13/03	18/04	13/05
Dia com maior precipitação acumulada	28/03	11/04	13/05

Fonte: Autor.

5.1.3 Análise da discrepância entre medições dos equipamentos *Escort iMINI MX-IN-S-8-L* e *Datalogger IP-747RH*

Para verificar a existência de discrepâncias nos valores de temperatura medidos pelos termômetros utilizados nos protótipos, foram realizadas diversas medições em que os aparelhos tinham suas localizações no interior das CTs alternadas, como descrito anteriormente. A partir desse procedimento, também foi possível analisar o comportamento térmico das paredes, para verificar a ocorrência de temperaturas destoantes das demais, devido à incidência direta dos raios solares ou a sombras projetadas em sua superfície externa.

A Tabela 9 apresenta os valores registrados durante os três dias de análise. É possível observar que as paredes esquerdas das CTs 1 e 2 apresentaram as temperaturas mais elevadas em todas as medições, devido à incidência direta do sol no horário da coleta dos dados. Apesar disso, a diferença térmica com relação às outras paredes é pequena, não superando o valor de 0,4°C e 0,3°C nas CTs 1 e 2, respectivamente. Vale destacar que essa pequena diferença entre as medições se enquadra na precisão do equipamento, conforme a Tabela 7.

Tabela 9 - Temperaturas (°C) nas paredes para análise da calibração.

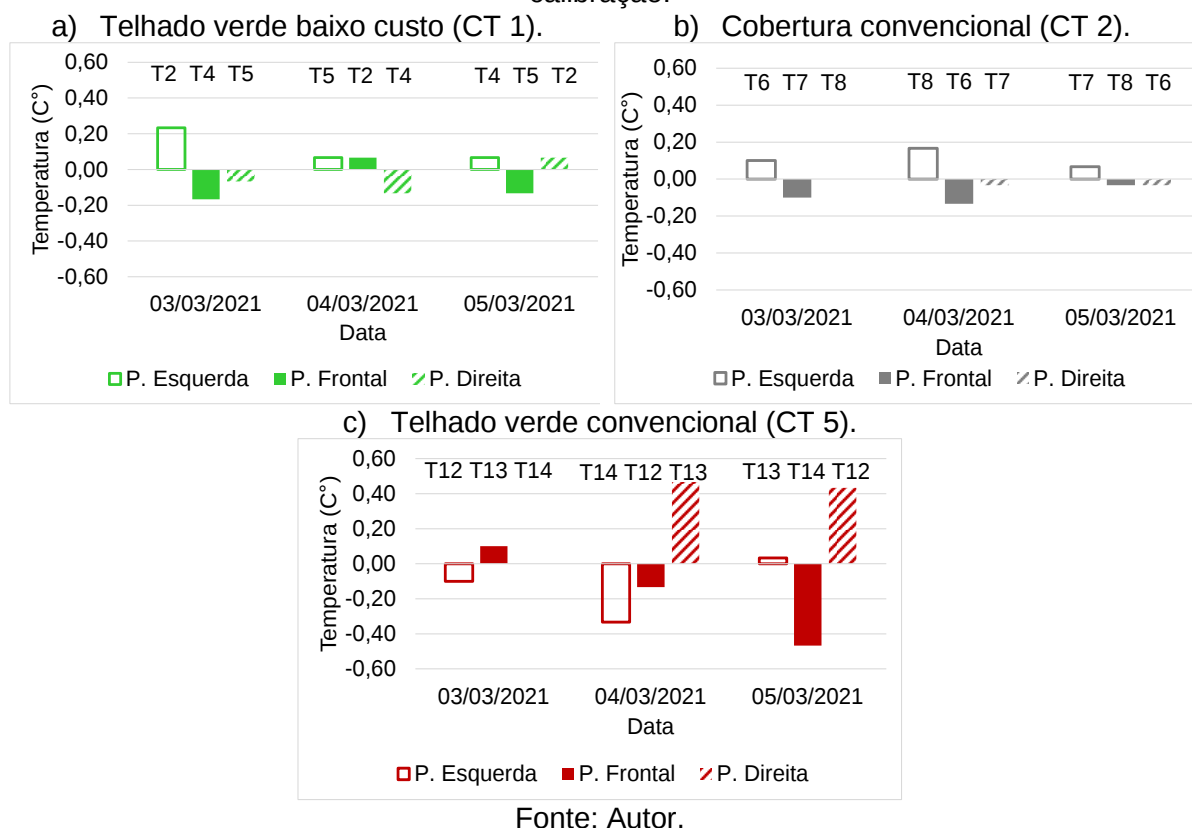
Escort iMini MX-IN-S-8-L										
Data	Parede (P)	Telhado verde de baixo custo (CT 1)			Cobertura convencional (CT 2)			Telhado verde convencional (CT 5)		
		T (°C)	Média		T (°C)	Média		T (°C)	Média	
03/03/2021	P. Esquerda	T2	26,3		T6	26,1		T12	25,7	
	P. Frontal	T4	25,9	26,1	T7	25,9	26,0	T13	25,9	25,8
	P. Direita	T5	26,0		T8	26,0		T14	25,8	
04/03/2021	P. Esquerda	T5	27,2		T8	27,3		T14	26,5	
	P. Frontal	T2	27,2	27,1	T6	27,0	27,1	T12	26,7	26,8
	P. Direita	T4	27,0		T7	27,1		T13	27,3	
05/03/2021	P. Esquerda	T4	27,7		T7	27,9		T13	27,3	
	P. Frontal	T5	27,5	27,6	T8	27,8	27,8	T14	26,8	27,3
	P. Direita	T2	27,7		T6	27,8		T12	27,7	

Fonte: Autor.

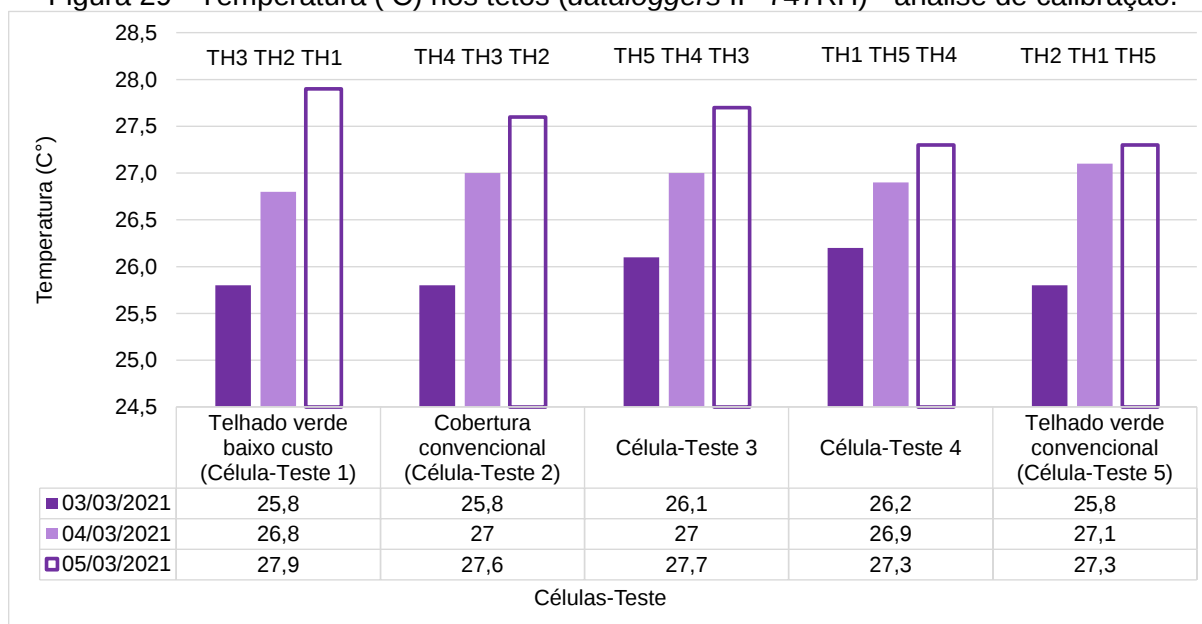
Na CT 5 foram observadas diferenças entre os termômetros de 0,8°C e 0,9°C no segundo (04/03/2021) e terceiro (05/03/2021) dia, respectivamente. Essa maior discrepância não ocorreu no primeiro dia de medição e os valores extremos não foram obtidos a partir dos mesmos equipamentos, garantindo que tal diferença não aconteceu por problemas no equipamento, caso em que haveria um padrão de comportamento de cada termômetro, apresentando sempre as maiores ou menores temperaturas. Além disso, essa diferença entre medições não ocorreu para o mesmo par de paredes, o que não indica uma interferência das paredes na temperatura interna. A discrepância apresentada pode ser justificada pela precisão do equipamento, que conforme a Tabela 7, é de $\pm 0,3^\circ\text{C}$ para valores de temperatura entre -10°C e 70°C . Dessa forma, os aparelhos *Escort iMINI* apresentaram valores de temperatura condizentes entre si, sem nenhum valor discrepante nas posições em que se encontraram.

A Figura 28 mostra que a diferença máxima entre as medições e as médias diárias para cada telhado foi de aproximadamente $0,5^\circ\text{C}$, valor $0,1^\circ\text{C}$ acima do observado por Rocha (2020), fato justificável devido aos diferentes tipos de cobertura nos telhados. No momento das medições, a CT 1 estava com a vegetação Grama-Esmeralda; a CT 2 sem cobertura, ou seja, com a laje convencional; e a CT 5 com telhado verde de Coroa-de-Frade, disposição essa utilizada no estudo de Gomes (2019). Santos (2016) obteve valores com até 1°C de diferença entre as temperaturas das paredes para CT de telhado verde com vegetação Babosa e com telhados convencionais, em estudo realizado no Agreste Pernambucano.

Figura 28 - Desvio de temperatura entre a média e o valor de cada parede - análise de calibração.



Para realização da análise dos dados fornecidos pelos termohigrômetros *Datalogger* IP-747RH, esses foram dispostos em diferentes CTs ao longo dos três dias de coleta, como citado anteriormente. A Figura 29 apresenta os valores obtidos em cada um dos equipamentos em suas respectivas posições nos tetos das CTs. Observa-se que para o dia 03/03/2021, todos os *dataloggers* mostraram as menores temperaturas para uma mesma CT, de forma semelhante ao que ocorreu no dia 05/03/2021, em que todos termohigrômetros apresentaram os valores mais elevados. Como mostra a tabela presente na Figura 29, nenhum dos equipamentos forneceu medições com grande discrepância com relação aos outros para um mesmo dia, sendo as diferenças entre os valores de cada CT devido às diferentes coberturas dos telhados.

Figura 29 - Temperatura (°C) nos tetos (*dataloggers* IP-747RH) - análise de calibração.

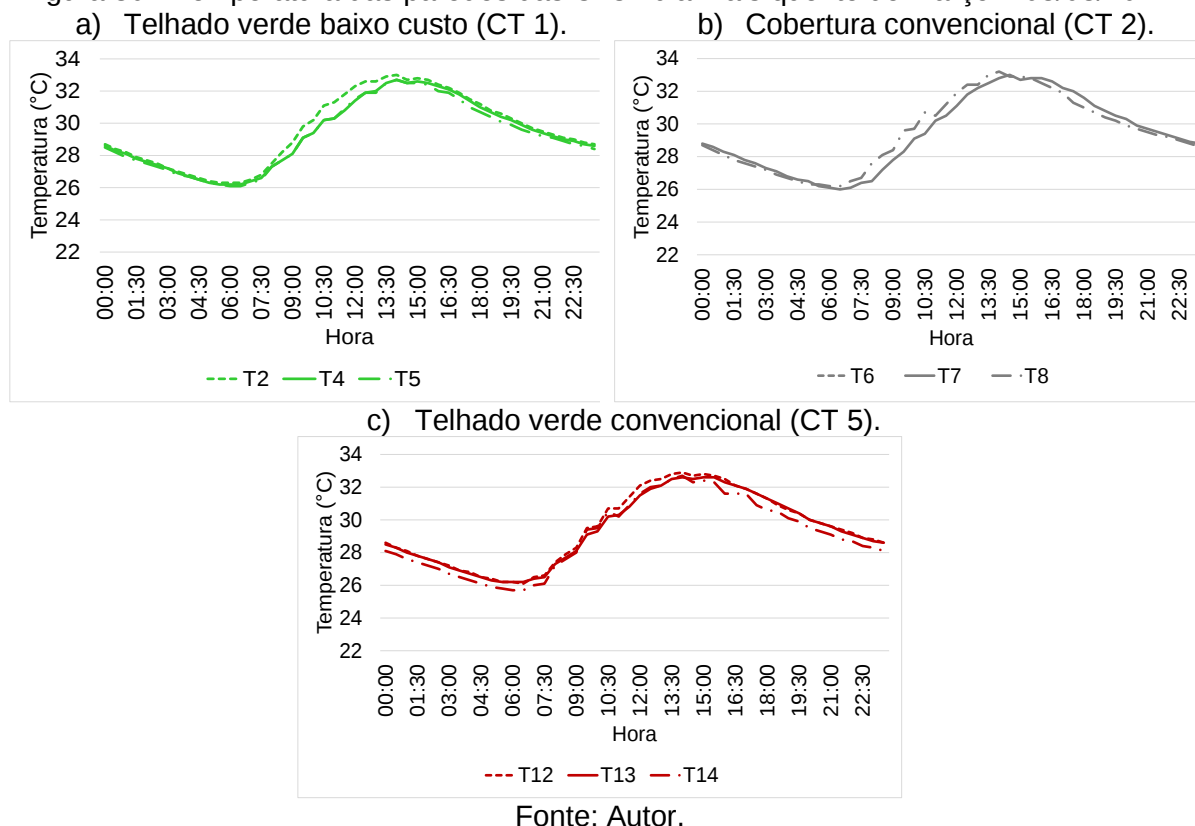
Fonte: Autor.

5.1.4 Análise da interferência das paredes na temperatura interna dos protótipos da UETER

Na verificação da interferência das paredes na temperatura interna das CTs, causada por fatores externos como incidência direta de raios solares, ventos ou sombras, foi analisado o dia mais quente de cada um dos três meses. Na Figura 30, estão apresentados os gráficos com as temperaturas de cada parede no dia 8 de março de 2021, o dia mais quente do mês para o período de coleta. É possível observar que em termos qualitativos, todas as paredes de cada CT apresentaram curvas semelhantes, com as temperaturas internas acompanhando as mudanças térmicas externas.

Não houve um padrão no comportamento térmico quanto à posição da parede analisada de cada CT. Para o telhado verde de baixo custo (Figura 30a), bem como para o telhado convencional (Figura 30b), a maior variação de temperatura em relação à média foi de 0,7°C, apresentando valores mais elevados a parede esquerda (T2) e a direita (T8), respectivamente. Apenas o termômetro T6 do telhado convencional não coletou dados devido a problemas com a bateria. Por fim, para o telhado verde convencional (Figura 30c), a diferença entre as paredes foi ainda mais sutil, sem nenhuma das paredes apresentar temperaturas mais elevadas como padrão, com maior variação em relação à média de 0,5°C.

Figura 30 - Temperatura das paredes das CTs - dia mais quente de março – 08/03/2021.



As Figuras de A1 a A6 (Apêndice A) mostram os gráficos para o dia de maior temperatura dos meses de abril e de maio. No mês de abril, o telhado verde de baixo custo apresentou a maior diferença de temperatura entre as paredes, com a parede esquerda (T2) atingindo $0,8^{\circ}\text{C}$ acima da média. Para os telhados convencional e verde convencional, a maior diferença de temperatura foi de $0,6^{\circ}\text{C}$ em relação à média, com as paredes esquerda (T6) e direita (T14) mais fria que as demais, respectivamente. A parede direita (T14) da CT com telhado verde convencional apresentou temperaturas mais baixas ao longo de todo o dia, fato que pode ser justificado pela sombra que o edifício do CTG projeta sobre ela. No mês de maio, a maior diferença entre a temperatura das paredes e a média em todas as CTs foi de $0,7^{\circ}\text{C}$. As paredes que apresentaram as maiores temperaturas foram à esquerda (T2) no telhado verde de baixo custo, a frontal (T7) no telhado convencional e a frontal (T13) no telhado verde convencional. A parede direita (T14) da CT com telhado verde convencional atingiu as menores temperaturas ao longo do dia devido à sombra projetada sobre ela.

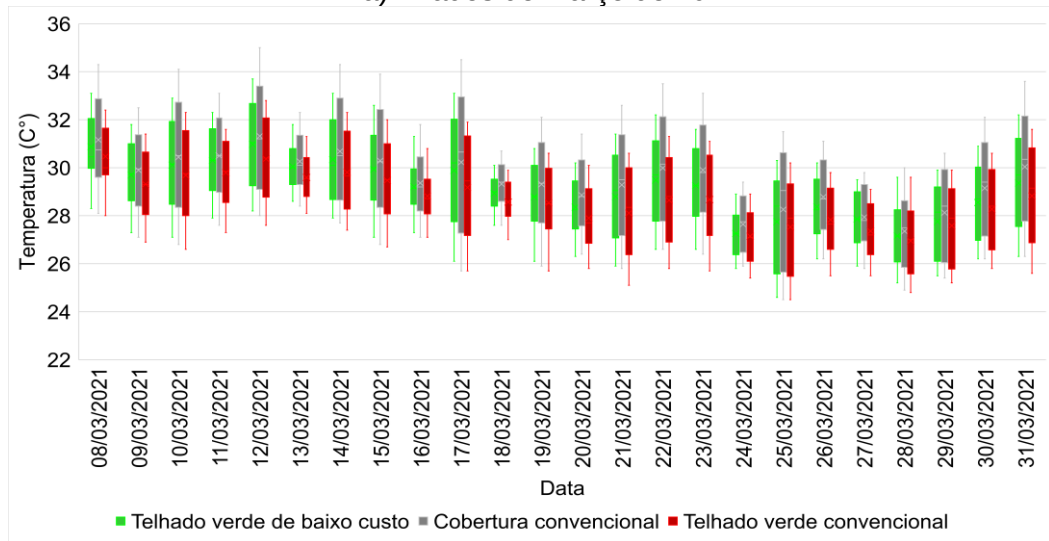
Dessa forma, considerando a precisão do equipamento *Escort iMINI MX-IN-S-8-L* instalado nas paredes, de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ para temperaturas dentro da faixa de -10°C e 70°C , conforme Tabela 7 apresentada anteriormente, nenhuma das paredes

apresentou discrepâncias significativas entre si, capazes de afetar a medição da temperatura no interior das CTs, durante o período de análise. Da mesma forma observada por Leonardo (2021), na análise da interferência das paredes na temperatura de telhados ecológicos e do mesmo telhado verde convencional, no período entre abril e junho de 2021, os dados fornecidos pelos sensores apresentaram grande semelhança, sendo a temperatura média representativa dos valores amostrais coletados.

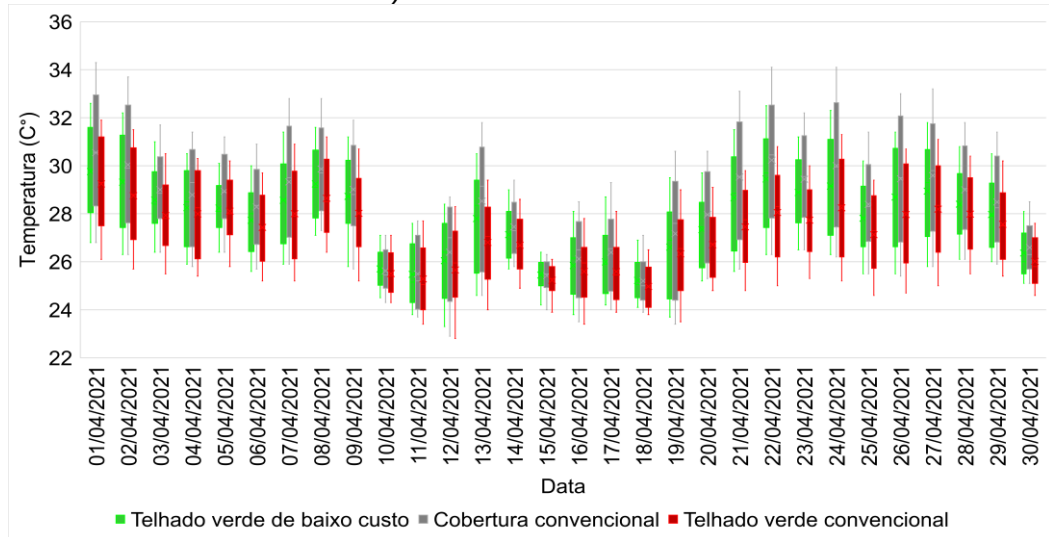
5.1.5 Comparação do comportamento térmico entre coberturas a partir de dados internos diários

As temperaturas no teto, obtidas pelos *dataloggers* IP-747RH (Figura 31), foram coletadas diariamente, a cada 30 minutos, permitindo a comparação detalhada do desempenho térmico entre cada tipo de telhado. Observa-se que a CT com cobertura convencional atingiu temperaturas máximas superiores às atingidas pelas CTs de telhados verdes convencional e de baixo custo. Isso ocorre em todo o período de análise, com exceções nos dias 10 e 11 de abril, em que todos os telhados apresentaram máxima de 27,1°C e os telhados convencional e verde convencional atingiram máximas iguais a 27,7°C, respectivamente. Em maio, nos dias 14 e 28, o telhado verde de baixo custo atingiu temperatura máxima superior ao telhado convencional em 0,1°C. Tais exceções podem ser justificadas pela precisão dos equipamentos *dataloggers* IP-747RH, que chega até 1°C na faixa de temperatura compreendida entre -10°C e 40°C, como mostra a Tabela 7 apresentada anteriormente. A CT com telhado verde de baixo custo, apesar de apresentar temperaturas de pico diárias inferiores ao telhado convencional, atingiu temperaturas máximas superiores às atingidas pela CT com telhado verde convencional, com exceções nos dias 24, 28 e 29 de março, 10 de abril e 02, 27 e 30 de maio, em que apresentaram valores iguais, e do dia 05 de abril, quando o telhado verde convencional atingiu temperatura superior em 0,1°C. Resultado semelhante foi encontrado por Rocha (2020) com um telhado de referência e um telhado verde de baixo custo de configuração similar ao do presente estudo, em que as temperaturas do telhado de referência foram superiores às do telhado verde ecológico com PET, além de apresentar maior amplitude térmica.

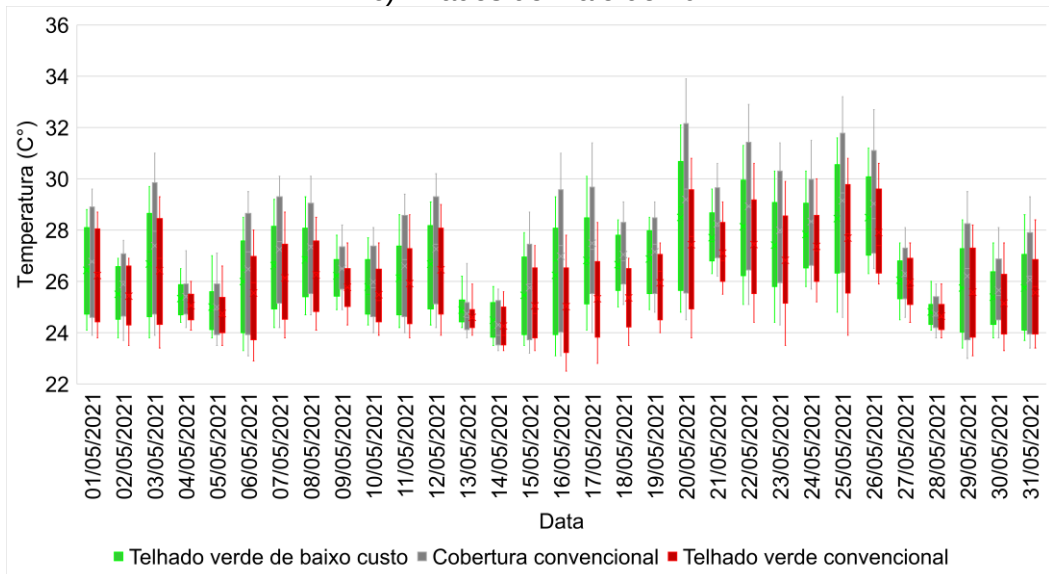
Figura 31 - *Boxplot* de temperaturas diárias com dados dos sensores de teto.
a) Dados de março de 2021.



b) Dados de abril de 2021.



c) Dados de maio de 2021.



Fonte: Autor.

As temperaturas médias diárias de cada telhado estão apresentadas na Tabela 10. Para os três meses de coleta de dados, o telhado verde com garrafas PET atingiu temperatura média inferior ao convencional, com diferenças entre 0,4 e 0,5°C. O telhado verde convencional obteve as menores médias mensais, até 0,6°C e 1,1°C a menos que o de baixo custo e o convencional com laje, respectivamente.

Tabela 10 - Temperaturas (°C) médias diárias nos meses de análise.

Mês	Telhado verde baixo custo (CT 1)	Cobertura convencional (CT 2)	Telhado verde convencional (CT 5)	Externa
Março	29,1	29,5	28,7	26,7
Abril	27,7	28,2	27,1	26,0
Maio	26,4	26,8	25,9	25,1

*Temperatura média calculada a partir de 08/03/2021, primeiro dia de análise.

**Desconsiderados os dias de coleta de dados.

Fonte: Autor.

A Tabela 11 apresenta as amplitudes médias diárias nos meses de estudo. Nela é possível observar que a CT com telhado verde de baixo custo atingiu menores amplitudes térmicas diárias quando comparado às com telhado convencional, nos três meses de análise, com diferença mínima de 1°C na média diária. As CTs 1 e 5, com coberturas verdes, apresentaram amplitudes médias diárias semelhantes, o que mostra a eficiência das coberturas vegetadas em conter as trocas térmicas com o meio externo e manter uma menor variação na temperatura ao longo do dia. Em estudo experimental realizado com telhado verde modular extenso em Indiana, Estados Unidos, Tang e Qu (2016) observaram que o fluxo de calor do telhado verde foi bem inferior quando comparado ao telhado tradicional, com perdas médias de 11,86 W/m² e 15,77 W/m², respectivamente. Em termos de perdas totais de calor ao longo do experimento, os autores relataram uma redução de 17,3% no telhado vegetado.

Tabela 11 - Amplitudes térmicas (°C) médias diárias nos meses de análise.

Mês	Telhado verde baixo custo (CT 1)	Cobertura convencional (CT 2)	Telhado verde convencional (CT 5)	Externa
Março	4,7	5,8	4,7	7,2
Abril	4,6	5,6	4,6	6,9
Maio	4,3	5,3	4,3	6,4

*Temperatura média calculada a partir de 08/03/2021, primeiro dia de análise.

**Desconsiderados os dias de coleta de dados.

Fonte: Autor.

5.1.6 Comparação do desempenho térmico das CTs para os dias de análise investigados a partir de dados horários

A observação de dados horários permite analisar o comportamento térmico das diferentes coberturas nos dias com eventos diferenciados. Foram escolhidos os dias de maior temperatura externa máxima e de menor temperatura externa mínima, os dias com maior e menor amplitudes térmicas e o dia com maior precipitação diária de cada mês de coleta, como mostrado anteriormente na Tabela 8 construída a partir da análise dos dados meteorológicos do período.

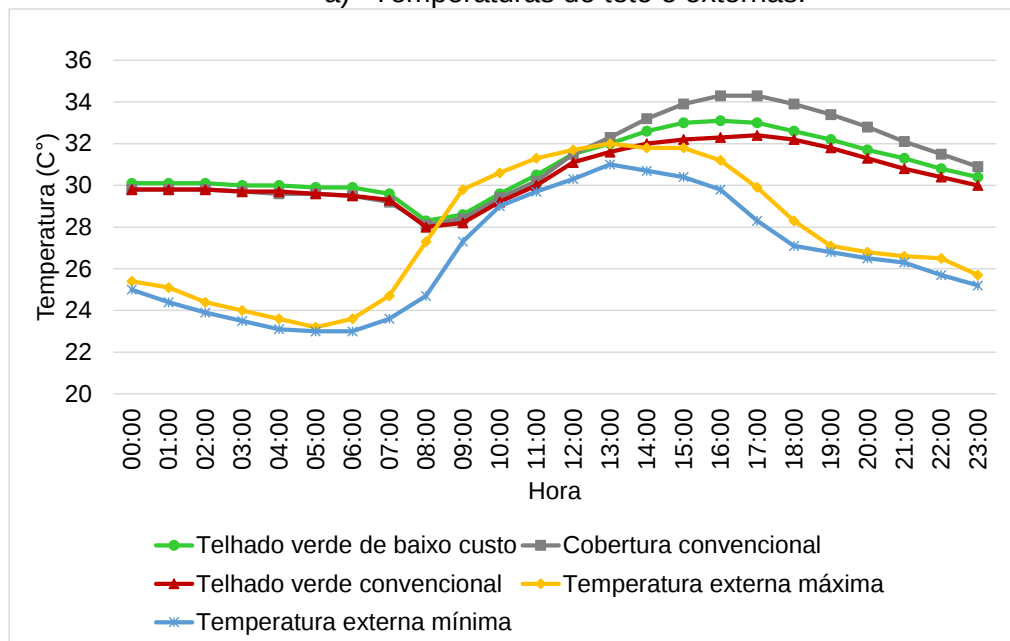
5.1.6.1 *Análise do dia com maior temperatura máxima de cada mês de coleta*

A observação da forma como os telhados influenciam na temperatura interna do ambiente em dias de temperaturas externas mais elevadas é de grande relevância, uma vez que o uso de coberturas vegetadas pode contribuir para o conforto térmico das edificações, principalmente em locais com clima quente como o observado em Recife. As Figuras 32, 33 e 34 apresentam gráficos de linha com dados horários de temperatura para cada tipo de telhado estudado, além dos dados de temperatura externa, com os valores de máximo e mínimo a cada hora. Para análise da influência das distintas coberturas - tanto logo abaixo da laje, como também na altura em nível de um adulto, conforme recomendações da ISO 7726 (ABNT, 1998) - foram analisadas as temperaturas obtidas pelos *dataloggers* dos tetos e a média das temperaturas dadas pelos equipamentos das paredes de cada CT. Os dados internos de temperatura foram medidos a cada 30 minutos e os dados externos a cada 1 hora.

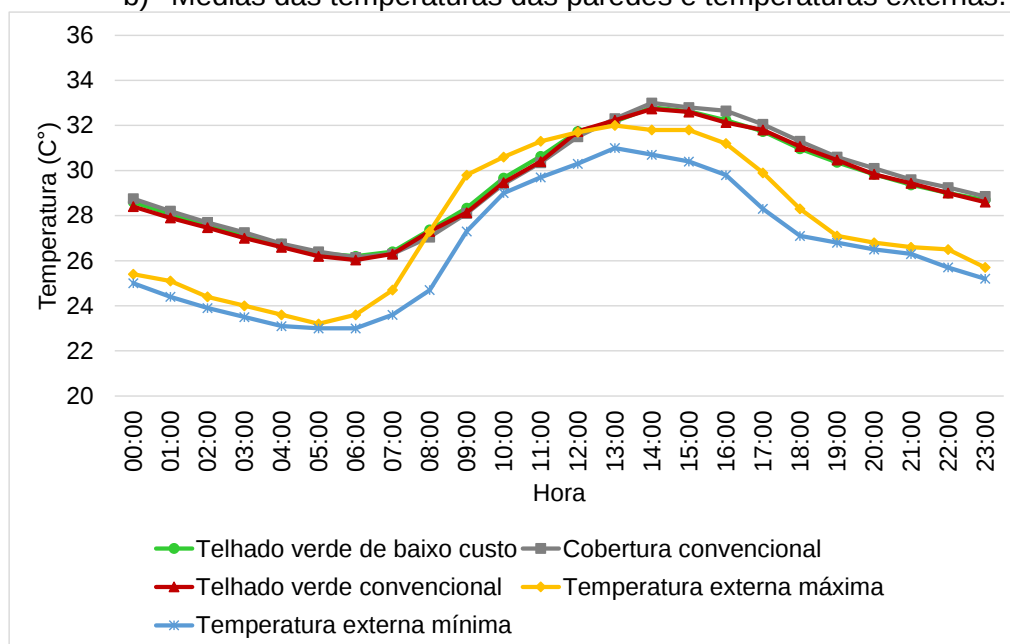
No geral, as temperaturas internas às CTs atingiram valores máximos diários superiores às máximas externas, nos dias mais quentes de março e de abril. Esse fato pode ser justificado pela localização da estação A301 do INMET, no bairro do Curado, que se encontra em uma área bastante arborizada, em que se pode esperar temperaturas mais amenas que no local em que se encontra a UETER. A Figura 33 apresenta os dados de março.

Figura 32 - Temperaturas internas e externas - dia com maior temperatura máxima de março
- 08/03/2021.

a) Temperaturas do teto e externas.



b) Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas.



Fonte: Autor.

Da Figura 32, observa-se que no dia mais quente do mês de março, as três CTs apresentaram comportamentos semelhantes em termos qualitativos, com curvas similares entre si. Em relação aos dados coletados pelos equipamentos das paredes, tem-se curvas sobrepostas, revelando a semelhança também quantitativa entre os telhados. Entretanto, em relação aos valores atingidos abaixo dos tetos, principalmente no período de maiores temperaturas internas, nota-se diferença entre

os tipos de cobertura. O telhado de referência atingiu os valores mais elevados, às 16h, com temperatura de 34,3°C, valor esse maior 2,0°C e 1,3°C que os telhados verdes convencional e de baixo custo, respectivamente. O telhado verde de baixo custo apresentou temperaturas intermediárias, com valores até 0,8°C superiores ao telhado verde convencional ao longo do dia.

Na Tabela 12, há uma síntese dos valores analisados mais relevantes, extraídos dos equipamentos instalados nos tetos, por terem apresentado maiores discrepâncias entre as CTs. Em relação à amplitude térmica diária, observa-se que ambos os telhados vegetados foram capazes de conter as trocas de calor com o meio externo, uma vez que os telhados verdes de baixo custo e convencional tiveram variação de temperatura interna de 4,8°C e 4,4°C, respectivamente, o equivalente a 53,3% e 48,9% da amplitude externa, que variou 9°C ao longo do dia.

Tabela 12 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 08/03/2021.

Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	32,0	-	2,3	13:00	-	23,0	-	5,1	05:00	-	9,0
Telh. Verde BC (CT 1)	33,1	-1,1	1,2	16:00	03:00	28,3	-5,3	-0,2	08:00	03:00	4,8
Telh. Cn (CT 2)	34,3	-2,3	-	16:00	03:00	28,1	-5,1	-	08:00	03:00	6,2
Telh. Verde Cn (CT 5)	32,4	-0,4	1,9	17:00	04:00	28,0	-5,0	0,1	08:00	03:00	4,4

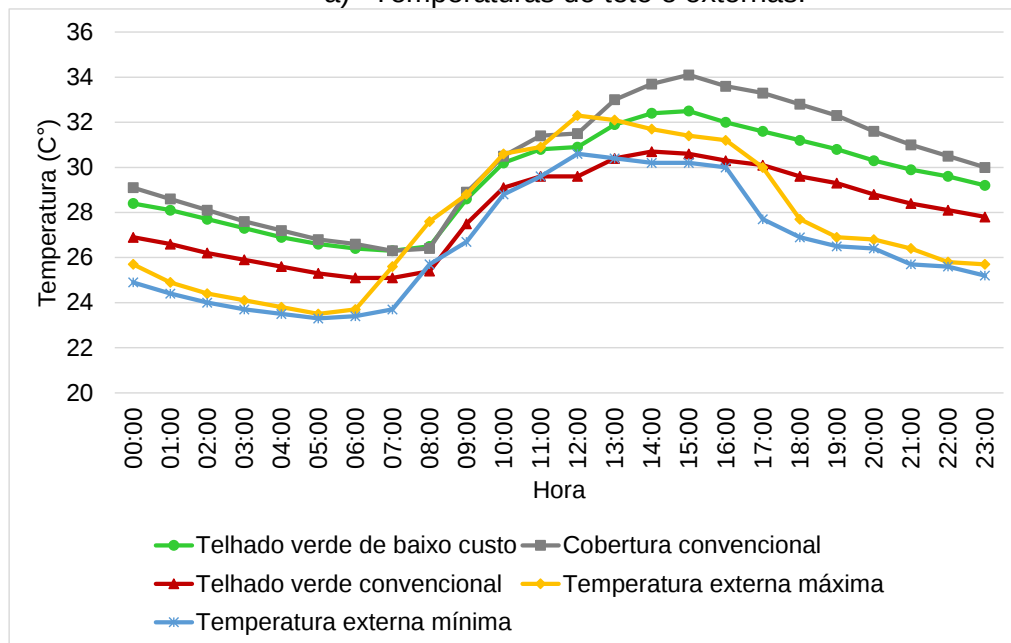
Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

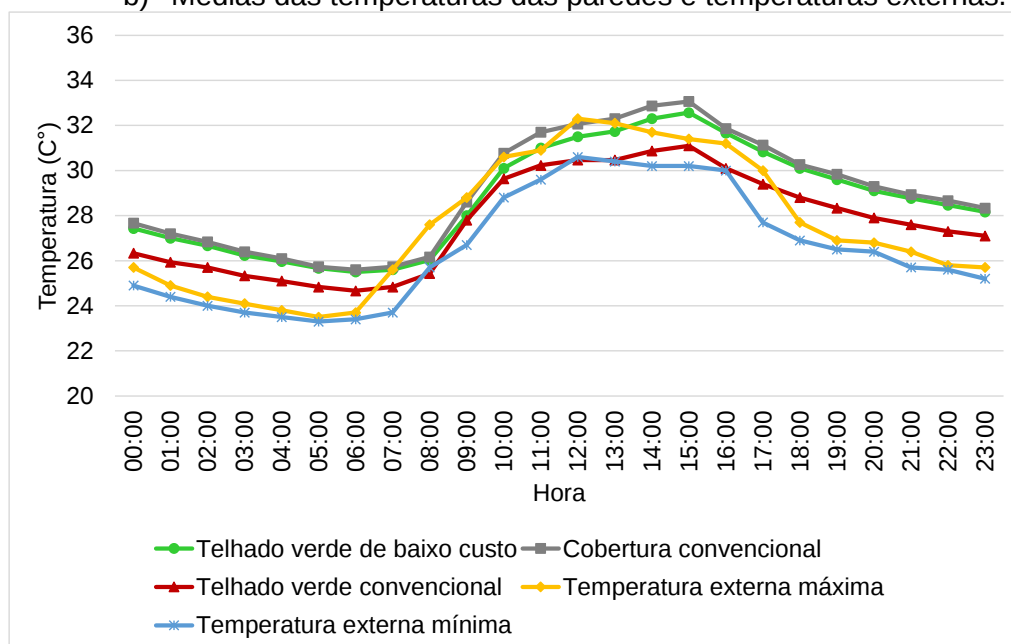
O telhado verde com PET foi capaz de retardar o horário de pico máximo de temperatura interna em até 3 horas do horário de máxima externa, atingindo valor 1,1°C superior, enquanto o telhado verde convencional atrasou em até 4 horas, alcançando valor 0,4°C a mais que a máxima externa. Quanto às temperaturas mínimas, todos os telhados atrasaram o horário de pico em até 3 horas. Os telhados verdes de baixo custo e convencional atingiram valores mínimos 5,3°C e 5,0°C acima do valor externo. A Figura 33 apresenta os dados do mês de abril.

Figura 33 - Temperaturas internas e externas - dia com maior temperatura máxima de abril - 22/04/2021

a) Temperaturas do teto e externas.



b) Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas.



Fonte: Autor.

Da Figura 33, é possível observar que no mês de abril houve maiores discrepâncias entre os valores de temperatura dos telhados, quando comparado ao mês de março. As curvas dos três telhados em estudo são similares entre si, sem discrepâncias qualitativas, para os dados extraídos dos equipamentos do teto e das paredes. Na análise dos dados do teto das CTs, observa-se que o telhado verde de baixo custo e o telhado de referência apresentam curvas quase sobrepostas no início

do dia, com diferenças mais significativas entre as 13h e 21h e máximo valor às 17h, com diferença de 1,7°C. O telhado verde convencional atingiu valores mais baixos ao longo do dia, que chegaram a 3,5°C e 1,9°C inferiores aos telhados convencional e verde de baixo custo, respectivamente, às 15h.

Quanto aos dados de temperatura das paredes, observa-se que o telhado verde de baixo custo e o convencional apresentam curvas sobrepostas ao longo de quase todo o dia, com diferença máxima entre si de 0,7°C às 10h. O telhado verde convencional manteve-se com as temperaturas mais baixas que os demais, com diferença máxima de até 2°C e 1,57°C abaixo da temperatura dos telhados convencional e verde de baixo custo, às 14h e 16h, respectivamente.

Na Tabela 13 estão os dados de máximo e mínimo para o dia mais quente de abril, e a amplitude térmica externa e de cada cobertura, todos baseados nos dados extraídos dos equipamentos nos tetos. O telhado verde de baixo custo atingiu temperatura máxima similar à máxima externa, enquanto o telhado verde convencional atingiu temperatura interna máxima 1,6°C inferiores à externa, mais uma vez com um ganho de calor menor que o telhado verde com PET, como ocorreu no mês de março. Em relação à cobertura convencional, os telhados vegetados de baixo custo e convencional atingiram temperaturas máximas inferiores, com diferenças de até 1,6°C e 3,4°C, respectivamente. Cortés e Castillo (2011), em estudo com telhados verdes com garrafas PET, relataram a redução de até 3°C na cobertura de telhado verde em relação à cobertura de fibrocimento, e até 4°C em relação à temperatura ambiente externa. Panziera *et al.* (2015) encontraram redução semelhante entre uma cobertura verde de garrafas PET e de telhado convencional de fibrocimento.

Tabela 13 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 22/04/2021.

Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	32,3	-	1,8	12:00	-	23,3	-	3,0	05:00	-	9,0
Telh. Verde BC (CT 1)	32,5	-0,2	1,6	15:00	03:00	26,3	-3,0	0,0	07:00	02:00	6,2
Telh. Cn (CT 2)	34,1	-1,8	-	15:00	03:00	26,3	-3,0	-	07:00	02:00	7,8
Telh. Verde Cn (CT 5)	30,7	1,6	3,4	14:00	02:00	25,1	-1,8	1,2	06:00	01:00	5,6

Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

O telhado verde convencional apresentou uma variação térmica diária correspondente a 62% da amplitude térmica externa, enquanto o telhado verde de baixo custo variou 69% da variação externa. Todos os telhados foram capazes de retardar o horário de pico máximo, com atraso de 3h para os telhados verde de baixo custo e convencional, e de 2h para o telhado verde convencional.

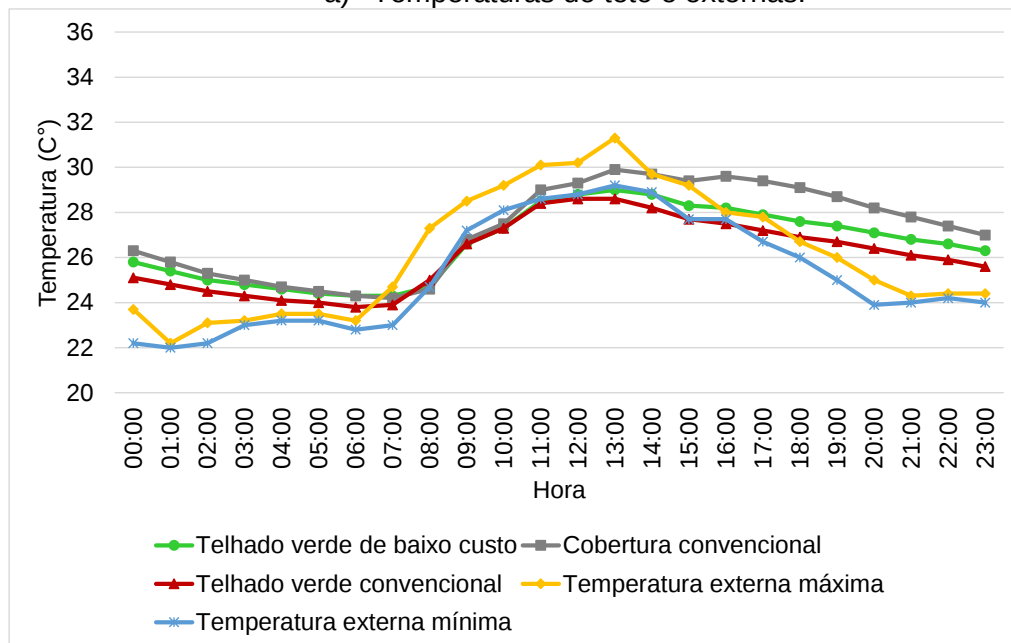
Quanto às temperaturas mínimas, o telhado verde com PET e o convencional atingiram valores 3°C acima da mínima externa, com retardo horário de 2h. Já a CT com cobertura verde convencional alcançou temperatura mínima 1,8°C acima do valor externo, com 1h de atraso, contendo mais as trocas de calor com o meio externo.

Na Figura 34, no dia mais quente no mês de maio, assim como nos meses anteriores, as curvas de cada telhado apresentaram inclinações semelhantes, indicando comportamentos qualitativos equivalentes ao longo do dia. A partir dos dados do teto, nota-se que as temperaturas dos telhados foram bastante próximas em grande parte do dia, até que começam a apresentar maiores diferenças a partir das 13h. O telhado verde convencional atingiu as temperaturas mais baixas entre as três coberturas, com diferenças de até 0,7°C e 2,2°C em relação aos telhados verde de baixo custo e de referência. Já os dados obtidos pelos equipamentos instalados nas paredes fornecem diferenças ainda mais discretas para as temperaturas de cada CT. O telhado verde convencional apresentou diferença máxima de 0,5°C e 0,9°C em comparação aos telhados verde de baixo custo e de referência.

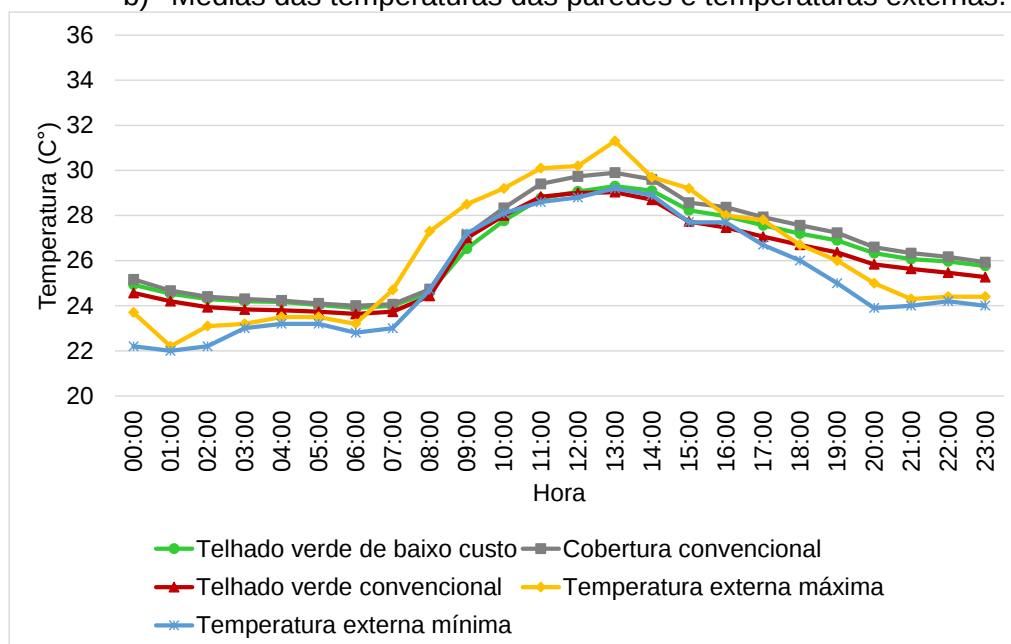
Como mostrado na Tabela 14, baseado nos dados originados nos equipamentos dos tetos para o mês de maio, observa-se que todas as CTs em estudo atingiram temperaturas máximas inferiores à máxima externa, diferentemente do ocorrido nos meses anteriores (março e abril). Os telhados vegetados com PET e convencional atingiram valores máximos inferiores em 2,3°C e 2,7°C, respectivamente, à máxima temperatura externa. Em relação à cobertura convencional, os telhados vegetados com material de baixo custo e convencional atingiram temperaturas máximas inferiores, com diferenças de até 0,9°C e 1,3°C respectivamente.

Figura 34 - Temperaturas internas e externas - dia com maior temperatura máxima de maio - 07/05/2021.

a) Temperaturas do teto e externas.



b) Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas.



Fonte: Autor.

Tabela 14 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 07/05/2021.

Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	31,3	-	-1,4	13:00	-	22,0	-	2,2	01:00	-	9,3
Telh. Verde BC (CT 1)	29,0	2,3	0,9	13:00	00:00	24,3	-2,3	-0,1	06:00	05:00	4,7
Telh. Cn (CT 2)	29,9	1,4	-	13:00	00:00	24,2	-2,2	0,0	07:00	06:00	5,7
Telh. Verde Cn (CT 5)	28,6	2,7	1,3	12:00	-01:00	23,8	-1,8	0,4	06:00	05:00	4,8

Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

Os telhados verdes convencional e de baixo custo apresentaram amplitudes térmicas diárias semelhantes correspondentes a 51,6% e 50,5%, respectivamente, da variação de temperatura externa. Os telhados não foram capazes de retardar o horário de pico máximo, com destaque para a cobertura verde convencional, que atingiu sua temperatura máxima com uma hora de antecedência da máxima externa.

Quanto às temperaturas mínimas, o telhado verde de baixo custo e o convencional atingiram valores próximos, 2,3°C e 2,2°C acima da mínima externa, com retardos horários de 5h e 6h, respectivamente. Já a CT com cobertura verde convencional alcançou temperatura mínima 1,8°C acima do valor externo, com 5h de atraso.

5.1.6.2 Análise do dia com menor temperatura mínima de cada mês de coleta

A observação dos telhados verdes em dias mais frios permite a análise de seu desempenho em temperaturas mais baixas, uma vez que a presença de vegetação e substrato tende a conter as trocas térmicas e fornecer um armazenamento térmico às coberturas quando ocorrem maiores quedas nas temperaturas externas (TANG; QU, 2016).

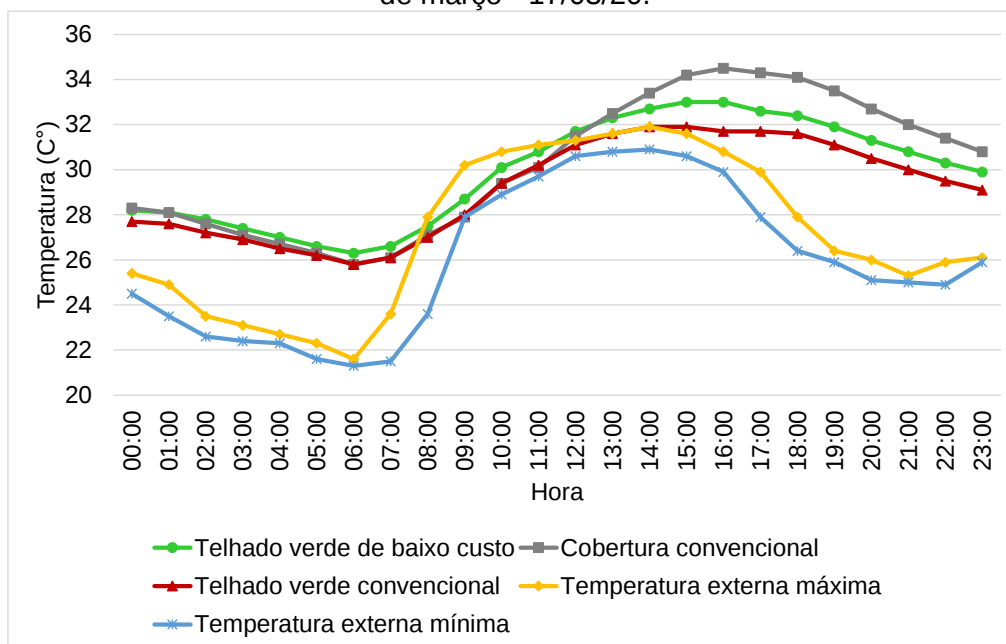
Para o período de coleta de dados analisado, as médias das temperaturas das paredes de cada CT apresentam pequenas diferenças entre si para os dias mais frios de cada mês. As curvas representantes de cada CT estão apresentadas no Apêndice A (Figuras A7, A8 e A9) e mostram-se praticamente sobrepostas ao longo da maior parte do dia, com diferença máxima de 0,8°C entre elas. No mês de março, os telhados verdes convencional e de baixo custo apresentaram médias máxima e

mínima de 32,7°C e 24,8°C e de 33,0°C e 25,0°C, respectivamente. A maior diferença de temperatura horária entre as médias de cada telhado foi de 0,7°C, entre os dois telhados vegetados. Em abril, a maior diferença horária entre as coberturas foi de 0,6°C, na comparação do telhado verde convencional com as demais CTs. O telhado verde de baixo custo atingiu temperaturas máxima e mínima de 28,5°C e 23,0°C, respectivamente, enquanto o telhado verde convencional obteve máxima de 28,4°C e mínima de 22,7°C. Em maio, no dia com as temperaturas mínimas externas mais baixas para o período de análise, os telhados verdes convencional e de baixo custo atingiram máximas de 30,7°C e mínimas de 23°C e 23,6°C, respectivamente. A maior discrepância entre as temperaturas médias das coberturas foi de 0,8°C, na diferença entre o telhado convencional e a cobertura verde convencional.

A partir dos dados extraídos dos equipamentos do teto para o mês de março, observa-se que as curvas de temperatura (Figura 35), são qualitativamente semelhantes entre si, demonstrando comportamento térmico similar para os três telhados. O telhado verde de baixo custo atingiu temperatura máxima de 33,0°C às 15h, valor 1,5°C inferior à máxima do telhado em laje e 1,1°C superior à máxima do telhado verde convencional. A maior diferença horária entre os telhados verdes de baixo custo e convencional foi de 1,3°C, enquanto a diferença deles para a cobertura convencional foi de 1,7°C e 2,8°C, respectivamente.

Na Tabela 15, com dados extraídos dos tetos das CTs, observa-se que o telhado verde convencional chegou à mesma temperatura máxima que a externa, enquanto os telhados convencional e verde de baixo custo atingiram máximas 2,6°C e 1,1°C acima do valor externo. O dia 17 de março de 2021, além de ser o dia com a temperatura externa mais baixa no mês, também foi o dia com a maior amplitude térmica externa. O telhado verde com PET obteve uma amplitude térmica correspondente a 63,2% da variação térmica diária externa. Já o telhado verde convencional apresentou amplitude comparada ao telhado com material de baixo custo equivalente a 57,5% da variação externa. O telhado verde convencional não causou nenhum retardo no horário de pico comparado à hora da máxima temperatura externa, entretanto, os telhados convencional e verde de baixo custo retardaram o pico máximo em 2h e 1h.

Figura 35 - Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor temperatura mínima de março - 17/03/20.



Com relação às temperaturas mínimas, os telhados convencional e verde convencional atingiram o mesmo valor, 4,5°C acima da menor temperatura mínima externa, enquanto o telhado verde de baixo custo obteve mínima mais elevada, 5°C acima do valor mínimo externo. O horário de pico mínimo para as três CTs foi o mesmo do externo, sem a ocorrência de atrasos.

Tabela 15 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 17/03/2021.

Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	31,9	-	2,6	14:00	-	21,3	-	4,5	06:00	-	10,6
Telh. Verde BC (CT 1)	33,0	-1,1	1,5	15:00	01:00	26,3	-5,0	-0,5	06:00	00:00	6,7
Telh. Cn (CT 2)	34,5	-2,6	-	16:00	02:00	25,8	-4,5	-	06:00	00:00	8,7
Telh. Verde Cn (CT 5)	31,9	0,0	2,6	14:00	00:00	25,8	-4,5	0,0	06:00	00:00	6,1

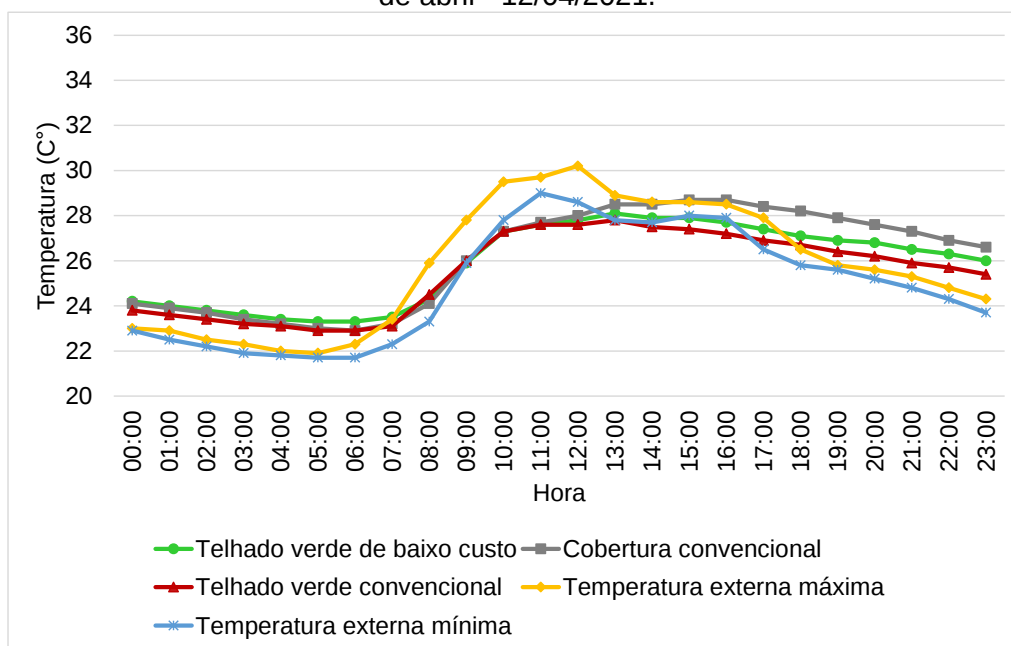
Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

O dia mais frio do mês de abril (Figura 36) assim como em março, teve curvas qualitativamente semelhantes entre si e maiores diferenças de temperaturas na parte da tarde, aproximadamente a partir das 13h. O telhado convencional atingiu as

maiores temperaturas, com máxima de 28,7°C, enquanto o telhado verde convencional manteve-se com as temperaturas mais baixas, com máxima de 27,8°C. O telhado verde de baixo custo apresentou, na maior parte do dia, valores intermediários, com máxima de 28,1°C. Ao longo do dia, a maior diferença horária entre os telhados foi 1,5°C, na diferença entre as temperaturas do telhado convencional e do verde convencional.

Figura 36 - Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor temperatura mínima de abril - 12/04/2021.



Fonte: Autor.

Na Tabela 16, observa-se que todos os três telhados atingiram temperaturas máximas inferiores à máxima externa. O telhado convencional alcançou o maior valor comparado aos telhados vegetados, com diferença de 0,6°C e 0,9°C para os telhados verdes de baixo custo e convencional, respectivamente. As amplitudes térmicas dos telhados verdes convencional e de baixo custo foram similares entre si e equivalente a 57,6% e 56,5 % da variação térmica diária externa, respectivamente. Com relação ao horário de pico máximo de temperatura, os telhados verdes conseguiram retardar em 1h a temperatura máxima, enquanto o telhado convencional atrasou em 3h.

Quanto às temperaturas mínimas, os três telhados resultaram em valor mínimo superior à menor temperatura externa. O telhado verde de baixo custo teve a maior mínima comparado aos outros telhados, com valor de 23,3°C, superior em 1,6°C o valor externo. Os telhados convencional e verde convencional atingiram o mesmo

valor de 22,9°C, superior em 1,2°C a temperatura mínima externa. Apenas o telhado convencional retardou o horário de pico mínimo, com atraso de 1h.

Tabela 16 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 12/04/2021.

Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	30,2	-	-1,5	12:00	-	21,7	-	1,2	05:00	-	8,5
Telh. Verde BC (CT 1)	28,1	2,1	0,6	13:00	01:00	23,3	-1,6	-0,4	05:00	00:00	4,8
Telh. Cn (CT 2)	28,7	1,5	-	15:00	03:00	22,9	-1,2	-	06:00	01:00	5,8
Telh. Verde Cn (CT 5)	27,8	2,4	0,9	13:00	01:00	22,9	-1,2	0,0	04:00	00:00	4,9

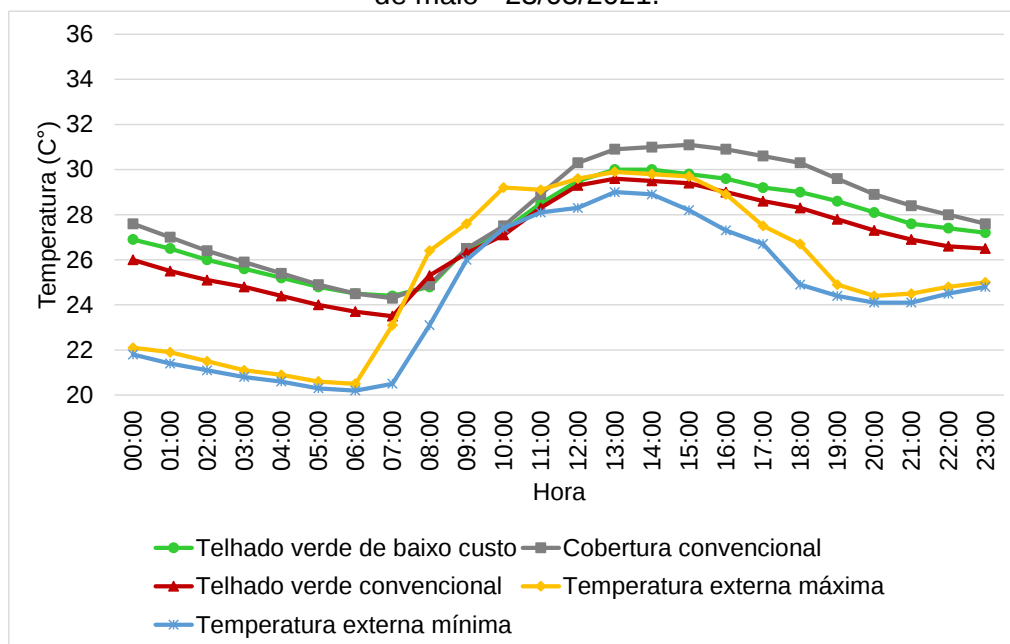
Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

Em maio, as curvas representantes de cada telhado (Figura 37) mostraram semelhanças qualitativas entre si e, diferentemente dos meses de março e abril, houve mais discrepâncias quantitativas entre elas ao longo do dia, visto que o telhado verde convencional atingiu valores horários até 2,0°C inferiores aos demais. O telhado verde convencional manteve as menores temperaturas ao longo do dia e atingiu valor máximo de 29,6°C, com diferença horária máxima ao longo do dia de 2°C a menos que o telhado convencional e de 1°C a menos que o telhado verde de baixo custo. Este, por sua vez, atingiu máxima de 30,0°C, e manteve-se até 1,1°C abaixo do telhado convencional.

Na Tabela 17, observa-se que as diferenças entre a máxima externa e as máximas temperaturas dos telhados vegetados são de até 0,3°C, pequeno valor que pode ser associado à precisão do *Datalogger* IP-747RH (Tabela 7). As máximas temperaturas dos telhados vegetados convencional e de baixo custo foram 1,5°C e 1,1°C inferiores à temperatura máxima do telhado convencional. O telhado verde de baixo custo teve a menor amplitude térmica entre as CTs, com valor correspondente a 57,7% da variação térmica externa, enquanto o telhado verde convencional variou o equivalente a 62,9%. Apenas o telhado convencional retardou o horário de pico máximo de temperatura, em 2h.

Figura 37 - Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor temperatura mínima de maio - 23/05/2021.



Fonte: Autor.

Todos as CTs atingiram temperaturas mínimas superiores à mínima externa. A menor temperatura foi do telhado verde convencional, de 23,5°C, valor 3,3°C acima da mínima externa. O telhado verde de baixo custo atingiu temperatura mínima equivalente à atingida pelo telhado convencional, considerando a precisão dos equipamentos instalados nos tetos. Todos os telhados retardaram o horário de pico mínimo externo, com um atraso de 1h.

Tabela 17 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários - 23/05/2021.

Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	29,9	-	1,2	13:00	-	20,2	-	4,1	06:00	-	9,7
Telh. Verde BC (CT 1)	30,0	-0,1	1,1	13:00	00:00	24,4	-4,2	-0,1	07:00	01:00	5,6
Telh. Cn (CT 2)	31,1	-1,2	-	15:00	02:00	24,3	-4,1	-	07:00	01:00	6,8
Telh. Verde Cn (CT 5)	29,6	0,3	1,5	13:00	00:00	23,5	-3,3	0,8	07:00	01:00	6,1

Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

5.1.6.3 *Análise do dia com maior amplitude térmica de cada mês de coleta*

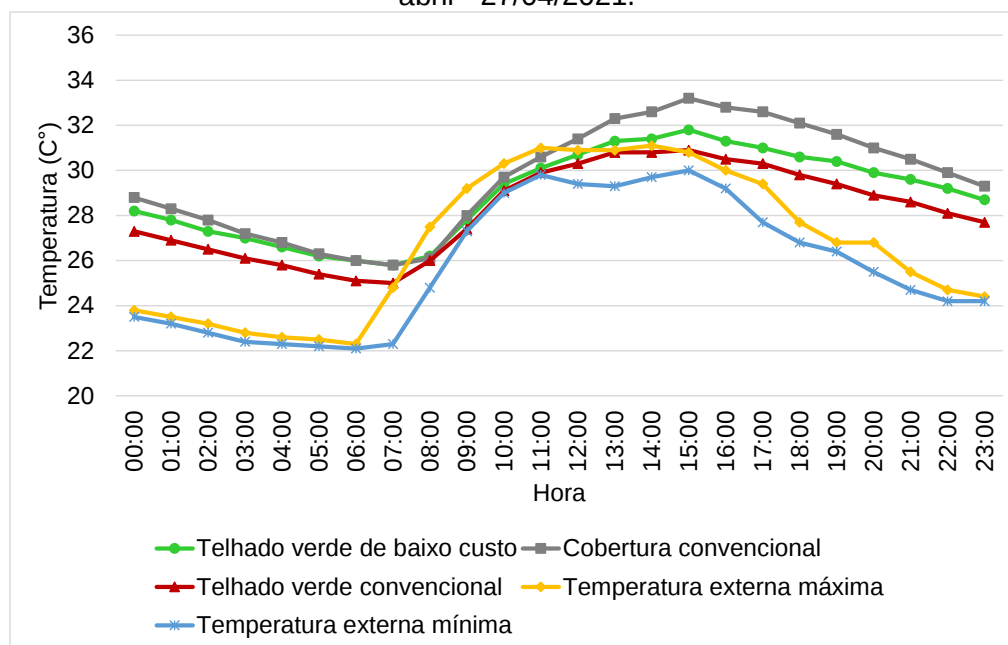
Na análise dos dias com maior variação térmica externa, as médias das temperaturas das paredes de cada CT apresentaram pequenas diferenças entre si. As curvas de cada CT estão apresentadas no Apêndice A (Figuras A10, A11 e A12) e mostram-se muito próximas entre si ao longo da maior parte do dia, com diferença máxima de 0,8°C entre elas, para os três dias em questão. No mês de março, o dia de maior amplitude térmica externa também foi o dia com a menor temperatura externa. Como mostrado anteriormente, os telhados verdes convencional e de baixo custo apresentaram médias máxima e mínima de 33,0°C e 25,0°C e de 32,7°C e 24,8°C, respectivamente. A maior diferença de temperatura horária entre as médias de cada telhado foi de 0,7°C, entre os dois telhados vegetados. Nos meses de abril e maio, o telhado verde de baixo custo teve a curva de seu gráfico horário sobreposta à curva do telhado de referência até aproximadamente 9h, momento a partir do qual, sua curva se sobrepôs à do telhado verde convencional, com menores temperaturas. Em abril, a maior diferença horária entre as coberturas foi de 0,8°C, na diferença entre o telhado convencional e as CTs vegetadas. O telhado verde de baixo custo atingiu temperaturas máxima e mínima de 31,3°C e 25,1°C, respectivamente, enquanto o telhado verde convencional obteve máxima de 31,3°C e mínima de 24,5°C. Em maio, os telhados verdes convencional e de baixo custo atingiram máximas e mínimas de 31,6°C e 23,6°C e de 32,0°C e 24,0°C, respectivamente. A maior discrepância entre as temperaturas médias das coberturas foi de 1,2°C, na diferença entre o telhado convencional e o verde convencional.

Como mostrado na Figura 35, para o dia 17, com maior amplitude térmica e menor temperatura mínima de março, com a análise dos dados registrados pelos equipamentos do teto, observa-se que o telhado verde de baixo custo atingiu as temperaturas mais elevadas entre as três CTs até às 12h, chegando a 0,8°C acima do telhado de referência, e manteve-se com temperaturas intermediárias no restante do dia, atingindo máxima de 33,0°C, 1,5°C a menos que a máxima atingida pelo telhado convencional. O telhado verde convencional atingiu as temperaturas mais baixas, com máxima de 31,9°C e maior diferença de 2,8°C na comparação com o telhado convencional. Como mostrado na Tabela 15, o telhado verde de baixo custo registrou amplitude térmica de 6,7°C, correspondente a 63,2% da variação térmica

diária externa. O telhado verde convencional apresentou amplitude de $6,1^{\circ}\text{C}$, equivalente a 57,5% da variação externa.

Em abril, os dias 22 e 27 apresentaram o maior valor de amplitude térmica externa, de 9°C , sendo o dia 22 também aquele que atingiu a maior temperatura máxima externa, como citado anteriormente. As curvas para o dia 27, presentes na Figura 38, apresentam inclinações semelhantes entre si, demonstrando a similaridade qualitativa nos comportamentos térmicos dos telhados. A partir de aproximadamente 11h, o telhado verde de baixo custo apresentou temperaturas intermediárias entre as coberturas, atingindo um valor máximo de $31,8^{\circ}\text{C}$. A maior diferença horária de temperatura no telhado verde de baixo custo foi de $1,6^{\circ}\text{C}$, em comparação ao telhado convencional. O telhado verde convencional atingiu máxima de $30,9^{\circ}\text{C}$, e maior discrepância horária de $2,3^{\circ}\text{C}$, na diferença entre o telhado convencional e ele.

Figura 38 - Temperaturas internas do teto e externas - dia com maior amplitude térmica de abril - 27/04/2021.



Fonte: Autor.

Como mostrado na Tabela 18, para o dia 27, o telhado verde convencional atingiu temperatura máxima equivalente à temperatura máxima externa, cujo valor foi de $31,1^{\circ}\text{C}$. O telhado verde de baixo custo teve máxima superior em $0,7^{\circ}\text{C}$ à externa, enquanto o telhado convencional atingiu temperatura máxima $2,1^{\circ}\text{C}$ acima. A maior diferença entre as temperaturas máximas foi de $2,3^{\circ}\text{C}$, dada na comparação entre o telhado convencional e o telhado verde convencional. A amplitude térmica dos

telhados vegetados convencional e de baixo custo equivalem à 65,6 % e 66,7% o valor da amplitude externa, respectivamente. Todos os telhados retardaram em uma hora o horário de pico máximo interno, em relação ao momento externo.

Tabela 18 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 27/04/2021.

Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	31,1	-	2,1	14:00	-	22,1	-	3,7	06:00	-	9,0
Telh. Verde BC (CT 1)	31,8	-0,7	1,4	15:00	01:00	25,8	-3,7	0,0	07:00	01:00	6,0
Telh. Cn (CT 2)	33,2	-2,1	-	15:00	01:00	25,8	-3,7	0,0	07:00	01:00	7,4
Telh. Verde Cn (CT 5)	30,9	0,2	2,3	15:00	01:00	25,0	-2,9	0,8	07:00	01:00	5,9

Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

Em maio, assim como nos meses de março e abril, todos os telhados apresentaram curvas qualitativamente semelhantes entre si, como mostrado na Figura 49, e o telhado verde de baixo custo atingiu temperaturas intermediárias pela manhã, aproximadamente às 11h, alcançando a temperatura máxima de 31,6°C. As maiores variações de temperatura horária entre as outras CTs foram de 1,7°C e 1,1°C, na diferença com o telhado convencional e o com o telhado verde convencional, respectivamente. O telhado verde convencional atingiu máxima de 30,8°C e maior diferença de temperatura horária de 2,5°C, na comparação com o telhado convencional.

Na Tabela 19, observa-se que o telhado verde convencional atingiu temperatura máxima igual à externa, sendo a mais baixa entre as três CTs. O telhado convencional obteve a maior temperatura máxima, superior em 2,4°C o valor da externa. As máximas temperaturas dos telhados vegetados convencional e de baixo custo foram 2,4°C e 1,6°C inferiores à temperatura máxima do telhado convencional. Os telhados retardaram o horário de pico de temperatura máxima em 1h, comparado ao momento externo. O telhado verde convencional e de baixo custo atingiram amplitudes térmicas equivalentes a 68,3% e 67,3% da variação térmica externa, de 10,1°C. As amortizações na variação térmica interna causadas pelos telhados vegetados podem ser consideradas iguais, devido à precisão de medição do equipamento *Datalogger* IP-747RH instalado nos tetos das CTs (Tabela 7).

Figura 39 - Temperaturas internas do teto e externas - dia com maior amplitude térmica de maio - 25/05/2021.

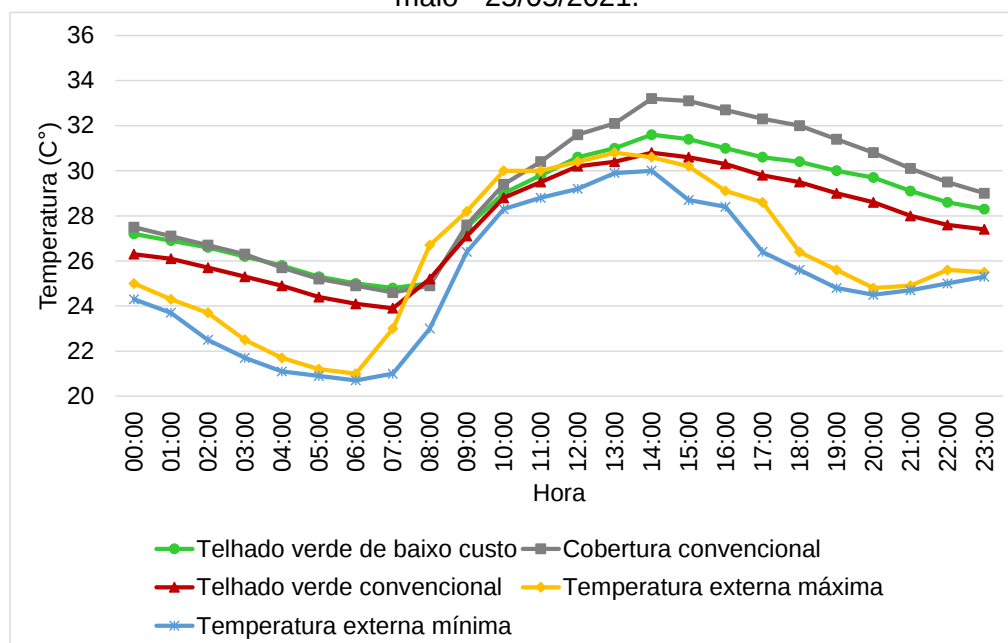


Tabela 19 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 25/05/2021

Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	$T_{\text{máx}}$ (°C)	ΔT^* (°C)	ΔT_{cn} (°C)	Hor $T_{\text{máx}}$	$\Delta \text{Hor pico}$ (hh:mm)	$T_{\text{mín}}$ (°C)	ΔT^* (°C)	ΔT_{cn} (°C)	Hor $T_{\text{mín}}$	$\Delta \text{Hor pico}$ (hh:mm)	
Externo	30,8	-	2,4	13:00	-	20,7	-	3,9	06:00	-	10,1
Telh. Verde BC (CT 1)	31,6	-0,8	1,6	14:00	01:00	24,8	-4,1	-0,2	07:00	01:00	6,8
Telh. Cn (CT 2)	33,2	-2,4	-	14:00	01:00	24,6	-3,9	0,0	07:00	01:00	8,6
Telh. Verde Cn (CT 5)	30,8	0,0	2,4	14:00	01:00	23,9	-3,2	0,7	07:00	01:00	6,9

Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | $T_{\text{máx}}$ = temperatura máxima | $T_{\text{mín}}$ = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

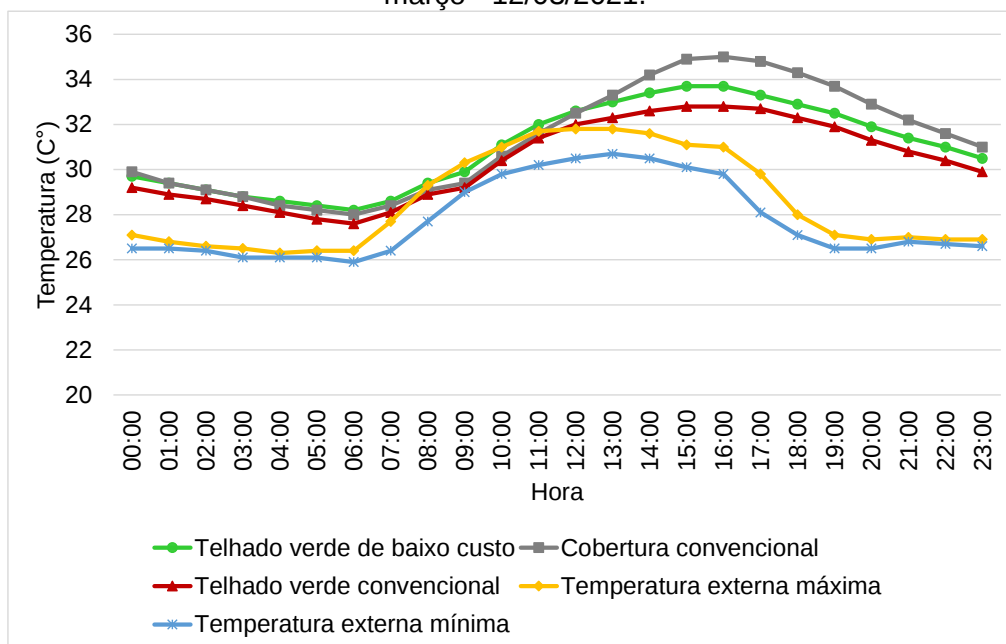
Quanto às temperaturas mínimas, o telhado verde convencional atingiu o menor valor, de 23,9°C, superior à temperatura mínima externa em 3,2°C. A maior delas foi obtida no telhado verde de baixo custo, com valor de 24,8°C, diferente da atingida pelo telhado convencional por apenas 0,2°C, podendo-se considerar os valores equivalentes devido à precisão do equipamento utilizado na medição. Assim como ocorreu com o atraso nas temperaturas máximas, as temperaturas mínimas internas tiveram seus picos retardados em 1h com relação ao horário externo.

5.1.6.4 *Análise do dia com menor amplitude térmica de cada mês de coleta*

Para os dias com menor amplitude térmica de cada mês, observou-se que as curvas de um dia apresentaram grandes semelhanças qualitativas entre si, o que demonstra comportamento térmico similar entre os dados registrados no teto e nas paredes de uma mesma CT. Assim como nos outros dias analisados, citados anteriormente, as curvas representantes das temperaturas obtidas dos equipamentos instalados nas paredes estão apresentadas no Apêndice A (Figuras A13, A14 e A15), e apresentaram-se próximas entre si, com sobreposições em grandes períodos analisados. A maior discrepância de temperatura para um mesmo horário entre os dados registrados nas paredes foi de $0,6^{\circ}\text{C}$, no mês de março, na diferença entre os telhados verdes de baixo custo e convencional. Em março, o telhado convencional atingiu máxima de $33,2^{\circ}\text{C}$, entretanto, os três telhados apresentaram máximas próximas entre si, com variação de $0,2^{\circ}\text{C}$, equivalentes entre si levando-se em consideração a precisão dos equipamentos. Em abril, a maior diferença de temperatura ocorreu entre os telhados convencional e verde convencional, de $0,4^{\circ}\text{C}$. Nesse mês, as curvas das temperaturas internas às CTs não tiveram inclinações semelhantes àsquelas das temperaturas externas no período de temperaturas mais elevadas do dia, de forma que as oscilações térmicas foram amortizadas pelas coberturas. As temperaturas máximas dos telhados vegetados foram também similares entre si, com diferença de $0,1^{\circ}\text{C}$. Em maio, cujo dia com maior precipitação coincide com o de menor amplitude térmica, a maior diferença de temperatura horária entre os telhados foi de $0,4^{\circ}\text{C}$, na comparação entre o telhado convencional e o verde convencional. Os telhados verdes convencional e de baixo custo atingiram máximas e mínimas de $35,5^{\circ}\text{C}$ e $25,7^{\circ}\text{C}$, e mínimas de $23,9^{\circ}\text{C}$ e $24,2^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Em março, no estudo dos dados registrados pelos equipamentos localizados nos tetos (Figura 40) observa-se que o telhado convencional atingiu a maior temperatura máxima, de $35,0^{\circ}\text{C}$, superior em $1,3^{\circ}\text{C}$ e $2,2^{\circ}\text{C}$ às máximas dos telhados verdes de baixo custo e convencional, respectivamente. A maior diferença de temperatura para um mesmo horário foi entre a cobertura convencional e o telhado verde convencional, no horário de pico máximo, de $2,2^{\circ}\text{C}$. Entre os telhados vegetados, a maior diferença de temperatura horária foi de $0,9^{\circ}\text{C}$, também entre os valores de pico máximo.

Figura 40 - Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor amplitude térmica de março - 12/03/2021.



Fonte: Autor.

Na Tabela 20, observa-se que todos os telhados atingiram temperaturas máximas superiores à externa, sendo a do telhado convencional a que mais se distanciou desse valor. O telhado verde convencional teve a menor temperatura máxima, com diferença de apenas 1,0°C para o valor externo. Os telhados vegetados retardaram o horário de pico máximo em 3h, enquanto o telhado convencional retardou em 4h. Amplitude térmica do telhado convencional foi superior à variação térmica externa. Os telhados verdes convencional e de baixo custo atingiram valores correspondentes a 74,3% e 78,6% da variação diária ocorrida na CT de cobertura convencional. Os telhados vegetados convencional e de baixo custo apresentaram amplitudes térmicas semelhantes entre si e próximas à variação térmica externa, de 5,9°C, equivalendo a respectivamente 88,1% e 93,2% de seu valor.

Todas as CTs atingiram temperaturas mínimas superiores à mínima externa. A menor temperatura foi do telhado verde convencional, de 27,6°C, valor 1,7°C acima da mínima externa. O telhado verde de baixo custo atingiu temperatura mínima equivalente à atingida pelo telhado convencional, considerando a precisão dos equipamentos instalados nos tetos. Os telhados não retardaram o horário de pico mínimo externo, atingindo o valor mínimo no mesmo momento que o pico mínimo externo.

Tabela 20 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 12/03/2021.

Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	31,8	-	3,2	12:00	-	25,9	-	2,1	06:00	-	5,9
Telh. Verde BC (CT 1)	33,7	-1,9	1,3	15:00	03:00	28,2	-2,3	-0,2	06:00	00:00	5,5
Telh. Cn (CT 2)	35,0	-3,2	-	16:00	04:00	28,0	-2,1	-	06:00	00:00	7,0
Telh. Verde Cn (CT 5)	32,8	-1,0	2,2	15:00	03:00	27,6	-1,7	0,4	06:00	00:00	5,2

Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

Em abril, a partir dos dados registrados pelos equipamentos dos tetos, Figura 41, nota-se que as temperaturas dos telhados ficaram bem próximas entre si, com comportamentos similares qualitativa e quantitativamente, com maior diferença de temperatura para um mesmo horário de 0,8°C, na diferença entre os telhados convencional e verde convencional, na primeira medição do dia, às 00h. A maior temperatura foi atingida pelo telhado convencional, de 26,8°C, entretanto, os telhados verdes de baixo custo e convencional atingiram valores máximos apenas 0,1°C e 0,4°C inferiores ao da cobertura convencional, diferença que pode ser associada à precisão dos equipamentos. Dessa forma, os três telhados apresentaram temperaturas equivalentes ao longo do dia.

Ao analisar os dados da Tabela 21, observa-se que as coberturas foram capazes de manter as suas temperaturas máximas abaixo da máxima externa, em até 1,2°C, dado pelo telhado verde convencional que atingiu a menor máxima entre as CTs. Os telhados conseguiram conter a variação externa de forma similar, com diferenças até 0,2°C, resultando em amplitudes térmicas equivalentes a até 52,9% do valor externo, no caso do telhado convencional. Quanto às temperaturas mínimas, os telhados atingiram valores superiores ao externo, em até 1,7°C, comparado ao telhado verde de baixo custo. Os telhados apresentaram mínimas próximas entre si, com diferença máxima de 0,4°C, na comparação entre as temperaturas do telhado verde de baixo custo e do verde convencional. Nenhuma das coberturas retardaram os horários de pico para esse dia, tanto para os valores máximo, como para os mínimos.

Figura 41 - Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor amplitude térmica de abril - 18/04/2021.

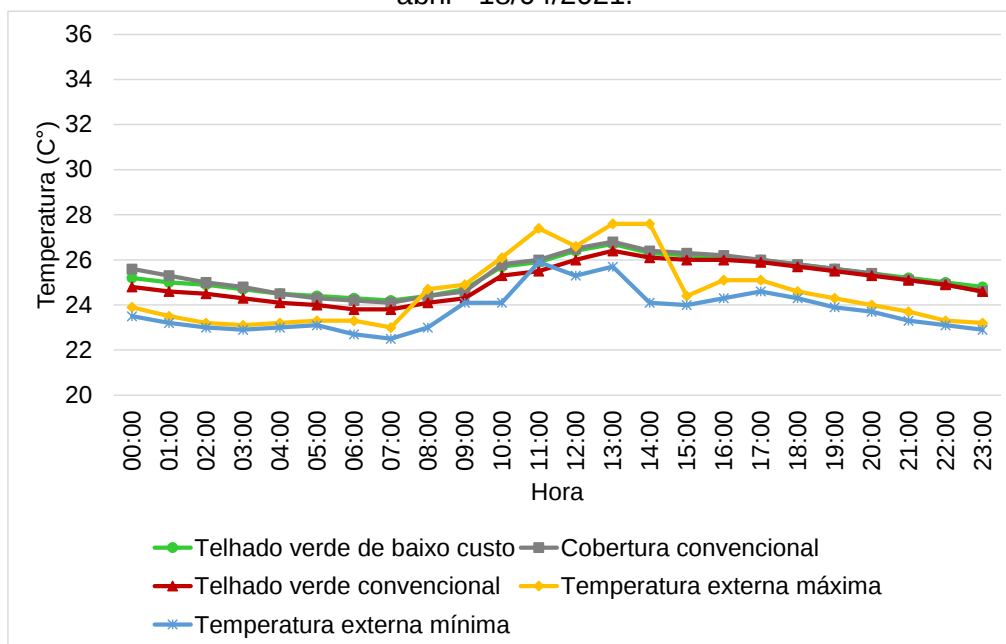


Tabela 21 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 18/04/2021.

Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	27,6	-	-0,8	13:00	-	22,5	-	1,6	07:00	-	5,1
Telh. Verde BC (CT 1)	26,7	0,9	0,1	13:00	00:00	24,2	-1,7	-0,1	07:00	00:00	2,5
Telh. Cn (CT 2)	26,8	0,8	-	13:00	00:00	24,1	-1,6	-	07:00	00:00	2,7
Telh. Verde Cn (CT 5)	26,4	1,2	0,4	13:00	00:00	23,8	-1,3	0,3	07:00	00:00	2,6

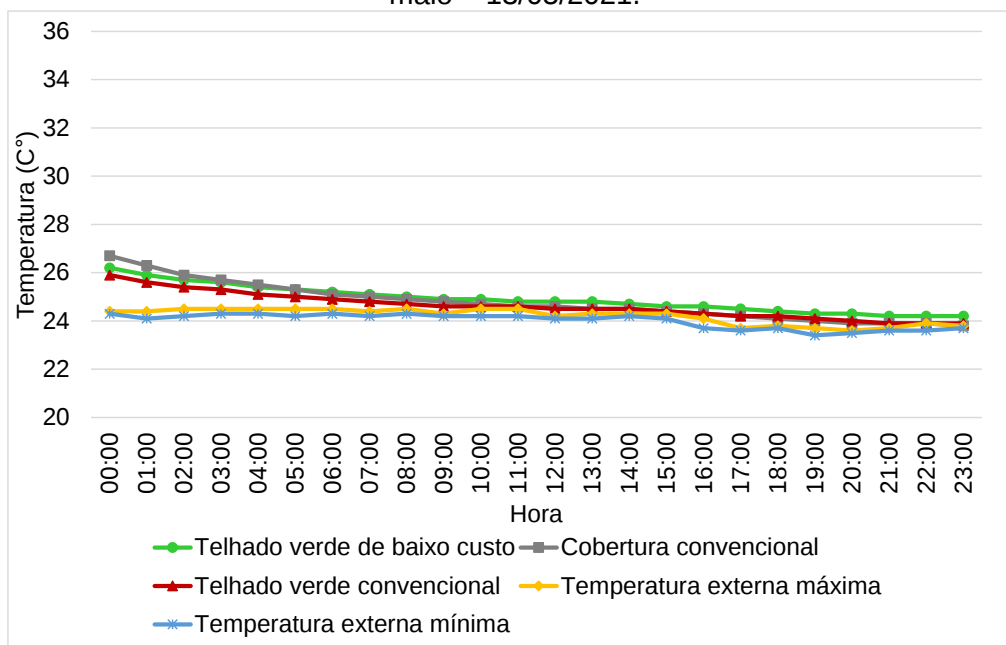
Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

Com a análise do dia de menor amplitude térmica do mês de maio, observa-se na Figura 42, que os dados de temperaturas externas formam curvas de valores horários distintas das demais, apresentando-se sem as oscilações ao longo do dia, que estão sempre presentes nos gráficos de temperatura mostrados anteriormente. Os dados obtidos pelos sensores localizados nos tetos também seguiram a mesma tendência. A temperatura externa apresentou comportamento linear ao longo de todo o dia, com variação externa de 1,1°C. Essa ocorrência atípica pode ser confirmada a partir do gráfico da Figura 43, que mostra as curvas de temperaturas máximas e mínimas para todo o mês de maio, fornecida pelo INMET. O dia 13, em questão,

apresentou máximas e mínimas bastante próximas entre si comparadas ao restante do mês, além de valores extremos com grandes discrepâncias comparados aos valores das médias máxima e mínima históricas para o período entre 2000 e 2018.

Figura 42 - Temperaturas internas do teto e externas - dia com menor amplitude térmica de maio – 13/05/2021.

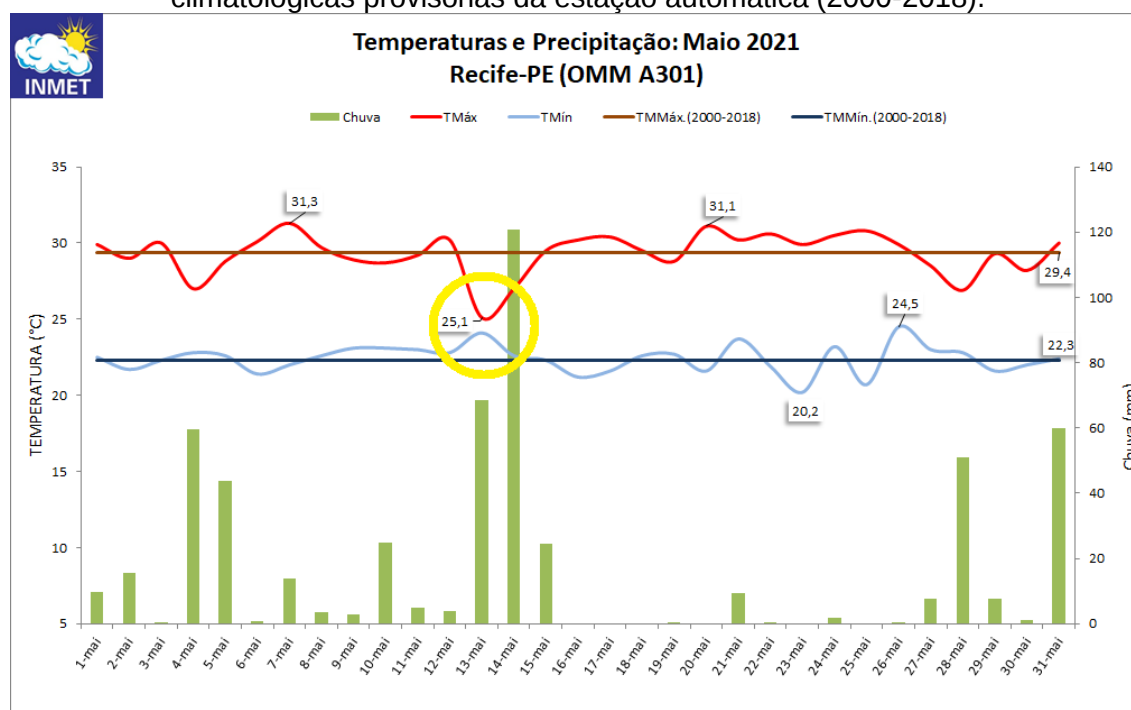


Fonte: Autor.

Os telhados atingiram valores equivalentes entre si ao longo do dia, com discrepância máxima para um mesmo horário de $0,8^{\circ}\text{C}$, na primeira medição do dia entre os telhados convencional e verde convencional. A partir das 05h, a maior diferença entre as medições foi de $0,4^{\circ}\text{C}$, valor que pode ser associado à precisão dos equipamentos de medição, conforme Tabela 7 apresentada anteriormente. Na Tabela 22, tem-se que todas as máximas dos telhados foram observadas na primeira medição do dia, às 0h, enquanto a máxima externa ocorreu após 2h. O telhado convencional atingiu o maior valor máximo, $2,2^{\circ}\text{C}$ superiores a máxima externa, enquanto os telhados verdes convencional e de baixo custo atingiram máximas $1,4^{\circ}\text{C}$ e $1,7^{\circ}\text{C}$ acima. Todos os telhados alcançaram variações térmicas diárias superiores à externa e ambos telhados vegetados obtiveram amplitude térmica de $2,0^{\circ}\text{C}$, $81,8\%$ superior à variação externa, ratificando que as coberturas verdes podem manter o calor interno aos ambientes, reduzindo as trocas térmicas com o meio externo. Panziera *et al.* (2015), em estudo realizado com telhados verde convencional, verde com PET e de fibrocimento, afirmaram que as coberturas vegetadas têm

características que melhor restringem a transmissão de energia térmica para o interior de sua estrutura, quando comparado com a cobertura de fibrocimento. De acordo com os autores, o telhado verde desenvolvido com PET atenuou melhor o fluxo de calor sensível quando comparado ao ambiente externo e aos outros tipos de telhados analisados. Todas as CTs atingiram temperaturas mínimas superiores à mínima externa. O telhado verde convencional atingiu temperatura mínima equivalente à atingida pelo telhado convencional, considerando a precisão dos equipamentos instalados nos tetos. Os telhados verdes retardaram o horário de pico mínimo em 2h, e o telhado convencional em 4h.

Figura 43 - Temperaturas máximas, mínimas e precipitação, com respectivas normais climatológicas provisórias da estação automática (2000-2018).



Legenda: TMáx = temperatura máxima | TMín = temperatura mínima | TMMáx = temperatura máxima média para o período | TMMín = temperatura mínima média para o período

Fonte: INMET (2021).

Tabela 22 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 13/05/2021.

Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	24,5	-	2,2	02:00	-	23,4	-	0,4	19:00	-	1,1
Telh. Verde BC (CT 1)	26,2	-1,7	0,5	00:00	-02:00	24,2	-0,8	-0,4	21:00	02:00	2,0
Telh. Cn (CT 2)	26,7	-2,2	-	00:00	-02:00	23,8	-0,4	-	23:00	04:00	2,9
Telh. Verde Cn (CT 5)	25,9	-1,4	0,8	00:00	-02:00	23,9	-0,5	-0,1	21:00	02:00	2,0

Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

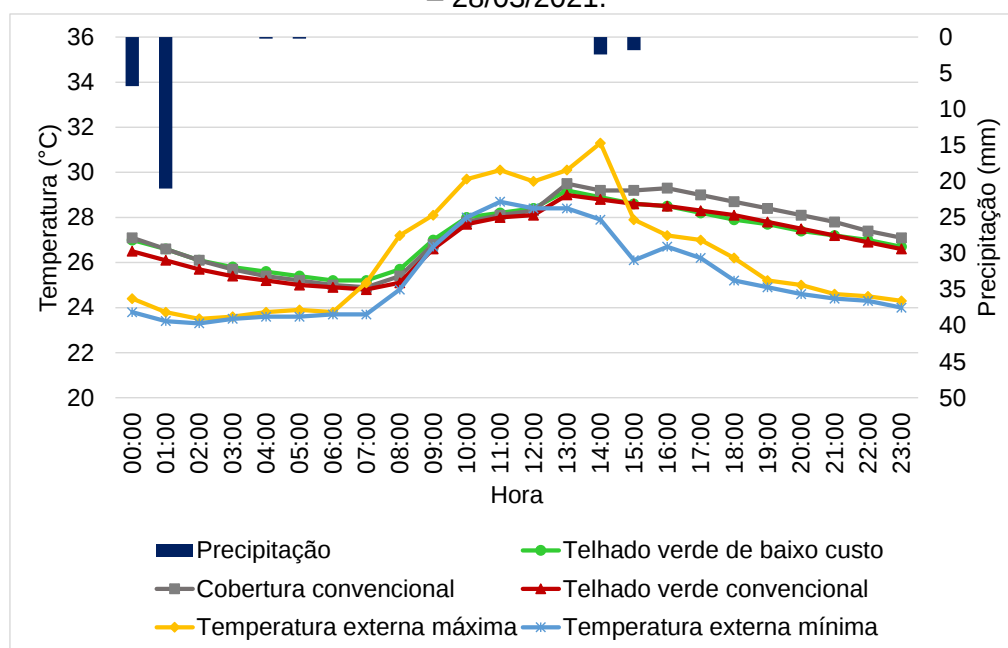
5.1.6.5 Análise do dia com maior precipitação acumulada de cada mês de coleta

Para os dias com maior precipitação de cada mês de coleta de dados, as médias das temperaturas das paredes de cada CT apresentam pequenas diferenças entre si, com curvas de temperatura praticamente sobrepostas entre si ao longo da maior parte do dia (Apêndice A, Figuras A16, A17 e A18). No mês de março, os telhados verdes convencional e de baixo custo apresentaram médias máxima e mínima de 29,5°C e 24,8°C e de 29,3°C e 24,8°C, respectivamente. A maior discrepância de temperatura horária entre as médias de cada telhado foi de 0,5°C, na comparação do telhado verde convencional com o telhado verde de baixo custo e com a cobertura convencional. Em abril, a maior diferença horária entre as coberturas foi de 0,3°C, na comparação do telhado convencional com o verde de baixo custo, valor este tão pequeno que se enquadra na precisão do equipamento de medição *Escort iMINI MX-IN-S-8-L*. Os telhados verde de baixo custo e verde convencional atingiram a mesma temperatura máxima, de 27,9°C, e suas mínimas chegaram a 24,0°C e 23,8°C, respectivamente. Em maio, cujo dia com maior precipitação coincide com o de menor amplitude térmica, a maior diferença de temperatura horária entre os telhados foi de 0,4°C, na comparação entre o telhado convencional e o verde convencional. Os telhados verdes convencional e de baixo custo atingiram máximas e mínimas de 35,5°C e 25,7°C, e mínimas de 23,9°C e 24,2°C, respectivamente.

Na análise dos dados obtidos pelos equipamentos instalados nos tetos, também é possível observar que as curvas de temperatura de cada CT estão sobrepostas entre si, o que demonstra pequenas diferenças térmicas entre as coberturas. No mês de março, o dia 28 atingiu a maior precipitação diária, de 32,4

mm, com maior volume de chuvas entre 00h e 01h. Como pode-se observar na Figura 44, após a chuva as temperaturas de todas as CTs foram reduzindo até atingir os valores mínimos. O telhado verde de baixo custo resultou na temperatura mínima mais elevada, de 25,2°C, superior em 1,9°C o valor externo, enquanto os telhados convencional e verde convencional atingiram valores equivalentes, de 24,9°C e 24,8°C. A maior temperatura foi observada pelo telhado convencional, de 29,5°C, seguida pelos telhados verdes de baixo custo e convencional, de 29,2°C e 29,0°C. Como pode-se observar, as diferenças entre os valores de temperatura são bem pequenas. A maior diferença horária de temperatura entre as CT foi de 0,8°C, nas comparações entre o telhado convencional e ambos os telhados vegetados.

Figura 44 - Temperaturas internas do teto e externas - dia com maior precipitação de março – 28/03/2021.



Fonte: Autor.

Na Tabela 23 estão os valores máximos e mínimos internos às CTs, como também os extremos externos. Observa-se que todos os telhados atingiram temperaturas máximas inferiores à externa, sendo a do telhado verde convencional a que mais se distanciou desse valor, com diferença de 2,3°C. Todos os telhados atingiram seus valores máximos 1h antes do horário de máxima externa. Amplitude térmica do telhado convencional foi superior à das demais coberturas, com diferença de até 2,6°C. Os telhados verdes convencional e de baixo custo atingiram valores correspondentes a 70,1% e 77,0% da variação diária ocorrida na CT de cobertura

convencional. Os telhados vegetados convencional e de baixo custo apresentaram amplitudes térmicas equivalentes a 57,5% e 63,2% da variação térmica externa. Todas as CTs atingiram temperaturas mínimas superiores à mínima externa. O telhado verde de baixo custo retardou o horário de temperatura mínima em 4h, enquanto as demais CTs retardaram em 5h.

Tabela 23 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 28/03/2021.

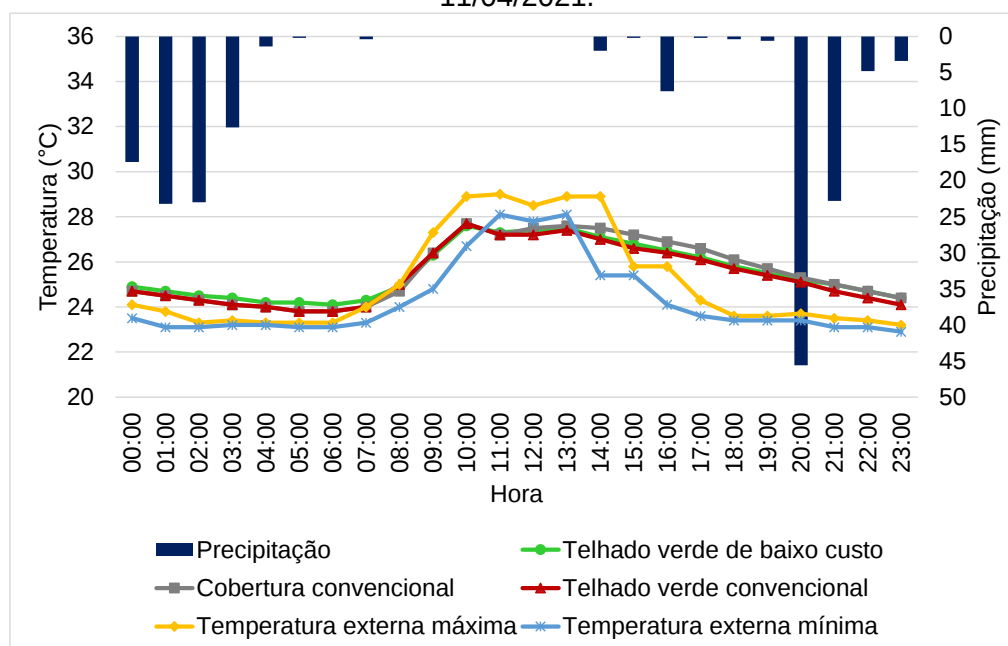
Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	31,3	-	-1,8	14:00	-	23,3	-	1,6	02:00	-	10,6
Telh. Verde BC (CT 1)	29,2	2,1	0,3	13:00	-01:00	25,2	-1,9	-0,3	06:00	04:00	6,7
Telh. Cn (CT 2)	29,5	1,8	-	13:00	-01:00	24,9	-1,6	-	07:00	05:00	8,7
Telh. Verde Cn (CT 5)	29,0	2,3	0,5	13:00	-01:00	24,8	-1,5	0,1	07:00	05:00	6,1

Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

O dia 11 foi o de maior precipitação no mês de abril, com um total precipitado de 165,8 mm. Como mostrado na Figura 45, entre 00h e 04h houve uma maior intensidade de precipitação, com total de 77,6 mm, seguida da redução das temperaturas internas às CTs, até os valores mínimos. A menor temperatura foi de 23,8°C, nos telhados convencional e verde convencional. O telhado verde de baixo custo atingiu o maior valor entre as temperaturas mínimas, de 24,1°C. No período do dia sem chuvas, as temperaturas das CTs aumentam, atingindo seus valores máximos. Os telhados atingiram valores máximos semelhantes, de 27,6°C para o telhado verde de baixo custo e de 27,7°C para a cobertura convencional e o telhado verde convencional. A partir das 14h, teve início o período de maior volume de chuvas do dia, de 87,6 mm, momento em que as temperaturas voltaram a cair. A maior diferença de temperatura, para um mesmo horário, entre as CTs foi de 0,6°C, na comparação entre os telhados convencional e verde convencional. Pode-se observar que as diferenças tanto horárias como entre as máximas e mínimas são pequenas a ponto de serem justificadas pela precisão do equipamento de medição, o *Datalogger* IP-747RH, que é de ± 1°C para a faixa de valores medidos.

Figura 45 - Temperaturas internas do teto e externas - dia com maior precipitação de abril – 11/04/2021.



Fonte: Autor.

As temperaturas máximas internas as CTs foram todas inferiores ao valor máximo externo, com diferenças entre 1,3°C e 1,4°C, como se observa na Tabela 24. As temperaturas máximas internas às CTs apresentaram valores equivalentes entre si, assim como as temperaturas mínimas. As coberturas das CTs não retardaram os horários de pico em relação ao momento externo, ocorrendo para todos eles com 1h de antecedência. Os valores mínimos foram todos mais elevados que a menor temperatura externa, com diferença de até 1,2°C, quando comparado ao telhado verde de baixo custo. As temperaturas mínimas internas às CTs ocorreram no período da manhã, enquanto o menor valor da temperatura externa foi ao final do dia, não havendo, assim, relação do efeito das coberturas com o retardo dos horários de pico mínimo.

Tabela 24 - Temperaturas de pico máximos e mínimos e seus horários – 11/04/2021.

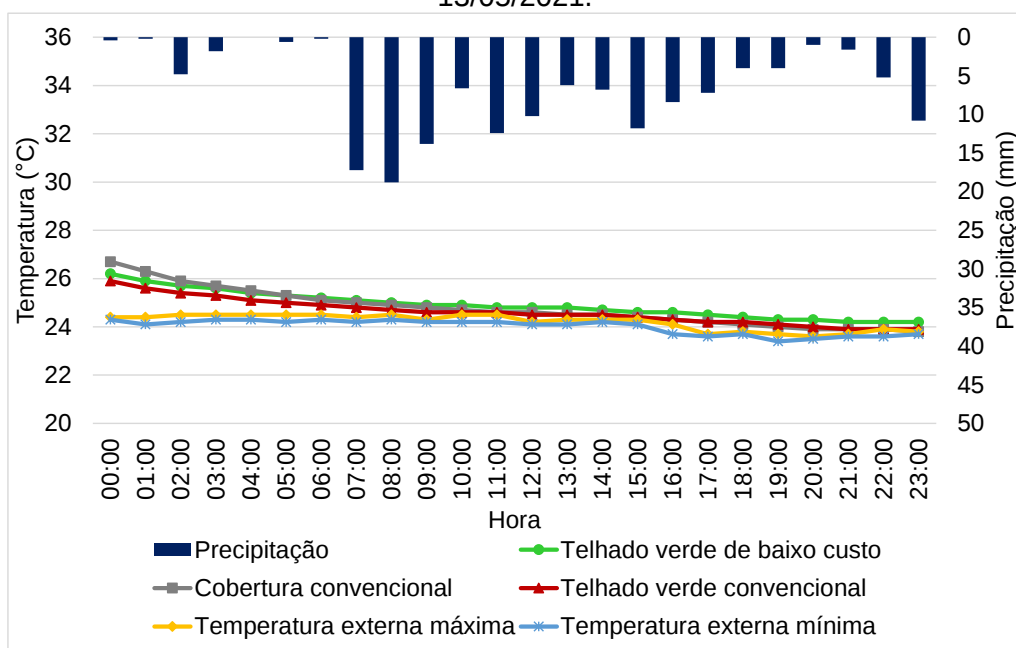
Ambiente	Picos máximos de temperatura					Picos mínimos de temperatura					Amp. (°C)
	T _{máx} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{máx}	ΔHor pico (hh:mm)	T _{mín} (°C)	ΔT* (°C)	ΔT _{cn} (°C)	Hor T _{mín}	ΔHor pico (hh:mm)	
Externo	29,0	-	-1,3	11:00	-	22,9	-	0,9	23:00	-	6,1
Telh. Verde BC (CT 1)	27,6	1,4	0,1	10:00	-01:00	24,1	-1,2	-0,3	06:00	-17:00	3,5
Telh. Cn (CT 2)	27,7	1,3	-	10:00	-01:00	23,8	-0,9	-	05:00	-18:00	3,9
Telh. Verde Cn (CT 5)	27,7	1,3	0,0	10:00	-01:00	23,8	-0,9	0,0	05:00	-18:00	3,9

Legenda: Telh. = telhado | BC = baixo custo | T_{máx} = temperatura máxima | T_{mín} = temperatura mínima | ΔT = variação de temperatura | ext. = externo | int. = interno | * = ext. – int. | Cn = convencional | Hor = Horário | Amp. = Amplitude térmica | CT = célula-teste.

Fonte: Autor.

O dia 13 de maio foi o dia de maior precipitação como também o dia de menor amplitude térmica. Como citado anteriormente, as curvas de temperaturas externas apresentam-se distintas das demais, sem as oscilações comuns ao longo do dia, e as curvas dos dados internos às CTs seguem a mesma tendência. A amplitude térmica externa foi de 1,1°C, como mostrado na Tabela 22, enquanto a dos telhados vegetados foi de 2,0°C e a do telhado convencional foi de 2,9°C. A precipitação diária acumulada foi de 154 mm, com chuvas distribuídas ao longo de todo o dia, o que contribui para a manutenção térmica externa e interna. Na Figura 46, observa-se que os horários de maiores precipitações ocorreram a partir das 7h, momento a partir do qual, as temperaturas tornaram-se mais constantes, com redução de 0,8°C nos valores externos até o final do dia.

Figura 46 - Temperaturas internas do teto e externas - dia com maior precipitação de maio – 13/05/2021.



Fonte: Autor.

5.2 Análise da temperatura ambiente e atendimento à NBR 15.575-1

A NBR 15.575-1 (ABNT, 2013a) determina requisitos de desempenho térmico mínimos, intermediários e superiores capazes de satisfazer o bem-estar em recintos habitacionais de permanência prolongada, como salas e dormitórios. Seguindo o recomendado na referida norma, de acordo com a classificação das zonas bioclimáticas, definida na NBR 15.220-3 (ABNT, 2005), a cidade do Recife se enquadra na zona 8, caracterizada por dias típicos de verão com temperatura máxima diária de 31,4°C, amplitude térmica diária de 7,4°C e radiação solar de 5105 Wh/m², e dias típicos de inverno com temperatura mínima diária de 18,8°C, amplitude térmica diária de 6,7°C e radiação solar de 4562 Wh/m². Conforme essa classificação e a Tabela 4, apresentada anteriormente, localidades pertencentes às zonas climáticas 6, 7 e 8 não precisam ser verificadas quanto aos critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno. Dessa forma, a cidade do Recife deve obedecer aos critérios de avaliação para o verão, cujas temperaturas internas aos ambientes devem apresentar condições térmicas melhores ou iguais às do ambiente externo, à sombra.

Para a verificação ao atendimento à norma, foram analisadas as temperaturas máximas internas e externas de todos os dias de coleta, a fim de quantificar a influência dos telhados vegetados no total de dias dentro dos requisitos.

Na Tabela 25, estão as porcentagens dos dias que atenderam aos níveis especificados na NBR 15.575-1 (ABNT, 2013a) para cada tipo de cobertura. Em todos os meses, o telhado verde convencional atingiu a maior quantidade de dias dentro dos requisitos de desempenho térmico, com o telhado verde de baixo custo atingindo a mesma quantidade de dias em março, nos níveis intermediário e superior, e em maio, no nível mínimo. O mês de março apresentou as menores porcentagens de atendimento à norma, com a exceção do desempenho do telhado verde de baixo custo, que atingiu a maior quantidade de dias dentro do nível superior para esse mês. Maio teve o maior número de dias dentro dos limites mínimos de desempenho, com os valores de temperatura internos aos telhados vegetados atingindo o índice em 80,6% dos dias. O telhado convencional teve o menor desempenho entre as coberturas, atingindo o nível mínimo em até 51,6% dos dias, no mês de maio.

Tabela 25 - Porcentagem de dias que atenderam aos níveis de desempenho térmico da NBR 15.575-1.

Meses	Nível de desempenho (NBR 15.575-1)								
	Mínimo (M)			Intermediário (I)			Superior (S)		
	T.V. B.C.	T.C.	T.V.C.	T.V. B.C.	T.C.	T.V.C.	T.V. B.C.	T.C.	T.V.C.
Março	37,5%	25,0%	50,0%	16,7%	8,3%	16,7%	4,2%	0,0%	4,2%
Abril	56,7%	43,3%	70,0%	30,0%	16,7%	43,3%	3,3%	0,0%	16,7%
Maio	80,6%	51,6%	80,6%	22,6%	12,9%	48,4%	3,2%	0,0%	12,9%

Legendas: T.V.B.C. = Telhado verde de baixo custo | T.C. = Cobertura convencional | T.V.C. = Telhado verde convencional

Fonte: Autor.

A Tabela 26 apresenta os dias de eventos extremos analisados anteriormente quanto as temperaturas horárias para o mês de coleta. Em março, o telhado verde convencional foi o único que nos dias de menor temperatura e maior amplitude térmica atingiu o nível mínimo de desempenho exigido pela NBR 15.575-1 (ABNT, 2013a). Para os dias de maior temperatura externa e menor amplitude térmica, nenhum dos telhados atingiram, ao menos, o nível mínimo de desempenho. O dia de maior precipitação foi o único em que todos os telhados atingiram o nível intermediário, com o telhado verde convencional atendendo ainda ao nível superior.

Em abril, o telhado verde de baixo custo e o telhado convencional apresentaram o mesmo desempenho para os dias de eventos extremos, sem alcançar o nível mínimo nos dias de maior temperatura externa e de maior amplitude térmica. O telhado verde convencional atingiu o nível mínimo em todos os dias, com exceção do dia de maior amplitude térmica. Além disso, alcançou ainda o nível superior no dia

de menor temperatura mínima, sendo o único a atingir esse nível de desempenho no mês de abril.

O mês de maio, apesar do maior número de dias que atenderam ao desempenho térmico da NBR 15.575-1 (ABNT, 2013a), teve apenas o dia de maior temperatura externa atendendo aos requisitos mínimos e intermediários para todas as coberturas, entre os dias de eventos extremos. Nesse dia, os telhados vegetados atingiram também o nível superior de desempenho. Os outros dias não atenderam aos níveis de desempenho, uma vez que as temperaturas internas máximas das CTs foram superiores às máximas externas.

Tabela 26 - Dias de análise específicos verificados quanto ao atendimento à NBR 15.575-1.

Tabela 20 - Dias de análise específicos verificados quanto ao atendimento à NBR 15.575-1.										
Evento externo analisado	Data	Telhado verde de baixo custo			Telhado convencional			Telhado verde convencional		
		Nível de desempenho (NBR 15.575-1)								
		M	I	S	M	I	S	M	I	S
Mês: Março/2021										
Maior temperatura máxima	08/03	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Menor temperatura mínima	17/03	x	x	x	x	x	x	✓	x	x
Maior amplitude térmica	17/03	x	x	x	x	x	x	✓	x	x
Menor amplitude térmica	12/03	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Maior precipitação acumulada	28/03	✓	✓	x	✓	✓	x	✓	✓	✓
Mês: Abril/2021										
Maior temperatura máxima	22/04	x	x	x	x	x	x	✓	✓	x
Menor temperatura mínima	12/04	✓	✓	x	✓	✓	x	✓	✓	✓
Maior amplitude térmica	27/04	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Menor amplitude térmica	18/04	✓	x	x	✓	x	x	✓	x	x
Maior precipitação acumulada	11/04	✓	✓	x	✓	✓	x	✓	✓	x
Mês: Maio/2021										
Maior temperatura máxima	07/05	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓
Menor temperatura mínima	23/05	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Maior amplitude térmica	25/05	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Menor amplitude térmica	13/05	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Maior precipitação acumulada	13/05	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Legenda: M = mínimo I = intermediário S = Superior										

Legenda: M = mínimo | I = intermediário | S = Superior

Fonte: Autor.

5.3 Avaliação simplificada do uso do telhado verde de baixo custo investigado pela comunidade de baixa renda

Conforme explicita Rocha (2020), para um sistema de telhados verdes os custos podem variar a depender de diversos fatores, como o tipo de telhado que será realizado, intensivo ou extensivo, e sua composição. Para Feitosa e Wilkinson (2018),

os telhados verdes podem ser construídos com custos mais acessíveis se forem empregados elementos removíveis e de fácil acesso, se a cultura escolhida constituir fonte alimentar e se o sistema for desenvolvido sem a necessidade de mão-de-obra especializada. De acordo com os autores, dessa forma, é possível “baratear” a técnica e contemplar até mesmo a população com condição financeira pouco privilegiada, bem como possibilitar um retorno econômico pela venda dos produtos cultivados. Na Tabela 27 estão os materiais e seus respectivos custos e quantidades utilizados para a confecção e montagem do telhado verde de baixo custo com garrafas PET como estrutura suporte.

Tabela 27 - Quantitativos e custos para a construção do telhado verde de baixo custo.

Material	Unidade	Quantidade	Preço unitário	Preço Total
Garrafa PET (2L)	un.	23	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Mudas <i>Kalanchoe laetivirens</i>	un.	1	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Substrato	kg	10,8	R\$ 1,00	R\$ 10,8
Areia lavada	kg	10,8	R\$ 0,30	R\$ 3,24
Clips 6/0 de arame de aço galvanizado	un.	56	R\$ 0,10	R\$ 5,60
			Custo total/m²:	R\$ 19,64

Fonte: Autor.

No levantamento do custo total para 1 m² do telhado verde de baixo custo, os valores das garrafas PET e da vegetação não foram contabilizados, uma vez que as garrafas seriam descartadas e foram recolhidas com o intuito de reutilização e as mudas eram de cultivo próprio e são facilmente encontradas em meio a áreas vegetadas da região. Os custos para construção das CTs também não foram considerados, visto que os arranjos investigados podem ser implantados sobre quaisquer superfícies niveladas. Os custos se tornam ainda menores por não ser necessária a contratação de mão de obra especializada, devido à simplicidade da montagem e à pequena quantidade de riscos, já que os módulos de PET com vegetação e substrato podem ser montados a nível do solo e posteriormente levados ao nível da cobertura.

O valor total do telhado de baixo custo ficou em torno de R\$ 19,64/m², valor esse semelhante ao obtido por Rocha (2020), que com arranjo semelhante de garrafas PET com vegetação de *Kalanchoe laetivirens*, atingiu um custo de R\$ 18,98/m². A diferença pode se dar pelos valores dos materiais, uma vez que a presente pesquisa foi realizada em Recife, capital de Pernambuco, onde as mercadorias apresentam

preços mais elevados. Pereira Júnior e Silva (2011), também na construção de um telhado verde com garrafas PET reutilizadas, atingiu o valor de R\$ 16,00/m², em arranjo que utilizou rebitadeira, rebites e manta do tipo *Bidim*. Entretanto, de acordo com os autores, o valor obtido ainda é bem inferior e mais vantajoso do que o cobrado por empresas especializadas, em torno de R\$ 75,00/m². Oliveira (2016), na montagem de um telhado verde constituído por vegetação, substrato, geotêxtil e geomembrana, chegou ao valor de R\$ 72,87/m², e em outro telhado verde composto por vegetação, substrato, geotêxtil, geomanta e geomembrana, atingiu o valor de R\$ 72,34/m². Araújo, Sousa e Peres (2017) afirmam ser possível a redução de até 86,7% no custo de um telhado verde com garrafas PET, se comparado ao módulo Hexaecotelhado.

6 CONCLUSÕES

Na construção do telhado verde de baixo custo foi escolhida a utilização de um material que seria destinado ao descarte para a sua reutilização, a fim de manter a sustentabilidade da técnica e seu valor de aquisição, montagem e manutenção acessível para famílias de baixa renda que possam se interessar em adotá-lo. A estrutura suporte escolhida foi a garrafa PET, que apresentou boa resistência mecânica e química, sem sofrer alterações em sua estrutura quando exposta à umidade e à insolação da cobertura, mostrando-se um excelente componente para um telhado verde de baixo custo com materiais de reuso. A vegetação de *Kalanchoe laetivirens* teve bom crescimento e desenvolvimento nas condições do telhado, além de atingir dimensões esperadas mesmo com o espaço limitado das garrafas PET, multiplicando-se e formando novas mudas ao seu redor.

Nos meses de análise, de março a maio de 2021, março foi o que apresentou temperaturas mais elevadas, com média de 26,7°C e amplitude média de 7,2°C, e uma menor precipitação acumulada, de 222,2 mm, com pequenos eventos de chuva ao longo do mês. Em contrapartida, o mês de maio apresentou temperaturas mais amenas, com média de 25,1°C e amplitude média de 6,4°C, e eventos de chuva significativos, atingindo acumulado mensal de 531,4 mm. Com essas variações meteorológicas no período de análise, foi possível analisar o comportamento dos telhados verdes, convencional e de baixo custo, em diferentes condições externas. Em todos os telhados, as temperaturas internas acompanharam os valores externos, apresentando valores mais elevados no mês de março, e mais amenos no mês de maio.

Durante os dias de análise, observou-se que o telhado verde convencional atingiu as menores temperaturas máximas, como também as menores temperaturas mínimas. A cobertura convencional atingiu as temperaturas internas mais elevadas, com valores de máximo e mínimo superiores aos telhados verdes, além de apresentar as maiores amplitudes térmicas ao longo dos dias. O telhado verde de baixo custo apresentou valores intermediários, entretanto, mais semelhantes aqueles atingidos pelo telhado verde convencional. O telhado verde convencional chegou a atingir média diária 1,1°C a menos que a cobertura convencional, enquanto a maior diferença na média diária entre o telhado verde de baixo custo e a cobertura convencional foi de 0,5°C, durante o período de coleta de dados. Com isso, ao longo de todo o período

de coleta, o telhado verde convencional foi o mais eficiente em reduzir as temperaturas internas, comparadas aos valores externos, e em reduzir a amplitude térmica diária, enquanto a cobertura convencional foi menos eficiente em conter as trocas de calor, atingindo maiores temperaturas e maiores amplitudes térmicas.

Nos dias de eventos extremos analisados, o telhado verde convencional chegou a atingir temperatura máxima até 3,4°C inferiores à máxima da cobertura convencional. Já o telhado verde de baixo custo teve diferença de até 1,6°C em relação à cobertura convencional. Em relação a temperatura externa, o telhado verde convencional atingiu valor até 2,7°C inferiores à máxima externa, enquanto o telhado verde de baixo custo obteve valor 2,3°C a menos. A amplitude térmica dos telhados verdes convencional e de baixo custo chegaram a ser equivalentes a apenas 48,9% e 50,5%, respectivamente, da variação térmica externa, valores inferiores quando comparados a capacidade da cobertura convencional de conter as trocas térmicas. Na maioria dos dias, os telhados verdes comportaram-se de maneiras semelhantes, com diferenças de temperatura diversas vezes justificadas apenas pelas precisões dos equipamentos.

Quanto à NBR 15.575-1, os telhados verdes conseguiram atender suas recomendações em até 80,6% dos dias de coleta de dados, enquanto o telhado convencional atingiu no máximo 51,6% dos dias, ambos para o nível mínimo de atendimento. Apenas os telhados vegetados alcançaram dias de acordo com os critérios para o nível superior, com até 16,7% e 12,9%, para os telhados verdes convencional e de baixo custo, respectivamente.

O telhado verde convencional apresentou resultados mais satisfatórios em relação à redução da temperatura interna do ambiente comparada ao meio externo e à cobertura convencional, atingindo menores valores de temperatura e menores amplitudes térmicas diárias. Entretanto, devido às pequenas diferenças de temperatura interna apresentadas pelos telhados vegetados, e levando em consideração a facilidade de obtenção de seus materiais e de sua construção e o baixo valor dos materiais e de montagem, o telhado verde de baixo custo mostra-se como uma boa alternativa ao telhado verde convencional. Com sua configuração simplificada e mais econômica, pode ser adotado por famílias com baixa renda que desejam implantar em suas residências uma técnica sustentável capaz de oferecer diversos benefícios às suas moradias.

7 TRABALHOS FUTUROS

Para um completo entendimento do desempenho térmico de um telhado verde de baixo custo composto por garrafas PET, é recomendada a análise de seu comportamento ao longo de todo o ano, a fim de verificá-lo nas diferentes condições climáticas da região.

O estudo dos diversos benefícios de um telhado verde, como sua capacidade de retenção hídrica e a qualidade de escoamento das águas de chuvas coletadas, também são necessários para o telhado verde de baixo custo, de forma a verificar suas semelhanças e vantagens em relação ao telhado verde convencional.

Além disso, a instalação de um telhado verde composto por garrafas PET em escala real, em toda a superfície de uma cobertura familiar, seria capaz de oferecer o dimensionamento dos custos total com sua instalação e os impactos sociais e financeiros na família que o utiliza.

REFERÊNCIAS

ABIPET - Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens PET. **Infográfico Censo 2019**. Disponível em: <https://abipet.org.br/reciclagem>. Acesso em 17/05/2022.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220**: Norma Brasileira de Desempenho Térmico de Edificações, Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 30 p., 2005.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 60 p., 2013a.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro, 40 p., 2013b.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 7726**: Ergonomia do ambiente térmico – Instrumentos para medição de grandezas físicas. Rio de Janeiro, 51 p., 1998.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo, 54 p., 2021.

ALBERTO, M. A.. **Produção agrícola sobre as coberturas das edificações no espaço urbano e as possibilidades de impacto na segurança hídrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 209 p., 2017.

ALMEIDA, M.; ALMEIDA, C. V.. **Morfologia da folha de plantas com sementes**. Piracicaba: ESALQ/USP, 111 p., 2018.

ALMEIDA, S. C.; BRITO, G. P.; SANTOS, S. M.. Revisão Histórica dos Telhados Verdes: da Mesopotâmia aos dias atuais. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 2 (1): 42-51, 2018.

ALTOÉ, S. P. S.; RIBEIRO, A. V.; SILVA, A. C. P.; NEUBER, C. T. B.. Estudo do conforto térmico e confecção de telhados verdes a partir de embalagens tetra pak®. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, 11 (2): 201-210, 2019.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G.. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22 (6): 711-728, 2013.

AMORIM, M. C. C. T.. Intensidade e forma da ilha de calor urbana em Presidente Prudente/SP: episódios de inverno. **Geosul**, 20 (39): 64-82, 2005.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **SÉRIES HISTÓRICAS DE ESTAÇÕES**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em 20/11/2021.

ARAÚJO, E. D. S.; SILVA, J. B.; MACHADO, C. C. C.. Identificação de ilhas de calor na cidade de Campina Grande-PB utilizando sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 9 (2): 614-626, 2016.

ARAÚJO, B. G.; SOUSA, A. M. S.; PERES, M. D.. Telhado Verde de garrafa PET. I Simpósio de Produção Científica, Marabá – PA, **Anais..**, 3 p., 2017.

BARTH, A. A.; LIMANA, L.; KIST, K. J.; REICHERT, L. S.. A importância da criação de casas ecológicas para a maximização da sustentabilidade. XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Ijuí - RS, **Anais..**, 4 p., 2017.

BERARDI, U.; GHAFARIANHOSEINI, A.; GHAFARIANHOSEINI, A.. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. **Applied energy**, 115: 411-428, 2014.

BESIR, A. B.; CUCE, E.. Green roofs and facades: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 82 (1): 915-939, 2018.

BRASIL. **Lei Nº 11.445** de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Presidência da República. 2007.

BRASIL. **Lei Nº 12.305** de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Presidência da República. 2010.

BRITO, F.; HORTA, C. J. G.; AMARAL, E. F. L.. A urbanização recente no Brasil e as aglomerações metropolitanas. **Open Science Framework Preprints**, 2018. (<https://doi.org/10.31219/osf.io/84b92>).

BUTLER, C.; ORIAN, C. M.. Sedum cools soil and can improve neighboring plant performance during water deficit on a green roof. **Ecological Engineering**, 37 (11): 1796-1803, 2011.

CASTILHO, C. J. M.. Processo de produção desigual do espaço urbano: Recife – Impasse permanente da coexistência de interesses da “cidade à acumulação de capital” e da “cidade à realização plena da vida humana”!. **Acta Geográfica**, 5 (10): 95-113, 2011.

CASTLETON, H. F.; STOVIN, V.; BECK, S.B.M.; DAVISON, J. B.. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. **Energy and buildings**, 42 (10): 1582-1591, 2010.

CANOAS. **Lei Municipal Nº 5.840** de 27 de maio de 2014. Dispõe sobre a criação de telhados verdes e seus critérios técnicos especificados nesta lei e dá outras providências. Canoas – RS. Diário Oficial de Canoas, 2014.

CORTÉS, C. F.; CASTILLO, C. A. D.. Mejora de las condiciones de Habitabilidad y del Cambio Climático a partir de Ecotechos Extensivos. Estudio de caso: Barrio la Isla, altos de Cazúca Soacha Cundinamarca. **Cuadernos de Vivienda y Urbanismo**, 4 (8): 316-329, 2011.

CORTÉS, C. F.; CASTILLO, C. A. D.. Sistema productivo de techos verdes en comunidades vulnerables: estudio de caso en el barrio La Isla, Altos de Cazucá en Soacha, Cundinamarca. **Ambiente y Desarrollo**, 16 (30): 21-35, 2012.

COSTA, I. M.; DIAS, M. F.. Evolution on the solid urban waste management in Brazil: A portrait of the Northeast Region. **Energy Reports**, 6: 878-884, 2020.

COSTA, J.; POLETO, C.; RAMME, S. S.. Redução e retardo do escoamento superficial das águas pluviais em telhado verde. IV Encontro de Iniciação Científica, Toledo – PR, **Anais..**, 13 p., 2016.

CRISTIANO, E.; DEIDDA, R.; VIOLA, F.. The role of green roofs in urban Water-Energy-Food-Ecosystem nexus: A review. **Science of the Total Environment**, 756: 143876, 2021.

DAUVERGNE, P.. Why is the global governance of plastic failing the oceans?. **Global Environmental Change**, 51: 22-31, 2018.

DIMITRIJEVIĆ, D. G.; ŽIVKOVIC, P. M.; STOJILJKOVI, M. M.; TODOROVIC, M. N.; SPASIC-DJORDJEVIC, S. Z.. Green living roof implementation and influences of the soil layer on its properties. **Thermal Science**, 20 (5): 1511-1520, 2016.

DINIZ, F. A.; RAMOS A. M.; REBELLO, E. R. G.. Normas climatológicas do Brasil, 1981 – 2010. **Pesquisa agropecuária brasileira**, 53 (2): 131-143, 2018.

DVORAK, B.; VOLDER, A.. Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review. **Landscape and urban planning**, 96 (4): 197-213, 2010.

EMILSSON, T.; ROLF, K.. Comparison of establishment methods for extensive green roofs in southern Sweden. **Urban Forestry & Urban Greening**, 3 (2): 103-111, 2005.

FALCÃO, S. M. P.; BEZERRA, A. P. X. G.; ALVES, M. D. F. A.; HOLANDA, R. M.; CAMPOS, J. H. B. C.. Análise de Conforto Térmico urbano da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)–Campus Recife (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 7 (1): 070-085, 2019.

FEITOSA, R. C.; WILKINSON, S. J.. Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit. **Building and Environment**, 140: 11-22, 2018.

FENSTERSEIFER, P.; TASSI, R.; CECONI, D. E.; ALLASIA, D. G.; MINETTO, B.; SBITKOWSKI, A. L.; FENSTERSEIFER, M. J.. Reaproveitamento de embalagens TETRA PAK® como suporte de telhados verdes. XVIII Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, Curitiba – PR, **Anais...**, 10 p., 2017.

FERNANDES, J. S.; DANIELEWICZ, R. J.; SECCO, J.. Isolamento térmico de residências através da reutilização de embalagens Tetra Pak. **Revista Brasileira de Extensão Universitária**, 5 (1): 13-17, 2014.

FRANCIS, L. F. M.; JENSEN, M. B.. Benefits of green roofs: A systematic review of the evidence for three ecosystem services. **Urban Forestry & Urban Greening**, 28: 167-176, 2017.

FÜNFELT. K.; SOUZA, G. A.; TONET, E. A.; FACHINI, S.. Telhado verde e a influência no conforto térmico em uma edificação de madeira no IFC Campus Rio do Sul. V Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnologia Interdisciplinar, Camboriú – SC, **Anais...**, 6 p., 2012.

FRANÇA, M. V.; HOLANDA, R. M.; MEDEIROS, R. M.. Air Temperature and Relative Moisture Oscillations in Recife–PE. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, 9 (1): 30-35, 2019.

GALARZA-MOLINA, S.; TORRES, A.; RENGIFO, P.; PUENTES, A.; CÁRCAMO-HERNÁNDEZ, E.; MÉNDEZ-FAJARDO, S.; DEVIA, C.. The benefits of an eco-productive green roof in Bogota, Colombia. **Indoor and Built Environment**, 26 (8): 1135-1143, 2017.

GALBRUN, L.; SCERRI, L.. Sound insulation of lightweight extensive green roofs. **Building and Environment**, 116: 130-139, 2017.

GALVÃO, D. C.. Uma contribuição para o entendimento dos fatores que provocam deslizamentos nos morros do Grande Recife: O relevo, a ocupação e o clima. **REVISTA HUM@NAE**, 8 (2), 2014.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B.; ROBERTSON, G. P.; CREGG, B. M.; ANDRESEN, J. A.. Carbon sequestration potential of extensive green roofs. **Environmental Science & Technology**, 43 (19): 7564–7570, 2009.

GHESLA, P. L.; GOMES, L. P.; CAETANO, M. O.; MIRANDA, L. A. S.; DAI-PRÁ, L. B.. Municipal solid waste management from the experience of São Leopoldo/Brazil and Zurich/Switzerland. **Sustainability**, 10 (10): 3716, 2018.

GOMES, Y. R. M.. **Telhado verde em clima tropical úmido: investigação da qualidade da água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 68 p., 2019.

GONÇALVES, R. M.; PACHECO, A. P.; TANAJURA, E. L. X.; SILVA, L. M.. Urbanização costeira e sombreamento na praia de Boa Viagem, Recife-PE, Brasil. **Revista de Geografia Norte Grande**, 54: 241-255, 2013.

GONÇALVES, E. D.; BLANCO, C. J.C.; WATRIN, V. R.; COSTA, E. G. S.. Análise experimental e custos de telhados verdes comerciais e fabricados com garrafas pet para redução de cheias urbanas na Amazônia. **Mix Sustentável**, 7 (2): 57-66, 2021.

GUARULHOS. **Lei Municipal Nº 6793** de 28 de dezembro de 2010. Dispõe sobre o lançamento, arrecadação e fiscalização do imposto sobre a propriedade predial e territorial urbana - IPTU e dá outras providências. Diário Oficial do Município. 2010.

GUARULHOS. **Lei Municipal Nº 7.031** de 17 de abril de 2012. Dispõe sobre a instalação do “Telhado Verde” nos locais que especifica, e dá outras providências. Guarulhos, SP. Diário Oficial de Guarulhos, 2012.

GUTIÉRREZ, P.A.G.; LÓPEZ-PUJOL, J.; GÓMEZ-BELLVER, C.. Notas sobre las especies de Kalanchoe (Crassulaceae) ocasionales y naturalizadas en Cuba. **Collectanea Botanica**, 38 (11), 2019.

HATHWAY, E. A.; SHARPLES, S.. The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. **Building and Environment**, 58: 14-22, 2012.

HENN, A. B.; CAGLIARI, A. I.. A aplicabilidade do telhado verde em centros urbanos. V Seminário Internacional de Construções Sustentáveis, Passo Fundo - RS, **Anais...**, 6 p., 2016.

IBGE–Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados. Recife**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>. Acesso em 10 /03/2022.

IMRAN, H.M.; KALA, J.; NG, A.W.M.; MUTHUKUMARAN, S.. Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. **Journal of Cleaner Production**, 197: 393-405, 2018.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **DADOS HISTÓRICOS ANUAIS**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em 12/08/2021.

JOBIM A. L.. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo de água pluvial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria- UFSM, Rio Grande do Sul, 76 p., 2013.

KARACHALIOU, P.; SANTAMOURIS, M.; PANGALOU, H.. Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. **Energy and Buildings**, 114: 256-264, 2016.

KIST, T.. **Direito urbanístico e políticas públicas: estímulos legais e fiscais para a adoção de técnicas sustentáveis na construção civil, quanto à implantação de telhados verdes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Direito), Universidade de Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul, 77 p., 2015.

LOPES, D. A. R.; VITALLI, P. D. L.; VECCHIA, F.. A importância das políticas públicas no fomento das coberturas verdes. IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis- ELECS, **Anais...**, 2007.

LEONARDO, H. R. A. L.. **Desempenho de telhados ecológicos em área urbana**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 127 p., 2021.

LESSA, M. A.; PAIVA, P. D. O.; SCHUCH, U. K.. Production of cacti and other succulents. **Informe Agropecuario**, 30 (249): 99-107, 2009.

MACEDO, P. M. T.. **Telhados ecológicos: avaliação do desempenho térmico e hidrológico em clima tropical úmido**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 122 p., 2022.

MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A.; GANDOLLA, M.. Contribution to the development of municipal solid waste management in Brazil based on European experience. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 21: 379-385, 2016.

MARTINS, L. S.; PINTO, J. S.. Avaliação quali-quantitativa de telhado verde extensivo em escala piloto. **Disciplinarium Scientia**, 17 (2): 245-257, 2016.

MARY, W.; ARRUDA, J.; SILVA, L. P.; PINTO, G. B.; GARCIA, B.A.S.R.; SOARES, Y. X.. Tecnologias alternativas de produção vegetal em telhados verdes em áreas de interesse social. **Revista Conexão UEPG**, 6 (1): 60-67, 2010.

MENDES, T. G. L.; NASCIMENTO, P. T. B.; BEZERRA, J. M.; ANJOS, L. S.; NÓBREGA, R. S.. Avaliação de índices de conforto térmico ambiental nos bairros de Recife-Pernambuco (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 4 (1): 136-147, 2018.

MENTENS, J; RAES, D; HERMY, M.. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. **Landscape and Urban Planning**, 77 (3): 217-226, 2006.

MORAIS, B. R.; MÉNDEZ-QUINTERO, J. D.; MACEDO, D. R.; NERO, M. A.. Os telhados verdes nas políticas ambientais e como medida mitigadora das inundações urbanas: uma revisão sistemática. **Labor e Engenho**, 15: e021018-e021018, 2021.

NAÇÕES UNIDAS. **World Urbanization Prospects**, 126 p., 2019. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html#:~:text=News-68%25%20of%20the%20world%20population%20projected%20to%20live%20in,are as%20by%202050%2C%20says%20UN&text=Today%2C%2055%25%20of%20the%20world's,increase%20to%2068%25%20by%202050>. Acesso em 28/02/2022.

NÓBREGA, R. S.; LEMOS, T. V S.. O microclima e o (des) conforto térmico em ambientes abertos na cidade do Recife. **Revista de Geografia (Recife)**, 28 (1): 93-109, 2011.

NÓBREGA, R. S.; VITAL, L. A. B.. Influência da urbanização sobre o microclima de Recife e formação de Ilha de Calor (Influence of urbanization on the climate of Recife and development of Heat Island). **Revista Brasileira de Geografia Física**, 3 (3): 151-156, 2010.

NUNES, N. C. P.; SILVA, D. A. M.; BRITO, L. A. P. F.; CARVALHO, M. C.. O uso de placas de Tetra pak como uma alternativa sustentável na construção civil. **Tecnológica**, 13 (2):64-69, 2009.

OLIVEIRA, A. F.. Metrôpoles e metropolização no Brasil: o caso de Goiânia. **Sociedade e Cultura**, 16 (1): 153-167, 2013.

OLIVEIRA, T. A. A.. **Comparação de Preços Entre Telhados Verdes e Telhas Coloniais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 20 p., 2016.

OLIVEIRA, T.H., GALVÍNCIO, J.D., PIMENTEL, R.M.M., SILVA, B.B., 2013. Uso e Cobertura do Solo e Seus Efeitos na Distribuição da Temperatura de Superfície em Área Urbana. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 6 (6): 1598-1616, 2013.

PALMEIRA, A. N.. **Balanco de energia em telhado verde**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 94 p., 2016.

PANZIERA, A. G.; CALIL, V. S.; AMARAL, F. D.; SWAROWSKY, A.. Desempenho de diferentes tipos de telhado verde no conforto térmico urbano na cidade de Santa Maria, RS. **Disciplinarum Scientia | Naturais e Tecnológicas**, 16 (3): 445-457, 2015.

PARAÍBA. **Lei Estadual Nº 10.047** de 09 de julho de 2013. Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do “telhado verde” nos locais que especifica, e dá outras providências. João Pessoa, PB. Diário Oficial do Estado da Paraíba, 2013.

PARIZOTTO, S.; LAMBERTS, R.. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. **Energy and Buildings**, 43 (7): 1712-1722, 2011.

PÊGO, R. G.; FERREIRA, T. S.. Substratos alternativos para a produção de *Kalanchoe laetivirens* e *Kalanchoe delagoensis*. **Cadernos de Agroecologia**, 15 (2), 2020.

PEREIRA JÚNIOR, A. A. M.; SILVA, S. A. O.. **Montagem de telhado verde com a utilização de materiais de baixo custo**. Projeto Nº. 604. Monografia apresentada ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte: CEFET, 2011.

PERSCH, C. G.. **Efeito de Escala em Telhados Verdes Extensivos**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria UFSM, Santa Maria - RS, 147 p., 2019.

PIAUI. **Lei Nº 6.888** de 06 de outubro de 2016. Dispõe sobre a obrigatoriedade da adoção de práticas e métodos sustentáveis na construção civil e dá outras providências. Teresina, PI. Diário Oficial do Estado da Piauí, 2016.

PORTO ALEGRE. **Lei Complementar Nº 434** de 01 de dezembro de 1999. Dispõe sobre o desenvolvimento urbano no município de porto alegre, institui o plano diretor de desenvolvimento urbano ambiental de porto alegre e dá outras providências. Porto Alegre – RS. Diário Oficial de Porto Alegre, 1999.

PORTO ALEGRE. **Lei Complementar Nº 646** de 22 de julho de 2010. Altera e inclui dispositivos, figuras e anexos na lei complementar nº 434, de 1º de dezembro de 1999 - Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental de Porto Alegre (PDDUA) -, e alterações posteriores, e dá outras providências. Porto Alegre – RS. Diário Oficial de Porto Alegre, 2010.

RANGEL, A. C. L. C.; ARANHA, K. C.; SILVA, M. C. B. C.. Os telhados verdes nas políticas ambientais como medida indutora para a sustentabilidade. **Desenvolvimento & Meio Ambiente**, 35: 397-409, 2015.

RECIFE. **Lei municipal nº18.112** de 15 de janeiro de 2015. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Recife, PE: Diário Oficial de Pernambuco, 2015.

RIO DE JANEIRO. **Lei nº 6.349** de 30 de novembro de 2012. Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do "telhado verde" nos locais que especifica e dá outras providências. Rio de Janeiro – RJ. Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro, 2012a.

RIO DE JANEIRO. **Decreto nº 35.745** de 06 de junho de 2012. Cria a qualificação Qualiverde e estabelece critérios para sua obtenção. Rio de Janeiro – RJ. Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro, 2012b.

ROCHA, R. S. T. M.. **Desempenho térmico de telhado verde ecológico de baixo custo em clima semiárido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 121 p., 2020.

ROGERS. J.. Green, brown or grey: green roofs as 'sustainable' infrastructure. **Sustainable Development and Planning**, 173: 323-333, 2013.

SAIZ, S.; KENNEDY, C.; BASS, B.; PRESSNAIL, K.. Comparative life cycle assessment of standard and green roofs. **Environmental Science & Technology**, 40 (13): 4312-4316, 2006.

SALVADOR. **Decreto Municipal Nº. 29.100** de 06 de novembro de 2017. Regulamenta o art. 5º da Lei nº 8.474, de 02 de outubro de 2013, e institui o Programa de Certificação Sustentável "IPTU VERDE" em edificações no Município de Salvador, que estabelece benefícios fiscais aos participantes do programa, assim como o art. 5º da Lei 8.723 de 22 de dezembro de 2014 e dá outras providências. Salvador – BA, Prefeitura de Salvador, 2017.

SANTA CATARINA. **Lei nº 14.243** de 11 de dezembro de 2007. Dispõe sobre a implementação de sistemas de natação através da criação de telhados verdes em espaços urbanos de Santa Catarina. Florianópolis - SC. Governo do Estado de Santa Catarina, 2007.

SANTOS, G. C.. **Desempenho Térmico De Telhados Verdes No Agreste Pernambucano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 96 p., 2016.

SANTOS, S. M.; MONTEGRO, S. M. G. L.; ARAÚJO FILHO, P. F.; CABRAL, J. J. S. P.; ARAÚJO T. F.. Determinação da utilidade do uso de telhado verde no Agreste Pernambucano. V Encontro Nacional e III Encontro Latino- Americano Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Recife – PE, **Anais..**, 10 p., 2009.

SANTOS, P. T. S.; SANTOS, S. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P.; MOURA, G. S. S.; ANTONINO, A. C. D.. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, 13 (1): 161-174, 2013.

SANTOS, P. T. S.. **Balanço hídrico em teto com cobertura vegetal no semiárido pernambucano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 100 p., 2011.

SÃO PAULO. **Decreto Nº 55.994** de 10 de março de 2015. Introduz alterações no artigo 4º do Decreto Nº 53.889, de 8 de maio de 2013, que regulamenta o Termo de Compromisso Ambiental - TCA. São Paulo – SP. Diário Oficial de São Paulo, 2015.

SAVI, A. C.. **Telhados verdes: análise comparativa de custo com sistemas tradicionais de cobertura**. Monografia (Especialização em Construções Sustentáveis), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 128 p., 2012.

SCRENSKI, A. J.. **Viabilidade do telhado verde como instrumento de redução de emissões de carbono**. Monografia (Curso de Especialização em Projetos Sustentáveis, Mudanças Climáticas e Gestão Corporativa de Carbono), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 32 p., 2015.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; RAFIQ, M.. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 90: 757-773, 2018.

SILVA, C. M.; GOMES, M. G.; SILVA, M.. Green roofs energy performance in Mediterranean climate. **Energy and buildings**, 116: 318-325, 2016.

SILVA JUNIOR, M. A. B.. **Alternativas compensatórias para controle de alagamentos em localidade do Recife - PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 154 p., 2015.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; FONSECA NETO, G. C.; CABRAL, J. J. S. P.. Análise estatística para detecção de tendências em séries temporais de temperatura e precipitação no Recife-PE. **Revista de Geografia (Recife)**, 37 (1), 2020.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; SILVA, S. R.. Impactos da urbanização e das alterações climáticas no sistema de drenagem do Recife/PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 9 (6): 2034-2053, 2016.

SILVA, A. C.; SILVA, O. G.; SILVA, D. N. F.; CORRÊA, A. C. B.. Mudanças do uso e ocupação da terra a partir da expansão urbana e as influências climáticas sobre a morfodinâmica no município do Recife/PE entre 1975 e 2015. **Revista Cerrados (Unimontes)**, 13 (1): 33-49, 2015.

SILVA, S. R.; SILVA JUNIOR, M. A. B.; OLIVEIRA, R. L. M.. Modelagem computacional de reservatório de retenção sob logradouro: uma alternativa para controle de alagamentos em área densamente urbanizada do Recife/PE. **Revista DAE**, 68 (226): 196-212, 2020.

SILVA, T. F.. **Tecnologia alternativa em drenagem urbana: telhado verde**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 136 p., 2017.

SONG, X. P.; HANSEN, M. C.; STEHMAN, S. V.; POTAPOV, P. V.; TYUKAVINA, A.; VERMOTE, E. F.; TOWNSHEND, J. R.. Global land change from 1982 to 2016. **Nature**, 560 (7720): 639-643, 2018.

SUN, T.; BOU-ZEID, E.; WANG, Z.; ZERBA, E.; NI, G.. Hydrometeorological determinants of green roof performance via a vertically-resolved model for heat and water transport. **Building and Environment**, 60: 211-224, 2013.

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**, 162: 106273, 2019.

TEOTÓNIO, I.; SILVA, C.M.; CRUZ, C.O.. Eco-solutions for urban environments regeneration: The economic value of green roofs. **Journal of Cleaner Production**, 199: 121-135, 2018.

TANG, X.; QU, M.. Phase change and thermal performance analysis for green roofs in cold climates. **Energy and Buildings**, 121: 165-175, 2016.

TERRAL. **ARTIGOS JARDINAGEM**. Disponível em: <<http://terral.agr.br/plus/modulos/noticias/ler.php?cdnoticia=33>>. Acesso em 17/06/2022./

TETRA PAK. Disponível em: <<https://www.tetrapak.com/br/>>. Acesso em 22/04/2022.

TIBA, C.; LEAL, S. S.. Enhancement of UV radiation by cloud effect in NE of Brazil. **International Journal of Photoenergy**, 2017, 2017.

TRINDADE, T. Q.; MARTINI, D.. Embalagens Tetra Park® alternativa de baixo custo na construção. 2ª Jornada Científica da Universidade do Estado de Mato Grosso, Pró-Reitora de Pesquisa e Pós-Graduação, Barra do Bugres - MT, **Anais..**, 7p., 2009

ULRICH, R. S.; SIMONS, R. F.; LOSITO, B. D.; FIORITO, E.; MILES, M. A.; ZELSON, M.. Stress recovery during exposure to natural and urban environments. **Journal of environmental psychology**, 11 (3): 201-230, 1991.

VIJAYARAGHAVAN, K.. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 57: 740-752, 2016.

VISENTIN, T. G.; NECKEL, A.; BREDA, A.. Telhados verdes como um meio sustentável nas cidades: Propostas recicláveis de produção. VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Porto Alegre – RS, **Anais..**, 5p., 2015.

VITTORINO, F.; UCHÔA, G.. Método para avaliação de Coberturas Verdes. Latin American Real State Society - LARES, São Paulo – SP, **Anais..**, 16 p., 2013.

WEI, Y. L.; BAO, L. J.; WU, C. C.; HE, Z. C.; ZENG, E. Y.. Assessing the effects of urbanization on the environment with soil legacy and current-use insecticides: A case study in the Pearl River Delta, China. **Science of the Total Environment**, 514: 409-417, 2015.

WILLIAMS, K. J. H.; LEE, K. E.; SARGENT, L.; JOHNSON, K. A.; RAYNER, J.; FARRELL, C.; MILLER, R. E.; WILLIAMS, N. S. G.. Appraising the psychological benefits of green roofs for city residents and workers. **Urban Forestry & Urban Greening**, 44: 126399, 2019.

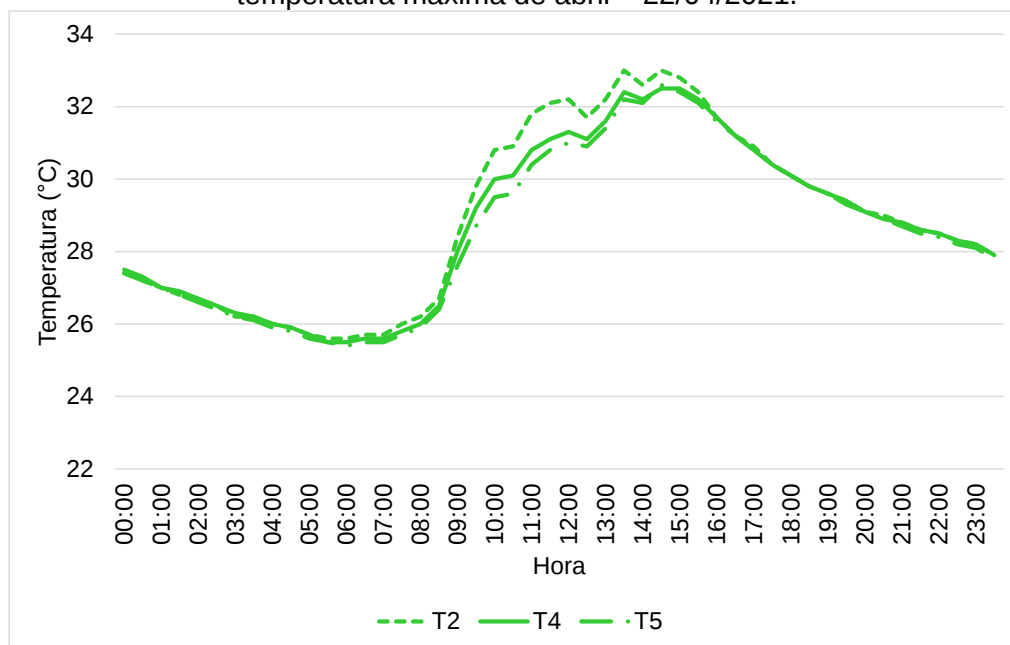
WONG, N. H.; CHEN, Y.; ONG, C. L.; SIA, A.. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. **Building and Environment**, 38 (2): 261-270, 2003.

YANG, J.; YU, Q.; GONG, P.. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. **Atmospheric Environment**, 42 (31): 7266–7273, 2008.

YU, Z.; YAO, Y.; YANG, G.; WANG, X.; VEJRE, H.. Strong contribution of rapid urbanization and urban agglomeration development to regional thermal environment dynamics and evolution. **Forest Ecology and Management**, 446: 214-225, 2019.

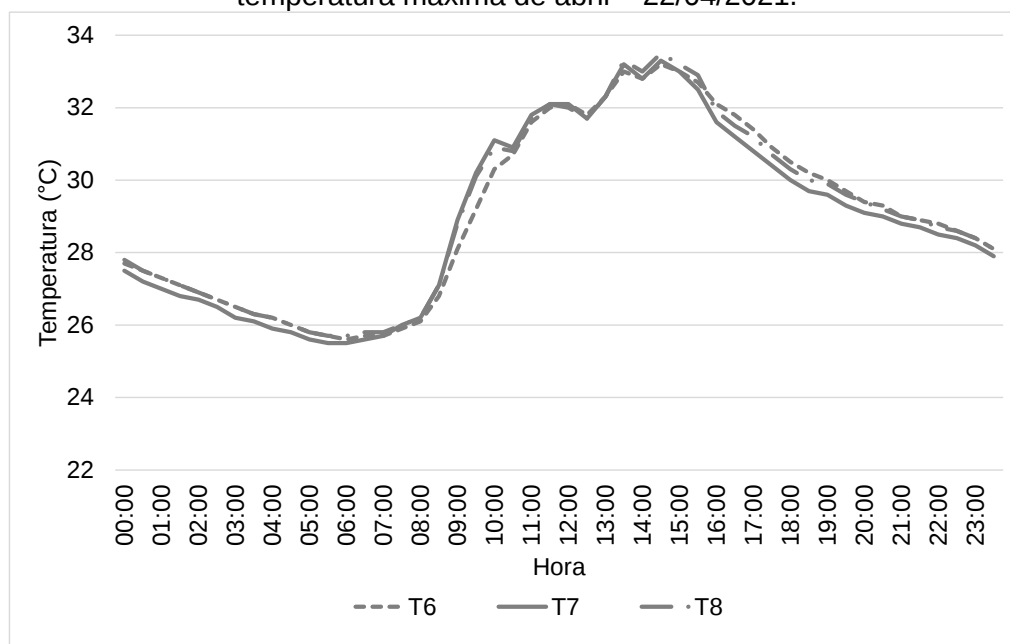
APÊNDICE A – GRÁFICOS DE TEMPERATURA NAS CÉLULAS-TESTE

Figura A1 - Temperatura das paredes do telhado verde de baixo custo para o dia de maior temperatura máxima de abril – 22/04/2021.



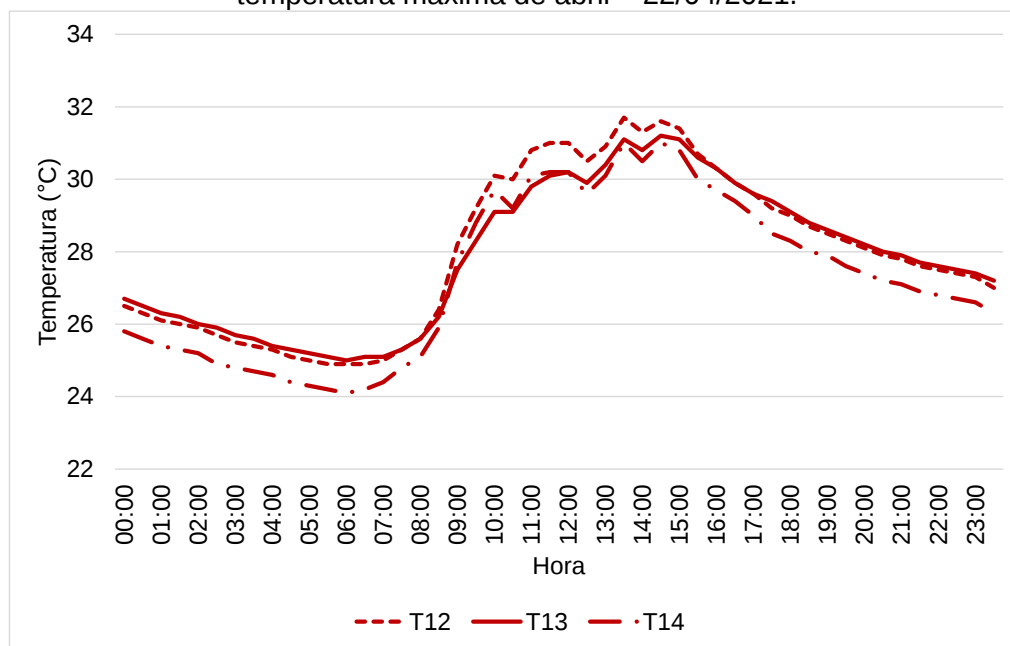
Fonte: Autor.

Figura A2 - Temperatura das paredes do telhado convencional para o dia de maior temperatura máxima de abril – 22/04/2021.



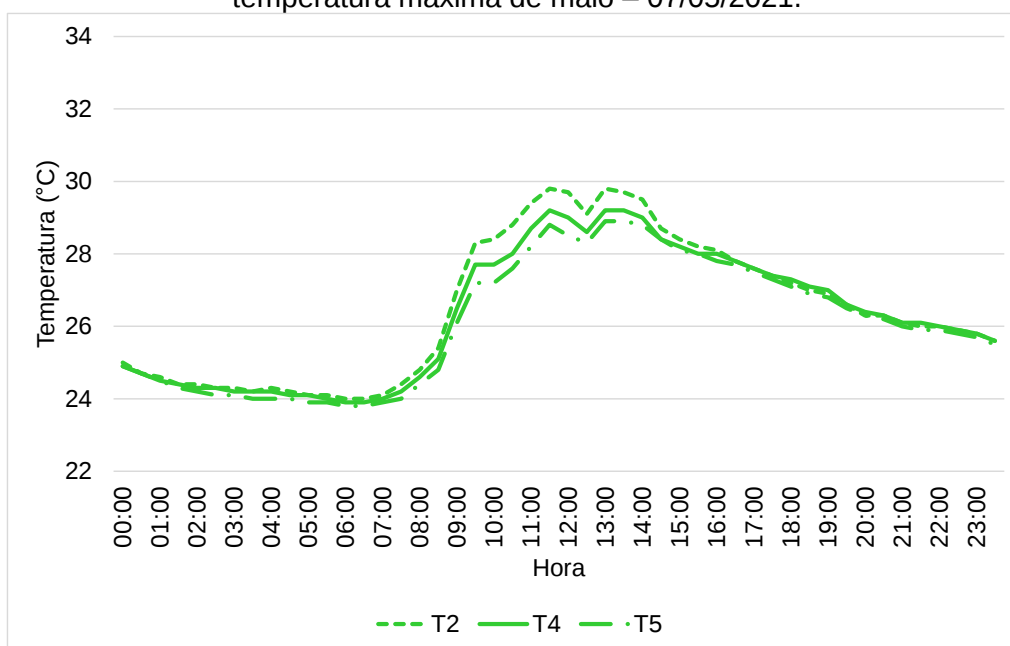
Fonte: Autor.

Figura A3 - Temperatura das paredes do telhado verde convencional para o dia de maior temperatura máxima de abril – 22/04/2021.



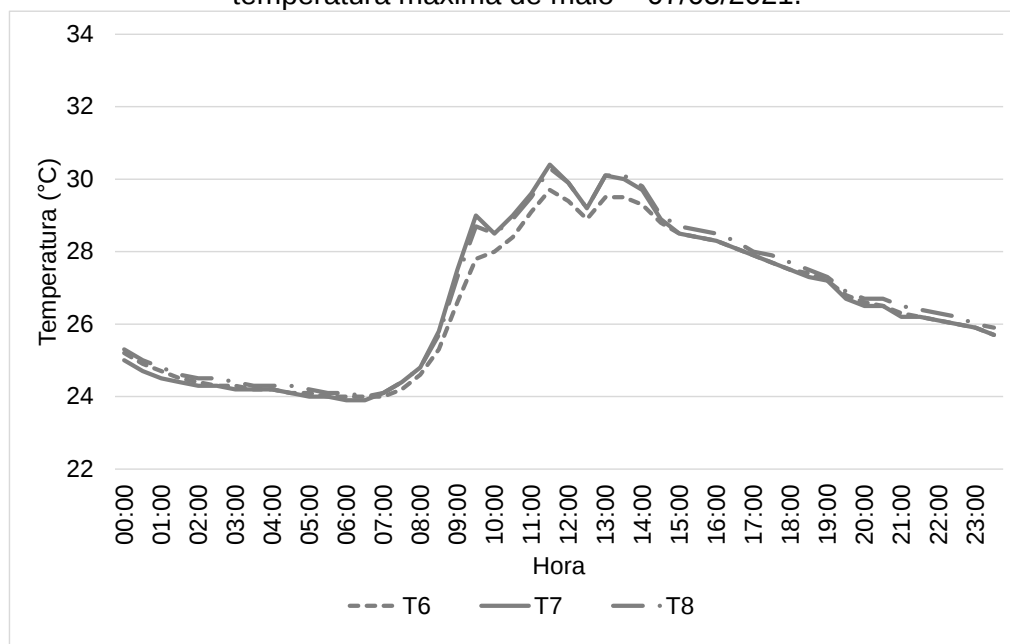
Fonte: Autor.

Figura A4 - Temperatura das paredes do telhado verde de baixo custo para o dia de maior temperatura máxima de maio – 07/05/2021.



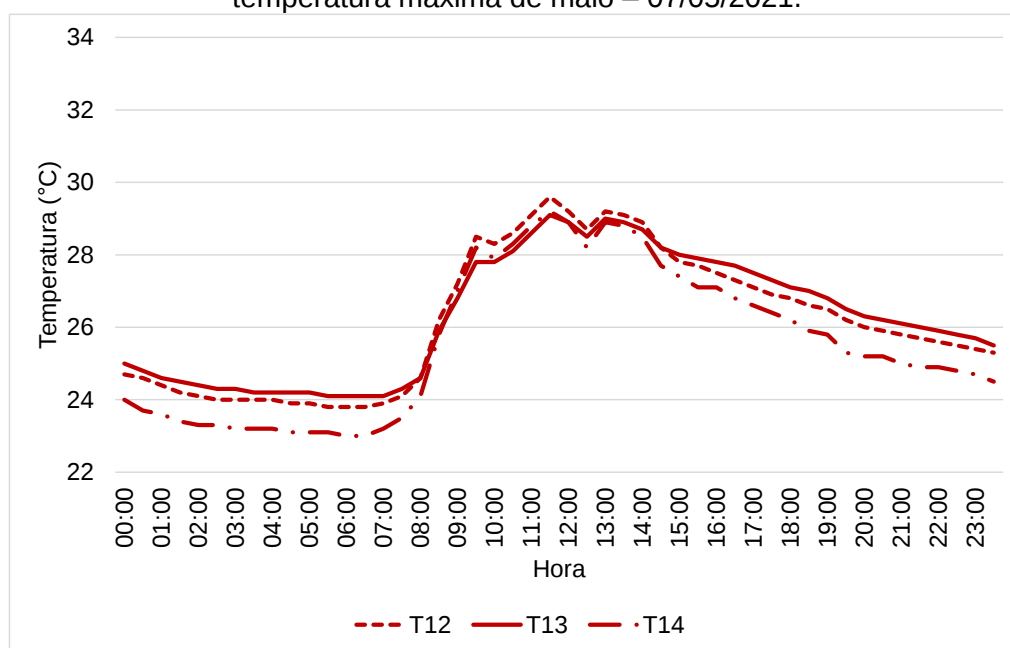
Fonte: Autor.

Figura A5 - Temperatura das paredes do telhado convencional para o dia de maior temperatura máxima de maio – 07/05/2021.



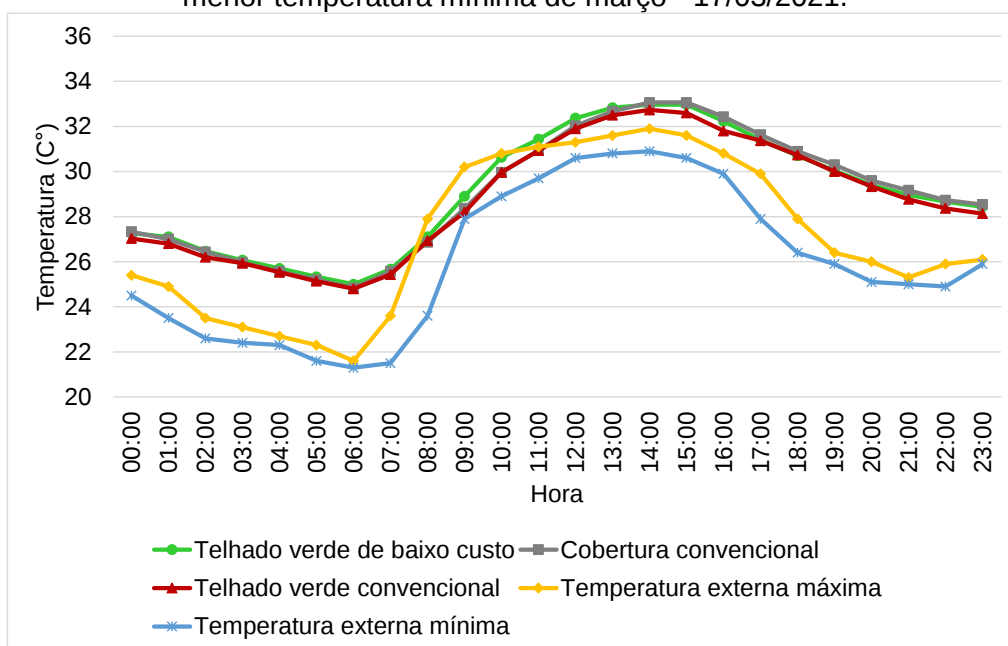
Fonte: Autor.

Figura A6 - Temperatura das paredes do telhado verde convencional para dia de maior temperatura máxima de maio – 07/05/2021.



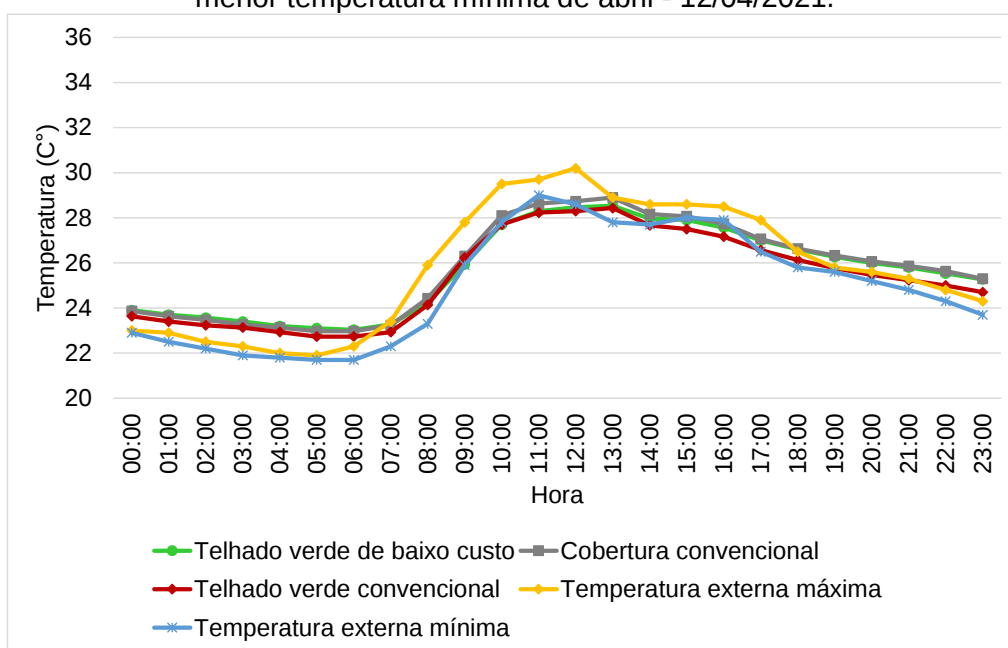
Fonte: Autor.

Figura A7 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia de menor temperatura mínima de março - 17/03/2021.



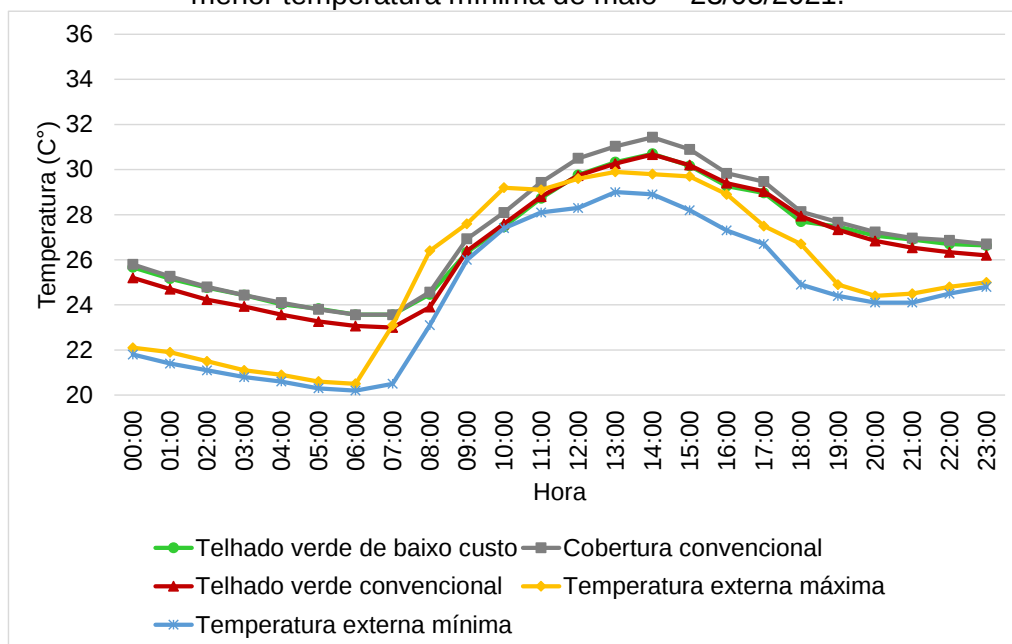
Fonte: Autor.

Figura A8 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia de menor temperatura mínima de abril - 12/04/2021.



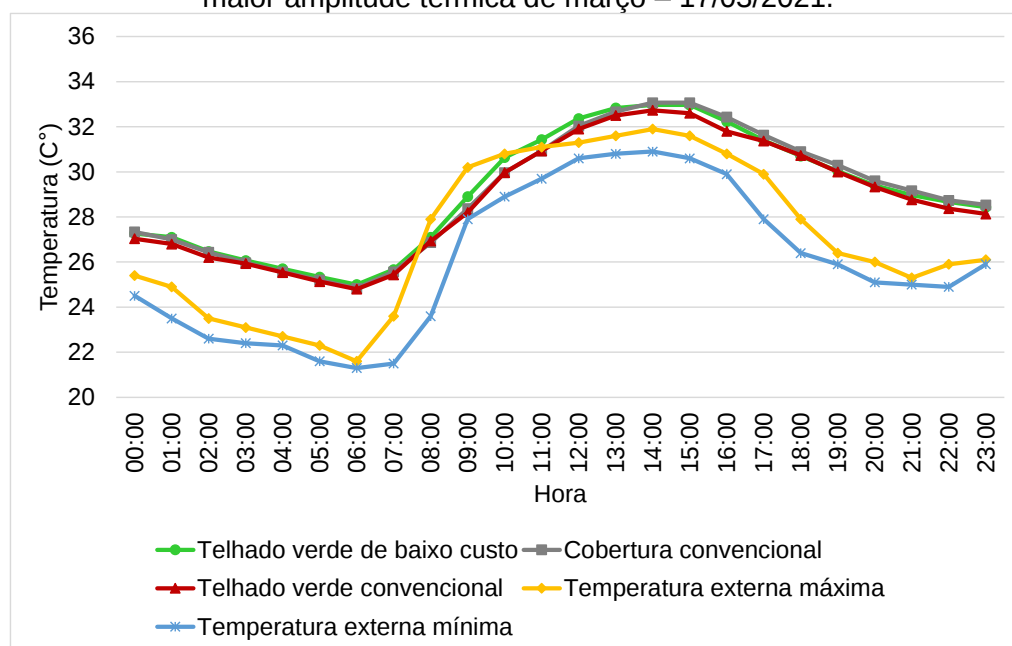
Fonte: Autor.

Figura A9 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia de menor temperatura mínima de maio – 23/05/2021.



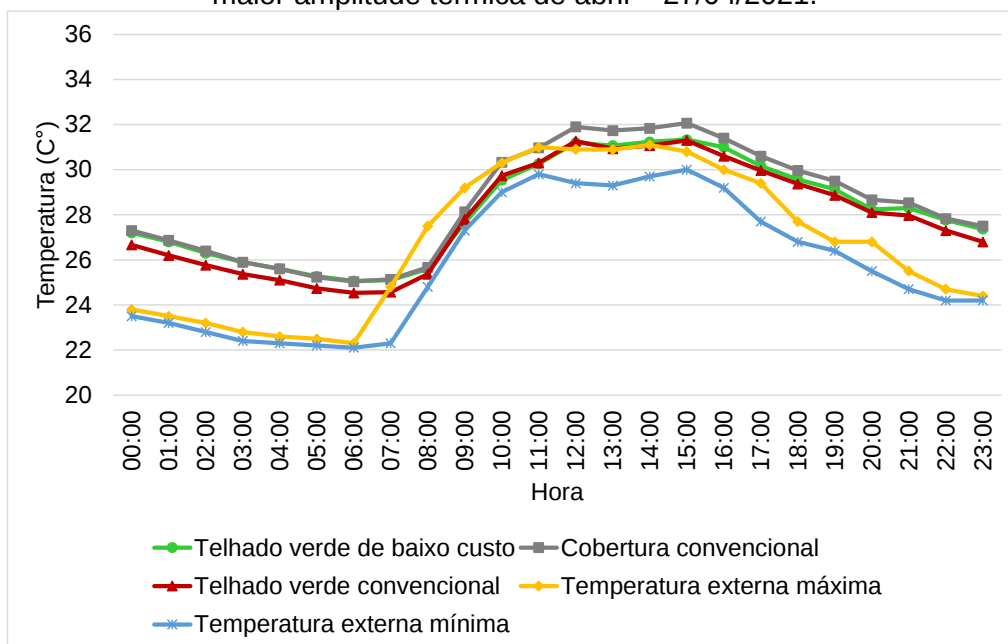
Fonte: Autor.

Figura A10 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia com maior amplitude térmica de março – 17/03/2021.



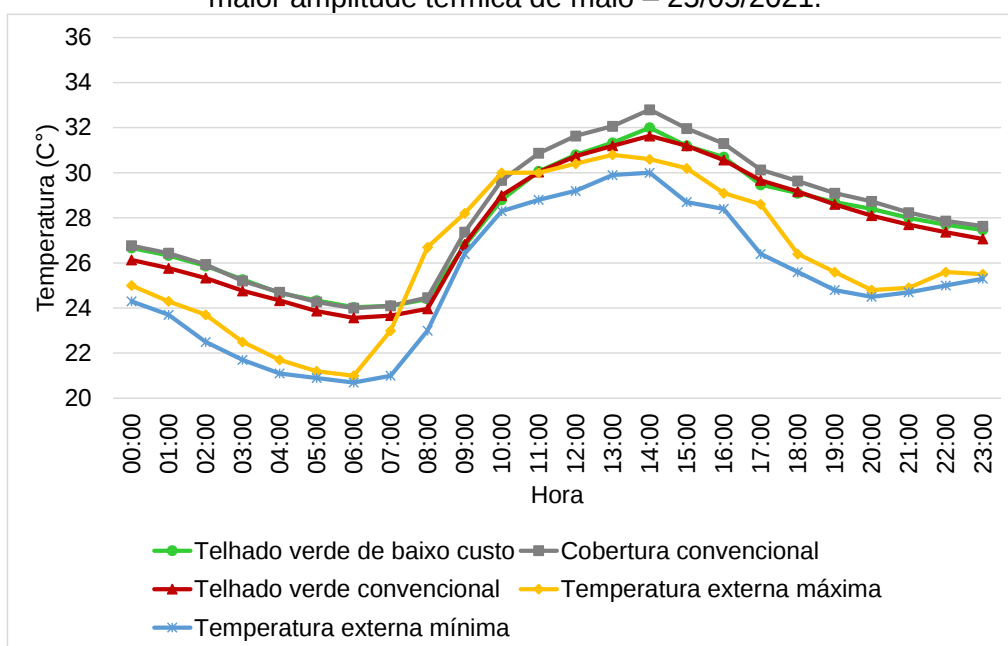
Fonte: Autor.

Figura A11 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia com maior amplitude térmica de abril – 27/04/2021.



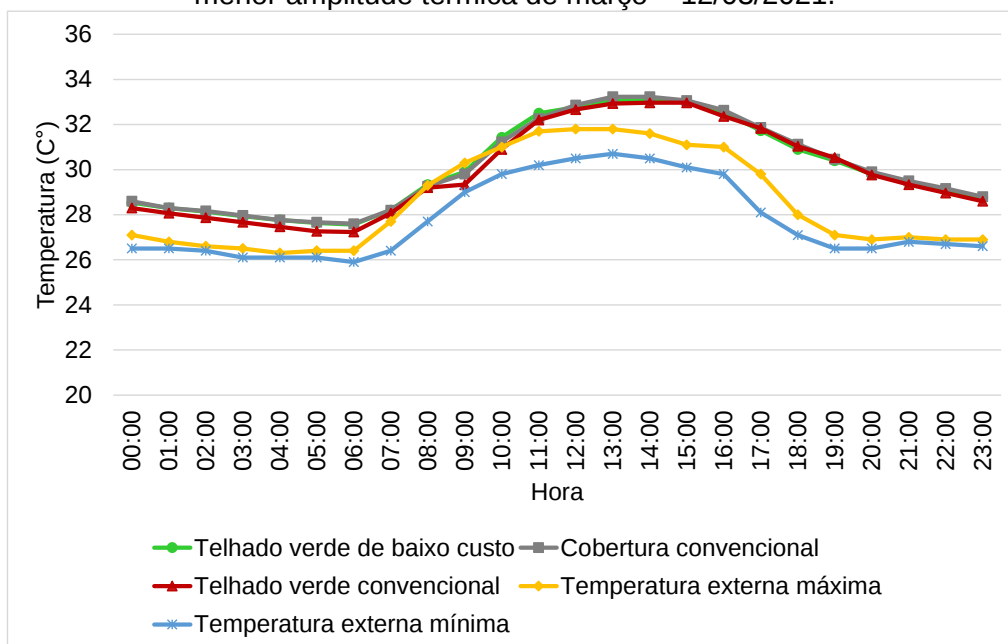
Fonte: Autor.

Figura A12 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia com maior amplitude térmica de maio – 25/05/2021.



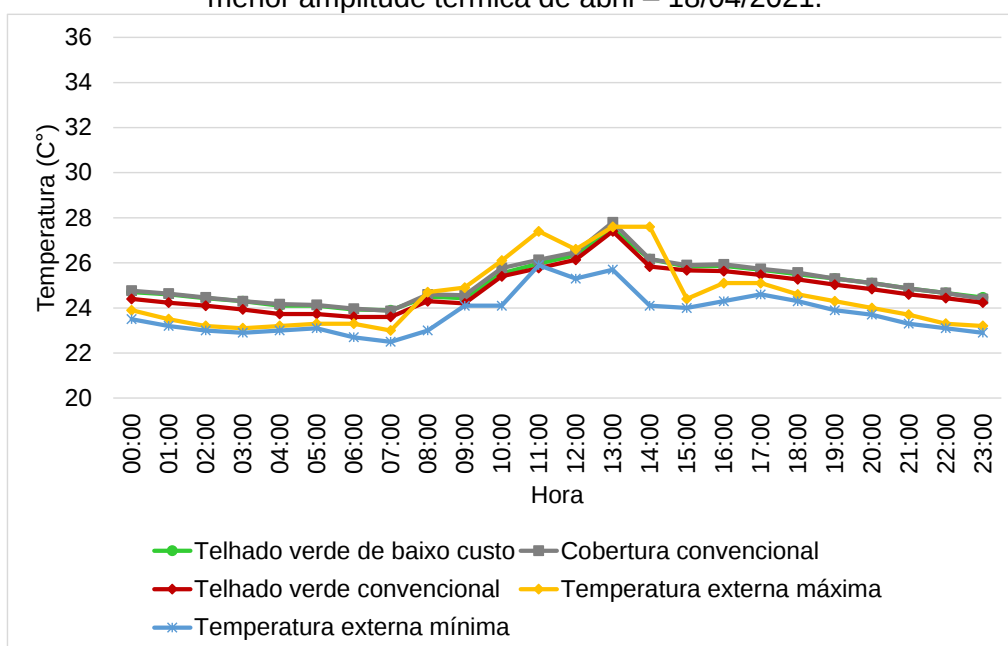
Fonte: Autor.

Figura A13 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia com menor amplitude térmica de março – 12/03/2021.



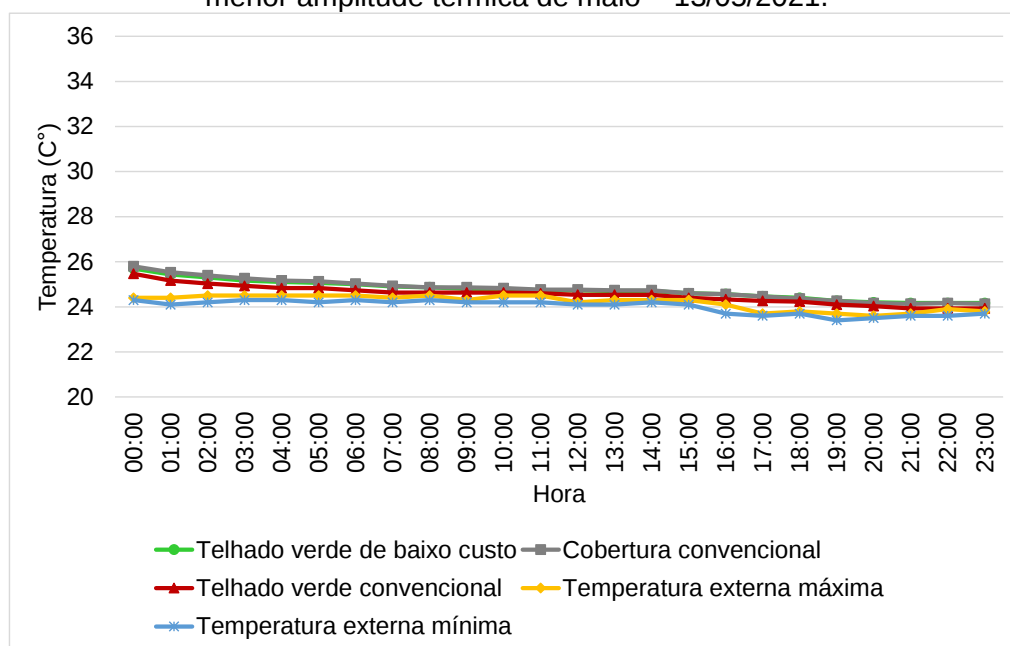
Fonte: Autor.

Figura A14 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia com menor amplitude térmica de abril – 18/04/2021.



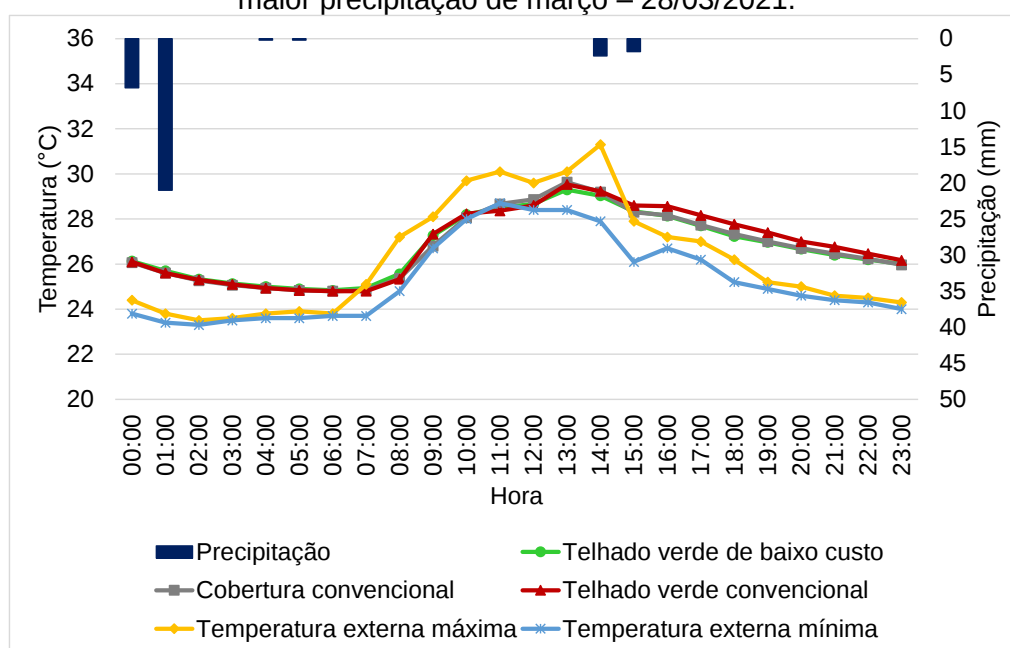
Fonte: Autor.

Figura A15 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia com menor amplitude térmica de maio – 13/05/2021.



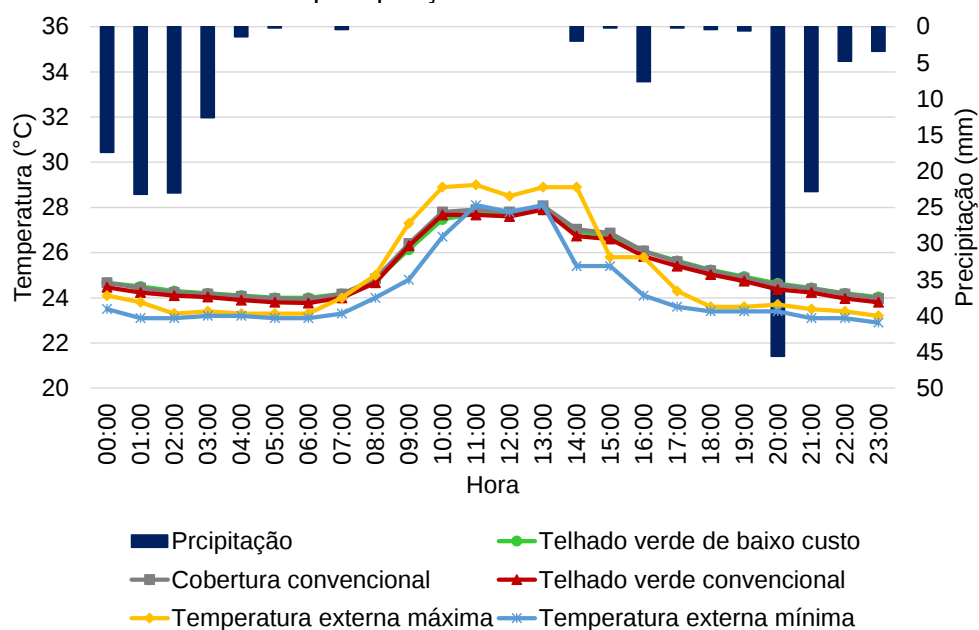
Fonte: Autor.

Figura A16 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia com maior precipitação de março – 28/03/2021.



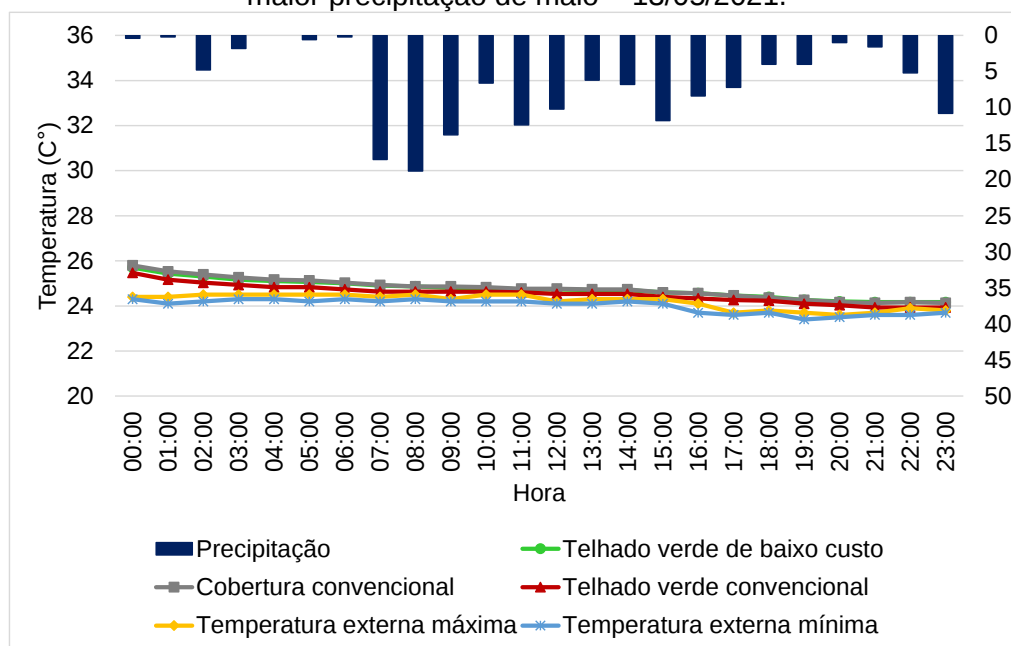
Fonte: Autor.

Figura A17 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia com maior precipitação de abril– 11/04/2021.



Fonte: Autor.

Figura A18 - Médias das temperaturas das paredes e temperaturas externas para o dia com maior precipitação de maio – 13/05/2021.



Fonte: Autor.