



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

HAYLLA REBEKA DE ALBUQUERQUE LINS LEONARDO

DESEMPENHO DE TELHADOS ECOLÓGICOS EM ÁREA URBANA

Recife
2021

HAYLLA REBEKA DE ALBUQUERQUE LINS LEONARDO

DESEMPENHO DE TELHADOS ECOLÓGICOS EM ÁREA URBANA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos 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
Coorientador: Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Recife
2021

L581d Leonardo, Haylla Rebeka de Albuquerque Lins.

Desempenho de telhados ecológicos em área urbana / Haylla Rebeka de Albuquerque Lins. - 2021.
147 folhas, il.; tab., abr., sigl. e símb.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Sylvana Melo dos Santos.
Coorientador: Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Telhado ecológico. 3. Desempenho térmico. 4. Python.
I. Santos, Sylvana Melo dos (Orientadora). II. Paiva, Anderson Luiz Ribeiro de (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-01

HAYLLA REBEKA DE ALBUQUERQUE LINS LEONARDO

DESEMPENHO DE TELHADOS ECOLÓGICOS EM ÁREA URBANA

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: 27/12/2021

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Cristiane Guiselini (Examinadora Externa)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico esta dissertação primeiramente a Deus, que me concedeu forças, sabedoria e auxílio em cada dificuldade encontrada nesta jornada. A minha família, que me apoiou e incentivou a jamais desistir dos meus sonhos, vocês foram essenciais nesta conquista, aos meus orientadores, que com paciência e dedicação me ensinaram e incentivaram nesta caminhada. E a todos aqueles que possam ser beneficiados pela implementação da tecnologia desenvolvida nessa pesquisa.

AGRADECIMENTOS

A Deus sou grata por todas as coisas, pois tudo provém Dele, e sem Ele nada seria possível, por me proporcionar a oportunidade realizar planos muito maiores do que sonhei, por me dar a força e me capacitar nos momentos em que mais precisei, por guiar e dirigir cada passo até aqui.

Agradeço aos meus pais por todo apoio, carinho, incentivo e suporte, vocês são responsáveis pela pessoa que sou hoje, serei eternamente grata por todo cuidado e dedicação, palavras jamais demonstraram o meu amor e gratidão por ter vocês ao meu lado, vocês são meu eterno exemplo. A minha avó (in memoriam), por todo amor, carinho e cuidado, serei eternamente grata.

Ao meu esposo e melhor amigo por ser meu parceiro de caminhada, por me incentivar nos momentos mais difíceis, por me ensinar a lutar e vencer cada obstáculo, por me apoiar e ajudar a realizar cada plano e sonho, por todo apoio e amor. A minha querida irmã, aos meus sogros e cunhados por todo carinho amor e incentivo, pelo apoio e ensino proporcionados na minha trajetória.

Aos meus queridos orientadores Sylvana Santos e Anderson Paiva, que acreditaram em mim e me incentivaram durante todo o trajeto acadêmico, por todas as oportunidades de crescimento proporcionadas, pelo ensino e dedicação, por toda orientação e amparo. À professora Leidjane Oliveira, que acreditou em mim e me incentivou, por todo ensino, apoio, e orientação prestados, obrigada por toda dedicação e carinho.

Aos meus amigos e colegas de pesquisas, e toda a equipe do grupo de telhados verde, por se disponibilizarem, e ajudarem em cada etapa desta pesquisa, pelos conhecimentos trocados e experiências compartilhadas, e pelo apoio fornecido, especialmente a Maiana Vilarim, Pedro Prado, Francisco Marcelo, Jocimar Coutinho, Camila Brito. Aos discentes de iniciação científica, que me auxiliaram na execução dos protótipos.

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

E a todos que direta ou indiretamente auxiliaram na realização desta pesquisa.

RESUMO

O acelerado processo de urbanização das metrópoles sem um planejamento urbanístico adequado, ocasiona a alteração do meio ambiente nas áreas urbanizadas, gerando o aumento das superfícies impermeabilizadas pela aplicação de materiais asfálticos, e sintéticos, ocasionando fenômenos ambientais as ilhas de calor, além do aumento no risco de inundações e na degradação da qualidade da água dos corpos hídricos presentes no meio urbano. Os telhados verdes e ecológicos destacam-se como medida mitigatória e de redução no aumento da temperatura de superfície nos grandes centros urbanos, e de problemas de inundações nas cidades. A aplicação dessa tecnologia associada aos princípios de sustentabilidade a partir da reutilização e aplicação de materiais não biodegradáveis, como materiais plásticos advindos de resíduos sólidos urbanos, potencializa os benefícios ambientais gerados. De maneira que, este estudo objetivou-se analisar o desempenho térmico da implementação de três protótipos, sendo um telhado ecológico, composto por materiais reutilizados, um telhado verde, e uma cobertura convencional. A unidade experimental está localizada na cidade do Recife, na Cidade Universitária, foram analisados os dados coletados abaixo de cada cobertura no período de abril de 2021 a junho de 2021. Foram aplicados técnica de análises de dados através da programação eletrônica, utilizando a linguagem Python com a aplicação de frameworks, e análises estatísticas descritivas utilizando os softwares e plataformas “*Jupyter Notebook*” e “*Excel*”. Os resultados destacaram que no âmbito da redução de temperatura ambiente interna, o telhado verde apresentou melhores desempenhos que o telhado ecológico (arranjos 1, 2 e 3), visto que o ecológico apresentou o maior potencial de conservação térmica. O telhado ecológico (arranjo 1) se destacou por reduzir a temperatura no interior do ambiente em até 4,49% quando comparado com a temperatura externa máxima. A aplicação do telhado ecológico demonstrou conservação da temperatura interna do ambiente sob a cobertura, apresentando benefícios na redução da umidade relativa do ar, principalmente nos dias em que ocorreram os eventos extremos de precipitação pluviométrica.

Palavras-chave: telhado ecológico; desempenho térmico; python.

ABSTRACT

The accelerated urbanization process in metropolises without adequate urban planning causes changes in the environment in urbanized areas, generating an increase in impermeable surfaces by the application of asphalt and synthetic materials, causing environmental phenomena in heat islands, in addition to an increase in the risk of flooding and the degradation of the water quality of water bodies present in urban areas. Green and ecological roofs stand out as a mitigation measure and a reduction in the increase in surface temperature in large urban centers, and in flooding problems in cities. The application of this technology associated with the principles of sustainability from the reuse and application of non-biodegradable materials, such as plastic materials from urban solid waste, maximizes the environmental benefits generated. So, this study aimed to analyze the thermal performance of the implementation of three prototypes, being an ecological roof, composed of reused materials, a green roof, and a conventional roof. The experimental unit is located in the city of Recife, in the University City, the data collected under each coverage in the period from April 2021 to June 2021 were analyzed. Data analysis technique was applied through electronic programming, using the Python language with the application of frameworks, and descriptive statistical analysis using the “Jupyter Notebook” and “Excel” software and platforms. The results highlighted that in the scope of the reduction of the internal ambient temperature, the green roof presented better performances than the ecological roof (Arrangements 1, 2 and 3), since the ecological one had the greatest potential for thermal conservation. The ecological roof (arrangement 1) stood out for reducing the temperature inside the environment by up to 4.49% when compared to the maximum outside temperature. The application of the ecological roof demonstrated conservation of the internal temperature of the environment under the roof, showing benefits in reducing the relative humidity of the air, especially on days when extreme rainfall events occurred.

Keywords: ecological roof; thermal performance; python.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Regionalização do estado de Pernambuco.....	20
Figura 2 -	Municípios da Região Metropolitana do Recife.....	21
Figura 3 -	Crescimento populacional da cidade do Recife nos anos de 1970 a 2020.....	22
Figura 4 -	Balanço de energia em diferentes coberturas de telhados.....	28
Figura 5 -	Elementos construtivos do telhado verde.....	30
Figura 6 -	Radiação solar incidente nos telhados e mecanismos de calor.....	33
Figura 7 -	Retenção hídrica em telhado verde e convencional.....	34
Figura 8 -	Participação das regiões no total de RSU coletados.....	39
Figura 9 -	Localização da área de estudo, Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE.....	46
Figura 10 -	Localização da estação automática A301 do INMET e do Posto 30 da APAC.....	47
Figura 11 -	Visualização 3D dos protótipos.....	48
Figura 12 -	Protótipos construídos na UETER.....	49
Figura 13 -	Limpeza das células-teste.....	50
Figura 14 -	Etapas de preparo do tapete refletivo com embalagens Tetra Pak.....	50
Figura 15 -	Etapas de preparação das garrafas PET, para uso no telhado ecológico.....	51
Figura 16 -	Variações do telhado ecológico.....	51
Figura 17 -	Telhado verde com vegetação <i>Kalanchoe laetiviren</i> , na célula-teste 5.....	52
Figura 18 -	Equipamentos utilizados para as medições no ambiente interno.....	53
Figura 19 -	Disposição dos sensores nos protótipos na UETER.....	54
Figura 20 -	Interface do <i>software Datalogger</i>	55
Figura 21 -	Interface do <i>software ConsolePLus</i>	55
Figura 22 -	Fluxograma das etapas de análise.....	56
Figura 23 -	Precipitação pluviométrica acumulada anual, entre 2009 e 2019.....	59
Figura 24 -	Dados climatológicos da cidade de Recife entre 2009 e 2019.....	60
Figura 25 -	Dados climatológicos da cidade de Recife entre 2009 e 2019.....	61
Figura 26 -	Precipitação diária no período de estudo.....	62
Figura 27 -	Umidade relativa do ar diária no período de estudo.....	64

Figura 28 -	Temperatura externa média no período de estudo.....	65
Figura 29 -	Temperatura externa horária para os dias no período de estudo.....	66
Figura 30 -	Radiação média diária no período de estudo.....	68
Figura 31 -	Velocidade do vento média diária no período de estudo.....	69
Figura 32 -	Temperatura interna nos protótipos no mês de abril.....	70
Figura 33 -	Temperatura interna nos protótipos no mês de maio.....	70
Figura 34 -	Temperatura interna nos protótipos no mês de junho.....	71
Figura 35 -	Comparação da temperatura interna e da radiação no mês de abril.....	72
Figura 36 -	Comparação da temperatura interna e da radiação no mês de maio.....	73
Figura 37 -	Comparação da temperatura interna e da radiação no mês de junho.....	73
Figura 38 -	Comparação da temperatura interna e da precipitação no mês de abril.....	74
Figura 39 -	Comparação da temperatura interna e da precipitação no mês de maio.....	74
Figura 40 -	Comparação da temperatura interna e da precipitação no mês de junho.....	75
Figura 41 -	Temperatura interna e externa no dia 22 de abril.....	76
Figura 42 -	Temperatura interna e externa no dia 20 de maio.....	79
Figura 43 -	Temperatura interna e externa no dia 23 de junho.....	81
Figura 44 -	Umidade interna e externa no dia 22 de abril.....	82
Figura 45 -	Umidade interna e externa no dia 20 de maio.....	83
Figura 46 -	Temperatura interna e externa no dia 27 de abril.....	85
Figura 47 -	Temperatura interna e externa no dia 25 de maio.....	87
Figura 48 -	Temperatura interna e externa no dia 13 de junho.....	89
Figura 49 -	Umidade relativa do ar, interna e externa, no dia 27 de abril.....	90
Figura 50 -	Umidade relativa do ar, interna e externa, no dia 25 de maio.....	92
Figura 51 -	Temperatura interna e externa no dia 15 de abril.....	94
Figura 52 -	Temperatura interna e externa no dia 11 de abril.....	96
Figura 53 -	Temperatura interna e externa no dia 13 de maio.....	97
Figura 54 -	Temperatura interna e externa no dia 18 de junho.....	99

Figura 55 -	Umidade interna e externa no dia 15 de abril.....	100
Figura 56 -	Umidade relativa do ar, interna e externa, no dia 11 de abril.....	100
Figura 57 -	Umidade interna e externa no dia 13 de maio.....	102
Figura 58 -	Temperatura ambiente por sensor em cada telhado no dia 22 de abril.....	104
Figura 59 -	Temperatura ambiente por sensor em cada telhado no dia 20 de maio.....	105
Figura 60 -	Temperatura ambiente por sensor em cada telhado no dia 23 de junho.....	106
Figura 61 -	<i>BoxPlot</i> da temperatura interna em cada sensor no dia 22 de abril.....	106
Figura 62 -	<i>BoxPlot</i> da temperatura interna em cada sensor no dia 27 de abril.....	107
Figura 63 -	<i>BoxPlot</i> da temperatura interna em cada sensor no dia 15 de abril.....	107
Figura 64 -	<i>BoxPlot</i> da temperatura interna em cada sensor no dia 11 de abril.....	107
Figura 65 -	<i>BoxPlot</i> da temperatura interna em cada sensor no dia 13 de maio.....	108
Figura 66 -	<i>BoxPlot</i> da temperatura interna em cada sensor no dia 20 de maio.....	108
Figura 67 -	<i>BoxPlot</i> da temperatura interna em cada sensor no dia 25 de maio.....	108
Figura 68 -	<i>BoxPlot</i> da temperatura interna em cada sensor no dia 23 de junho.....	109
Figura 69 -	<i>BoxPlot</i> da temperatura interna em cada sensor no dia 13 de junho.....	109
Figura 70 -	<i>BoxPlot</i> da temperatura interna em cada sensor no dia 18 de junho.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Telhados verdes: desempenho térmico e consumo de energia.....	28
Tabela 2 -	Classificação dos telhados verdes.....	32
Tabela 3 -	Critérios de avaliação do desempenho térmico para condições de verão.....	37
Tabela 4 -	Tempo de deterioração de polímeros.....	40
Tabela 5 -	Pesquisas que utilizam garrafas PET e embalagens Tetra Pak em telhados verdes e ecológicos.....	43
Tabela 6 -	Pesquisas em telhados verdes e ecológicos realizadas na UFPE.....	45
Tabela 7 -	Etapas de implantação do Telhado Ecológico.....	49
Tabela 8 -	Especificações dos sensores utilizados no ambiente interno dos protótipos.....	54
Tabela 9 -	Arranjo, descrição e período de registro dos sensores internos.....	56
Tabela 10 -	Descrição estatística da precipitação no período de estudo.....	63
Tabela 11 -	Descrição estatística da umidade relativa do ar média mensal.....	64
Tabela 12 -	Dias selecionados para análise, ano 2021.....	67
Tabela 13 -	Temperaturas e horários de pico, em 22 de abril de 2021.....	78
Tabela 14 -	Temperaturas e horários de pico, em 20 de maio de 2021.....	80
Tabela 15 -	Temperaturas e horários de pico, em 23 de junho de 2021.....	82
Tabela 16 -	Umidade e horários de pico, em 22 de abril de 2021.....	83
Tabela 17 -	Umidade e horários de pico, em 20 de maio de 2021.....	84
Tabela 18 -	Temperaturas e horários de pico, em 27 de abril de 2021.....	86
Tabela 19 -	Temperaturas e horários de pico, em 25 de maio de 2021.....	88
Tabela 20 -	Temperaturas e horários de pico, em 13 de junho de 2021.....	90
Tabela 21 -	Umidade relativa do ar e horários de pico, em 27 de abril de 2021.....	91
Tabela 22 -	Umidade relativa do ar e horários de pico, em 25 de maio de 2021.....	93
Tabela 23 -	Temperaturas e horários de pico, em 15 de abril de 2021.....	95
Tabela 24 -	Temperaturas e horários de pico, em 11 de abril de 2021.....	96
Tabela 25 -	Temperaturas e horários de pico, em 13 de maio de 2021.....	98
Tabela 26 -	Temperaturas e horários de pico, em 18 de junho de 2021.....	99
Tabela 27 -	Umidade relativa do ar e horários de pico, em 15 de abril de 2021.....	101

Tabela 28 -	Umidade relativa do ar e horários de pico, em 11 de abril de 2021.....	102
Tabela 29 -	Umidade relativa do ar e horários de pico, em 13 de maio de 2021.....	103
Tabela 30 -	Análise de variância entre os telhados no mês de abril.....	110
Tabela 31 -	Análise de variância entre os telhados no mês de maio.....	111
Tabela 32 -	Análise de variância entre os telhados no mês de junho.....	111
Tabela 33 -	Análise de variância entre sensores de cada telhado no mês de abril.....	112
Tabela 34 -	Análise de variância entre sensores de cada telhado no mês de maio.....	112
Tabela 35 -	Análise de variância entre sensores de cada telhado no mês de junho.....	112
Tabela 36 -	Temperaturas e horários de ponto de máximo nos dias de maior temperatura externa.....	114
Tabela 37 -	Temperaturas e horários de ponto de mínimo nos dias de maior temperatura externa.....	114
Tabela 38 -	Temperaturas e horários de ponto de máximo nos dias de maior amplitude térmica.....	115
Tabela 39 -	Temperaturas e horários de ponto de mínimo nos dias de maior amplitude térmica.....	116
Tabela 40 -	Temperaturas e horários de ponto de máximo nos dias de maior precipitação e menor amplitude térmica.....	116
Tabela 41 -	Temperaturas e horários de ponto de mínimo nos dias de maior precipitação e menor amplitude térmica.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ANOVA	Análise de Variância
CAA	Centro Acadêmico do Agreste
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NBR	Norma Brasileira
PET	Politerefitalato de etileno
PVC	Policloreto de polivinila
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
TV	Telhado Verde
TE	Telhado Ecológico
TR	Telhado de Referência
UETER	Unidade Experimental de Telhado Ecológico do Recife

LISTA DE SÍMBOLOS

mm	Milímetros
m	Metros
°C	Graus célsius
KJ/mA ²	Quilo Joule por metro ampere ao quadrado
m/s	Metros por segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos.....	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1	Região Metropolitana do Recife.....	21
3.2	Clima e vegetação	24
3.3	Telhados ecológicos e verdes.....	26
3.3.1	Sistema construtivo	30
3.3.2	Classificação dos telhados verdes	32
3.3.3	Benefícios	33
3.3.4	Normas e legislações	36
3.4	Emprego de materiais reciclados em telhados ecológicos	38
3.4.1	Reuso de Resíduos Sólidos Urbanos	38
3.4.2	Desenvolvimento e construção sustentável	40
3.4.3	Pesquisas com telhados ecológicos	42
3.5	Pesquisas desenvolvidas na UFPE	45
4	METODOLOGIA.....	47
4.1	Área de estudo	47
4.2	Caracterização meteorológica	48
4.3	Unidade Experimental de Telhado Ecológico do Recife (UETER).....	49
4.4	Coleta de dados	53
4.4.1	Dados de temperatura ambiente externa.....	53
4.4.2	Dados de temperatura ambiente interna e umidade relativa do ar.....	54
4.5	Processamento dos dados.....	57
4.6	Análise de Variância	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1	Caracterização meteorológica local	60
5.2	Dados meteorológicos externos	63
5.3	Dados internos aos ambientes	70
5.3.1	Análise dos dados internos diários	70
5.3.2	Análise dos dados horários	76

5.3.2.1 Dias de maior temperatura ambiente externa	76
5.3.2.2 Dias de maior amplitude térmica	86
5.3.2.3 Dias de menor amplitude térmica e de maior precipitação	94
5.3.3 Análise do desempenho térmico das paredes	103
5.3.4 Análise de variância	110
5.3.5 Análise comparativa dos telhados ecológicos	113
6 CONCLUSÕES.....	118
7 TRABALHOS FUTUROS	120
REFERÊNCIAS.....	121
APÊNDICE A – VERIFICAÇÃO DOS SENSORES.....	134
APÊNDICE B – TEMPERTURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS.....	135
APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	138

1 INTRODUÇÃO

Estudos desenvolvidos por Tucci (2002) destacaram que o crescimento da população urbana tem sido acelerado nas últimas décadas, no Brasil, resultando no surgimento de grandes metrópoles na capital de cada Estado brasileiro. Observou-se que cidades acima de 1 milhão de habitantes crescem a taxa média de 0,9 % anual, enquanto os núcleos regionais como cidades entre 100 e 500 mil habitantes, crescem a taxa de 4,8%. Portanto, todos os processos inadequados de urbanização e impacto ambiental, que foram observados nas Regiões Metropolitanas (RM), estão se reproduzindo nessas cidades de médio porte. Tais afirmações corroboram com Alencar (2016) sobre o processo de produção e ocupação do espaço urbano, comumente realizado de forma acelerada e sem um adequado planejamento. De acordo com o autor, dessa forma, tem-se contribuído para a supressão dos sistemas ambientais nessas áreas, que já apresentam alto grau de fragilidade pelo nível de degradação que vêm sofrendo ao longo do tempo.

O aumento no número de superfícies impermeabilizadas devido à aplicação de materiais com características impermeáveis nas construções dos grandes centros urbanos, resultam em mudanças significativas no cenário ambiental e na qualidade do ar, tais como o desenvolvimento de ilhas de calor, o aumento nos riscos de inundações e a redução da qualidade das águas dos corpos hídricos no entorno das cidades. De forma geral, a solução dos problemas relatados se encontram interligados em uma esfera multidisciplinar envolvendo características hidráulicas, hidrologias, arquitetônicas, estruturais e de materiais de construção, bem como a aplicação de técnicas e tecnologias que visem a redução dos problemas ambientais citados. Estudos desenvolvidos por Aboelata (2020), na cidade do Cairo, evidenciaram que existe uma correlação entre a ilha de calor observada na cidade e a distribuição de uso do solo, destacando que nas áreas industriais a temperatura é mais elevada do que seu entorno.

De forma geral, o fenômeno de ilhas de calor reduz o conforto térmico, gerando aumento da temperatura ambiente do ar, em espaços internos e externos, e consequente aumento no consumo de energia elétrica com o uso de aparelhos condicionadores de ar. Nesse contexto, os telhados verdes destacam-se como uma tecnologia mitigatória dos problemas ambientais citados, uma vez que a aplicação do conjunto vegetação e substrato proporciona aumento das superfícies permeáveis, redução do tempo de pico do escoamento superficial nas cidades, aumento da capacidade de retenção hídrica e infiltração das águas pluviais nos grandes centros urbanos. Catuzzo (2013) afirmou que associado ao efeito da ilha de calor nos centros urbanos,

ocorre também a incidência mais elevada da precipitação, devido à concentração urbana e a insuficiência de espaços verdes.

A resolução dos problemas ambientais de impacto socioeconômicos em escala mundial vem ganhando cada vez mais notoriedade, e constitui o enfoque de um plano de ação global comprometido com o desenvolvimento sustentável dos próximos anos. Conforme Portal do Governo Brasileiro (2021), no âmbito da agenda 2030, que visa a aplicação de objetivos e metas em parceria global com 193 países, estão os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), que se caracterizam pela relevância no alcance da agenda global, subdividindo-se em três principais esferas de ação: Economia, Sociedade e Biosfera. Pesquisas que envolvem telhados verdes destacam-se por englobar cinco dos dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. No ODS 6, que se refere à água potável e ao saneamento, os recursos hídricos destacam-se por compor o centro das três esferas (econômica, social e ambiental). No âmbito do ODS 6, é de suma relevância a gestão sustentável dos recursos hídricos, assim sendo, os telhados verdes destacam-se no uso das águas pluviais contribuindo para a eficiência da gestão hídrica. Nos ODS 7 e 12, energia acessível e limpa, e consumo e produção responsáveis, respectivamente, os telhados verdes caracterizam-se pela aplicação de tecnologias que promulguem a eficiência energética das edificações, colaborando para melhor desempenho térmico e eficiência do uso de recursos energéticos e naturais. Nos ODS 11 e 13, cidades e comunidades sustentáveis e ação contra a mudança global do clima, respectivamente, destaca-se a implementação de mecanismos que visem o uso dos recursos, a mitigação e a adaptação às mudanças climáticas.

De acordo com Roaf (2006), para redução dos impactos da indústria da construção civil, e avanço da indústria para a construção ecologicamente correta, é de grande importância a aplicação dos princípios da sustentabilidade, sendo necessário a associação interdisciplinar de profissionais da arquitetura, ecologia e engenharia, para a concepção de infraestrutura e edificações com maior eficiência térmica e menor consumo de energia, assim como a aplicação e utilização de fontes renováveis. Em conformidade com Rocha (2020), os telhados verdes podem estar associados à aplicação de materiais recicláveis de resíduos sólidos urbanos, normalmente descartados pela sociedade, fazendo com que sua aplicabilidade seja ainda mais benéfica e satisfatória. Destaca-se aí, a aplicação da garrafa de Politereftalato de Etileno (PET) que, considerando o descarte impróprio associado ao grande tempo de decomposição, ocasiona impactos ambientais negativos. A incorporação das garrafas PET no contexto do telhado vegetado cria um novo conceito, que é o telhado ecológico.

De acordo com Brasil (2010), a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal Nº 12.305, visa organizar a forma com que o país gerencia os resíduos sólidos, exigindo dos setores públicos e privados transparência no gerenciamento de seus resíduos. Destaca-se a relevância do descarte adequado, com a finalidade de evitar impactos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana, reduzindo também a contaminação do solo, dos corpos d'águas e da atmosfera.

O desenvolvimento de pesquisas científicas com enfoque nos telhados verdes e ecológicos vem ganhando notoriedade e crescimento, e a pesquisa realizada nessa dissertação considera a aplicação de telhado verde e de telhado ecológico de baixo custo utilizando para fins avaliativos, de embasamento e comparação, os dados já obtidos pelo grupo de pesquisa.

2 OBJETIVOS

Os objetivos dessa dissertação foram abordados em dois subtópico: Objetivo geral, e objetivos específicos.

2.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento térmico no interior de ambientes abaixo de telhados ecológicos (frios e verdes) em comparação com ambiente sob cobertura tradicional (laje).

2.2 Objetivos específicos

- Identificar materiais que necessitam de descarte na área de estudo e investigar sua funcionalidade e atendimento às propriedades necessárias ao isolamento térmico.
- Definir os materiais que serão utilizados sobre a laje para que a cobertura funcione como um telhado frio, buscando reutilizar materiais que seriam descartados como resíduos sólidos urbanos.
- Comparar os resultados obtidos dos telhados: verde, frio e convencional.
- Comparar os resultados obtidos nos arranjos do telhado ecológico.

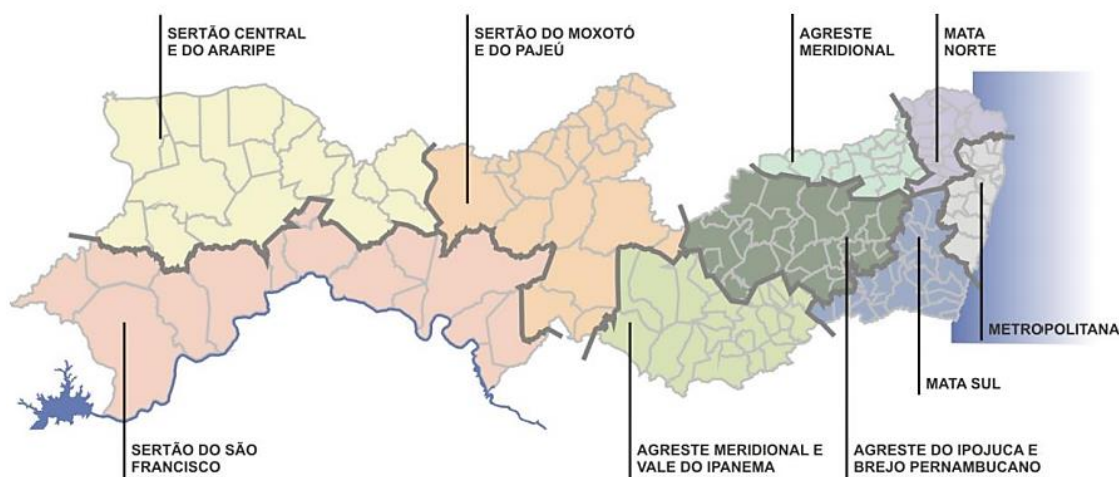
3 REFERENCIAL TEÓRICO

De maneira a facilitar a compreensão, abordou-se o referencial teórico nos seguintes subtópicos: Região Metropolitana do Recife, clima e vegetação, telhados ecológicos e verdes, emprego de materiais reciclados em telhados ecológicos, e pesquisas desenvolvidas na UFPE.

3.1 Região Metropolitana do Recife

Em 1955, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) compreendeu ser insuficiente a divisão do espaço geográfico brasileiro em grandes regiões que levaram em conta apenas as condições naturais e, passou a dividir cada região em zonas fisiogeográficas, que considerou tanto as variações naturais em escala mais reduzida como o processo de utilização do solo. Após estudos coordenados do Governo Estadual e da Comissão de Desenvolvimento do Nordeste (CODEPE), a Associação Municipalista de Pernambuco (AMUPE), estabeleceu a delimitação do estado de Pernambuco em 10 Regiões de Desenvolvimento, conforme a Lei nº11.725 de 23/12/1999 – PPA Estadual 2000-2003 (PERNAMBUCO, 1999). A Figura 1 mostra a divisão por região do estado de Pernambuco.

Figura 1 - Regionalização do estado de Pernambuco.

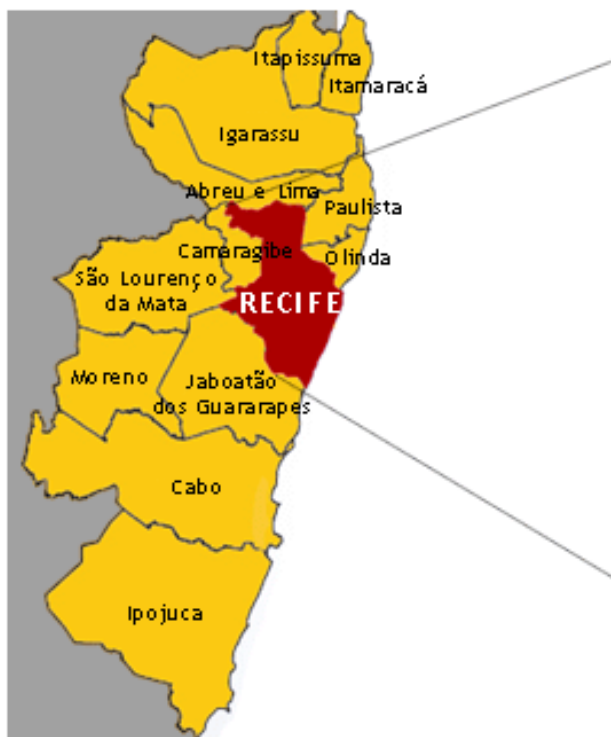


Fonte: AMUPE (2021).

De acordo com o Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado (PERNAMBUCO, 2021), a Região Metropolitana do Recife (RMR) é composta por 15 municípios: Abreu e Lima, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Goiana, Igarassu, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Itapissuma, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista, Recife e São Lourenço.

da Mata (Figura 2). Ressalta-se que, desde 2020, após revisão feita pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município de Goiana deixou de fazer parte da RMR.

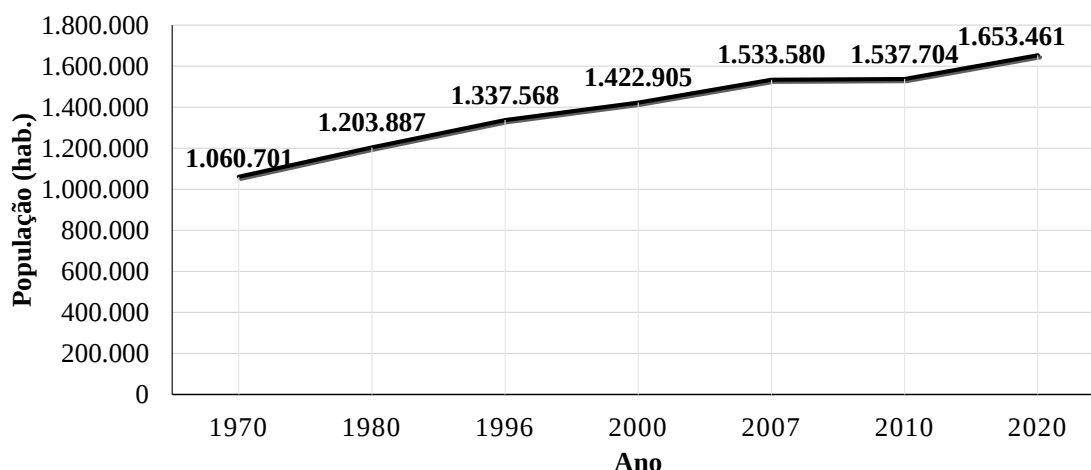
Figura 2 - Municípios da Região Metropolitana do Recife.



Fonte: Adaptado de Silva Junior e Silva (2016).

Conforme os dados do IBGE (2021), a capital pernambucana apresenta uma extensão territorial de 218,843 Km², com população estimada no ano de 2020 de 1.653.461 habitantes, e uma densidade demográfica de 7.039,64 habitantes/Km². Tucci (1997) destacou que cidades com mais de 1 milhão de habitantes crescem a uma taxa média de 0,9 % anual, portanto, todos os processos inadequados de urbanização e impacto ambiental observados nas Regiões Metropolitanas (RM) estão se reproduzindo nas cidades de médio porte. Esse crescimento urbano tem sido caracterizado por expansão irregular de periferia com pouca obediência à regulamentação urbana relacionada com o Plano Diretor e normas específicas de loteamentos, além da ocupação irregular de áreas públicas por população de baixa renda. Essa tendência dificulta o ordenamento das ações não estruturais do controle ambiental urbano. A Figura 3 mostra o aumento populacional na cidade do Recife, conforme dados do IBGE de 50 anos.

Figura 3 - Crescimento populacional da cidade do Recife nos anos de 1970 a 2020.



Fonte: A Autora (2021).

Barros e Lombardo (2013) ressaltam que até o ano de 2030 haverá um aumento significativo da população e das áreas edificadas, principalmente nos países em desenvolvimento. Cabral e Alencar (2005) destacaram que o Recife está situado entre os paralelos 7°55' e 8°10' de Latitude Sul, com clima tropical quente úmido, apresentando uma planície formada por sedimentos fluvio-marinhos, e semicircundada por uma linha de morros. Esses morros, constituídos pelas rochas terciário-quaternárias do Grupo Barreiras, representam paleo-falésias que registram processos de transgressão e regressão marinhas a que foi submetida essa região em épocas passadas, enquanto a planície é recoberta pelos sedimentos quaternários, definindo o cenário geomorfológico da planície.

O Recife caracteriza-se por ser densamente urbanizado, sendo sua majoritária extensão ocupada por edificações e ruas pavimentadas à exceção da superfície formada pelos cursos de água, pequenas áreas verdes correspondendo a parques, praças e manguezais. Essa taxa de ocupação resulta em grande impermeabilização do solo, ocasionando índices altos de escoamento superficial e baixas taxas de infiltração de águas de chuvas. Conforme Moreira (2014), o reflexo do crescimento urbanístico resulta em nova conotação no uso do solo, proporcionando progressiva deterioração dos ambientes urbanos e periurbanos, especificamente impulsionado pelas pressões econômicas e especulativas nas grandes cidades, refletindo na substituição de áreas verdes por áreas artificiais.

3.2 Clima e vegetação

A identificação das características climáticas da região de estudo é de suma relevância para a compreensão dos fenômenos extremos e das principais variáveis que afetem a variação da temperatura externa ao longo do dia. Conforme Catuzzo (2013), a compreensão das dinâmicas do microclima das cidades acaba por ressaltar a necessidade da aplicação de estruturas verdes, visto que essas estruturas respondem positivamente ao minimizar as temperaturas do ar, de maneira que a aplicação ampliada das estruturas verdes pode resultar em impactos positivos dentro do sistema climático urbano.

Moreira *et al.* (2017) afirmam que as cidades, por seu tamanho e/ou função, desempenham papel importante no clima local e nas relações com a sociedade, fatores como temperatura do ar, ventos, umidade do ar e pluviosidade mudam de acordo com a posição geográfica da cidade. Conforme Amorim (2005), as cidades são geradoras de um clima próprio, que é resultante da interferência de fatores que se processam sobre a camada limite urbana e que atuam no sentido do condicionamento climático em escala local.

A precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais importantes para os estudos climáticos, em virtude dos impactos nos diversos setores da sociedade, pois quando ocorrem em excesso podem ocasionar enchentes, escorregamentos de barreiras, alagamentos, etc., e quando são escassas podem resultar em secas, assoreamento dos rios, entre outros, afetando os setores produtivos econômico, social e ambiental de uma região (SOUZA, AZEVEDO e ARAUJO, 2012). Eventos raros ou extremos têm grande relevância na climatologia e hidrologia, e suas estimativas probabilísticas são imprescindíveis para o planejamento e desenvolvimento das atividades sujeitas a seus efeitos adversos, especialmente estruturas de engenharia civil e agricultura (SANSIGOLO, 2008).

Alvares *et al.* (2014) destacaram que o clima da cidade de Recife é caracterizado por ser quente e úmido, apresentando chuvas de outono a inverno, iniciadas nos meses de março, e isothermas que variam entre 26°C e 22°C, apresentando elevada umidade relativa do ar, com valores médios anuais superiores a 84%, de acordo com a classificação climática de Köppen. Barros, Lombardo e Galvêncio (2010) afirmam que na época de verão, na cidade, agrava-se o problema do conforto térmico ambiental com elevadas temperaturas, intensificado o impacto da ilha de calor, presente nas áreas centrais e litorâneas, o qual atinge temperaturas 10°C maiores do que nas áreas periféricas.

No Nordeste do Brasil, e particularmente em Pernambuco, a precipitação e a temperatura estão entre as variáveis meteorológicas mais importantes para os estudos das mudanças

climáticas, uma vez que sua variabilidade espacial e temporal são características marcantes do clima local (LACERDA, 2015). Kozmhinisky, Pinheiro e El-Deir (2016) afirmam que elevação de temperatura está associada à escassez de precipitação e à redução de circulação do ar o que resulta em desconforto térmico à população.

Um estudo sobre alterações de temperatura e umidade relativa do ar foi realizado por Oliveira *et al.* (1995) na cidade de Belém. Os autores destacaram que há uma maior tendência ao aumento da temperatura do ar nos centros urbanos, e que há uma redução da umidade relativa do ar nos pontos de aumento da temperatura. Susca, Gaffin e Dell’Osso (2011) evidenciaram que a expansão urbana é frequentemente associada ao aumento da temperatura ambiente do ar nas áreas urbanas, fenômeno denominado de ilha de calor. De acordo com os autores, essa alteração climática depende principalmente da modificação do balanço de energia nas grandes cidades e pode ser gerada por vários fatores: propriedades térmicas dos materiais de construção, substituição de áreas verdes por impermeáveis (superfícies que limitam a evapotranspiração), e diminuição do albedo urbano. Nesse contexto, Senanayake, Welivitiya e Nadeeka (2013) afirmam que além de reduzir a temperatura da superfície terrestre, uma vez que fornecem sombra, a vegetação diminui a temperatura do ar ambiente por meio do processo de evapotranspiração, em que liberam vapor de água para a atmosfera circundante.

De forma geral, o plantio de vegetação em áreas urbanas é um dos métodos de maior eficiência para reduzir os efeitos das ilhas de calor urbanas. O aumento da cobertura vegetal resulta no resfriamento evaporativo, e ao fornecer sombra, reduz a radiação solar do solo exposto ao calor. O plantio estratégico de árvores ao redor de edifícios e o estabelecimento de florestas urbanas destacam-se como excelentes soluções sustentáveis para o fenômeno de aumento da temperatura do ar nos grandes centros urbanos. Além disso, a cobertura vegetal também contribui para melhorar a qualidade do ar (AKBARI, POMERANTZ e TAHA, 2001; DEVANATHAN e DEVANATHAN, 2011 *apud* SENANAYAKE, WELIVITIYA e NADEEKA, 2013). De fato, um importante instrumento para a regulação do clima urbano, principalmente no controle da poluição atmosférica, na amenização da temperatura, no aumento da umidade, são as áreas verdes urbanas que proporcionam uma melhoria da qualidade de vida das pessoas (SOUCH e GRIMMOND, 2006; ZOULIA, SANTAMOURIS e DIMOUDI, 2009; SHASHUA-BAR *et al.*, 2010). Para Catuzzo (2013), a utilização da cobertura vegetal sobre os telhados, reduz as temperaturas e elevam a umidade do ar no microclima, enquanto que o telhado de concreto eleva a temperatura e reduz a umidade do ar significativamente. Esta

cobertura emite calor para atmosfera, principalmente em áreas urbanas altamente adensadas, potencializando a ilha de calor.

No que se refere à edificação propriamente dita, a temperatura de qualquer estrutura tende a apresentar valores mais elevados durante o dia, e o inverso com o chegar da noite (PALMEIRA, 2016). Em estudo, os pesquisadores Niachou *et al.* (2001) comprovaram que as diferenças de temperatura superficial observadas nas coberturas estavam relacionadas, entre outros critérios com as espécies vegetais, ou com o tipo de material empregado na execução das coberturas.

3.3 Telhados ecológicos e verdes

Em áreas urbanas, o aumento da temperatura de superfície relaciona-se com a utilização de materiais com maior condutividade térmica e capacidade calorífica. A redução de áreas vegetadas e aumento dos materiais de maior condutividade, ocasiona a redução da evaporação e da evapotranspiração nessas regiões, reduzindo assim a umidade relativa do ar, e aumento as trocas de calor latente.

Diversos pesquisadores como Yang, Yu e Gong (2008) e Synnefa *et al.* (2008) destacam a necessidade de modificação das propriedades térmicas das construções comuns nos dias atuais, principalmente, nos centros urbanos, como uma estratégia adequada para mitigação dos fenômenos de “ilhas de calor”. Sobre isso, Hasan (1999) destacou que uma das estratégias mais adotadas para reduzir as cargas de aquecimento e resfriamento de edifícios é o aumento do isolamento térmico dos componentes de recobrimento externo, incluindo os telhados. Nesse contexto, se insere uma tipologia de telhados que vem sendo, cada vez mais aplicada, os telhados frios. De forma geral, um telhado frio é um sistema de cobertura que oferece maior refletância solar (capacidade de refletir os comprimentos de onda visíveis, infravermelhos e ultravioleta do sol, reduzindo a transferência de calor para o edifício) e maior emissão térmica (capacidade de irradiar a energia solar) do que produtos convencionais de cobertura de edificações.

Em ambos os casos, telhados verdes e frios, a cobertura colocada sobre a laje pode funcionar como uma camada “protetora” do ambiente interno abaixo da laje. A possibilidade de melhoria da qualidade de vida da população, principalmente a de baixa renda, com o emprego de telhados frios, está em tornar essa tecnologia acessível e, ao mesmo tempo, tentar contribuir para a redução dos impactos ambientais com a minimização na geração de resíduos sólidos.

Conforme Cruz e Leoni (2008 *apud* WILLES, 2014), a *Environmental Protection Agency* (EPA) considera que a principal função do telhado verde é absorver volumes de água de chuva e liberá-los em um ritmo reduzido e controlado. O telhado verde constitui, portanto, uma importante medida no que se refere ao desenvolvimento sustentável em centros urbanos, promovendo a melhoria na qualidade do ar e da água, além da eficiente redução da necessidade de sistemas de aquecimento e refrigeração nas edificações.

Os telhados verdes se originaram na Mesopotâmia, onde foram viabilizadas construções arquitetônicas com grande utilização de vegetais nos templos religiosos conhecidos como Zigurates, há aproximadamente 2.500 a. C.. Posteriormente, foram construídas as obras mais famosas da antiguidade que utilizaram a técnica do telhado verde, os jardins suspensos da babilônia, construídos, possivelmente, por Nabucodonosor II no século VI a. C.. Acredita-se que esse monumento foi criado em homenagem à esposa do imperador, Amytis, e é considerado uma das sete maravilhas do mundo antigo, ressaltando a sua grande importância histórica e um marco para as práticas ambientalistas (OSMUNDSON, 1999 *apud* ALMEIDA, BRITO e SANTOS, 2018). Segundo Almeida, Brito e Santos (2018), da observação da história, é possível concluir que a evolução dos telhados verdes remetem à transformação da compreensão social ao longo do tempo, visto que a técnica surgiu como uma resposta aos anseios de imperadores e poderosos da antiguidade que almejavam um projeto paisagísticos de grandes dimensões estéticas para demonstrar todo o seu poderio, ao passo que, com a ruptura do pensamento cultural gerado pela Revolução Industrial, as pessoas modificaram o pensamento sobre como se portar diante da relação entre homem e meio, tentando incorporar aos telhados uma importância mais funcional àquela realidade.

Conforme Oberndofer *et al.* (2007) e Menten, Raes e Hermy (2003), há evidências da aplicação inicial de estruturas com telhados verdes para mitigação dos efeitos nocivos da radiação solar sobre a estrutura do telhado. Diante dos possíveis benefícios do emprego dos telhados verdes, observa-se, na literatura científica, a existência de muitas pesquisas sobre telhados verdes durante a década de 1980 e de forma mais intensiva durante a década de 1990. Flubacher (2002) afirma que em 2001, 14% dos telhados planos de novas edificações alemãs eram de telhados verdes, totalizando uma área de aproximadamente 13,5 milhões de metros quadrados. De acordo com Harzmann (2002) e Heneine (2008), em 2002, 12% de todos os telhados planos da Alemanha eram compostos por telhados verdes, e em seguida o percentual foi de 15%, no ano 2008.

No cenário brasileiro, de acordo com Ferraz (2012), os primeiros registros indicam que o Palácio Gustavo Capanema no Rio de Janeiro foi o primeiro telhado verde, tendo sido idealizado pelo arquiteto Lúcio Costa no ano de 1930. Segundo o autor, a utilização dos telhados é uma prática promissora, visto que existem registros da aplicação da tecnologia em estados como Santa Catarina e Rio Grande do Sul, inclusive com o emprego de leis de incentivo à construção de coberturas vegetadas nas capitais desses estados.

Dentre os benefícios esperados com o emprego dos telhados frios e verdes relatados na literatura científica destacam-se a capacidade que os mesmos têm em amenizar a temperatura dos ambientes abaixo desses, interferindo, por isso, diretamente no desempenho térmico das respectivas edificações. Apresenta-se na Tabela 1 alguns resultados encontrados no levantamento bibliográfico sobre o tema. Em ambos os casos, telhados verdes e frios, a cobertura colocada sobre a laje pode funcionar como uma camada “protetora” do ambiente interno abaixo da laje, como está ilustrado na Figura 4.

A possibilidade de melhoria da qualidade de vida da população, principalmente a de baixa renda, com o emprego de telhados frios, consiste em tornar essa tecnologia acessível. O emprego desse tipo de telhado ainda tem como atrativo a possibilidade de contribuir para a sustentabilidade uma vez que possibilita a minimização dos impactos ambientais com a redução na geração de resíduos sólidos.

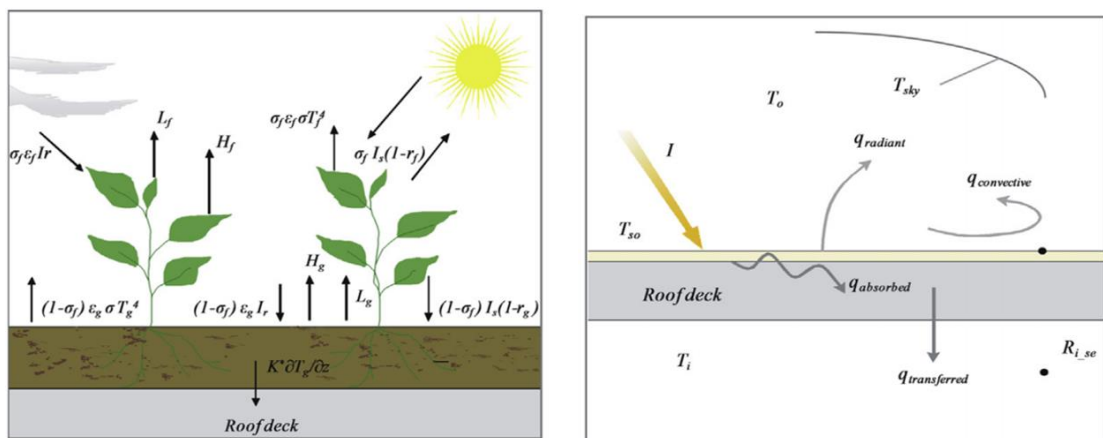
De forma geral, o conceito de desempenho dos telhados verdes relacionado às edificações é bastante abrangente, segundo Bonin (1998), esse pode ser utilizado, inclusive, para se avaliar o comportamento das técnicas construtivas tradicionais em uso, criando uma referência inicial necessária para a otimização do processo de produção das edificações. Nesse contexto, Spannenberg (2006) cita a ISO 6241 (*Performance standards in buildings*) como um consenso internacional sobre as exigências dos usuários, e aborda necessidades de segurança, habitabilidade, adequação ao uso, durabilidade e economia. Willes (2014) afirma que não necessariamente relaciona-se a aplicação dessa tecnologia exclusivamente às novas edificações, visto que a mesma pode ser inserida em construções pré-existentes, desde que observadas as características estruturais necessárias ao suporte do telhado verde.

Tabela 1 - Telhados verdes: desempenho térmico e consumo de energia.

Referência	Principais conclusões
Virk <i>et al.</i> (2015)	Redução da temperatura do ar diretamente sobre as superfícies, da temperatura máxima do ar em até 1°C, e do uso anual de energia no interior dos edifícios.
Lin <i>et al.</i> (2013)	Redução da temperatura exterior em até 42% e da temperatura interna em 8%, durante o período diurno. Eficácia térmica intimamente relacionada com o clima. Mais eficiente quanto ao resfriamento diurno em clima tropical e quanto ao isolamento noturno em clima subtropical.
Jim e Peng (2012)	Redução da temperatura máxima diária na superfície do telhado em 5,2°C e da temperatura do ar a 10 cm do telhado em 0,7°C, em relação à telha cerâmica. Menor ganho de calor e maior perda de calor em dias ensolarados. Em longo prazo, benefícios ambientais e de energia justificam o custo de sua instalação em prédios públicos.
Ouldboukhitine <i>et al.</i> (2011)	Uso de vegetação no telhado do edifício não melhora apenas as condições de conforto térmico, mas o desempenho energético de um edifício.
Frizon e Canteras (2018)	Foi observado que nos horários de temperaturas máximas a temperatura nos telhados verdes era menor que a temperatura no telhado convencional em 61,90% dos dias.
Schmidt (2020)	O telhado verde apresentou nos horários mais quentes do dia uma temperatura ambiente interna 1,7 °C inferior ao telhado de referência e 6,1 °C inferior à temperatura ambiente externa.
Garcia <i>et al.</i> (2020)	Os resultados mostram que os telhados verdes podem reduzir significativamente o fluxo de calor através do telhado porque têm uma maior resistência térmica equivalente e um menor fator decrescente equivalente.
Lessa (2009)	A telha ecológica de Tetra Pak apresenta, a capacidade de reduzir o calor do interior das edificações entre 30% a 40% quando em comparação com telhas de amianto
Magalhães (2018)	As análises evidenciaram que a telha ecológica de Tetra Pak apresentou melhor desempenho térmico que as telhas de fibrocimento devido a amenização da temperatura interna.

Fonte: A Autora (2021).

Figura 4 - Balanço de energia em diferentes coberturas de telhados.



(a) Telhado verde.

(b) Telhado convencional e telhado frio.

Fonte: Gagliano *et al.* (2015).

3.3.1 Sistema construtivo

Os telhados verdes têm sido empregados em várias partes do mundo principalmente com finalidades estéticas de valorização do espaço urbano e para melhoria do conforto ambiental. Essas áreas verdes podem servir também para retenção do escoamento superficial, minimizando o volume do escoado que contribui para a ocorrência de enchentes urbanas. Os telhados verdes são caracterizados como toda cobertura ou telhado, que agrega em sua composição, uma camada de solo ou substrato e outra de vegetação (ARAÚJO, 2007).

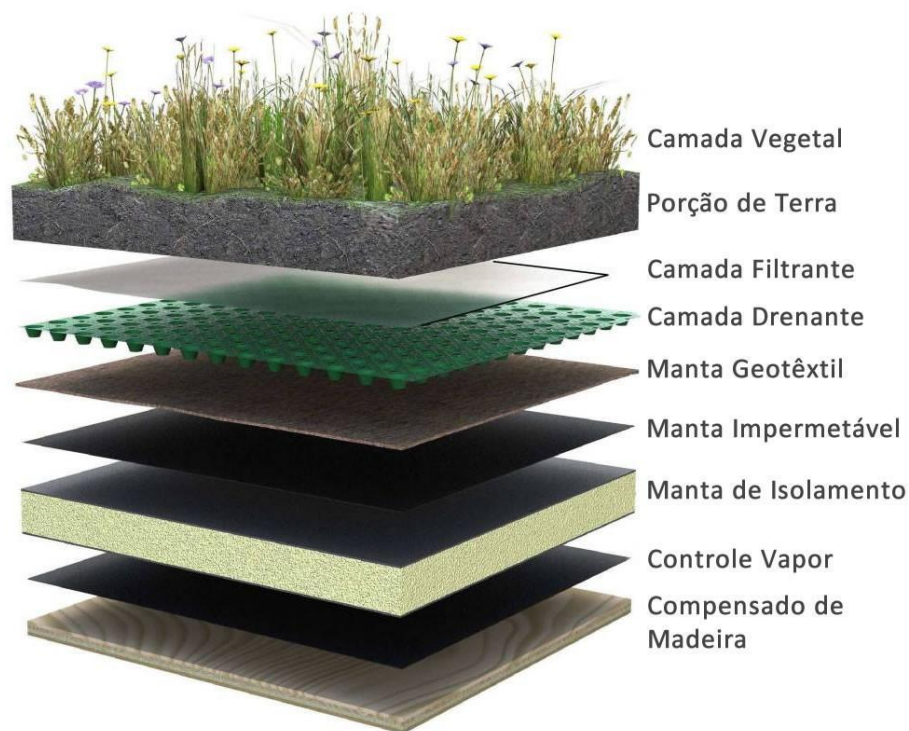
No que se refere à construção do telhado verde, a laje deve ser preparada com impermeabilização e com implantação de sistemas de drenagem. Em casos de estruturas que já foram executadas sem o adequado planejamento para receber a cobertura vegetal, é necessário realizar um estudo para analisar a carga que pode ser colocada ou até mesmo se é necessário realizar um reforço estrutural. O cuidado com o crescimento das raízes também é um fator muito importante (ALBERTO *et al.*, 2012). De acordo com Jobim (2013), os telhados são comumente executados com a composição de cinco camadas básicas: vegetação, substrato, camada de filtragem, camada de drenagem e camada de impermeabilização. Podendo-se encontrar outras variações com a aplicação de outros materiais. As disposições das camadas sofrem variação de acordo com o executor do serviço, as necessidades de utilização, a área disponível para execução, o custo, e a capacidade de suporte. Na Figura 5 visualiza-se as camadas de composição de um sistema de telhado verde.

Os elementos aplicados na constituição de um sistema de telhado verde são:

- Elemento estrutural: que consiste na laje como elemento de suporte das cargas do sistema, sendo necessário a consideração de cargas permanentes e acidentais em seu dimensionamento.
- Manta de impermeabilização: que compreende a camada responsável pelo isolamento do elemento estrutural, fornecendo proteção contra infiltrações, e maior durabilidade ao sistema.
- Camada drenante: que normalmente compreende uma manta geotêxtil sendo, conforme Alberto *et al.* (2012), a funcionalidade da camada, de dar vazão ao excesso de água no solo, podendo ser constituída também por argila expandida, brita ou seixos de diâmetros semelhantes.
- Camada filtrante: cuja aplicação visa evitar o arraste que partículas sólidas do telhado verde sejam carregadas pelas águas da chuva e da rega, e a consequente obstrução do sistema de drenagem.

- Camada de estabilização de raízes: também chamada de camada protetora, que visa fornecer proteção contra o crescimento das raízes da vegetação, e segundo Oliveira (2009), essa camada fornece proteção mecânica à impermeabilização contra danos.
- Camada de substrato: constituída de solo ou substrato orgânico, com espessura variável em função da necessidade das espécies de vegetação utilizadas, sendo preferencialmente composto por um solo que apresente drenagem adequada e boa composição mineral de nutrientes.
- Camada vegetativa: compreende a vegetação propriamente dita, selecionada considerando as características climáticas do local, para maior adequação. Santos (2016) destaca que o ideal é que sejam utilizadas espécies nativas, observando-se alguns condicionantes: clima, tipo de solo, estrutura de suporte e tipo de manutenção (irrigação, fertilização).

Figura 5 - Elementos construtivos do telhado verde.



Fonte: Planej (2021).

3.3.2 Classificação dos telhados verdes

A forma mais comumente encontrada para classificação dos telhados verdes, faz referência à três categorias conforme nível de manutenção de cada sistema: extensivos, semi-intensivos e intensivos (ROCHA, 2020). De acordo com Rola (2008), leva-se em consideração na classificação dos telhados verdes: espessura dos sistemas, carga superficial, espessura da vegetação, e manutenção necessária.

Segundo Correa e Gonzalez (2002), caracterizam-se como coberturas verdes intensivas aquelas que apresentam camadas de substrato maiores que 20 cm, podendo ser constituídas de plantas e arbustos de médio porte, visto que essas espécies exigem um ambiente mais complexo para o seu desenvolvimento, para esse tipo de cobertura é necessário uma estrutura reforçada e com as cargas bem distribuídas devido aos esforços extras promovidos pelo sistema. Krebs e Sattler (2012) destacam que as coberturas intensivas compreendem uma carga adicional sobre a superfície do telhado variando de 700 kg/m² a 1.200 kg/m². Os autores explicam que a espessura vegetal, no caso do telhado intensivo, é superior a 25 cm, e que, normalmente, exige manutenção intensa, sendo necessário a irrigação de maneira regular. Além disso, Krebs e Sattler (2012) destacam o elevado custo com investimento e manutenção. Ferraz (2012) afirma que o sistema intensivo é o que mais se assemelha a um jardim, e pode ser constituído de espécies de grande porte, sendo necessárias manutenções, e restrições como a ausência de inclinação dos telhados para evitar altos riscos de deslizamento.

De acordo com Correa e Gonzalez (2002), as coberturas verdes extensivas, por outro lado, caracterizam-se por apresentar camadas de solo menores que 20 cm, compostas por espécies de pequeno porte, como as autóctones. Para Krebs e Sattler (2012), as coberturas extensivas apresentam carga adicional sobre a superfície de 100 kg/m² a 700 kg/m²; espessura vegetal entre 5 cm e 20 cm, sendo necessária pouca ou nenhuma manutenção e irrigação, apresentando baixos custos de investimento e manutenção. Willes (2014) ressaltam a relevância na escolha de espécies para as coberturas extensivas, destacando que preferencialmente deve-se considerar o uso de espécies autossuficientes hidricamente e autopropagantes.

Além da classificação em extensivo e intensivo, comumente considera-se um outro tipo de telhado verde, o semi-intensivo com características intermediárias entre os telhados verdes extensivos e intensivos. Apresenta-se na Tabela 2 a classificação dos telhados verdes de acordo com algumas características, conforme informações obtidas de Dimitrijević *et al.* (2016), Santos (2016) e Pessanha (2017).

Tabela 2 - Classificação dos telhados verdes.

Parâmetros	Tipos de Telhado Verde		
	Extensivo	Semi-Intensivo	Intensivo
Manutenção	Pouca ou nenhuma	Constantemente	Alto
Irrigação	Nenhuma	Periódica	Regular
Redução de águas pluviais	Baixo	Médio	Alto
Diversidade de plantas	Baixo	Médio	Alto
Comunidades de plantas	Pequeno porte.	Gramíneas e arbustos	Maior porte.
Altura das plantas	5 – 30 cm	30 – 60 cm	30 – 90 cm ou mais
Profundidade do substrato	4 - 20 cm ou 10 - 15 cm	10 – 50 cm	≥ 10 – 200 cm
Peso saturado do solo	48,8 a 170 kg/m ²	170 a 244 kg/m ²	244 a 1467 kg/m ²
Custo	Baixo	Médio	Alto
Inclinação do telhado	Até 30°	Pequenas inclinações ou plano.	
Uso	Proteção ecológica	Apenas telhado verde	Lazer/passeio

Fonte: Adaptado de Dimitrijević et al. (2016); Santos (2016); Pessanha (2017).

3.3.3 Benefícios

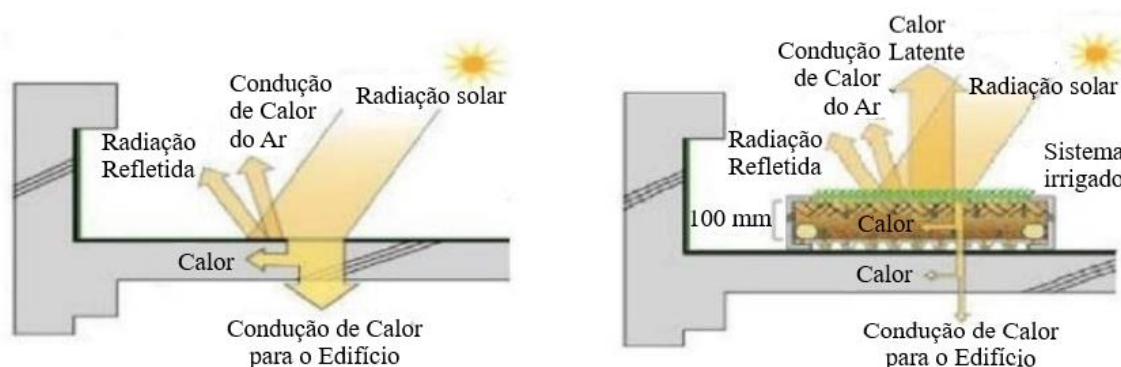
A utilização de telhados verdes nas edificações está associado a benefícios estéticos, acústicos, térmicos, hídricos e para a qualidade do ar. Cardoso e Vecchia (2013) e Ferraz (2012) destacam que os possíveis benefícios, de maior relevância, com a aplicação da tecnologia são: diminuição dos níveis de ruídos externos no interior das respectivas edificações devido às camadas implantadas sobre o suporte estrutural do teto original; aumento da vida útil da cobertura devido à proteção do suporte estrutural do teto original contra fatores externos (intempéries); retenção de parte da água das chuvas no conjunto vegetação + substrato, podendo minimizar eventos de enchentes e alagamentos, sobretudo, quando as chuvas são de baixa intensidade; possibilidade de reutilização da água armazenada pelo sistema; diminuição dos níveis de poluição do ar devido à filtragem de partículas de poeira e fumaça; uso do espaço para recreação e lazer, no caso de telhado intensivo; e diminuição dos efeitos das ilhas de calor urbanas, bem como regulação térmica dos ambientes abaixo das coberturas, devido à ocorrência de evapotranspiração e consequente ganho conforto térmico.

Krebs (2005) e Susca (2019) afirmam que o emprego do telhado verde é benéfico tanto urbanamente, ou seja, em escala maior, quanto para a própria construção, por se tratar de uma tecnologia sustentável que possui uma efetiva participação na mudança de paradigmas no ramo construtivo, e, portanto, seu emprego pode resultar em ganhos como umidificação do ar, suavização da temperatura em ambientes aquecidos, principalmente onde existem edificações de grande porte e fluxo urbano intenso.

Rocha (2020) ratifica que a cobertura verde constitui uma alternativa a ser aplicada também pelo seu desempenho térmico, pela retenção de partículas em suspensão e poluentes,

e pelo sequestro de gás carbônico. Na Figura 6 visualiza-se as trocas de radiação ocorridas na utilização de um telhado verde e um telhado convencional, em que o tamanho das setas permite associar os quantitativos de calor e radiação envolvidos em ambos os casos.

Figura 6 - Radiação solar incidente nos telhados e mecanismos de calor.



Fonte: Adaptado de Silva, Siqueira e Aragão (2016).

Conforme observado na Figura 6, os telhados verdes promovem a dissipação do calor, reduzindo significativamente o fluxo do mesmo para o interior das edificações. Conforme Besir e Cuce (2018), isso acontece devido à perda de calor por radiação de ondas longas, à evapotranspiração e à fotossíntese. Silva, Gomes e Silva (2016) realizaram a avaliação térmica experimental e numérica de edifícios com telhados verdes em Lisboa, Portugal, durante os períodos de aquecimento e arrefecimento do ano de 2013, os autores destacaram que o emprego de telhados verdes pode resultar em economia no consumo anual de energia de até 70%.

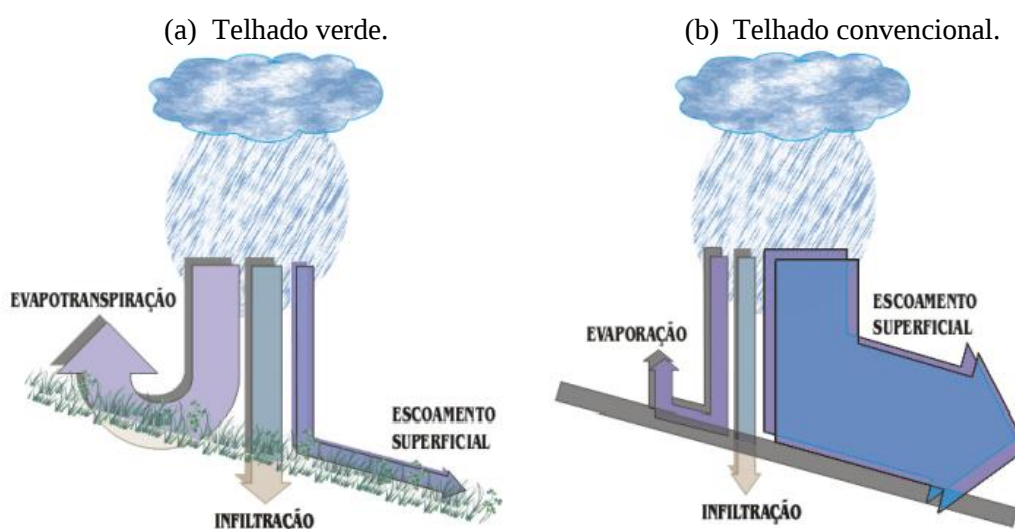
Esse resultado corrobora com o evidenciado por Francis e Jensen (2017), os autores realizaram uma revisão sistemática de estudos que analisam o desempenho térmico de telhados verdes, conforme os autores, em 20 dos 41 estudos analisados a redução de economia de energia gerada pelos telhados chega até 70%, além de uma variação de 0,42 a 9,1 g/m² na remoção de partículas inaláveis.

Santos *et al.* (2017) e Rocha (2020) evidenciaram que os telhados verdes atuam como filtro mecânico, reguladores de pH e como filtro de íons, devido aos substratos utilizados na composição e à manta geotêxtil da camada de filtragem, confeccionada em poliéster e/ou polipropileno.

Os telhados verdes também se destacam pelo alto potencial de retenção hídrico, que pode resultar na redução no escoamento superficial, com surgimento de infiltração e de evapotranspiração, não observados no telhado convencional, conforme Figura 7. Além dos aspectos quantitativos relacionados com o balanço hídrico, o caráter qualitativo deve ser

considerado. Sobre isso, Farias (2012) constatou, em estudo experimental com telhados verdes, que a água infiltrada no substrato e drenada para o sistema de armazenamento, ainda que “contaminada” na passagem pelo solo (e/ou fertilizantes), apresenta potencial de reuso. O autor destaca como possibilidades de uso os fins não potáveis, como utilização em descargas de bacias sanitárias, irrigação de gramados e plantas ornamentais, lavagem de veículos, e limpeza de calçadas e ruas.

Figura 7 - Retenção hídrica em telhado verde e convencional.



Fonte: Adaptado de Ohnuma Júnior (2008).

Além do que já citado, o aumento da área verde contribui para a produção de efeitos estéticos, que intervém no combate à poluição visual das cidades, resultando em sensações de bem estar nos habitantes próximos aos telhados verdes. Esses benefícios podem ser influenciados pelo tipo de telhado instalado como, por exemplo, no caso dos intensivos, que aumentam os espaços de recreação e de vida em áreas que são densamente povoadas (JOBIM, 2013 e COMA *et al.*, 2016 *apud* ROCHA, 2020).

No contexto dos telhados frios e verdes, ressaltam-se os telhados executados com telhas ecológicas, produzidas a partir da reutilização de resíduos sólidos descartados, como tubos de pasta de dente e embalagens de TetraPak. Araujo, Moraes e Altides (2008), Magalhães (2018), Misaka (2021) afirmam que devido ao fato das telhas ecológicas de embalagem Tetra Pak apresentarem alumínio em sua composição, atuam na reflexão solar, deixando o ambiente com a temperatura mais agradável, apresentando alta resistência à flexão, durabilidade, leveza, e isolamento térmico eficiente, sendo de 50% a 60% melhor que as telhas de fibrocimento.

De acordo com Lessa (2009), as telhas ecológicas constituídas de pasta de dente são materiais autoextinguíveis e reduzem o calor de 30% a 40% no interior do ambiente quando comparadas as telhas convencionais.

Entretanto, apesar dos benefícios citados sobre a utilização e implementação dos telhados frios e verdes, Francis e Jensen (2017) afirmam que as vantagens podem se apresentar em grandes intervalos de eficácia, em algumas situações pode-se alcançar um alto feito, em outras nenhum, dependendo da relação do contexto específico e dos parâmetros do telhado.

3.3.4 Normas e legislações

A urgência na tomada de decisões para combater o crescimento urbano, de forma acelerada, transformou a prática dos telhados verdes em uma ferramenta para encorajar o desenvolvimento de projetos de baixo impacto no ciclo hidrológico (OHNUMA JÚNIOR, 2008). Nesse contexto, se inserem os documentos norteadores, instrutores e mesmo mandatários. No cenário mundial, o desenvolvimento de normativas, políticas públicas e legislações visam o incentivo à implementação de telhados verdes. Entretanto, observa-se a carência de políticas públicas que tratem do tema no Brasil.

No Brasil, a formulação de legislações para a regulamentação da instalação e implementação dos telhados verdes se desenvolveu a partir da edição da Lei Federal Nº 6938 (BRASIL, 1981), que dispõe a respeito da Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. A Lei Federal Nº 6938 apresenta mecanismos para a formulação e para aplicações dos seus objetivos, que sinteticamente visam melhorar, preservar e recuperar a qualidade ambiental. No que se refere à implementação da tecnologia, destaca-se a Política Estadual de Mudança Climáticas, Lei Federal Nº 12187 (BRASIL, 2009), que visa a implementação de medidas para promover a adaptação à mudança do clima, com a participação e a colaboração dos agentes econômicos e sociais interessados ou beneficiários, em particular àqueles especialmente vulneráveis aos seus efeitos adversos. Apresenta-se como uma das diretrizes da Lei Nº 12187 está a implementação de medidas de adaptação para reduzir os efeitos adversos da mudança do clima e a vulnerabilidade dos sistemas ambiental, social e econômico.

Entre os 26 estados do país, apenas quatro estados possuem instrumentos legais de âmbito estadual que tratam a tecnologia como forma de aumentar as áreas vegetadas, conforme Vilarim *et al.* (2020). Conforme Andrade (2017), as Políticas Estaduais de Mudança Climáticas foram antecedidas pelo Plano Nacional sobre Mudança do Clima (BRASIL, 2008), tendo como objetivo geral “identificar, planejar e coordenar as ações e medidas que possam ser

empreendidas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa geradas no Brasil, bem como àquelas necessárias à adaptação da sociedade aos impactos que ocorram devido à mudança do clima”.

No âmbito municipal, apenas Recife (PE) e Guarulhos (SP) determinam a instalação da tecnologia como obrigatória. Em Recife, a Lei Municipal Nº 18112 (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 cobertura

Concomitantemente ao desenvolvimento das políticas públicas e legislações, observa-se o desenvolvimento de documentos normativos relacionados direta ou indiretamente com o emprego de tecnologias verdes e/ou similares em áreas urbanas. Nesse contexto, destaca-se a NBR ISO 37120 (ABNT, 2017), que foi instituída com a finalidade de estabelecer o desenvolvimento sustentável através de indicadores para os serviços urbanos e à qualidade de vida, sendo aplicada na implementação de medidas que visam avaliar a gestão dos serviços. Especificamente sobre o desempenho térmico das edificações, e sobre o conforto térmico de locais específicos, tem-se a NBR 15575-1 (ABNT, 2013), que dispõe a respeito dos requisitos gerais das edificações habitacionais e estabelece critérios de desempenho. A referida norma destina-se a edifícios de até cinco pavimentos, independente dos seus materiais constituintes e do sistema construtivo utilizado, estabelecendo que o valor máximo diário da temperatura do ar interior deve ser sempre menor ou igual ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Critérios de avaliação do desempenho térmico para condições de verão.

Nível de Desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M (mínimo)	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
I (intermediário)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ} \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1^{\circ} \text{C})$
S (superior)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^{\circ} \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ} \text{C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1^{\circ} \text{C})$

Legenda:

$T_{i,max}$: valor máximo, em °C, diário da temperatura do ar no interior da edificação.

$T_{e,max}$: valor máximo, em °C, diário da temperatura do ar exterior à edificação.

$T_{i,min}$: valor mínimo, em °C, diário da temperatura do ar no interior da edificação.

$T_{e,min}$: valor mínimo, em °C, diário da temperatura do ar exterior à edificação.

Fonte: Adaptado de Santos (2016).

A NBR 15220-3 (ABNT, 2005) classifica as cidades em 8 zonas bioclimáticas, sendo a metodologia de classificação adotada pelo estabelecimento de estratégias de condicionamento térmico necessárias para cada cidade. A NBR 15220-3 dispõe sobre o desempenho térmico das

edificações referentes ao zoneamento bioclimático brasileiro, com base nas zonas de classificação de cada cidade são estabelecidas diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.

A identificação da zona de pertencimento de cada cidade é estabelecida nas tabelas anexadas na norma. Conforme a NBR 15575-1, se a cidade analisada não constar nas tabelas de seu anexo, pode-se utilizar os dados climáticos da cidade mais próxima, desde que se encontre na mesma região climática e que apresente altitude de mesma ordem e grandeza.

De acordo com Rocha (2020), sobre conforto térmico, é necessário ainda a consideração da NBR 16401 (ABNT, 2008), que dispõe sobre os limites de temperatura operativa dos ambientes no verão. Conforme o autor, a referida norma estipula os seguintes limites: temperatura de 22,5°C a 25°C com umidade relativa de 65%, e temperatura de 23°C a 26°C com umidade relativa de 35%. Os limites estabelecidos para os parâmetros de conforto são previstos utilizando a Equação 1 para o cálculo da temperatura operativa (T_o), sendo consideradas como variáveis a temperatura radiante média (T_r), a temperatura do ar (T_{ar}), e o parâmetro C , que está correlacionado com a velocidade relativa do ar.

$$T_o = C \cdot T_{ar} + (1 - C) \cdot T_r \quad (1)$$

Entretanto, apesar das normativas e legislações destacadas, evidencia-se ainda a necessidade de políticas nacionais, estaduais e municipais com maior enfoque na implementação da tecnologia dos telhados verdes, assim como normativas técnicas nacionais específicas para o planejamento e o emprego adequado do sistema.

3.4 Emprego de materiais reciclados em telhados ecológicos

3.4.1 Reuso de Resíduos Sólidos Urbanos

Devido à modificação dos padrões naturais de uso e ocupação do solo, com as ações antrópicas e o processo de desenvolvimento urbano não planejado, ocorrem sérios problemas urbanos, como a elevação da taxa de impermeabilização do solo, o aumento do escoamento superficial, e o surgimento/agravamento de áreas de inundação/alagamento. Assim sendo, no âmbito do estado de Pernambuco, a SECTMA (2020) estabeleceu como parte do conteúdo mínimo previsto no horizonte de planejamento da implantação da Política Estadual de Mudança Climáticas, a análise das modificações atuais e futuras nos padrões de usos e gestão dos recursos

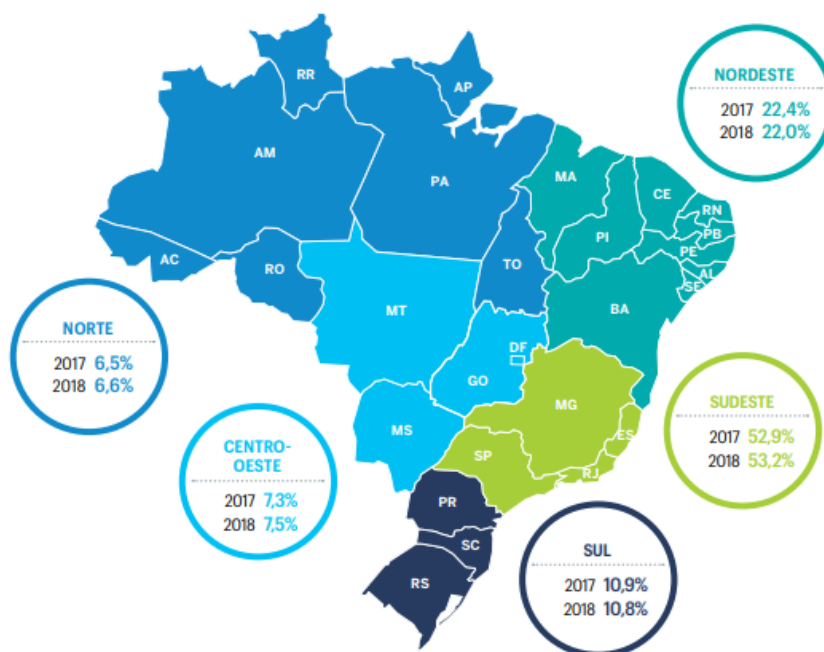
hídricos e de ocupação do solo. De forma geral, as políticas públicas de impacto social e/ou ambiental, destacam-se pela relevância no planejamento e no gerenciamento dos recursos naturais. A gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos é um campo de análise de particular relevância, conforme Heber e Silva (2014), devido ao aumento na geração de resíduos pelos padrões de consumo da sociedade. Nesse âmbito a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), disposta na Lei nº 12.305/10, visa organizar o gerenciamento dos resíduos sólidos pelo país, a partir do descarte adequado e da transparência no gerenciamento desses resíduos pelos setores públicos e privados.

De acordo com a definição de Brasil (2010), caracterizam-se como Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), os resíduos domiciliares, originários de atividades domésticas em residências urbanas, e os resíduos de limpeza urbana, originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana. Um estudo desenvolvido pela ABRELPE (2019) destacou que em 2018, foram geradas no Brasil 79 milhões de toneladas de resíduo, desse montante, 92% (72,7 milhões) foi coletado, evidenciando que 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidas junto aos locais de geração. Outro fator agravante é que do total de resíduos coletados 40,5% foram despejados em locais inadequados, perfazendo um total de 29,5 milhões de toneladas de RSU destinados em lixões ou aterros, que não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente contra danos e degradações. Na Figura 8, observa-se o percentual de coleta das regiões do Brasil no total de RSU coletados ao ano no país. A região Nordeste ocupa o segundo lugar, coletando um total de 22,0 % no ano de 2018.

O Politerefitalato de Etileno (PET), é um polímero termoplástico utilizado na fabricação de garrafas e embalagens plásticas. O resíduo de PET é responsável por 10 a 20% de todo o RSU coletados, e mesmo quando destinados corretamente, em aterros regularizados, é inevitável a ocorrência de impactos ambientais como a impermeabilização que ele provoca nas camadas em decomposição do aterro, prejudicando a percolação de gases e líquidos, e a liberação de gases tóxicos e cancerígenos. A destinação do PET para a reciclagem pode dirimir os impactos citados, além de contribuir para a economia de recursos naturais, para a redução dos custos de manejo e do consumo de energia, dentre outros (SHEN, WORRELL e PATEL, 2010; COELHO, CASTRO e GOBBO, 2011; HAMAD, KASEEM e DERI, 2013; WELLE, 2013 *apud* PIRES e PASCHOALIN FILHO, 2015). Conforme Rocha (2020), diversos materiais que comumente são descartados como lixo podem ser reciclados e ajudar na

preservação ambiental. Souza, Fontes e Salomão (2014) afirmam que os principais materiais recicláveis conhecidos são papel, vidro, plástico e metal.

Figura 8 - Participação das regiões no total de RSU coletados.



Fonte: ABRELPE (2019).

3.4.2 Desenvolvimento e construção sustentável

De acordo com Machado (2012), a noção de sustentabilidade implica em considerar que as ações humanas passam a ser analisadas quanto à incidência de seus efeitos diante do tempo cronológico, buscando-se considerar os efeitos das ações antrópicas no presente e procurar fazer um prognóstico do futuro, avaliando se os efeitos continuarão, consequências e duração. Como uma forma de destinação dos RSU, tem-se a reciclagem na esfera da engenharia civil (PIRES e PASCHOALIN FILHO, 2015). Uma interessante alternativa de inovações tecnológicas sustentáveis para a mitigação dos impactos ambientais, de acordo com Pappu, Saxena e Asolekar (2007), é a incorporação de resíduos como substituição de parte da matéria-prima natural, que, além de garantir correta destinação destes, proporciona uma alternativa sustentável. Segundo Manhães e Araújo (2014), o conceito de construção sustentável objetiva a redução de impactos ambientais através de estratégias que abrangem desde a escolha de ecomateriais até o reaproveitamento de materiais recicláveis.

Sobre isso, Almeida (2012) destaca o PET como um material de dureza elevada, resistência ao desgaste, excelente transparência, e considerável resistência a produtos químicos.

As características destacadas pelo autor, caracterizam o material como barreiras que podem ser úteis em diversos fins, sendo: média barreira à umidade; média barreira aos gases e excelente barreira à gordura, além da excelente resistência à tração e boa resistência ao impacto. A reutilização do PET, em construções sustentáveis, é uma alternativa de grande viabilidade ambiental, visto que o material descartado inadequadamente apresenta um tempo de deterioração extremamente alto (Tabela 4).

Tabela 4 - Tempo de deterioração de polímeros.

Polímero	Tempo de Degradação
PET	400 a milhares de anos
Poli(etileno)	100 a 400 anos
Poli(propileno)	> 1000 anos
Ácido Poli(Láctico)	1 semana a 24 meses
Policaprolactona	> 24 meses
Poli(estireno)	> 400 anos

Fonte: Adaptada de Almeida (2012).

De acordo com Nunes *et al.* (2009), materiais como PET, pneus de automóveis e caixas tetrapak são resíduos que ainda não possuem uma indústria de reciclagem desenvolvida. Além do PET, as embalagens alimentícias cartonadas da Tetra Pak, destacam-se para o reuso em construções sustentáveis. De acordo com os autores, as embalagens da Tetra Pak, utilizadas em produtos alimentícios, estão presentes em 94,7% dos lares brasileiros. Desde 2012, todas as tampas de rosca *StreamCap* utilizadas nas embalagens cartonadas são produzidas no Brasil com “polietileno verde”. Em abril de 2014, a Tetra Pak Brasil divulgou que todas as embalagens produzidas no Brasil passarão a utilizar o polietileno de baixa densidade (LDPE), feito a partir da cana-de-açúcar, nas camadas protetoras. Combinado ao papel, o biopolímero aumenta o percentual de materiais renováveis na embalagem para até 82%. Com isso, mais de 13 bilhões de embalagens cartonadas serão produzidas anualmente com a nova matéria-prima (UEMURA, 2021).

As caixas Tetra Pak são diariamente consumidas por toda a população, resultando num grande problema ambiental devido à sua composição multifoliada, o que dificulta a decomposição, a reciclagem e o reprocessamento. Estes fatores geram uma abundante aglomeração de um material sem função após o seu uso (NUNES *et al.*, 2009).

3.4.3 Pesquisas com telhados ecológicos

A aplicação de PET e Tetra Pak como matérias-primas em tecnologias de construção sustentável, como a execução de telhados verdes e ecológicos é um tema de abordagem recente. Pesquisadores como Funfgelt *et al.* (2012) e Visentin, Neckel e Breda (2015) reutilizaram garrafas PET para o cultivo de plantas em telhados verdes. De acordo com os autores, as garrafas proporcionam ambiente adequado para plantas de pequeno porte, destacando-se por permitir vários tipos de cortes e montagens, e, por isso, adequando-se à formatação necessária.

Panziera *et al.* (2015) destacaram que o reuso de garrafas PET para a montagem dos telhados verdes, pode contribuir com o meio ambiente e incluir vantagens como baixo custo do material e mão-de-obra barata. A aplicação do material nos telhados verdes e ecológicos, segundo Coimbra e Damato Neto (2016), contempla de maneira adequada a necessidade do instalador, com satisfatória relação custo x benefício.

Gonçalves *et al.* (2021), compararam experimentalmente o desempenho hidrológico e os custos de s de um telhado verde de politereftalato de etileno (PET) com um telhado verde comercial, usando um telhado de fibrocimento como padrão, os autores evidenciaram que o telhado verde composto por PET apresentou um desempenho superior ao telhado verde comercial, e um menor custo de execução e manutenção.

Araújo, Sousa e Peres (2017) realizaram experimentações com telhados verdes executados com módulos de PET em comparação com telhados verdes convencionais, os autores afirmam que os telhados verdes executados com módulos de garrafas PET apresentam uma redução de custo entre 77,4% e 86,7% quando comparado ao sistema de telhado verde convencional, proporcionando também uma redução da carga sobre a edificação de 43% à 62%. O desenvolvimento de pesquisas envolvendo o Tetra Pak ainda é menos difundido que a utilização das garrafas PET, entretanto alguns estudos destacam-se pela relevância dos resultados encontrados.

Fensterseifer *et al.* (2017), aplicaram as caixas de leite em embalagens Tetra Pak como módulos de suporte para a execução de telhados verdes, os autores executaram dois tipos de módulos, o primeiro contendo 10 caixas e o segundo contendo 4 caixas, os módulos finalizados foram acomodados sobre a estrutura de sustentação do telhado verde. Os autores monitoraram as estruturas durante 18 meses, foi evidenciado que os módulos apresentaram boa resistência e durabilidade a um clima com alta amplitude térmica, grandes volumes de chuva e ventos fortes, destacando a influência do telhado executado no que se refere ao conforto térmico e acústico, apresentando elevada eficiência.

Módulos constituídos de embalagens Tetra Pak para suporte de telhados verdes também foram confeccionados por Altóe *et al.* (2019), foram realizados recortes na parte inferior das faces das caixas, possibilitando a drenagem da água entre os módulos por meio das aberturas das tampas rosqueáveis. Os autores evidenciaram que o ambiente abaixo dos telhados verdes executados com embalagens Tetra Pak apresentaram uma temperatura até 3°C inferior a temperatura ambiente externa.

Conforme Fernandes, Danielewicz e Secco (2014), as embalagens de Tetra Pak possuem uma face aluminizada, impedindo que o calor seja transmitido para o interior (ou exterior no caso do inverno) da residência pelo processo de radiação, refletindo mais de 95% do calor, devido a esta característica as embalagens exercem com eficiência a função de manta térmica, como uma alternativa às mantas convencionais, com a vantagem de ser uma solução ecológica e barata.

Os autores criaram painéis formados pelas embalagens de Tetra Pak aberta, os painéis foram aplicados como forro em residências unifamiliares, sendo posicionados abaixo das telhas de fibrocimento. Os resultados evidenciaram que a aplicação dos painéis resultou em redução da temperatura ambiente interna dos dias mais quentes e aumento da temperatura interna nos dias mais frios, proporcionando maior conforto térmico aos usuários.

A aplicação de Forro composto por embalagens de TetraPak também foi realizada por Silva *et al.* (2015), o forro foi posicionado com a face aluminizada voltada para cima abaixo das telhas dos protótipos executados. Os experimentos evidenciaram que o reaproveitamento das embalagens Tetra Pak como forro contribuiu para a redução dos valores médios dos índices de temperatura e umidade, de temperatura do globo e umidade e de carga térmica de radiação. Nesse contexto, algumas pesquisas destacam-se pela aplicação de garrafas PET e de embalagens Tetra Pak na composição de telhados verdes e ecológicos (Tabela 5).

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

Fonte	Metodologia
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 dispostas em fileiras longitudinais, com os seguintes cortes: primeira garrafa, parte posterior; as do centro, parte frontal e posterior; e a última apenas a parte frontal. Abertura no centro das garrafas para o acondicionamento do substrato e da vegetação, sendo unidas umas às outras com rebite e arames.
Cortés e Castillo (2011)	Garrafas PET de 3L, dispostas no sentido longitudinal, com três aberturas (de 7 cm x 10 cm) na parte lateral para o acondicionamento do substrato e da vegetação, e três perfurações no bocal da garrafa para drenagem.
Funfgelt <i>et al.</i> (2012)	Garrafas dispostas no sentido longitudinal cortadas ao meio, perfuradas na base para drenagem, unidas por meio do bico em um semicírculo no fundo da mesma. Fixadas com uma malha de fios de <i>nylon</i> presa nas extremidades.
Jobim (2013)	Garrafas PET de 2 L, cortadas ao meio, com furos em toda circunferência a 3 cm da base para drenagem. Dispostas verticalmente e no interior das mesmas camadas com: argila expandida, manta geotêxtil, areia, substrato e vegetação.
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.
Martins e Pinto (2016)	Garrafas PET no sentido vertical medindo 7 cm de altura. Manta geotêxtil do tipo <i>Bidim</i> , na base, seguidos sobre a mesma, pelo substrato e vegetação.
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 fase 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 unidas por meio de grampos metálicos localizados em furos nas bordas laterais das garrafas.

Fonte: Adaptado de Rocha (2020).

A utilização de garrafas PET sobre os telhados também é realizada na técnica de desinfecção solar da água (SODIS). De acordo com Azevedo (2014), a Desinfecção solar da água (SODIS) é um método de baixo custo e simples para melhorar a qualidade da água potável em nível doméstico, o SODIS usa energia solar para a inativação de microrganismos patogênicos, causadores da contaminação da água, com isto melhorando a qualidade da água.

A técnica consiste na deposição sobre o telhado de garrafas PET com o volume totalmente preenchido por água, sendo expostas ao sol por um tempo determinado, retiradas posteriormente para consumo. A deposição de garrafas PET preenchidas com água foi realizada por diversas pesquisas com resultados promissores no tocante a desinfecção da água, destacando-se entre elas Paterniani e Silva (2005), Heierli (2008), Kruti e Shilpa (2012) e Azevedo (2014). Portanto evidencia-se a eficiência gerada pela utilização de garrafas PET preenchidas com água sobre coberturas, gerando a possibilidade de aplicação da tecnologia em telhados ecológicos, associando-se assim benefícios térmicos e de qualidade e reuso de água.

A aplicação de garrafas PET associadas a embalagens de Tetra Pak para a confecção de telhados ecológicos e verdes apresenta viabilidade econômica e social, gerando inovação tecnológica, e benefícios ambientais a partir da reutilização e reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos.

3.5 Pesquisas desenvolvidas na UFPE

Este trabalho está inserido nas atividades de pesquisa do Grupo de Pesquisa da Universidade Federal de Pernambuco, que desenvolve estudos referentes à temática de telhados ecológicos desde 2007 sob os enfoques da capacidade de redução do escoamento superficial, do ganho de conforto térmico nos ambientes interiores abaixo dos telhados verdes, e do monitoramento da qualidade da água escoada para armazenamento e posterior uso. As pesquisas envolvem resultados de coberturas vegetadas sobre protótipos construídos exclusivamente para realização de experimentos em clima tropical úmido (*campus* Recife da UFPE) e clima semiárido (*campus* Caruaru da UFPE), e coberturas adaptadas em uma edificação térrea da unidade rural do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) no município de Caruaru. Pesquisas realizadas por Santos *et al.* (2009), Santos *et al.* (2013), Paiva *et al.* (2017), Santos (2016), e Santos *et al.* (2017) consideraram diferentes adaptações e o emprego de diferentes tipos de coberturas. Assim sendo, foram utilizados em pesquisas anteriores: arranjo com argila expandida, manta Bidim Drennáge, manta do tipo MacDrain; arranjo com substrato e distintas vegetações (Grama-de-Burro/*Cynodium dactylum*; Coroa-de-Frade/*Melocactus Macrodiscus*; e Babosa/*Aloe Vera*). Além das coberturas convencionais, em que são empregadas camadas drenantes e impermeáveis, também foram testados arranjos com garrafas PET. Na pesquisa realizada por Rocha (2020), foram utilizadas garrafas PET e como vegetação a *Kalanchoe laetivirens* conforme. Na Tabela 6, observa-se a evolução cronológica das pesquisas realizadas pelo Grupo de Pesquisa da UFPE.

A adesão à implementação dos telhados verdes é dificultada devido aos custos de implementação e de manutenção. Assim sendo, com enfoque no estímulo à sustentabilidade, e visando garantir o acesso da população de baixa renda aos benefícios esperados com o uso de telhados ecológicos, considera-se a necessidade do desenvolvimento de um sistema de baixo custo. Espera-se que sistemas com essa proposta promova a minimização da geração e da disposição de RSU, destacando-se a possibilidade no aprimoramento dos estudos desenvolvidos, proporcionando sobretudo, qualidade de inovação e atualização metodológica.

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

FONTE	TÍTULO	CONCLUSÕES
Santos <i>et al.</i> (2009)	Determinação da utilidade do uso de telhado verde no Agreste Pernambucano	Verificou-se a necessidade de viabilidade técnico-financeira do arranjo para ganho de conforto térmico entre os meses de novembro e fevereiro, em clima Semiárido.
Santos <i>et al.</i> (2013)	Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial	Da combinação de resultados experimentais e simulação numérica, observou-se promissora capacidade de retenção em precipitações de menor intensidade, e os resultados indicaram uma retenção dos telhados verdes de 30%, tanto com grama, quanto com cacto.
Paiva <i>et al.</i> (2017)	Capacidade de retenção de água em um telhado verde: estudo de caso em Caruaru	Concluiu-se que os telhados verdes constituem promissoras alternativas para minimização de alagamentos, e os resultados indicaram melhor desempenho com Coroa-de-Frade que com Babosa.
Santos <i>et al.</i> (2017)	Desempenho térmico de telhados verdes no semiárido brasileiro	Observou-se, nos horários com maiores temperaturas, que 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	Foi evidenciado que o telhado ecológico resultou em melhor desempenho em diversos parâmetros, com destaque para a atenuação térmica no momento do pico máximo diário de temperatura e a amplitude térmica que chegou a evidenciar a diferença de 5,9°C entre as mesmas. O baixo custo de investimento, a sustentabilidade, e a eficácia no desempenho térmico constituem motivadores para ampla adesão da técnica.

Fonte: Adaptado de Rocha (2020).

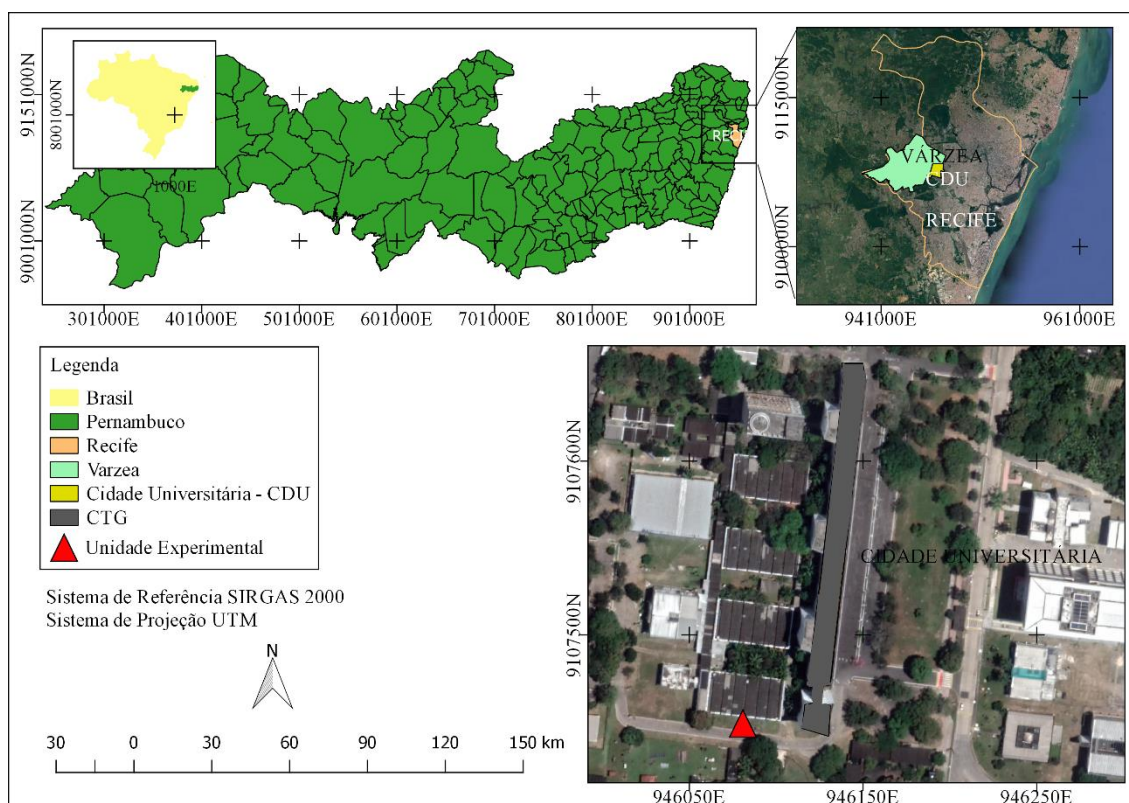
4 METODOLOGIA

Abordou-se a metodologia em seis principais subtópicos: Área de estudo; Caracterização meteorológica; Unidade Experimental de Telhados Ecológicos do Recife; Coleta de dados; Processamento dos dados; Análise de Variância.

4.1 Área de estudo

A área de estudo (Figura 9) situa-se na região Nordeste, na Região Metropolitana de Recife (RMR), no estado de Pernambuco, especificamente no Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) do *campus* Recife da Universidade Federal de Pernambuco, localizado na Cidade Universitária, ao lado do bairro da Várzea. A cidade do Recife está localizada nas coordenadas 8° 04' 03" de latitude sul, 34° 55' 00" de longitude oeste. Conforme os dados do IBGE (2021), a capital pernambucana apresenta extensão territorial de 218,843 Km², com população estimada no ano de 2020 de 1.653.461 habitantes, e uma densidade demográfica de 7.039,64 hab./Km².

Figura 9 - Localização da área de estudo, Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE.



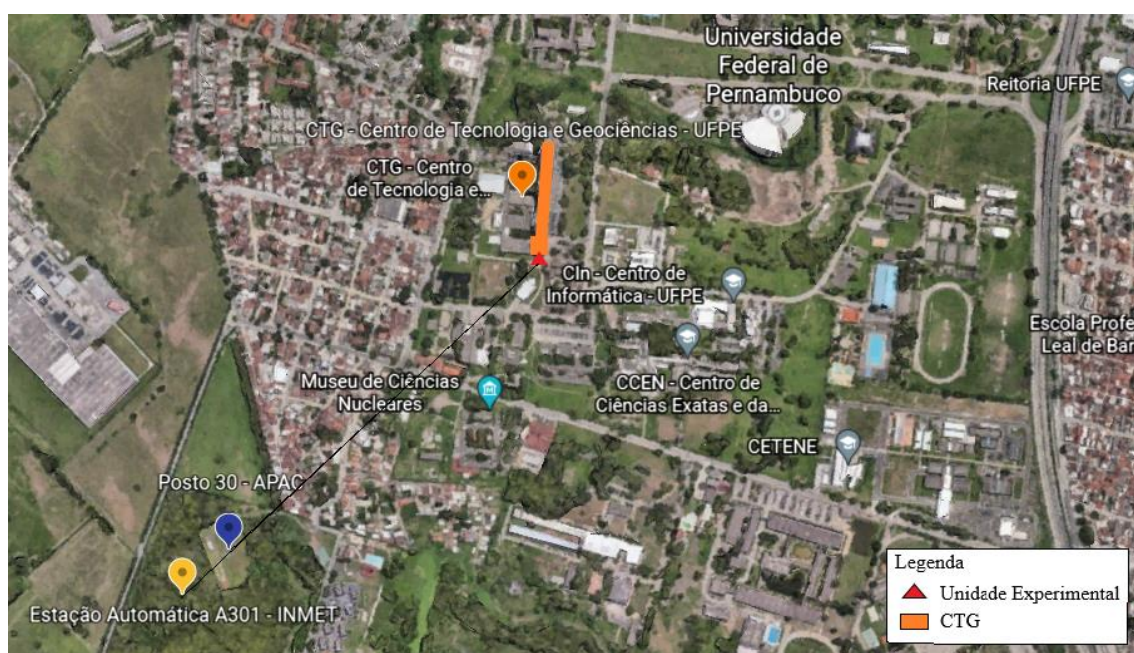
Fonte: A Autora (2021).

4.2 Caracterização meteorológica

As variabilidades climáticas exercem uma influência significativa sobre as atividades humanas, pois podem oscilar quanto à temperatura, à precipitação e à frequência de eventos extremos como secas e chuvas intensas, resultando em impactos na agricultura, nos recursos hídricos, na saúde, sobre o meio ambiente, em escala local ou regional (SOUZA, AZEVEDO e ARAUJO, 2012). Assim sendo, realizou-se a caracterização meteorológica da região de estudo, a partir da obtenção dos dados dos anos de 2009 a 2019. Os dados foram tratados e processados utilizando o *software Excel* versão 2016, e em seguida, foram confeccionados gráficos de barra e *LinePlots*.

Para análise da precipitação pluviométrica, utilizou-se os valores acumulados anuais de três séries de dados. A primeira série de dados de precipitação acumulada anual foi construída a partir da obtenção dos dados pluviométricos extraídos das imagens anuais dos *Chirps*, utilizando o *software RStudio*, com aplicação de um código de programação na linguagem R. A segunda série foi obtida a partir do banco de dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), referente ao posto 30 localizado no bairro da Várzea na cidade do Recife. E a terceira série foi obtida a partir do banco de dados do INMET. Os dados foram obtidos no *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), coletados pela estação automática de código A301, localizada em Recife (Figura 10).

Figura 10 - Localização da estação automática A301 do INMET e do Posto 30 da APAC.



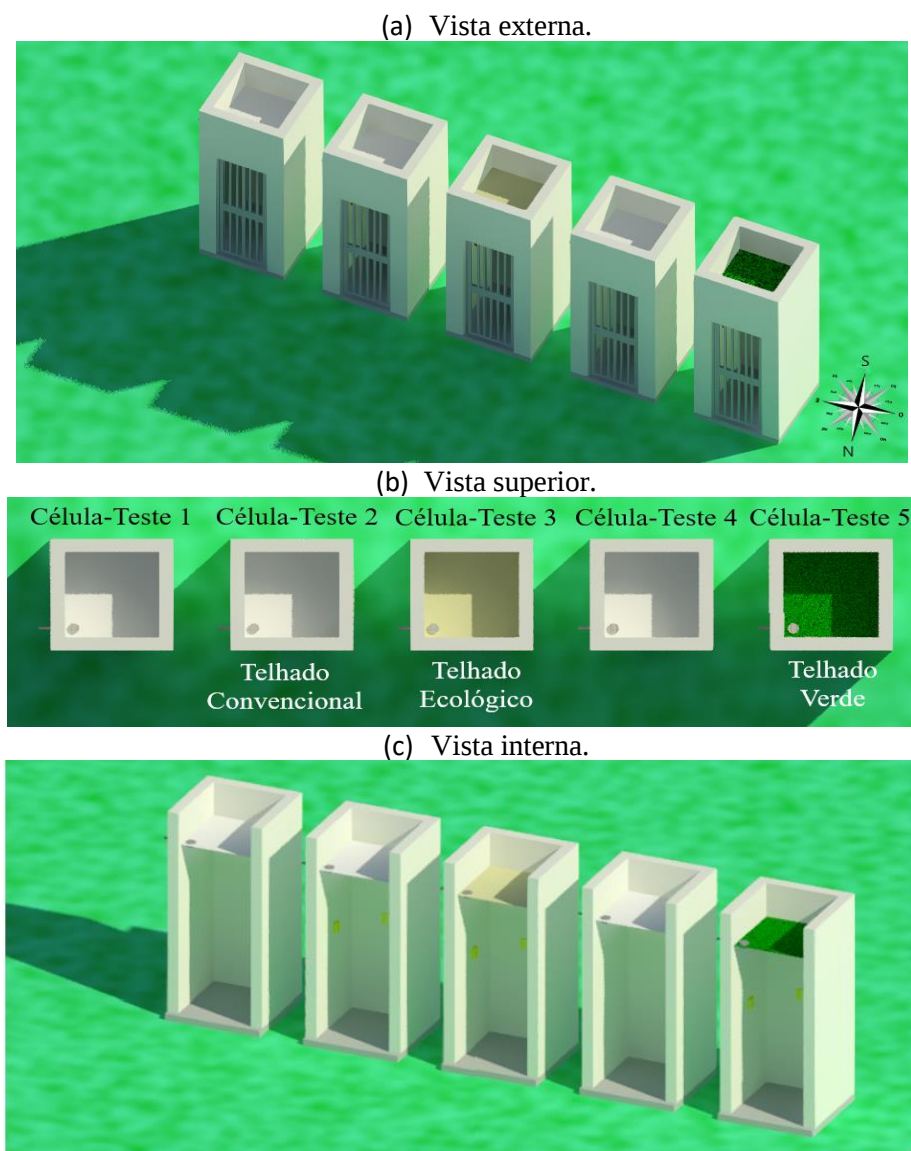
Fonte: Adaptado do Google Earth (2021).

A partir da análise das três séries foi possível a identificação das diferenças e semelhanças entre os dados analisados, podendo se considerar como o valor real aquele obtido na estação mais próxima, ou com menos falhas.

4.3 Unidade Experimental de Telhado Ecológico do Recife (UETER)

A Unidade Experimental de Telhado Ecológico do Recife (UETER) está localizada na parte posterior do CTG, na Figura 11 observa-se a disposição dos protótipos na UETER. Os 5 protótipos (Figura 12), construídos no ano de 2018 pelo Grupo de Pesquisa da UFPE, com lajes de concreto impermeabilizadas, e preparadas para implantação das coberturas a serem testadas.

Figura 11 - Visualização 3D dos protótipos.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 12 - Protótipos construídos na UETER.



Fonte: Gomes (2019).

Para realização desta pesquisa foram utilizadas as células-teste (como é chamado o topo/laje de concreto armado, impermeabilizada, do protótipo) de números 2, 3 e 5. A célula-teste 2 compreende o protótipo sem camadas adicionais sobre a laje e, portanto, considerada como cobertura de referência. A célula-teste 2 (CT2) será chamada, neste trabalho de ‘telhado convencional’. Sobre a laje da célula-teste 3 (CT3) foi implantado um arranjo confeccionado com garrafas PET de refrigerante Coca-Cola com capacidade para 2L e embalagens Tetra Pak. Para montagem do telhado com garrafas PET e embalagens Tetra Pak, foram realizadas as etapas descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Etapas de implantação do Telhado Ecológico.

Etapa	Descrição
1. Limpeza e preparação das células-teste	Limpeza e retirada dos resíduos e impurezas, e preparação das estruturas para a montagem das coberturas (Figura 13).
2. Obtenção de materiais ^{1, 2}	Confecção dos telhados (Figura 14a).
3. Limpeza dos materiais ^{1, 2}	Eliminação de resíduos orgânicos e de impurezas (Figuras 14b e 15a).
4. Recorte das embalagens ¹	Formato retangular e dimensões definidas para o tapete refletivo (Figura 14c).
5. Montagem do tapete refletivo.	Com fita impermeabilizante entre as juntas de união das embalagens para prevenir infiltrações (Figuras 14d e 14e).
6. Aplicação do tapete refletivo	Aplicação do material ² e isolamento lateral, entre o tapete e as paredes da célula-teste, com fita impermeabilizante para prevenir (Figura 14f).
7. Adaptações do material ¹	Recorte para confecção de alças de união, e colagem das alças.
8. Preparação do material ¹	Preenchimento com água em volume total, evitando a formação de bolhas de ar no interior das garrafas.
9. Montagem dos materiais ¹	Colocação das garrafas PET sobre o tapete refletivo e união das garrafas com enforcador plástico (Figura 15b).

Legenda: 1 = garrafas PET | 2 = embalagens Tetra Pak.

Fonte: A Autora (2021).

Figura 13 - Limpeza das células-teste.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 14 - Etapas de preparo do tapete refletivo com embalagens Tetra Pak.

(a) Caixas de Tetra Pak.



(b) Abertura e limpeza das embalagens.



(c) Corte em formato retangular.



(d) Fita impermeabilizante.



(e) Montagem do tapete refletivo.



(f) Vedação lateral do tapete refletivo.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 15 - Etapas de preparação das garrafas PET, para uso no telhado ecológico.

(a) Limpeza e preparação.



(b) União das garrafas cheias com enforcador plástico.



Fonte: A Autora (2021).

A investigação sobre o desempenho do telhado ecológico considerou três variações, Figura 16, chamadas de arranjo 1 (tapete refletivo com embalagens Tetra Pak + garrafas PET preenchidas com água), arranjo 2 (tapete refletivo com embalagens Tetra Pak + garrafas PET vazias) e arranjo 3 (tapete refletivo com embalagens Tetra Pak).

Figura 16 - Variações do telhado ecológico.

(a) Arranjo 1.



(b) Arranjo 2.



(c) Arranjo 3.



Fonte: A Autora (2021).

Sobre a laje da célula-teste 5 (CT5) foi implantado um telhado verde convencional considerando a disposição, nesta ordem, de manta geotêxtil Bidim, funcionando como camada filtrante e camada de drenagem, seguido por camada de substrato (em que foi considerada a composição recomendada para a vegetação selecionada) e, por fim, a camada de vegetação, em que foi adotada a vegetação suculenta *Kalanchoe laetiviren* (Figura 17).

Figura 17 - Telhado verde com vegetação *Kalanchoe laetiviren*, na célula-teste 5.



Fonte: A Autora (2021).

Para escolha da vegetação, no telhado verde, foram considerados os seguintes critérios: facilidade de manutenção e de adaptação, principalmente em altas temperaturas e em situação de escassez hídrica, facilidade de propagação de mudas, e possibilidade de retorno socioeconômico (ou seja, possibilidade de comercialização) para a comunidade de baixa renda.

4.4 Coleta de dados

4.4.1 Dados de temperatura ambiente externa

Visando analisar o desempenho térmico das coberturas investigadas, foram considerados os valores de temperatura externa disponibilizados no *site* do INMET (2021) da estação meteorológica de observação de superfície automática instalada no município de Recife, no bairro da Várzea (Recife A301). A referida estação coleta dados de temperatura ambiente externa, umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade dos ventos, e pressão atmosférica. Conforme os dados no INMET (2021), a velocidade do vento é medida na estação utilizando anemômetros instalados a 10 metros do solo. Para realização da análise proposta foram considerados as informações referentes aos meses de abril a junho de 2021.

4.4.2 Dados de temperatura ambiente interna e umidade relativa do ar

Os equipamentos utilizados para medição e coleta dos dados estão apresentados na Figura 18.

Figura 18 - Equipamentos utilizados para as medições no ambiente interno.

(a) *Sensor IP-747RH*



(b) *Escort iMINI MX-IN-S-8-L*

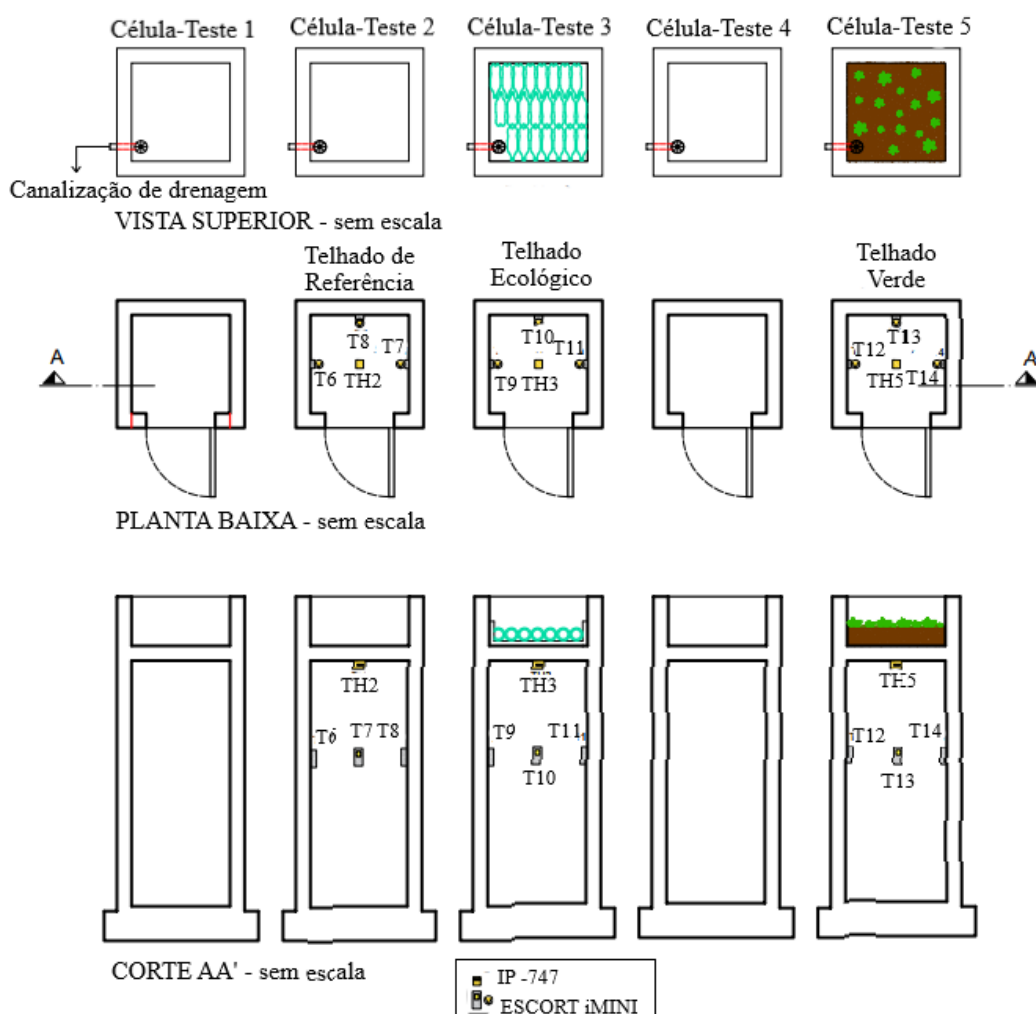


Fonte: A Autora (2021).

Utilizou-se um sensor de registro e armazenamento de dados IP-747RH que foi instalado no teto, dentro de cada protótipo, para a coleta dos dados de temperatura interna, e de umidade relativa do ar. Para os dados da temperatura ambiente próximo às superfícies das paredes foram utilizados três *Escort iMINI MX-IN-S-8-L* em cada protótipo, instalados a uma altura de 1,5 m em relação ao piso, o que está em consonância com as orientações estabelecidas na ISO 7726 (ABNT, 1998), Figura 19. A ISO 7726 estabelece as diretrizes para os instrumentos e métodos para a medição dos parâmetros físicos de ambientes. Na Tabela 8 estão apresentadas as características dos sensores IP-747RH e *Escort iMINI MX-IN-S-8-L*, que foram programados para registrar os dados de forma simultânea e instantânea.

Após a coleta dos dados referentes a cada mês, foi realizada a verificação da data e dos parâmetros de cada sensor sendo reajustados caso necessário, os parâmetros analisados foram o tempo de coleta, a data e o horário de início da coleta, o período de registro dos dados de temperatura e umidade, e as unidades dos dados coletados. Esse procedimento de verificação e ajuste do equipamento foi realizado antes do início de cada novo ciclo de medições.

Figura 19 - Disposição dos sensores nos protótipos na UETER.



Fonte: A Autora (2021).

Tabela 8 - Especificações dos sensores utilizados no ambiente interno dos protótipos.

Características	Sensor IP-747RH	Escort IMINI
Alcance	- 40°C até 70°C	- 40°C até 80°C
Precisão	±1°C (-10°C até 40°C)	±0,3°C (-10°C até 70°C)
Capacidade medições	32700 medições	7808 medições
Unidades de medição	°C ou °F	°C ou °F
Formato do relatório	XPS	PDF, TXT, CSV, e CVT
Conexão com o computador	USB	USB

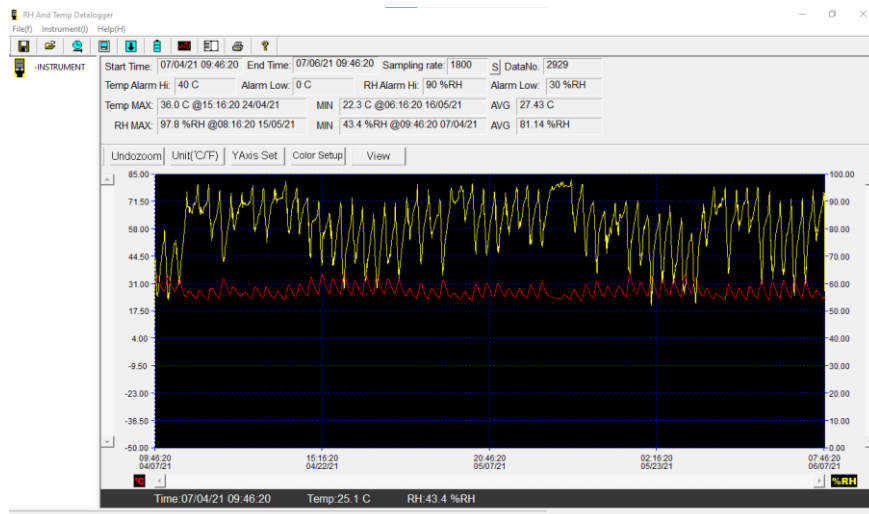
Fonte: Adaptado de Rocha (2020).

Para observação do funcionamento dos sensores, foi realizado um teste com os mesmos, que consistiu na troca dos equipamentos entre as paredes de uma mesma célula-teste, e com relação ao sensor do teto, entre as células-teste adjuntas. Esse procedimento foi realizado durante um período de 5 dias, em março de 2021, com registros de dados diários, Tabela A.1,

no Apêndice A. Ratificou-se a uniformidade dos dados registrados e os sensores foram configurados para, então, iniciar as coletas para registro instantâneo a cada 30 minutos.

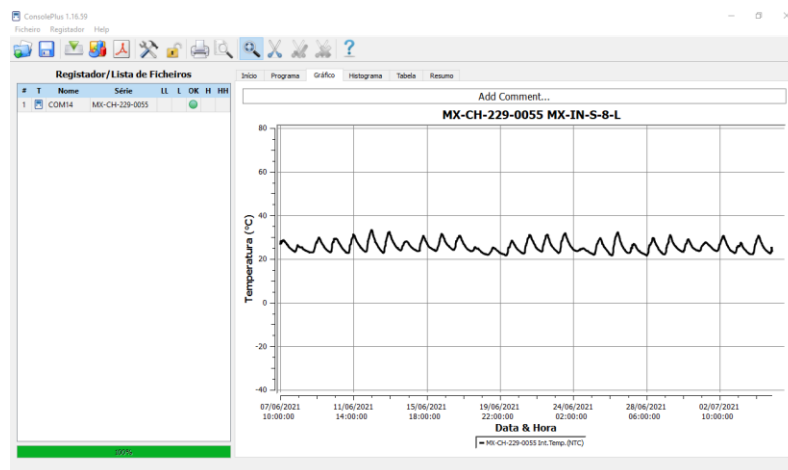
O descarregamento dos dados registrados e a programação dos sensores foi realizada com *softwares* específicos dos próprios instrumentos. No caso do *Sensor* IP-747RH, foi utilizado o *software* *Datalogger* (Figura 20), e para os dados do *Escort* iMINI MX-IN-S-8-L utilizou-se o *software* *ConsolePlus* (Figura 21).

Figura 20 - Interface do *software* *Datalogger*.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 21 - Interface do *software* *ConsolePlus*.



Fonte: A Autora (2021).

Os registros foram obtidos continuamente para os sensores instalados no interior do protótipo sem cobertura adicional sobre a laje e no interior do protótipo com telhado verde

convencional no período de 08 de abril de 2021 a 08 de julho de 2021, perfazendo um total de 3 meses de coleta. No caso do telhado ecológico, o registro ocorreu em diferentes períodos conforme o arranjo considerado, Tabela 9.

Tabela 9 - Arranjo, descrição e período de registro dos sensores internos.

Arranjo	Sistema	Período
1	Tapete refletivo* e garrafas PET preenchidas com água	Abril de 2021
2	Tapete refletivo* e garrafas PET vazias	Maio de 2021
3	Tapete refletivo*	Junho de 2021

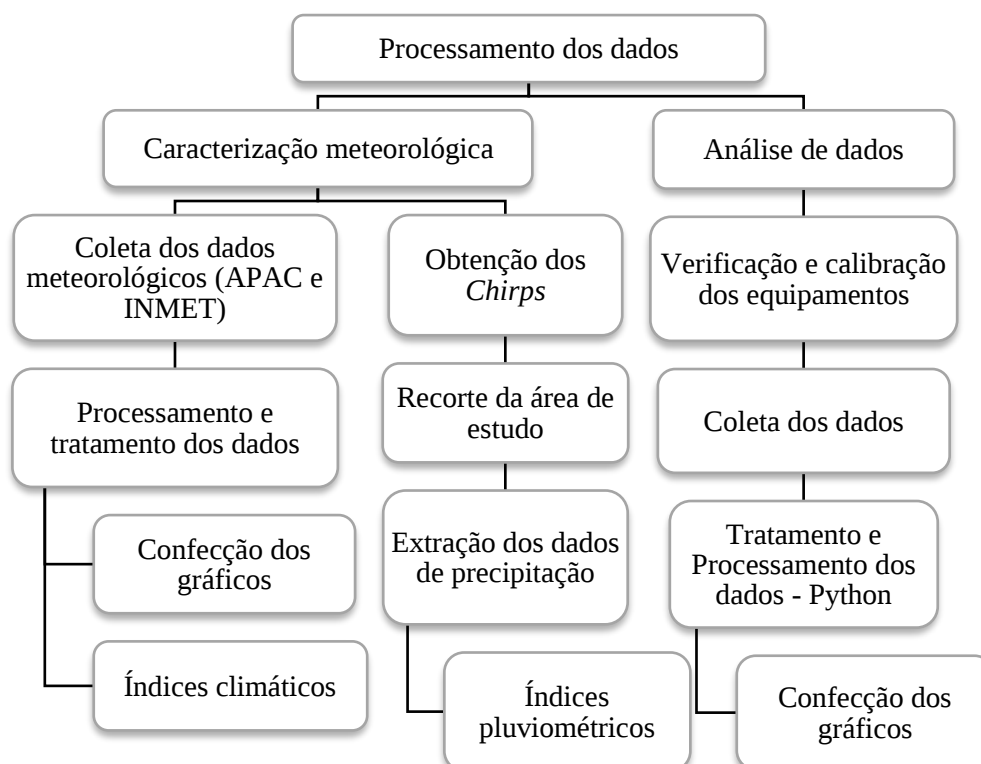
* Com Embalagens Tetra Pak.

Fonte: A Autora (2021).

4.5 Processamento dos dados

O processamento dos dados foi realizado conforme as etapas ilustradas no fluxograma da Figura 22.

Figura 22 - Fluxograma das etapas de análise.



Fonte: A Autora (2021).

Os dados coletados foram tratados e armazenados utilizando o *software Excel* versão 2016, em seguida, foi empregado o *software Jupyter Notebook* da plataforma *Anaconda Navigator*, para a execução de um código aplicando as bibliotecas *Pandas* e *Matplotlib* do *Python 3.0* para o processamento e confecção dos gráficos.

Os dados da temperatura ambiente externa foram utilizados na confecção de gráficos *BoxPlots*, *BarPlots* e *LinePlot*. Nos gráficos *BoxPlots* foram considerados os dados horários do período de análise, para confecção dos *BarPlots* utilizou-se os valores diários do período de análise e para a confecção do *LinePlot* considerou-se a média dos dados diários dos meses de análise. A partir da análise dos gráficos foi possível adotar critérios para seleção dos dias de análise. Assim sendo, os critérios adotados, para cada mês, foram: dia de maior temperatura externa; dia de maior amplitude de temperatura externa; dia de menor amplitude de temperatura externa; e dia de maior precipitação.

Após a seleção dos dias de análise, realizou-se o processamento dos dados de temperatura ambiente interna e umidade relativa do ar no *Jupyter notebook*, e os gráficos *Boxplots* e *Lineplots* foram confeccionados. Para a análise dos eventos externos de temperatura diária, utilizou-se o *software Excel* para a construção de tabelas com os dados de temperatura dos pontos de máxima temperatura e mínima temperatura diária, na tabela são verificados as temperaturas de máximas e mínimas externas e internas (em cada protótipo). Foram analisadas a diferença entre a temperatura em cada telhado e a temperatura externa, para obtenção do efeito de redução na temperatura ocasionado por cada cobertura, o cálculo foi feito aplicando a Equação 2. Os valores da temperatura ambiente interna nos protótipos utilizados no cálculo foram obtidos pelos dataloggers.

$$\Delta Temp = Temp_{\cdot Telhado} - Temp_{\cdot Externa} \quad (2)$$

Em que $Temp_{\cdot Externa}$ é a temperatura ambiente externa; $Temp_{\cdot Telhado}$ é a temperatura ambiente interna nos protótipos; e é $\Delta Temp$ a diferença entre as temperaturas, ou seja, o amortecimento causado com a implantação de camadas adicionais sobre a laje.

4.6 Análise de Variância

Conforme Leonardo *et al.* (2021), a ANOVA (Análise de Variância) é um método de análise estatística que consiste em comparar médias de um mesmo processo aplicado a diferentes tratamentos e indicar uma diferença ou semelhança significativa entre elas, se existir.

Os dados amostrais são separados em grupos segundo um fator (tratamento) e, inicialmente, são adotadas como possíveis duas hipóteses: a hipótese nula e a hipótese alternativa. A hipótese nula admite que as médias dos grupos são estatisticamente iguais e não sofreram influência do fator. Já a hipótese alternativa, afirma que nem todas as médias dos grupos são iguais, ou seja, existe pelo menos um grupo de média diferente das demais e que existe influência do fator.

Utilizou-se *software* Excel versão 2016 para a realização da análise de variância, foi aplicada a ANOVA fator único. Foi selecionado uma significância (α) de 0,05, indicando que há um risco de 5% de concluir que existe uma diferença entre os dados analisados quando não há diferença real. Realizou-se a comparação dos dados obtidos dos sensores (teto e parede) dos três protótipos investigados, com Telhado Verde, Telhado Ecológico e Telhado de Referência). Foram geradas tabelas com os resultados da ANOVA fator único para cada dia estudado, a análise gera como resultados a média dos valores de temperatura interna de cada sensor, o grau de liberdade da análise por grupo, sendo cada grupo composto por uma cobertura diferente (Telhado Verde, Telhado Ecológico, Telhado de Referência), a variância entre os dados, o valor-P, e o valor de F.

O valor-P, é utilizado para comparação da veracidade da hipótese adotada, sendo a probabilidade de obter um efeito extremo semelhante ou maior ao dos dados amostrais, utilizado em comparação com a significância adotada. Para análise dos valores gerados pela ANOVA, são adotadas duas hipóteses (Equações 4 e 5), que comparam os valores de F (observado e crítico), e o valor-P com a significância adotada, a partir das comparações obtém-se como resultado a aceitação de uma das hipóteses, a fim de indicar se há a semelhança na variação das amostras com relação ao conforto térmico.

$$H_0: \text{valor-P} > \alpha \text{ e } F_{\text{observados}} < F_{\text{crítico}}, \text{ indica que há semelhança} \quad (3)$$

$$H_1: \text{valor-P} < \alpha \text{ e } F_{\text{observados}} > F_{\text{crítico}}, \text{ indica que não há semelhança} \quad (4)$$

A hipótese nula, uma vez que validada, implica que o desempenho energético dos telhados verdes e do telhado convencional em estudo é similar, não havendo diferenças significativas entre eles. Enquanto a hipótese alternativa é verdadeira quando há uma desigualdade relevante entre os desempenhos do telhado verde e do telhado ecológico em comparação ao do telhado de referência.

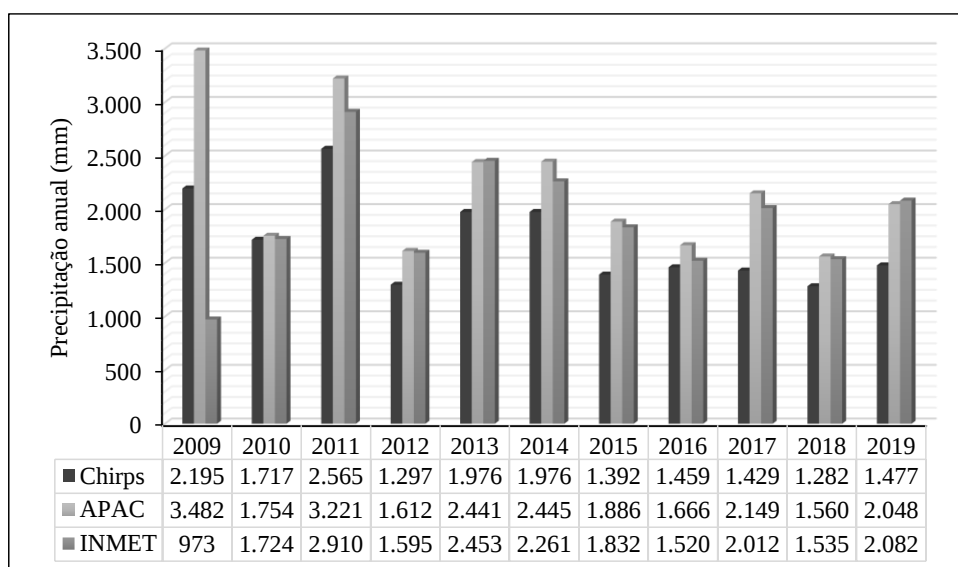
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abordou-se os resultados e discussões em três principais subtópicos: Caracterização meteorológica local, dados meteorológicos externos, dados internos aos ambientes.

5.1 Caracterização meteorológica local

Os valores de precipitação acumulada anual de 2009 a 2019 para as três séries de dados (*Chirps*, APAC e INMET) estão apresentados na Figura 23.

Figura 23 - Precipitação pluviométrica acumulada anual, entre 2009 e 2019.



Fonte: A Autora (2021).

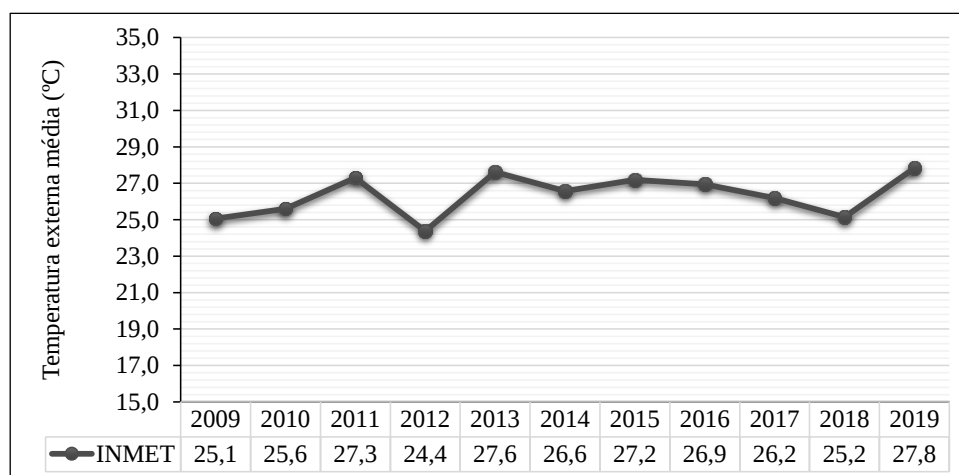
Observou-se que os valores de precipitação acumulada anual variaram de 973 mm (referente ao ano de 2009, coletado pelo INMET), até 3482 mm (referente ao ano de 2009, coletado pela APAC). Sobre a discrepância entre os valores máximo e mínimo observados para o mesmo ano, isso pode ser considerado pois os dados coletados no banco de dados do INMET apresentavam falhas no ano de 2009, ocasionando na redução do valor da precipitação anual para esse período.

A diferença entre os valores das três séries para o mesmo ano, excluindo-se os dados do INMET no ano de 2009, variou de 7 mm (dados do *Chirps* e do INMET no ano de 2010) até 720 mm (dados do *Chirps* e da APAC no ano de 2017). Além dos valores de precipitação, também foram analisados dados de radiação, de temperatura ambiente externa média, de velocidade do vento e de umidade relativa do ar dos anos de 2009 a 2019.

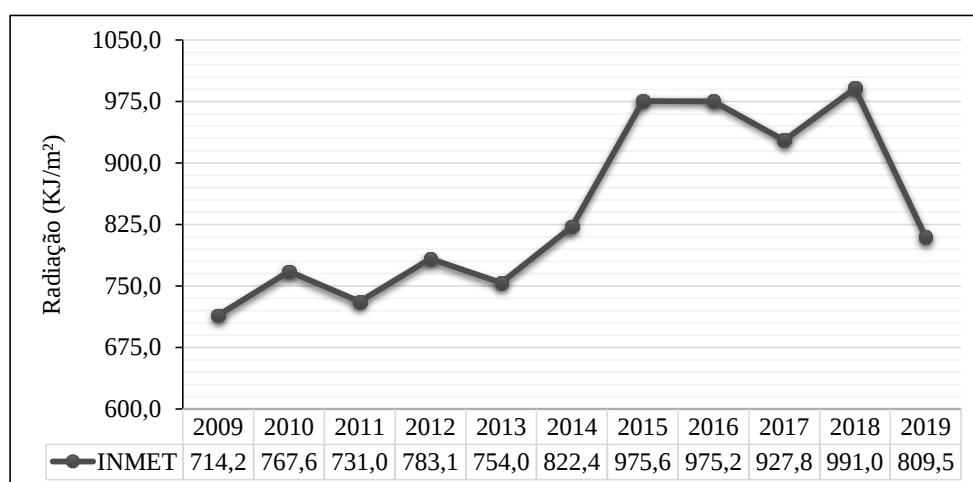
Utilizou-se os dados de temperatura ambiente externa média e radiação para a confecção dos gráficos da Figura 24. Moura *et al.* (2012) afirmaram que para a cidade do Recife, utilizando a classificação de Köppen, o clima local enquadra-se no tipo As', denominado tropical quente úmido com temperatura anual média de 25,4 °C, precipitação média anual de 2.145 mm, com chuvas concentradas nas estações de outono e inverno, de acordo com dados de 1994 a 2007. Durante o período investigado, a temperatura média anual variou de 24,4°C (em 2012) a 27,8°C (em 2019), sendo a média das temperaturas médias anuais de 26,4°C. No que se refere à radiação, os valores variaram de 714,2 KJ/m² (em 2009) a 991,0 KJ/m² (em 2018), com valor médio no período de 841,0 KJ/m².

Figura 24 - Dados climatológicos da cidade de Recife entre 2009 e 2019.

(a) Temperatura externa média anual.



(b) Radiação média anual.

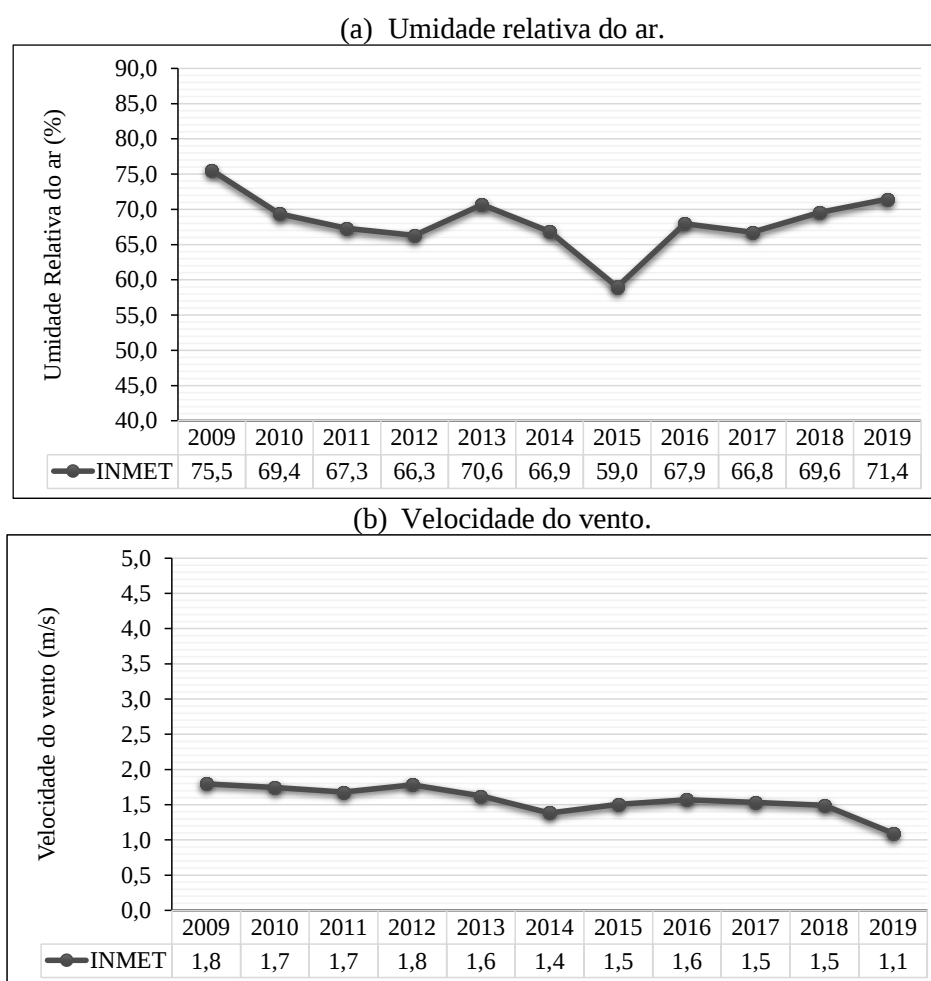


Fonte: A Autora (2021).

Foram utilizados dados médios anuais de velocidade do vento e umidade relativa do ar para a confecção dos gráficos da Figura 25. De forma geral, observa-se redução da umidade relativa do ar e da velocidade do vento ao longo dos anos. Conforme Nóbrega e Vital (2010), esse fator é ocasionado pela distribuição da verticalização urbana. Os autores afirmam que as formas geométricas irregulares dos edifícios afetam os padrões de radiação solar e de ventos, as edificações atuam como labirintos para a radiação solar, aumentando a eficácia do aquecimento. Os autores também afirmam que os edifícios interrompem os fluxos de vento diminuindo, assim, a perda de calor por resfriamento advectivo e, em média, os ventos perdem 25% de sua velocidade ao atravessar uma área urbana.

Durante o período investigado, a umidade relativa do ar anual variou de 59% (em 2015) a 75,5% (em 2009), sendo a média das umidades relativas anuais de 68,2%. No que se refere à velocidade do vento, os valores variaram de 1,1 m/s (em 2019) a 1,8 m/s (em 2009 e em 2012), com valor médio no período de 1,6 m/s.

Figura 25 - Dados climatológicos da cidade de Recife entre 2009 e 2019.

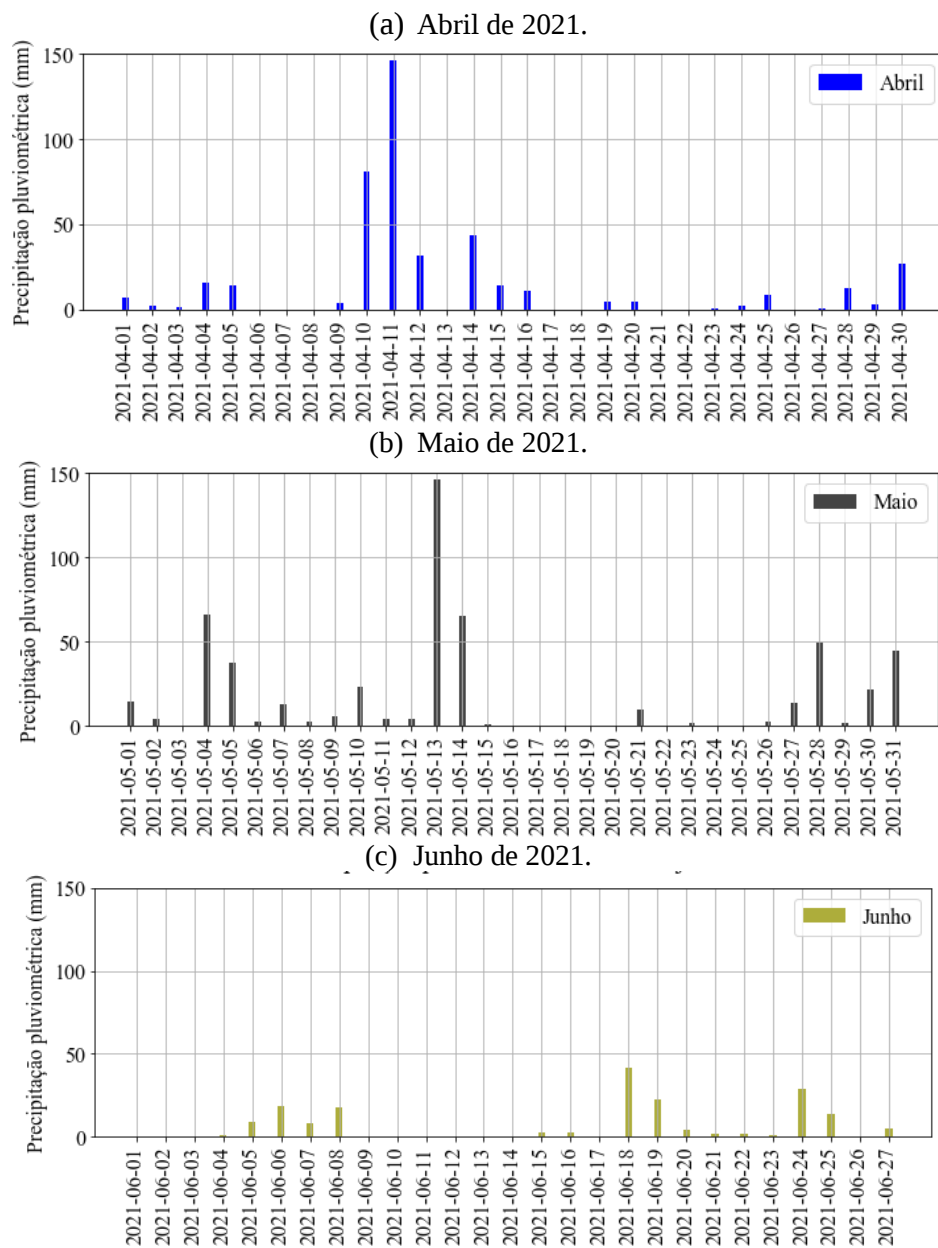


Fonte: A Autora (2021).

5.2 Dados meteorológicos externos

A caracterização meteorológica da área de estudo, no período de análise, foi realizada utilizando como variáveis externas a precipitação, a radiação, a temperatura ambiente externa, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento. Na Figura 26 apresenta-se os *BarPlots* com os dados diários de precipitação pluviométrica nos meses de abril, maio e junho de 2021.

Figura 26 - Precipitação diária no período de estudo.



Fonte: A Autora (2021).

O mês de maior precipitação pluviométrica do período de análise foi o mês de maio, com um total de 533,6 mm precipitados, em sequência, o mês de abril com 437,2 mm precipitados, e o mês de junho caracterizou-se por apresentar a menor quantidade de precipitação, de 182,8 mm.

A descrição estatística dos dados de precipitação pluviométrica dos meses analisados está apresentada na Tabela 10. As médias das amostras são características dos totais apresentados, com a maior média sendo apresentada pelo mês de maio. Evidencia-se que apesar do mês de maio apresentar uma precipitação pluviométrica mensal 96,4 mm superior ao mês de abril, a máxima precipitação diária ocorrida foi a mesma nos dois meses, no valor de 146,4 mm, ocorrida nos dias 11 de abril e 13 de maio.

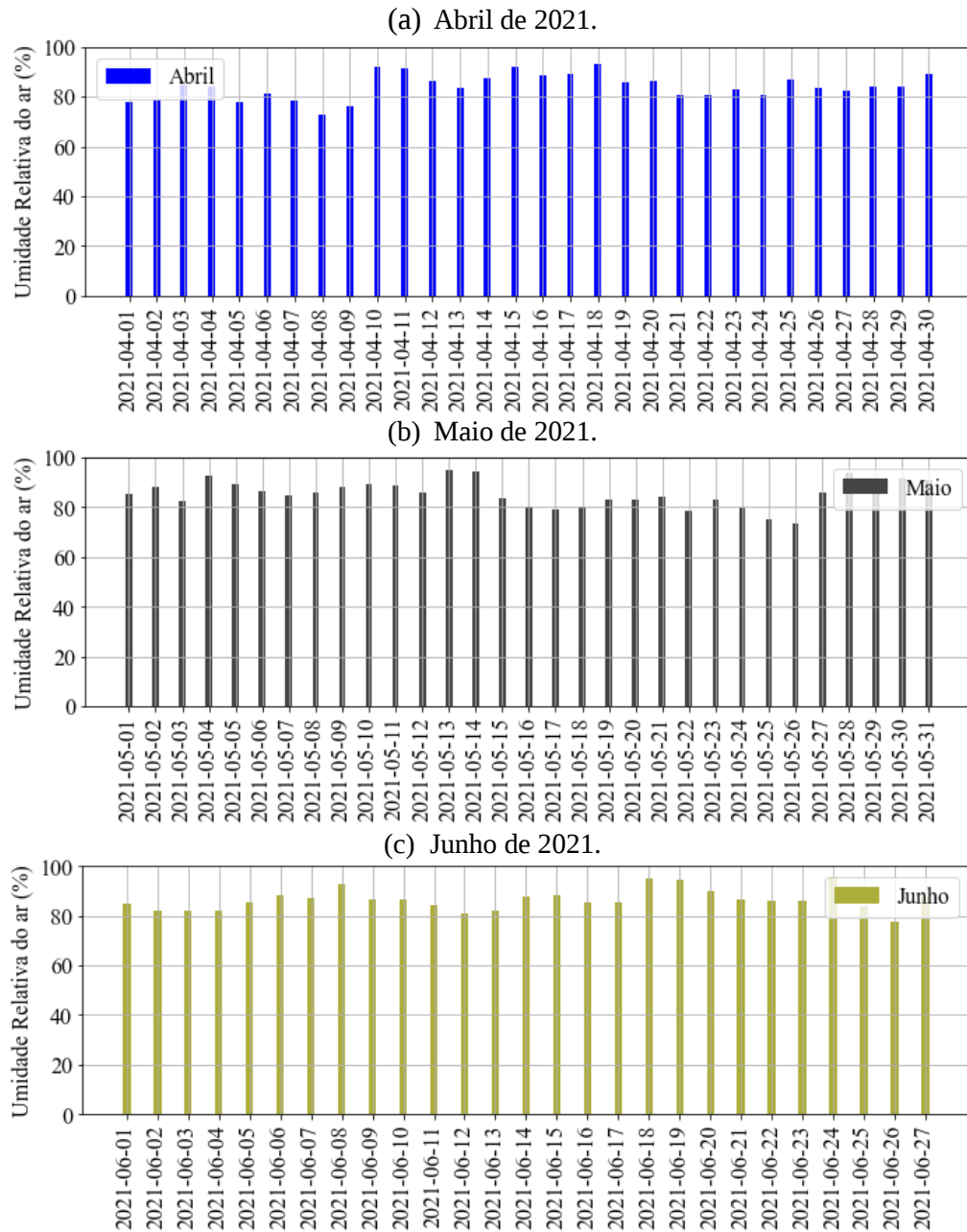
Tabela 10 - Descrição estatística da precipitação no período de estudo.

Mês	Média diária (mm)	Desvio padrão (mm)	Máxima precipitação (mm)	Mínima precipitação (mm)
Abril	14,57	30,17	146,4	0,00
Maio	17,21	30,78	146,4	0,00
Junho	6,77	10,49	41,2	0,00

Fonte: A Autora (2021).

Na Figura 27 apresenta-se a umidade relativa do ar diária nos três meses de análise. A precipitação e a temperatura estão relacionadas com a umidade relativa do ar, que, por sua vez, está associada ao número de partículas de vapor de água presentes na atmosfera, quanto maior for esse número, menor será a amplitude de variação térmica da temperatura e maiores as probabilidades de ocorrência de eventos chuvosos. O mês de junho apresenta a maior média mensal do período de análise (Tabela 11), e o menor desvio padrão, caracterizando que, no período de análise, o mês de junho apresenta a maior homogeneidade amostral, ou seja, os valores de umidades diárias apresentam a menor dispersão do valor médio diário no mês.

Figura 27 - Umidade relativa do ar diária no período de estudo.



Fonte: A Autora (2021).

Tabela 11 - Descrição estatística da umidade relativa do ar média mensal.

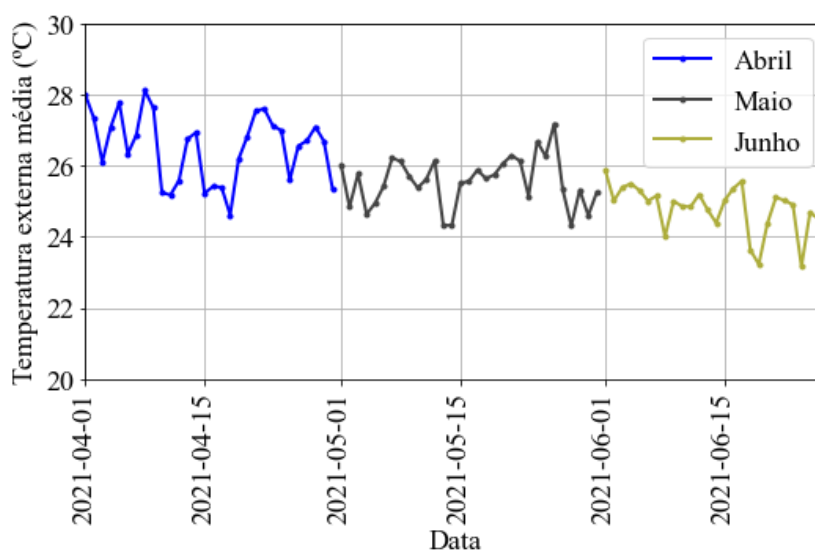
Mês	Média diário (%)	Desvio Padrão (%)	Umidade Relativa (%)	
			Máxima	Mínima
Abril	84,04	5,021	92,92	72,79
Maio	85,41	5,332	94,67	73,67
Junho	86,48	4,325	95,62	77,46

Fonte: A Autora (2021).

Um estudo comparativo entre a temperatura e umidade relativa de quatro bairros da cidade do Recife nos anos de 2015 e 2016 foi realizado por Mendes *et al.* (2018), os autores destacaram que a umidade relativa do ar se mostrou elevada no bairro da Cidade Universitária (UFPE), local de realização da pesquisa, com valores máximos de 80,2% em outubro de 2015 e 83,5% em fevereiro de 2016 no horário das 06:00 horas da manhã. Tal característica provavelmente ocorre devido ao fato do local ser uma zona próxima a uma área de reserva de mata atlântica, justificando a variação desta variável meteorológica.

Utilizou-se as temperaturas médias diárias para a composição do *LinePlot* da Figura 28, e foi observado que há uma redução da temperatura externa média no decorrer do período de análise, com os menores valores de temperatura sendo observados no mês de junho, fator condizente com o aumento evidenciado na umidade relativa do ar, corroborando com a premissa destacada anteriormente.

Figura 28 - Temperatura externa média no período de estudo.



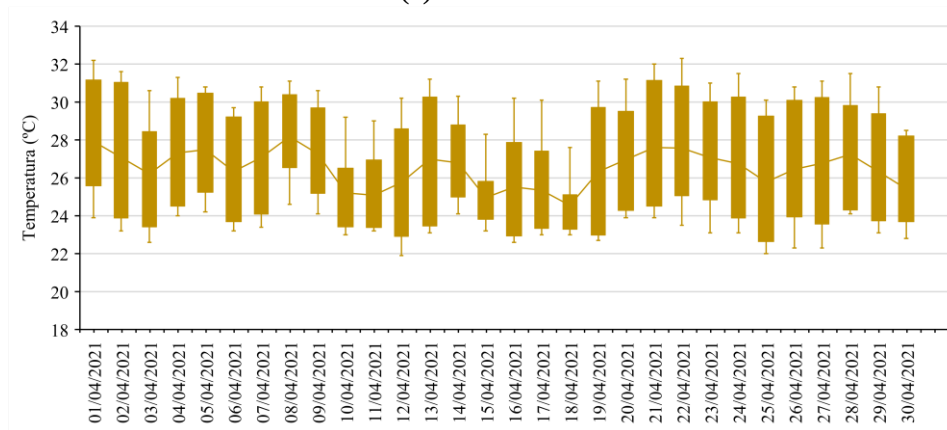
Fonte: A Autora (2021).

Com os dados horários de temperatura ambiente externa confeccionou-se gráficos *BoxPlots* para cada mês (Figura 29), com a finalidade de observar a variação da temperatura ao longo do dia, e identificar os dias de eventos extremos. Evidenciou-se que os dias 14 de maio e 28 de junho, apresentam alguns valores muito distanciados do conjunto dos dados denominados como “outliers”. Conforme observado por Rocha (2020), esse desvio evidenciado pelos “outliers” é possivelmente originado por uma anomalia climática.

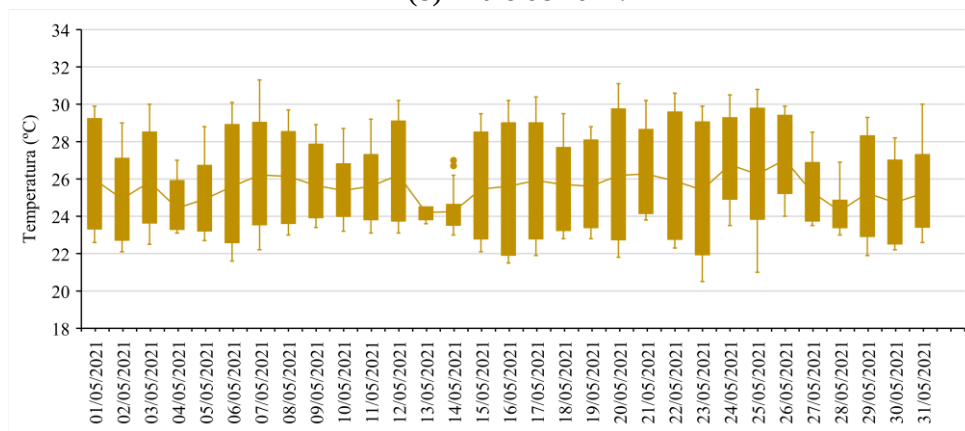
De acordo com o observado na análise das médias horárias mensal, o mês de abril apresenta as temperaturas externas horárias mais altas, atingindo até 32,3°C. Entretanto, na análise da amplitude da temperatura ao longo do dia, ou seja, avaliação da amplitude térmica diária, o mês de maio destaca-se, apresentando uma diferença de 9,8°C entre a máxima e a mínima temperatura ambiente externa do dia.

Figura 29 - Temperatura externa horária para os dias no período de estudo.

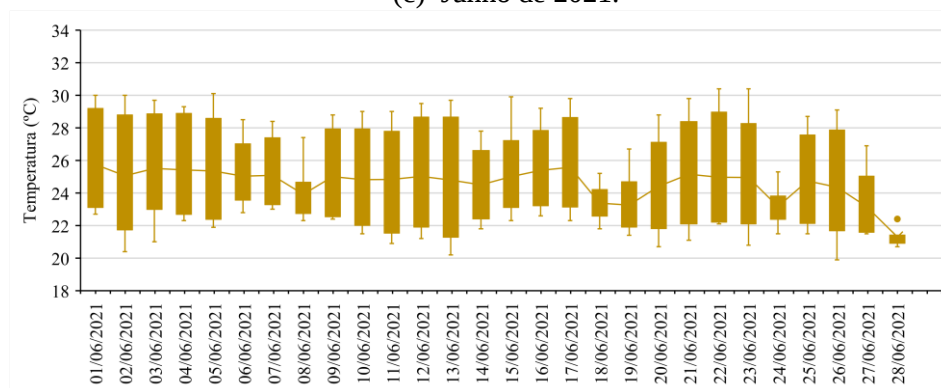
(a) Abril de 2021.



(b) Maio de 2021.



(c) Junho de 2021.



Fonte: A Autora (2021).

Com os *BoxPlots* foram selecionados os dias a serem analisados, com base nos critérios anteriormente descritos. Na Tabela 12 estão detalhados os dias selecionados, bem como o critério adotado para cada dia.

Tabela 12 - Dias selecionados para análise, ano 2021.

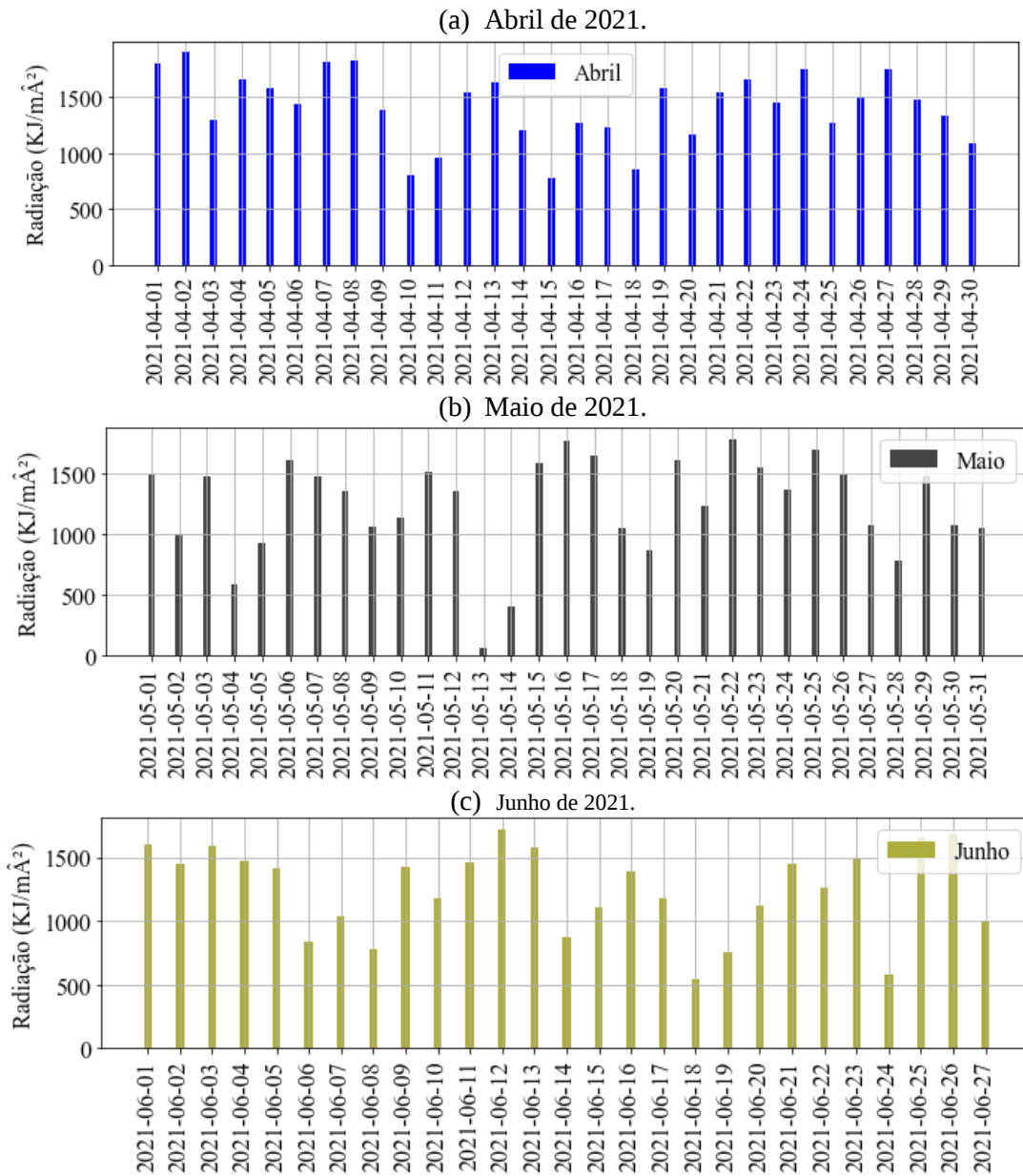
Dia	Critério
22/04	Maior temperatura* do mês de Abril (32,3°C)
27/04	Maior amplitude de temperatura* do mês de Abril (8,8°C)
15/04	Menor amplitude de temperatura* do mês de Abril (5,1°C)
11/04	Maior precipitação do mês de Abril (146,4 mm)
20/05	Maior temperatura* do mês de Maio (31,1°C)
25/05	Maior amplitude de temperatura* do mês de Maio (9,8°C)
13/05	Maior precipitação do mês de Maio (146,4 mm) e menor amplitude de temperatura* (0,9°C)
23/06	Maior temperatura* do mês de Junho (30,4°C)
13/06	Maior amplitude de temperatura* do mês de Junho (9,5°C)
18/06	Maior precipitação do mês de Junho (41,2 mm) e menor amplitude de temperatura* (3,4°C)

* Externa.

Fonte: A Autora (2021).

De acordo Palmeira (2016), a variação térmica é resultante direta da radiação solar, porém sofre influência de diversos fatores como a umidade relativa do ar e a velocidade do vento. Em conformidade com Sena (2012), a variação da temperatura em superfícies durante o dia tem relação direta com a radiação solar incidente nas superfícies, durante o dia a incidência direta da radiação eleva a temperatura da superfície, durante a noite a superfície tende a perder energia ficando relativamente mais fria. A variação da radiação solar média diária ao longo dos meses está apresentada na Figura 30, em que se observa que o mês de maior incidência de radiação solar do período de análise foi o mês de abril, corroborando com as altas temperaturas externas verificadas.

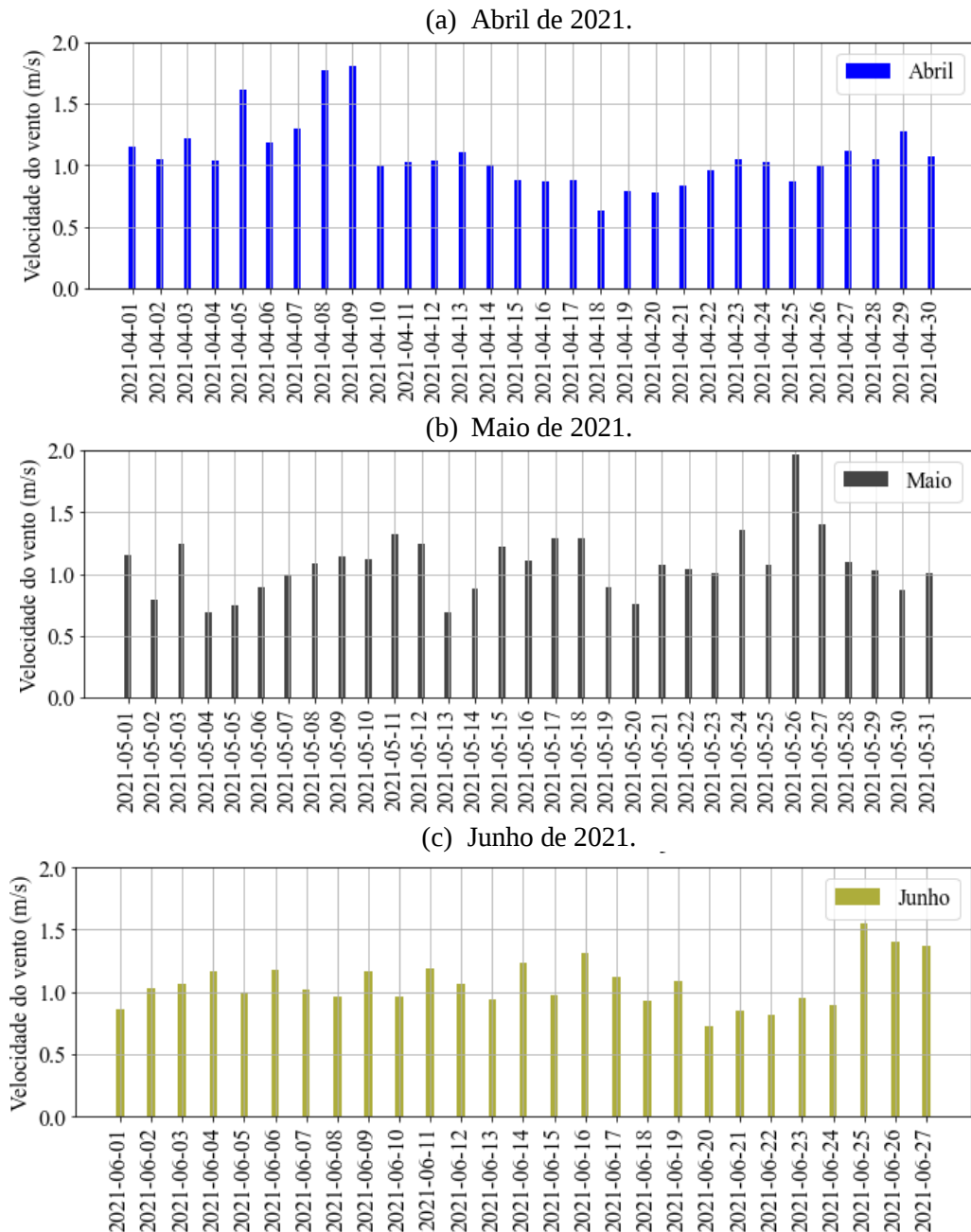
Figura 30 - Radiação média diária no período de estudo.



Fonte: A Autora (2021).

Na Figura 31 observou-se a variação diária da velocidade do vento ao longo dos meses de estudo. De acordo com Gaffin *et al.* (2011), o as trocas de calor são influenciadas pela velocidade do vento quando esta for superior a 1,75 m/s. Evidencia-se que na maior parte dos dias do período de análise a velocidade do vento apresenta valores superiores a 1,00 m/s, e valores próximos a 2,00 m/s nos dias 09 de abril e 26 de maio.

Figura 31 - Velocidade do vento média diária no período de estudo.



Fonte: A Autora (2021).

5.3 Dados internos aos ambientes

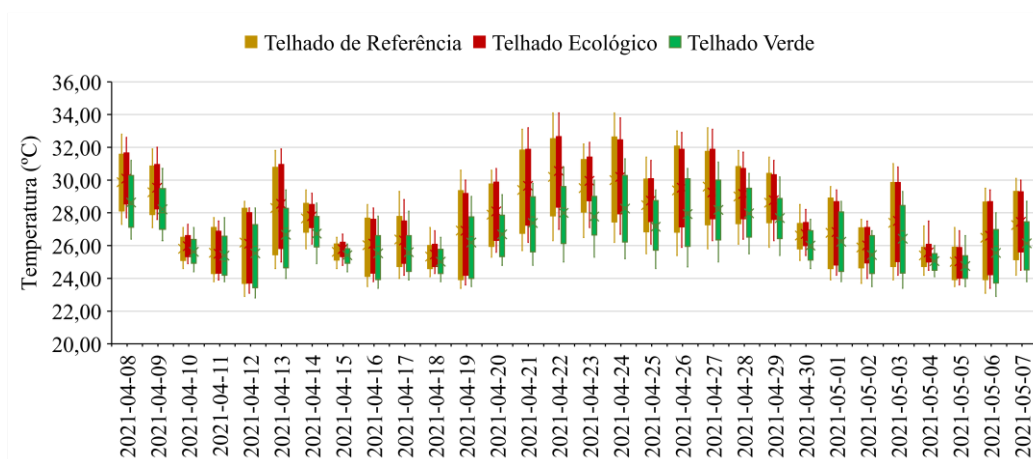
5.3.1 Análise dos dados internos diários

A comparação do desempenho térmico das coberturas foi realizada utilizando os dados horários da temperatura ambiente interna, temperatura externa, radiação e precipitação. A relevância na análise desse elemento estrutural se dá pelo fato de serem os elementos que sofrem maior interferência das amplitudes térmicas, conforme Givoni (1976), devido à

exposição aos efeitos climáticos. Segundo o autor, o impacto da radiação solar, as perdas pelo calor, e as chuvas têm maior influência sobre as coberturas ocasionando maiores impactos de variações de temperaturas no interior dos ambientes.

Nas Figuras 32, 33 e 34 são apresentados os dados de temperatura ambiente interna registrados pelos sensores do teto dos protótipos para cada cobertura.

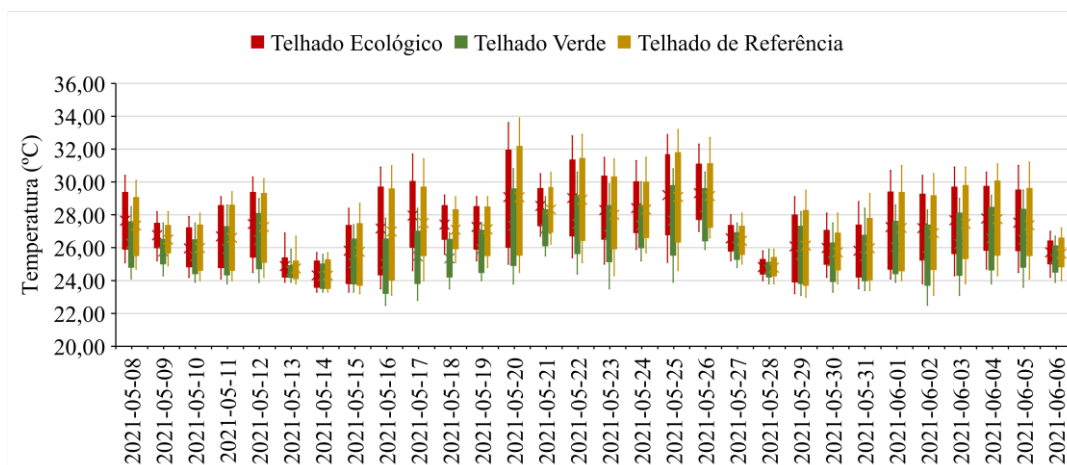
Figura 32 - Temperatura interna nos protótipos no mês de abril.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 1.

Fonte: A Autora (2021).

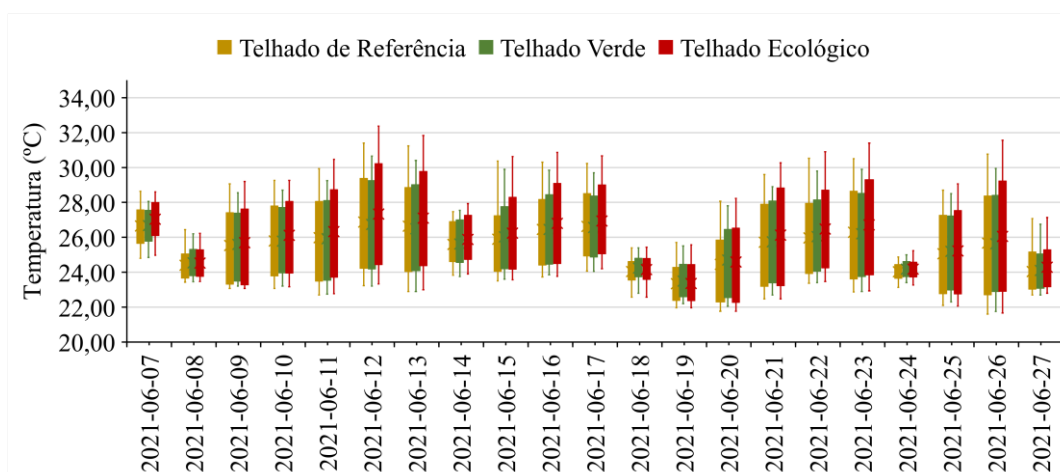
Figura 33 - Temperatura interna nos protótipos no mês de maio.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 2.

Fonte: A Autora (2021).

Figura 34 - Temperatura interna nos protótipos no mês de junho.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 3.

Fonte: A Autora (2021).

A análise dos *BoxPlot* possibilita uma maior compreensão da variação das amostras de dados horários, verificando a comparação entre as amplitudes de variação térmica de cada cobertura diariamente, e identificando a variação de cada cobertura. Evidenciou-se que as medianas dos conjuntos apresentam valores próximos. Nos meses de abril e maio, o conjunto com maior valor de mediana é o composto pelos dados de temperatura registrados na cobertura convencional, seguido pelo telhado ecológico (arranjos 1 e 2) e por último pelo telhado verde. Nesse período o telhado de referência apresentou os maiores valores de temperatura máxima, chegando a atingir 34°C.

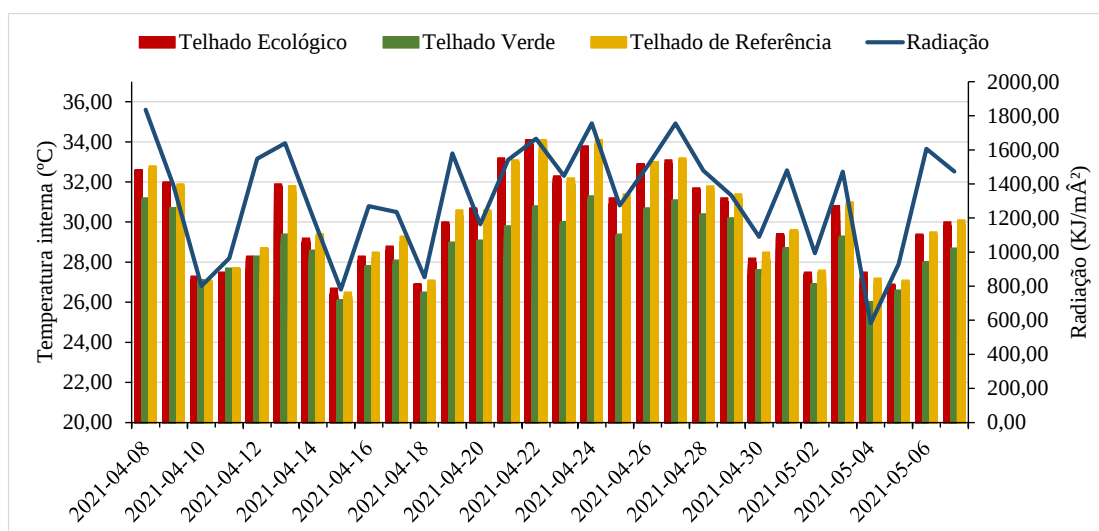
A cobertura de telhado verde destacou-se por apresentar as menores temperatura no interior do ambiente, no dia 24 de abril o telhado de referência atingiu uma temperatura máxima de 34,10°C enquanto para o mesmo horário a temperatura no telhado ecológico era de 33,80° e no telhado verde de 31,20°C, apresentando também a menor variação nos valores durante o dia para ambos os meses, no dia 21 de abril a amplitude térmica no telhado verde foi de 5,0°C e enquanto a do telhado ecológico foi 7,0 °C e a do telhado de referência foi 7,4°C. Para o mês de junho, pode-se observar que as medianas dos conjuntos apresentam uma variação diferente dos meses anteriores, de maneira que os maiores valores de mediana são registrados no telhado ecológico (27°C para os dias mais quentes), seguido pelo telhado convencional e por fim o telhado de verde.

Sendo assim, a análise comparativa dos 3 arranjos dos telhados ecológicos com as outras coberturas ressaltou que a variação térmica dos telhados ecológicos foram semelhantes nos meses abril, maio e junho.

A principal funcionalidade dos telhados nas edificações é a proteção do ambiente interno contra as intempéries externas, de maneira que a compreensão de como a temperatura interna é afetada devido aos parâmetros meteorológicos externos é de grande relevância.

Nas Figuras 35, 36 e 37 pode-se observar a comparação entre a temperatura ambiente em cada cobertura com média diária da radiação solar em cada mês. São evidenciadas as temperaturas máximas nos dias de maior incidência da radiação solar nos três meses. O mês com incidência da radiação em valores mais altos, foi o mês de abril, especificamente no dia 08 de abril que atingiu $1835,17 \text{ KJ/m}^2$. Observou-se que no dia em que o telhado de referência atingiu a temperatura máxima de 34°C a radiação solar média foi de $1755,5 \text{ KJ/m}^2$.

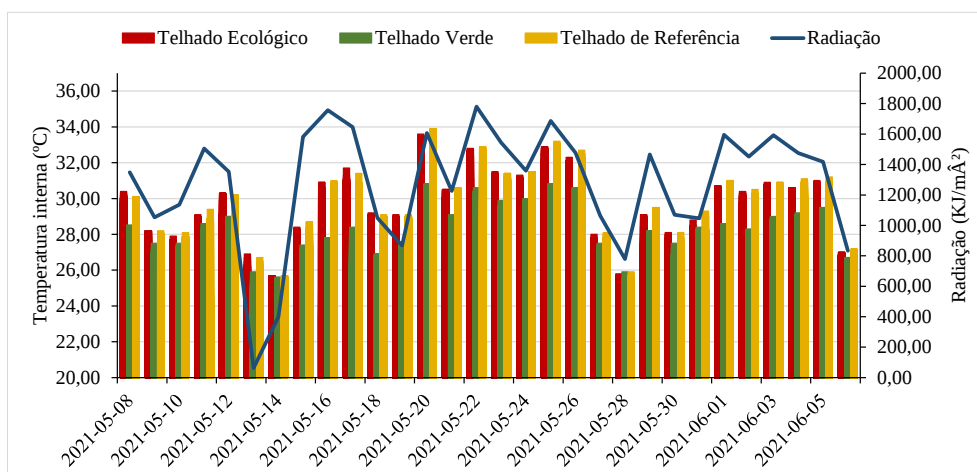
Figura 35 - Comparação da temperatura interna e da radiação no mês de abril.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 1.

Fonte: A Autora (2021).

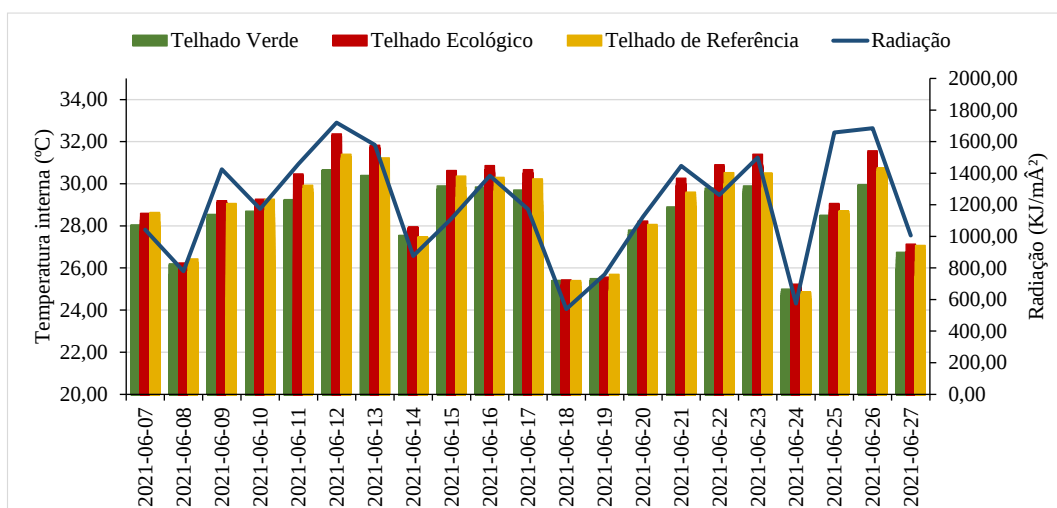
Figura 36 - Comparação da temperatura interna e da radiação no mês de maio.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 2.

Fonte: A Autora (2021).

Figura 37 - Comparação da temperatura interna e da radiação no mês de junho.



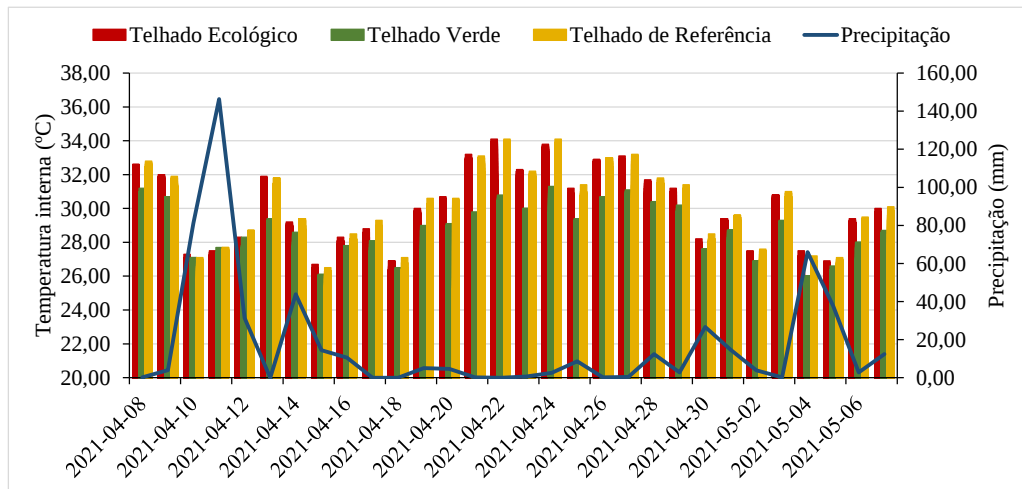
Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 3.

Fonte: A Autora (2021).

A análise dos gráficos sugere a influência da radiação sobre a temperatura registrada em cada ambiente, uma vez que há redução da temperatura interna em dias de menor incidência de radiação solar. A cobertura que apresentou os menores valores de temperatura nos três meses foi o telhado verde. Além da radiação, outro parâmetro climático de relevante impacto na temperatura é a precipitação pluviométrica.

As Figuras 38, 39, 40 detalham a análise comparativa entre os eventos chuvosos ocorridos e a variação de temperatura diária em cada mês. O mês com maior ocorrência de precipitação foi o mês de abril, observa-se que nos dias em que ocorrem eventos chuvosos há uma redução da temperatura ambiente interna.

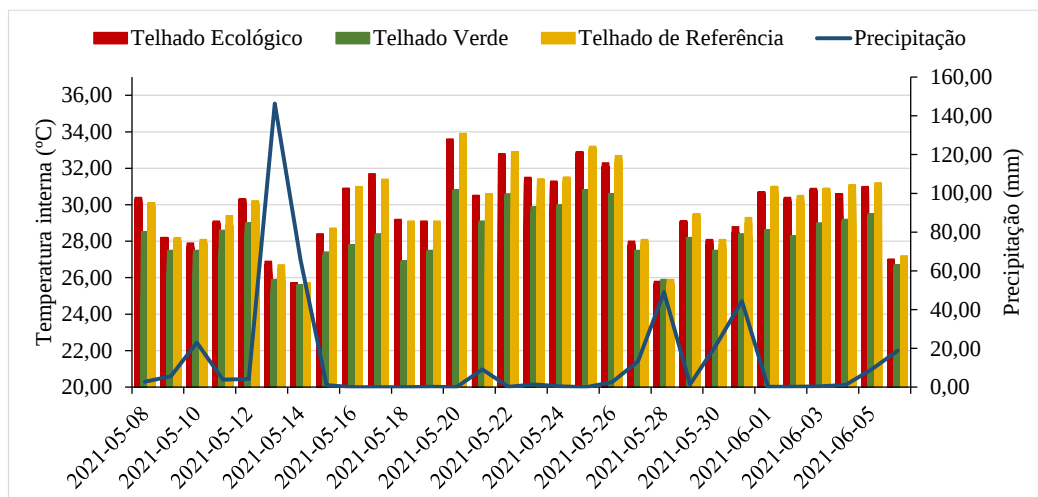
Figura 38 - Comparação da temperatura interna e da precipitação no mês de abril.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 1.

Fonte: A Autora (2021).

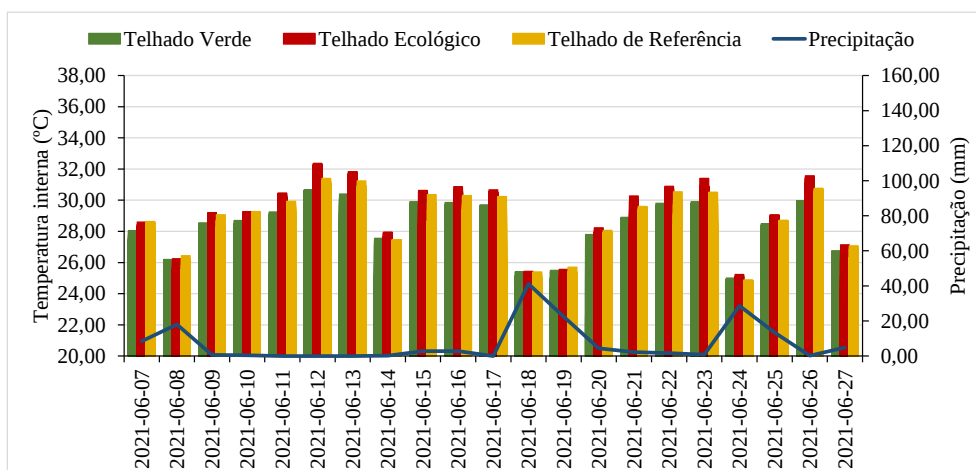
Figura 39 - Comparação da temperatura interna e da precipitação no mês de maio.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 2.

Fonte: A Autora (2021).

Figura 40 - Comparação da temperatura interna e da precipitação no mês de junho.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 3.

Fonte: A Autora (2021).

Para os meses de abril, maio e junho a redução de temperatura é mais evidenciada no telhado verde, observa-se que nos dias 11 de abril e 13 de maio há uma precipitação acumulada de 146,4 mm, nesses dias as temperaturas máximas registradas no telhado verde foram de 27,10°C e 25,70°C, respectivamente.

5.3.2 Análise dos dados horários

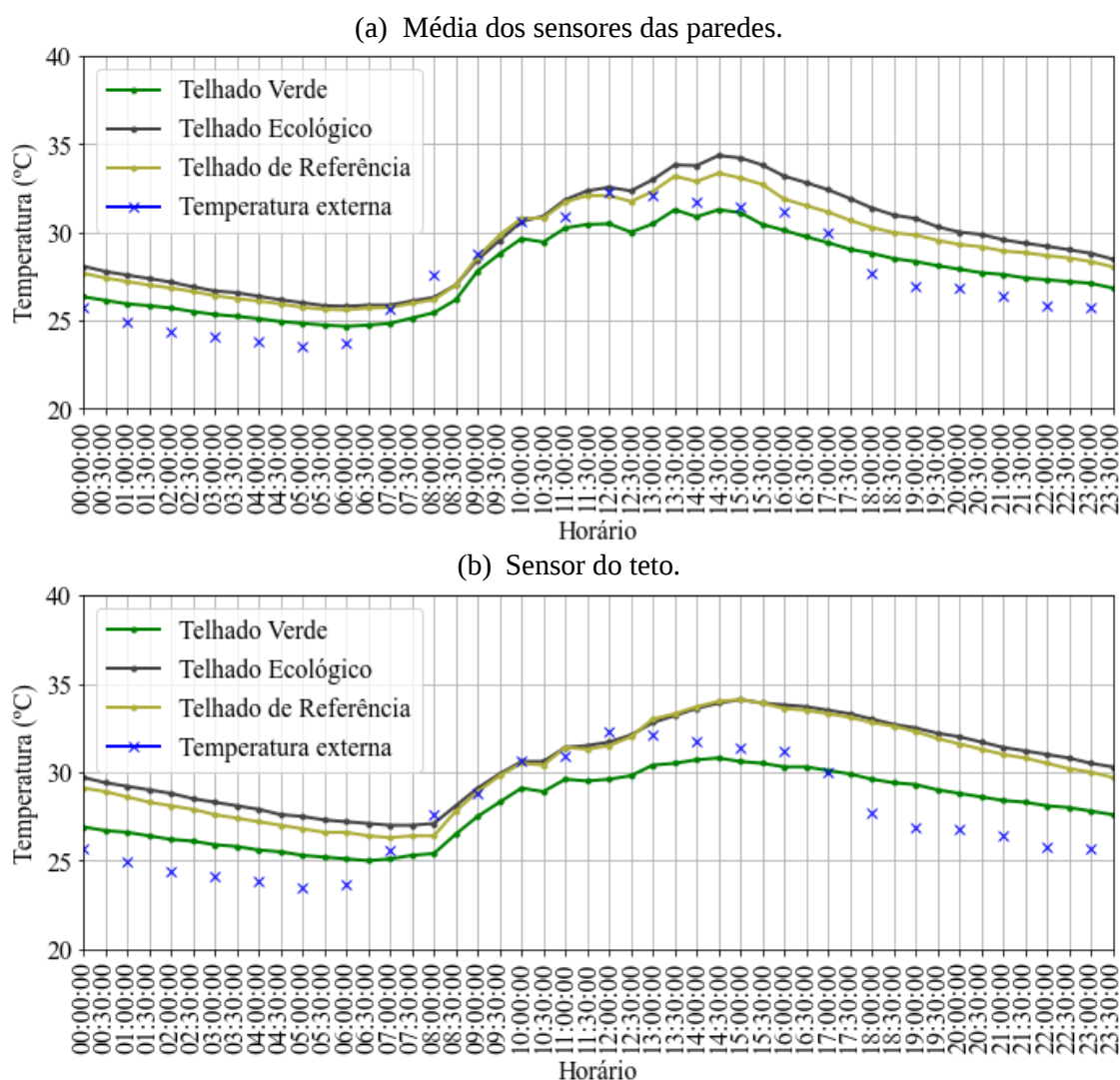
A análise comparativa dos dados internos de temperatura foi separada com base nos critérios de seleção de eventos extremos evidenciados. De maneira que se analisou a variação térmica dos telhados para cada dia específico, separando-se os dias correspondentes ao mesmo critério em cada mês, com a finalidade de avaliar o desempenho térmico de cada telhado ecológico executado em comparação com os telhados verde e de referência.

5.3.2.1 Dias de maior temperatura ambiente externa

Para analisar a influência de cada cobertura no desempenho térmico dos protótipos executados, foram construídos os *LinePlots* com os dados de temperatura ambiente interna média e externa para os dias de maior temperatura externa de cada mês. Os dados de temperatura interna média foram obtidos a partir da média aritmética dos dados registrados pelos sensores das paredes de cada ambiente. Os dados de temperatura interna foram registrados simultaneamente a cada 30 minutos, e os dados de temperatura externa foram registrados por hora, sendo comparados individualmente os dados de cada cobertura.

Como ressaltado anteriormente, as coberturas sofrem fortes influências dos efeitos meteorológicos externos, estando sujeitas às variações térmicas. Entretanto, não se pode descartar a influência das trocas térmicas ocorridas entre o ambiente interno e a área externa das edificações através das paredes, sendo assim, optou-se por analisar de forma comparativa a variação de temperatura registrada pelos sensores localizados nas paredes dos protótipos em comparação com as registradas pelos sensores localizados no teto de cada ambiente. Apresenta-se na Figura 41, os dados de temperatura interna e externa para o dia de maior temperatura do mês de abril.

Figura 41 - Temperatura interna e externa no dia 22 de abril.



Uma das principais problemáticas das construções convencionais são as elevadas temperaturas superficiais atingidas devido à exposição à radiação solar, segundo Mascaró *et al.* (1992). Nesse contexto, Machado, Brito e Neila (2003) afirmam que as temperaturas internas das edificações atingem um grau elevado no período diurno e perdem calor mais rapidamente durante a noite devido à radiação.

No mês de abril, o telhado ecológico executado era o arranjo 1 (tapete refletivo com Tetra Pak sobreposto por garrafas PET preenchidas com água). Evidencia-se que as curvas térmicas das três coberturas apresentam uma variação semelhante ao se comparar os dados coletados pelos *dataloggers* instalados nas paredes com os dados dos termohigrômetros localizados no teto. De maneira geral o telhado verde apresentou valores de temperatura abaixo das outras coberturas, enquanto o telhado ecológico (arranjo 1) apresentou valores próximos aos da cobertura convencional. Os dados registrados pelos sensores das paredes evidenciam com maior precisão a variação da temperatura interna destacando a variação de temperatura de cada cobertura. O telhado ecológico (arranjo 1) apresentou temperaturas mais elevadas que as outras coberturas ao longo do dia, atingindo um pico máximo de 34,33°C às 14:30, registrado pelos *dataloggers* localizados nas paredes do ambiente analisado. A presença da água no interior das garrafas PET funcionou como uma camada de retenção térmica, a radiação solar incidente ao longo dos dias aqueceu a camada de água que reteve o calor e realizou a transmissão para o interior do ambiente, funcionando como uma barreira térmica às trocas de calor entre o ambiente interno e externo.

O telhado verde apresentou temperaturas inferiores à temperatura externa reduzindo também a amplitude da temperatura ao longo do dia. A comparação entre o telhado ecológico (arranjo 1) e o telhado verde evidenciou que no âmbito da redução da temperatura no interior do ambiente não houveram benefícios pela utilização da cobertura ecológica para o dia mais quente do mês de abril.

Para uma análise detalhada dos horários de efeitos extremos na temperatura, e dos benefícios proporcionadas pelas coberturas, confeccionou-se tabelas com os dados de temperatura ambiente interna (máxima e mínima) registrados pelos sensores das paredes e os dados de temperatura ambiente externa. Os dados dos pontos de mínima e de máxima de temperatura medidos pelos sensores do teto, estão no Apêndice B, nas Tabelas B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.6, e B.7.

Como detalhado na Tabela 13, ao se analisar o ponto de mínimo observou-se que o telhado ecológico apresentou temperatura mínima de 25,8°C, que é 2,3°C mais elevada que a temperatura externa mínima, conservando a temperatura no interior do ambiente.

Tabela 13 - Temperaturas e horários de pico, em 22 de abril de 2021.

Cob .	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor-ponto (hh:m m)	Temp . (°C)	ΔHor. (hh:m m)	ΔTemp. (°C)		Hor-ponto (hh: mm)	Temp . (°C)	ΔHor. (hh:m m)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv .	
Ext.	05:00	23,50	-	-	-2,10	12:00	32,30	-	-	-1,03	8,80
TV	06:00	24,67	+01:00	1,17	-0,93	14:30	31,27	+02:30	-1,03	-2,06	6,60
TE	06:00	25,80	+01:00	2,30	0,20	14:30	34,33	+02:30	2,03	1,00	8,53
TR	06:00	25,60	+01:00	2,10	-	14:30	33,33	+02:30	1,03	-	7,73

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

O telhado verde apresentou temperatura mínima de 24,67°C, que é 1,17°C mais elevada que a temperatura externa, porém é 0,93°C menor do que a temperatura registrada no telhado convencional. Todas as três coberturas apresentaram um tempo de retardo de uma hora em relação à hora da temperatura mínima externa.

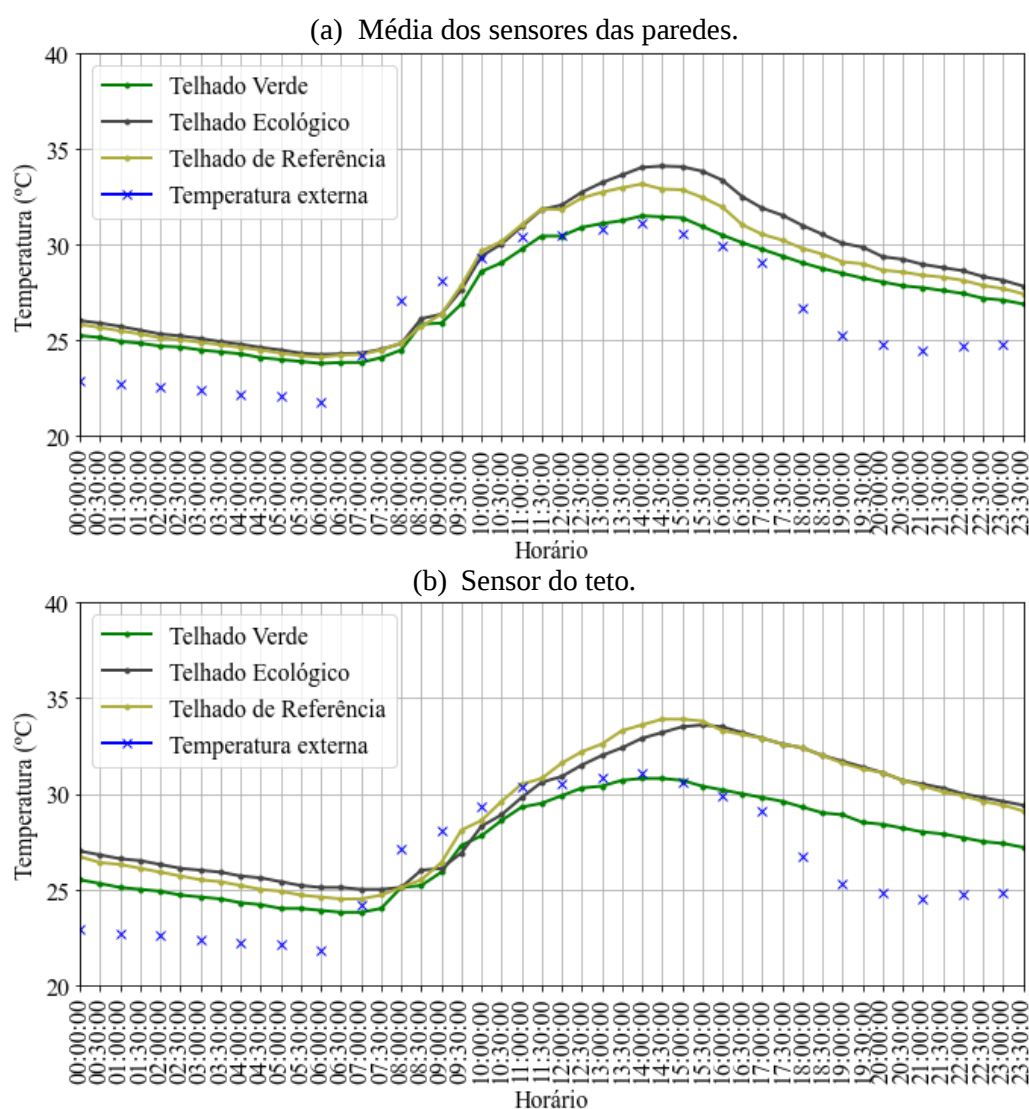
Ao se analisar o ponto de máximo, observou-se que o tempo de retardo das coberturas foi de 02:30 horas. Apenas o telhado verde apresentou uma temperatura máxima inferior à temperatura externa, reduzindo em 1,03°C a temperatura no interior do ambiente, enquanto telhado ecológico (arranjo 1) apresentou uma temperatura 2,03°C superior a temperatura externa máxima.

García *et al.* (2020) analisaram o comportamento térmico de um telhado verde em comparação com um telhado convencional, e as coberturas foram simuladas utilizando-se o *Python* 3.6.3. Os autores observaram que a temperatura máxima externa ocorreu às 16:00 horas, com valor aproximado de 47°C, e a temperatura mínima foi 21°C às 6:00 horas, enquanto que o telhado verde apresentou temperatura interna variando de 29°C a 35°C, aproximadamente, sendo a temperatura máxima na cobertura vegetada às 20:00 horas e a temperatura mínima às 8:00 horas.

A análise comparativa para o dia 20 de maio (Figura 42), evidenciou que o sistema de telhado ecológico (arranjo 2, com tapete refletivo com Tetra Pak sobreposto por garrafas PET

vazias) atingiu a máxima temperatura trinta minutos depois que o telhado de referência, entretanto não apresentou redução significativa da temperatura ambiente interna em comparação com o telhado de referência. Diferentemente do mês de abril, as curvas térmicas das coberturas apresentaram valores mínimos de temperatura semelhantes, com maior diferenciação para os valores de temperatura máxima. Observou-se que o telhado de referência e o telhado ecológico apresentam os maiores valores de temperatura ao longo do dia, com temperaturas máximas de 34,10°C e 33,17°C, respectivamente.

Figura 42 - Temperatura interna e externa no dia 20 de maio.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 2.

Fonte: A Autora (2021).

Analisando-se os dados registrados pelos sensores nas paredes dos protótipos, na Tabela 14, observou-se que o ponto de máximo do telhado verde ocorreu em 31,50°C, que é 1,67°C

menor do que a temperatura registrada no telhado de referência no mesmo horário. Corroborando com o evidenciado por Rocha (2020), que ressaltou que o telhado verde ecológico (arranjo 2) resultou em valores de teto mais amenos que o telhado de referência, na ordem de 0,63°C a 0,79°C de diferença, evidenciando uma atenuação na estabilização climatológica.

Tabela 14 - Temperaturas e horários de pico, em 20 de maio de 2021.

Cob .	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor-ponto (hh:mm)	Temp . (°C)	ΔHor . (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		Hor-ponto (hh:mm)	Temp . (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	06:00	21,80	-	-	-2,33	14:00	31,10	-	-	-2,07	9,30
TV	06:00	23,80	00:00	2,00	-0,33	14:00	31,50	00:00	0,40	-1,67	7,70
TE	06:00	24,27	00:00	2,47	0,14	14:30	34,10	+00:30	3,00	0,93	9,83
TR	06:00	24,13	00:00	2,33	-	14:00	33,17	00:00	0,87	-	9,04

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

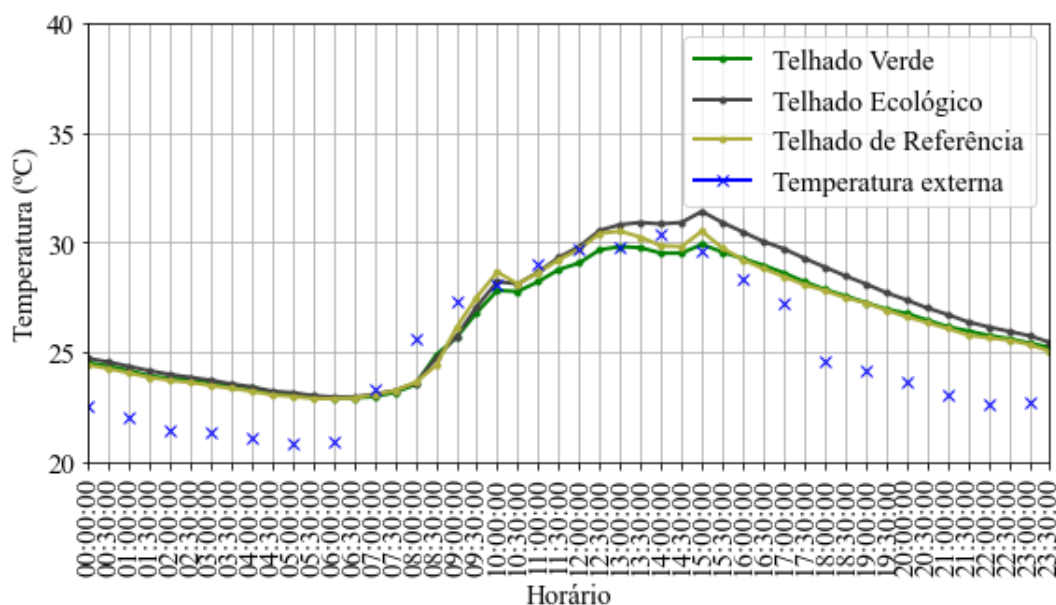
Ao se analisar o ponto de máximo para o telhado ecológico (arranjo 2) observou-se que a cobertura apresentou temperatura interna máxima de 34,10°C, que é 0,93°C superior à registrada no telhado convencional, porém as outras coberturas atingiram a temperatura máxima no mesmo horário que a temperatura externa enquanto o telhado ecológico (arranjo 2) apresentou um retardo de 30 minutos em comparação com o horário da temperatura externa. Os valores obtidos são condizentes com os resultados encontrados por Espínola (2010), Ferraz (2012) e Palmeira (2016). Os autores realizaram estudos comparando o desempenho térmico de telhados verdes e ecológicos com telhados de referência, e observaram que os telhados verdes reduziram a temperatura interna em 4,4°C, 12°C e 2,5°C, respectivamente.

Com relação aos dados obtidos nessa pesquisa, observou-se que os telhados ecológicos (arranjos 1 e 2) executados no mês de abril e no mês de maio obtiveram um desempenho térmico semelhante, não apresentando características térmicas de redução significativa da temperatura no interior do ambiente, porém proporcionando uma barreira térmica e conservando a temperatura no interior do ambiente mais elevada do que a do telhado verde.

Os dados coletados no dia 23 de junho, Figura 43, indicam, no que se refere aos valores mínimos de temperatura, que as coberturas apresentaram valores próximos. No dia 23 de junho

a temperatura externa mínima foi de 20,8° C, a menor registrada entre os dias desse critério de análise.

Figura 43 - Temperatura interna e externa no dia 23 de junho.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 3.

Fonte: A Autora (2021).

Ao se analisar o ponto de mínimo, observou-se que o telhado ecológico (arranjo 3, com tapete refletivo com Tetra Pak) apresentou temperatura ambiente 2,13°C superior à temperatura externa, semelhante aquela apresentada pelo telhado verde, que foi de 2,1 °C (Tabela 15), e que foi a apresentada pelo telhado convencional de 2,07°C. As três coberturas analisadas no mês de junho apresentaram tempo de retardo de 01:00 hora em comparação com a temperatura externa, semelhantemente ao evidenciado no dia 22 de abril.

Na análise do ponto de máximo, o telhado ecológico (arranjo 3) apresentou um desempenho similar ao telhado ecológico (arranjo 2), observando-se temperatura interna máxima 0,90°C mais elevada que o telhado convencional para o mesmo horário, e 1,0°C mais elevada que a temperatura externa. O telhado verde apresentou redução da temperatura externa em 0,5°C. Todos os telhados apresentaram máximas temperaturas 01:00 hora após o ponto de máxima temperatura externa.

Tabela 15 - Temperaturas e horários de pico, em 23 de junho de 2021.

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor-ponto (hh:m m)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:m m)	ΔTemp. (°C)		Hor-ponto (hh:m m)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:m m)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	05:00	20,80	-	-	-2,07	14:00	30,40	-	-	-0,10	9,60
TV	06:00	22,90	+01:00	2,10	0,03	15:00	29,90	+01:00	-0,50	-0,60	7,00
TE	06:00	22,93	+01:00	2,13	0,06	15:00	31,40	+01:00	1,00	0,90	8,47
TR	06:00	22,87	+01:00	2,07	-	15:00	30,50	+01:00	0,10	-	7,63

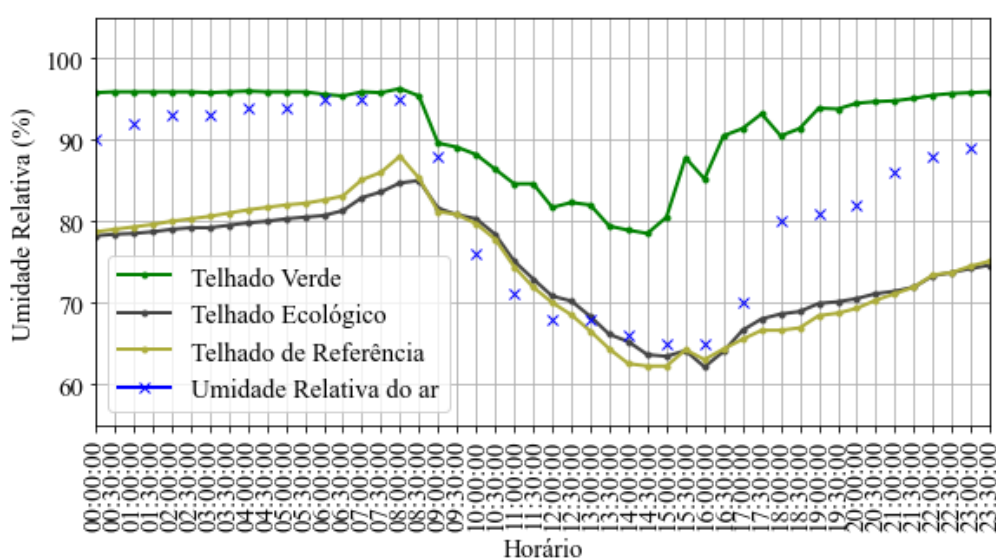
Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Nas Figuras 44 e 45, com dados de 22 de abril e 20 de maio, respectivamente, é possível comparar os dados de umidade relativa registrados pelos sensores localizados no teto dos protótipos e a umidade relativa do ar externa. Para ambos os meses, os maiores valores de umidade relativa do ar são observados no ambiente abaixo do telhado verde.

Observou-se que são registrados os menores valores da umidade relativa do ar aproximadamente nos horários em que ocorrem as máximas temperaturas. A cobertura de referência e o telhado ecológico (arranjos 1 e 2) apresentaram os menores valores de umidade relativa do ar.

Figura 44 - Umidade interna e externa no dia 22 de abril.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 1.

Fonte: A Autora (2021).

A análise dos pontos de máxima e mínima umidade relativa do ar evidenciou que no mês de abril o telhado verde apresentou umidade relativa máxima de 96,30%, que é 8,30% maior que a registrada no telhado de referência e 1,30% maior que a umidade relativa do ar externa (Tabela 16).

Tabela 16 - Umidade e horários de pico, em 22 de abril de 2021.

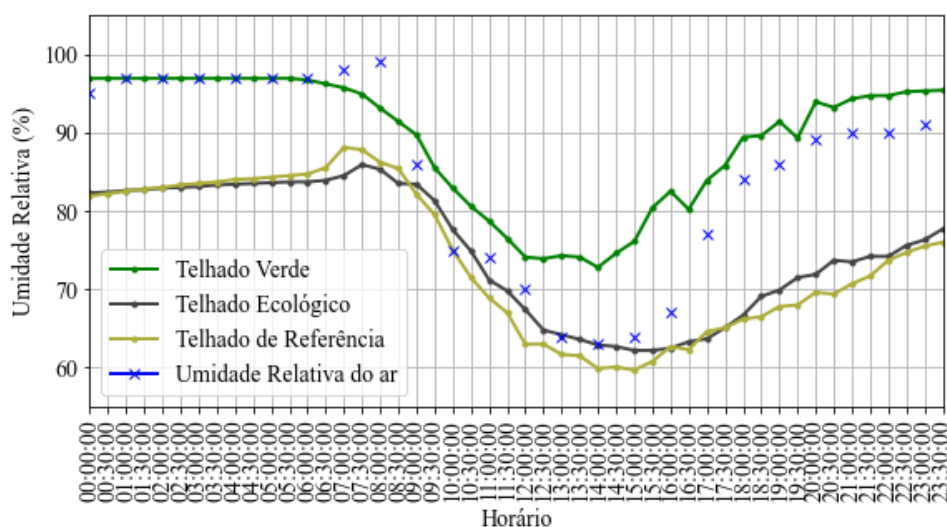
Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (%)
	Hor- ponto (hh: mm)	Umíd . (%)	ΔHor. (hh:m m)	ΔTemp. (°C)		Hor- ponto (hh:m m)	Umíd . (%)	ΔHor. (hh:m m)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Con v.				Ext.	Conv.	
Ext.	15:00	65,00	-	-	2,80	06:00	95,00	-	-	7,00	30,00
TV	14:30	78,50	-00:30	13,50	16,30	08:00	96,30	+02:00	1,30	8,30	17,80
TE	15:00	63,40	00:00	-1,60	1,20	08:00	84,70	+02:00	-10,30	-3,30	21,30
TR	15:00	62,20	00:00	-2,80	-	08:00	88,00	+02:00	-7,00	-	25,80

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Umid. = umidade | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Ao se analisar o ponto de máximo, observou-se que o telhado ecológico (arranjo 1) apresentou o menor valor de umidade relativa do ar (84,70%), que foi 10,30% inferior à umidade externa, e a análise do ponto de mínimo evidenciou que o telhado de referência apresentou o melhor desempenho reduzindo a umidade no interior do ambiente em 2,8% comparado à umidade externa.

Figura 45 - Umidade interna e externa no dia 20 de maio.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 2.

Fonte: A Autora (2021).

O mês de maio apresentou uma variação semelhante ao mês de abril, com valores de umidade mais elevados nas horas iniciais do dia, e apresentando redução próximo aos horários em que são evidenciados o pico de temperatura. Observou-se que o telhado verde apresentou os maiores valores de umidade relativa do ar (Tabela 17).

Ao se analisar o ponto de mínimo, evidenciou-se que a maior redução em comparação com a umidade externa foi apresentada pelo telhado de referência (3,10%), seguida pelo telhado ecológico – arranjo 2 (0,80%), e o telhado verde apresentou uma umidade relativa do ar 9,8% superior a umidade relativa do ar externa. Fator justificado pela presença do substrato no telhado verde, a camada de substrato retém a água precipitada sobre a cobertura, auxiliando no efeito de resfriamento da temperatura ambiente, porém ocasionando o aumento da umidade relativa do ar no interior dos protótipos.

O telhado convencional e o telhado ecológico (arranjo 2) apresentam pontos de umidade máxima semelhantes, com valores menores que o evidenciado no telhado verde, destacando-se, entretanto o telhado ecológico (arranjo 2) por apresentar o menor valor de umidade relativa do ar no ambiente interno a cobertura (85,90%) e a menor amplitude de variação da umidade relativa do ar no ambiente (23,70%).

Tabela 17 - Umidade e horários de pico, em 20 de maio de 2021.

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (%)
	Hor- ponto (hh: mm)	Umid. (%)	ΔHor. (hh: mm)	ΔUmid. (%)		Hor- ponto (hh: mm)	Umid. (%)	ΔHor. (hh:mm)	ΔUmid. (%)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	14:00	63,00	-	-	3,10	08:00	99,00	-	-	10,90	36,00
TV	14:00	72,80	00:00	9,80	12,90	05:30	96,90	-02:30	-2,10	8,80	24,10
TE	15:00	62,20	+01:00	- 0,80	2,30	07:30	85,90	-00:30	- 13,10	-2,20	23,70
TR	14:00	59,90	00:00	- 3,10	-	07:00	88,10	-01:00	-6,90	-	28,20

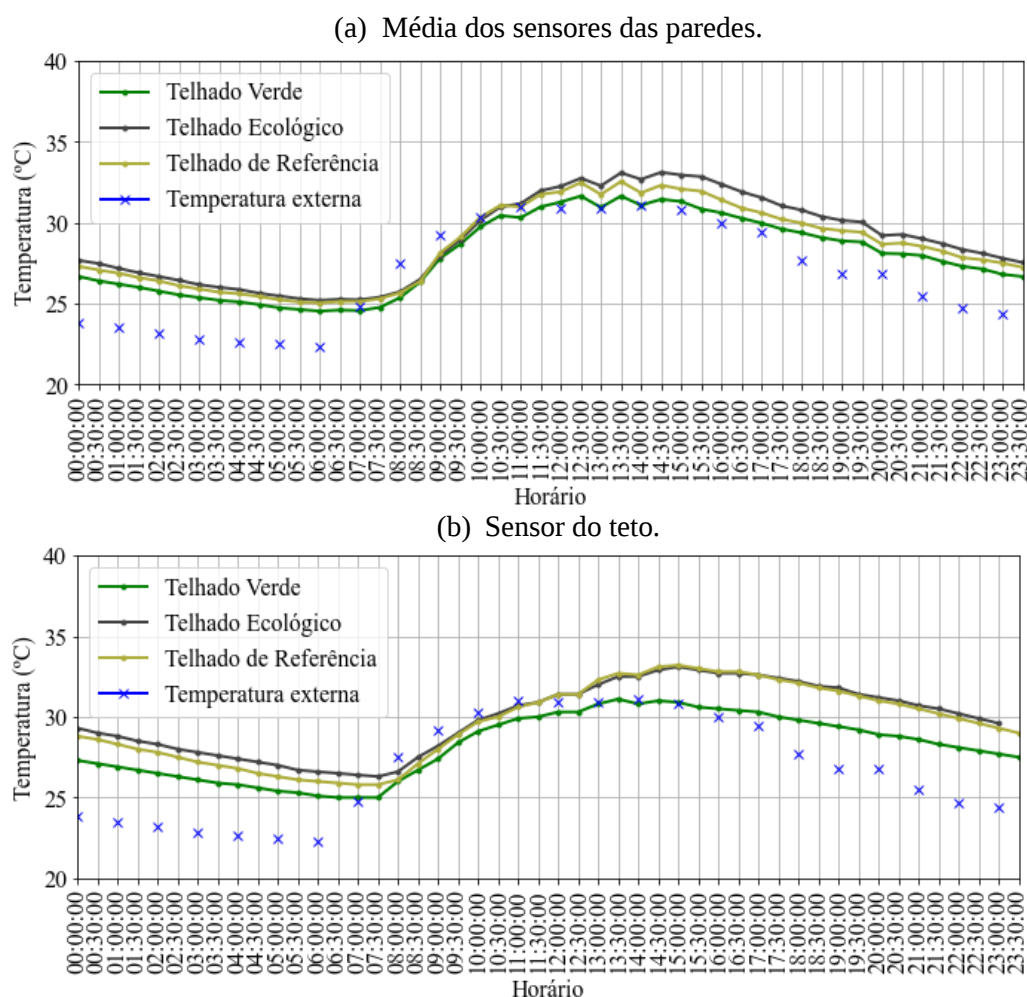
Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Umid. = umidade | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

5.3.2.2 Dias de maior amplitude térmica

Para a melhor visualização da variação térmica dos telhados em dias de maior amplitude térmica de cada mês com os dados de temperatura ambiente interna e externa foram confeccionados *LinePlots*. Na Figura 46 apresenta-se os dados para o dia de maior amplitude de variação da temperatura externa do mês de abril (27 de abril). As curvas térmicas das coberturas apresentaram valores próximos, porém é possível identificar que o telhado verde apresentou os menores valores de temperatura ao longo dia, e o telhado ecológico (arranjo 1) os maiores valores de temperatura.

Figura 46 - Temperatura interna e externa no dia 27 de abril.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 1.

Fonte: A Autora (2021).

Nos horários de temperatura mínima diária, o telhado ecológico (arranjo 1) mantém a temperatura do ambiente abaixo da cobertura em 2,9°C mais elevada que a temperatura externa,

valor semelhante ao apresentado pelo telhado de referência (2,73°C) e pelo telhado verde (2,23°C), como detalhado na Tabela 18.

Tabela 18 - Temperaturas e horários de pico, em 27 de abril de 2021.

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor- ponto (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh: mm)	ΔTemp. (°C)		Hor- ponto (hh:mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp, (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	06:00	22,30	-	-	-2,73	14:00	31,10	-	-	-1,20	8,80
TV	06:00	24,53	00:00	2,23	-0,50	14:30	31,43	+00:30	0,33	-0,87	6,90
TE	06:00	25,20	00:00	2,90	0,17	14:30	33,10	+00:30	2,00	0,80	7,90
TR	06:00	25,03	00:00	2,73	-	14:30	32,30	+00:30	1,20	-	7,27

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Ao se analisar o ponto de máximo, o telhado ecológico (arranjo 1) apresenta uma temperatura ambiente 2,0°C mais elevada que a temperatura externa, e 0,80°C superior ao telhado de referência, em comparação com o telhado verde que apresenta uma temperatura ambiente 0,33°C mais elevada que a temperatura externa e 0,87°C inferior ao telhado de referência. Evidenciou-se que as três coberturas apresentaram um retardo de 30 minutos em comparação com a temperatura externa mínima.

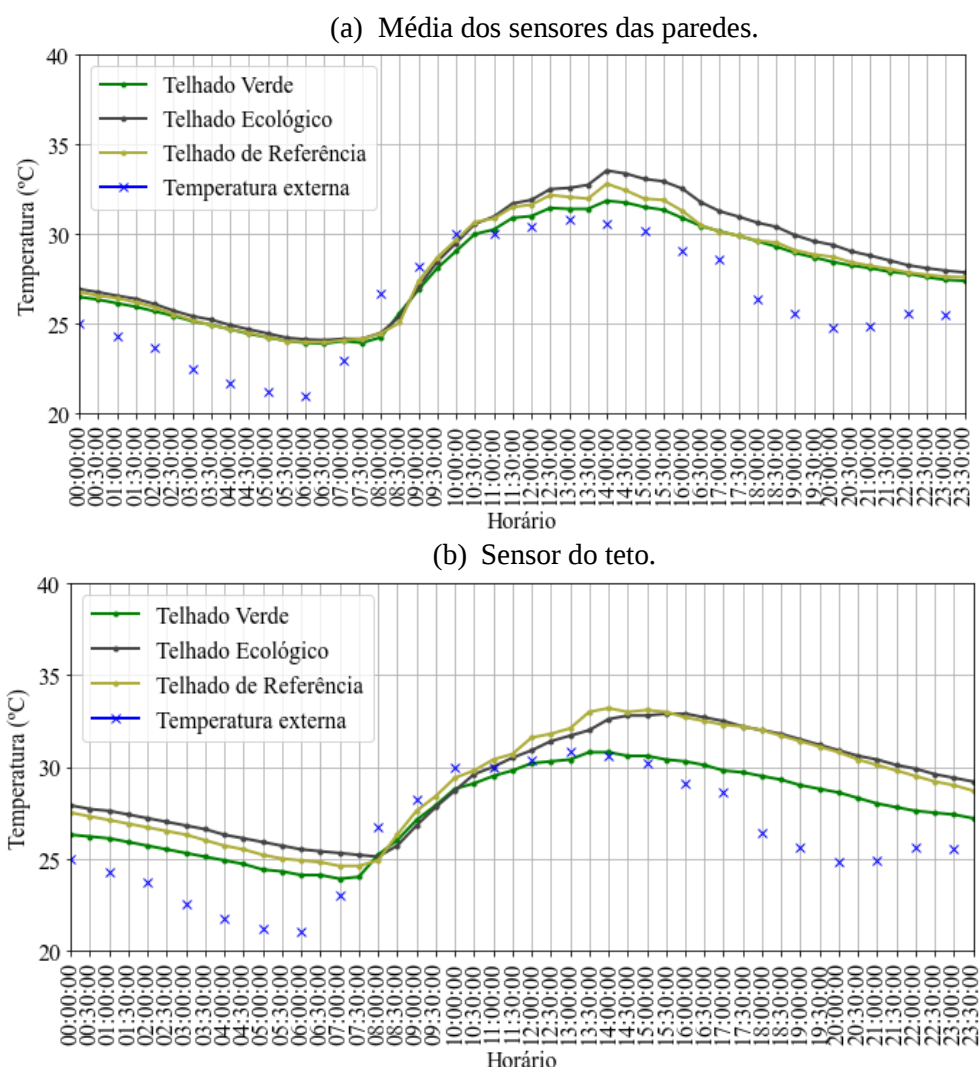
A Figura 47 mostra a variação da temperatura ambiente interna em comparação com a temperatura ambiente externa para o dia 25 de maio.

As curvas térmicas evidenciadas no dia 25 de maio são semelhantes às observados no mês de abril, em que se observou maior diferenciação dos valores de temperatura ambiente interna de cada cobertura pelos dados registrados nos termohigrômetros localizados no teto. Os menores valores de temperatura são registrados no ambiente abaixo do telhado verde, registrando uma temperatura mínima de 23,53°C.

De acordo com Carneiro *et al.* (2015), valores médios de temperatura do ar no interior das unidades superiores aos do ambiente externo ocorrem no caso de existir apenas uma entrada de ventilação no ambiente. Situação observada nos protótipos, em que a baixa velocidade do vento, o acúmulo da energia oriunda da radiação solar e a consequente baixa na dissipação da massa de ar quente contribuem para o observado. Em protótipos análogos implantados no *campus* de Caruaru da UFPE, Rocha (2020) analisou telhados ecológicos confeccionados com

garrafas PET e preenchidos com substrato e vegetação, em que comprovou que a minimização da amplitude térmica durante o período investigado, atenuando cerca de 3°C nos horários mais quentes do dia, nos quais o desempenho do sistema se mostra ainda mais notório. Santos (2016) analisou o desempenho térmico de três coberturas também no agreste pernambucano, sendo duas verdes, compostas por Coroa-de-Frade e Babosa, e uma cobertura convencional com telhas de cerâmica. O autor ressaltou que o maior valor de amplitude foi observado na parede do ambiente Coroa-de-Frade, seguido pelo Convencional, e pelo Babosa. Gilles (2006) observou que o telhado convencional resfria e aquece bem mais rápido que as outras coberturas.

Figura 47 - Temperatura interna e externa no dia 25 de maio.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 2.

Fonte: A Autora (2021).

A análise dos dados de temperatura ambiente do dia 25 de maio (Tabela 19), evidenciou que o telhado verde apresentou a menor amplitude térmica, variando em 8,10°C entre a mínima

e máxima temperatura ambiente diária registrada, seguido pelo telhado de referência com uma amplitude de 8,83°C e pelo telhado ecológico (arranjo 2) com uma variação de 9,43°C.

Tabela 19 - Temperaturas e horários de pico, em 25 de maio de 2021.

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor- ponto (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh: mm)	ΔTemp. (°C)		Hor- ponto (hh:mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	06:00	21,00	-	-	-2,97	13:00	30,80	-	-	-2,00	9,80
TV	06:30	23,53	+00:30	2,53	-0,44	14:00	31,63	+01:00	0,83	-1,17	8,10
TE	06:30	24,10	+00:30	3,10	0,13	14:00	33,53	+01:00	2,73	0,73	9,43
TR	06:30	23,97	+00:30	2,97	-	14:00	32,80	+01:00	2,00	-	8,83

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

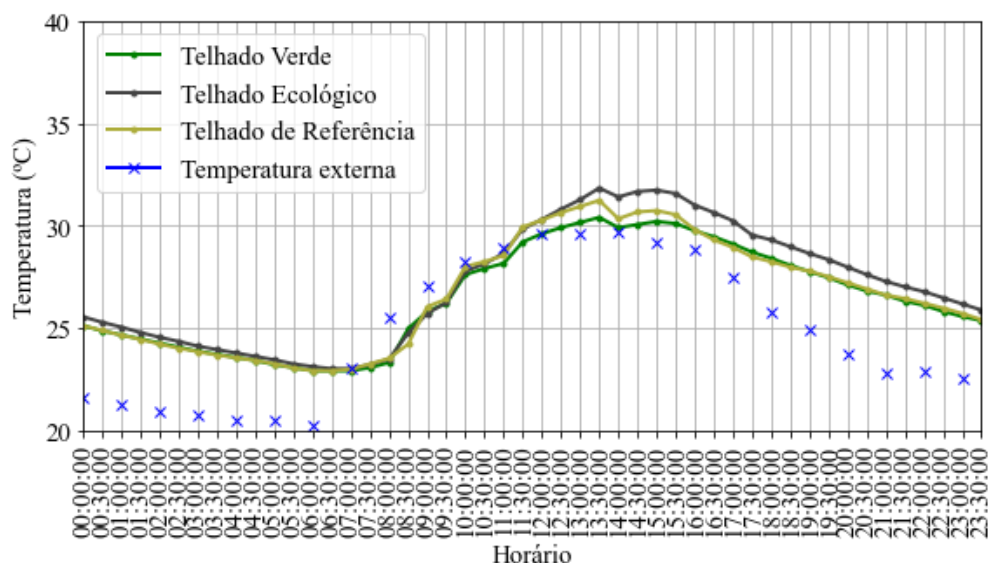
Fonte: A Autora (2021).

A análise do ponto de mínimo destacou que o telhado ecológico (arranjo 2) apresentou a maior temperatura ambiente (24,10°C), que é 3,10°C superior à temperatura externa mínima, enquanto que para o telhado verde esse valor foi de 23,53°C, que é 2,53°C superior à temperatura externa. As três coberturas apresentaram um tempo de retardo de 30 minutos, semelhante ao observado no mês de abril.

Para o ponto de máximo de temperatura, observou-se que o telhado ecológico (arranjo 2) apresentou a maior diferença em comparação com a temperatura externa, registrando-se uma temperatura ambiente interna 2,73°C superior à temperatura externa. O valor registrado no telhado de referência foi 2,00°C superior à temperatura externa, e no telhado verde foi 0,83°C superior. Apesar da temperatura elevada, as coberturas apresentaram um retardo de 01:00 hora em comparação ao horário da temperatura externa.

Para o dia 13 de junho (Figura 48), observou-se que o telhado ecológico (arranjo 3) apresentou os maiores valores de temperatura máxima, atingindo o ponto de máxima temperatura de 31,83°C às 13:30 horas, seguido pelo telhado de referência com um valor de 31,23°C no mesmo horário. O telhado verde apresentou uma temperatura máxima de 30,40°C, que foi 0,83°C inferior ao registrado no telhado de referência.

Figura 48 - Temperatura interna e externa no dia 13 de junho.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 3.

Fonte: A Autora (2021).

No dia 13 de junho a temperatura externa enquadrar-se como ‘intermediária a desconfortável’ no que se refere às zonas de conforto térmico estabelecida por Freitas (2005) para a cidade do Recife. Destacando-se o desempenho das coberturas verde e ecológica (arranjo 3) na atenuação desse efeito no interior dos ambientes, elevando a temperatura mínima registrada em 2,7°C e 2,8°C, respectivamente (Tabela 20).

Seguindo os padrões estabelecidos por Freitas (2005) das zonas de conforto térmico para o clima tropical litorâneo quente e úmido da cidade do Recife, o telhado ecológico (Arranjos 1, 2 e 3) apresenta maior eficácia em conservar a temperatura dentro dos limites estabelecidos como confortável.

Tabela 20 - Temperaturas e horários de pico, em 13 de junho de 2021.

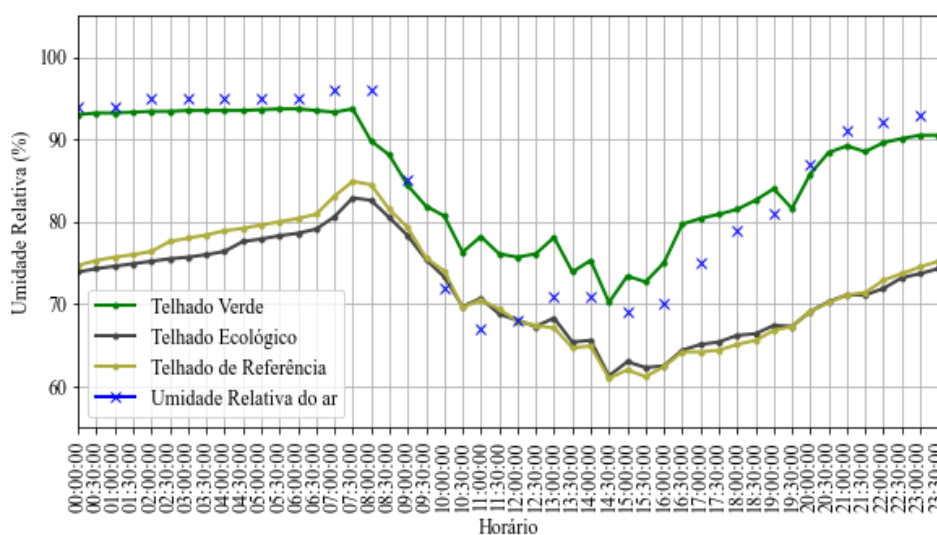
Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor- ponto (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		Hor- ponto (hh:mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh: mm)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	06:00	20,20	-	-	-2,70	14:00	29,70	-	-	-1,53	9,50
TV	06:30	22,90	+00:30	2,70	0,00	13:30	30,40	-00:30	0,70	-0,83	7,50
TE	06:30	23,00	+00:30	2,80	0,10	13:30	31,83	-00:30	2,13	0,60	8,83
TR	06:30	22,90	+00:30	2,70	-	13:30	31,23	-00:30	1,53	-	8,33

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Para avaliar a variação da umidade a partir da aplicação de cada cobertura deste estudo, utilizou-se a confecção de gráficos *LinePlots* com os dados de umidade relativa do ar externa e umidade no interior dos ambientes sobre os quais as coberturas estão posicionadas. Observou-se na Figura 49 que as curvas de umidade relativa do ar foram semelhantes, apresentando valores mais elevados no intervalo das 07:00 às 07:30, aproximadamente no horário em que foram evidenciadas as menores temperaturas. Os menores valores de umidade relativa do ar, foram observados às 14:30, próximo ao horário em que são registradas as máximas temperaturas diárias.

Figura 49 - Umidade relativa do ar, interna e externa, no dia 27 de abril.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 1.

Fonte: A Autora (2021).

Evidenciou-se que a umidade relativa do ar externa apresentou o seu maior valor 30 minutos antes das coberturas, fator condizente com o retardo na temperatura interna evidenciado para as coberturas aplicadas. Pode-se ressaltar que a umidade relativa do ar externa apresenta maior amplitude diária, ou seja, observa-se que são evidenciados maiores valores para a umidade externa nos momentos de pontos de máximos, e menores valores nos momentos de ponto de mínimo.

O telhado de referência e o telhado ecológico (arranjo 1) apresentam os menores valores de umidade relativa do ar mínima, 61,0% e 61,30%, respectivamente. O telhado verde apresentou umidade relativa do ar interna de 70,20%, que foi 7,20% superior à umidade relativa

do ar externa. As coberturas apresentaram um retardo de 01:30 hora em comparação com o ponto de mínimo externo (Tabela 21).

Ao se analisar o ponto de máximo, observou-se que o telhado ecológico (arranjo 1) apresentou a maior eficiência na redução da umidade relativa do ar, reduzindo em 13,10% a mesma em comparação com a umidade relativa do ar externa, caracterizando-se também por apresentar a menor amplitude diária da umidade relativa do ar (21,60%).

Tabela 21 - Umidade relativa do ar e horários de pico, em 27 de abril de 2021.

	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (%)
Cob.	Hor- ponto (hh: mm)	Umid. (%)	ΔHor. (hh: mm)	Δ Umid. (%)		Hor- ponto (hh: mm)	Umid. (%)	ΔHor. (hh: mm)	Δ Umid. (%)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	13:00	63,00	-	-	2,00	07:00	96,00	-	-	11,10	33,00
TV	14:30	70,20	+01:30	7,20	9,20	07:30	93,70	+00:30	-2,30	8,80	23,50
TE	14:30	61,30	+01:30	- 1,70	0,30	07:30	82,90	+00:30	- 13,10	-2,00	21,60
TR	14:30	61,00	+01:30	- 2,00	-	07:30	84,90	+00:30	- 11,10	-	23,90

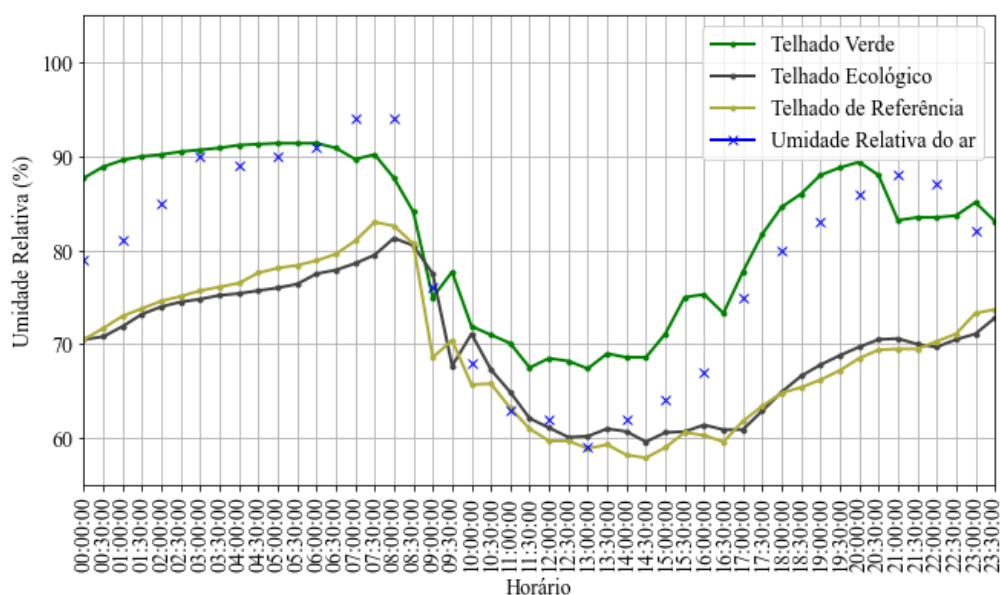
Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Umid. = umidade | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Observou-se que para o dia 27 de abril o telhado verde apresentou os valores de umidade relativa do ar mais elevados (Figura 50), conclui-se que a presença da vegetação e do substrato corroboram, com o aumento da evapotranspiração e, consequentemente, com o aumento da umidade relativa do ar.

Catuzzo (2013) comparou dados coletados em um telhado verde e em um telhado de concreto com os dados do INMET, e observou que durante os horários de maior radiação solar as temperaturas do telhado de concreto e do INMET apresentaram valores similares e elevados, enquanto o telhado verde apresentou temperatura menos elevada, e maior umidade do ar, aquecendo posteriormente ao telhado de concreto, bem como aos dados do INMET. Observou-se na Tabela 22 os dados de temperatura dos pontos de máximo e mínimo do dia 25 de maio.

Figura 50 - Umidade relativa do ar, interna e externa, no dia 25 de maio.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 2.

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 22 - Umidade relativa do ar e horários de pico, em 25 de maio de 2021.

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (%)
	Hor- ponto (hh: mm)	Umid. (%)	ΔHor. (hh: mm)	Δ Umid. (%)		Hor- ponto (hh: mm)	Umid. (%)	ΔHor. (hh: mm)	Δ Umid. (%)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	15:00	54,00	-	-	-5,00	07:00	94,00	-	-	11,00	40,00
TV	13:00	67,40	-02:00	13,40	8,40	06:00	91,40	-02:00	-2,60	8,40	24,00
TE	14:30	59,60	-00:30	5,60	0,60	08:00	81,30	+01:00	-12,70	-1,70	21,70
TR	15:00	59,00	00:00	5,00	-	07:30	83,00	+00:30	-11,00	-	24,00

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Umid. = umidade | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

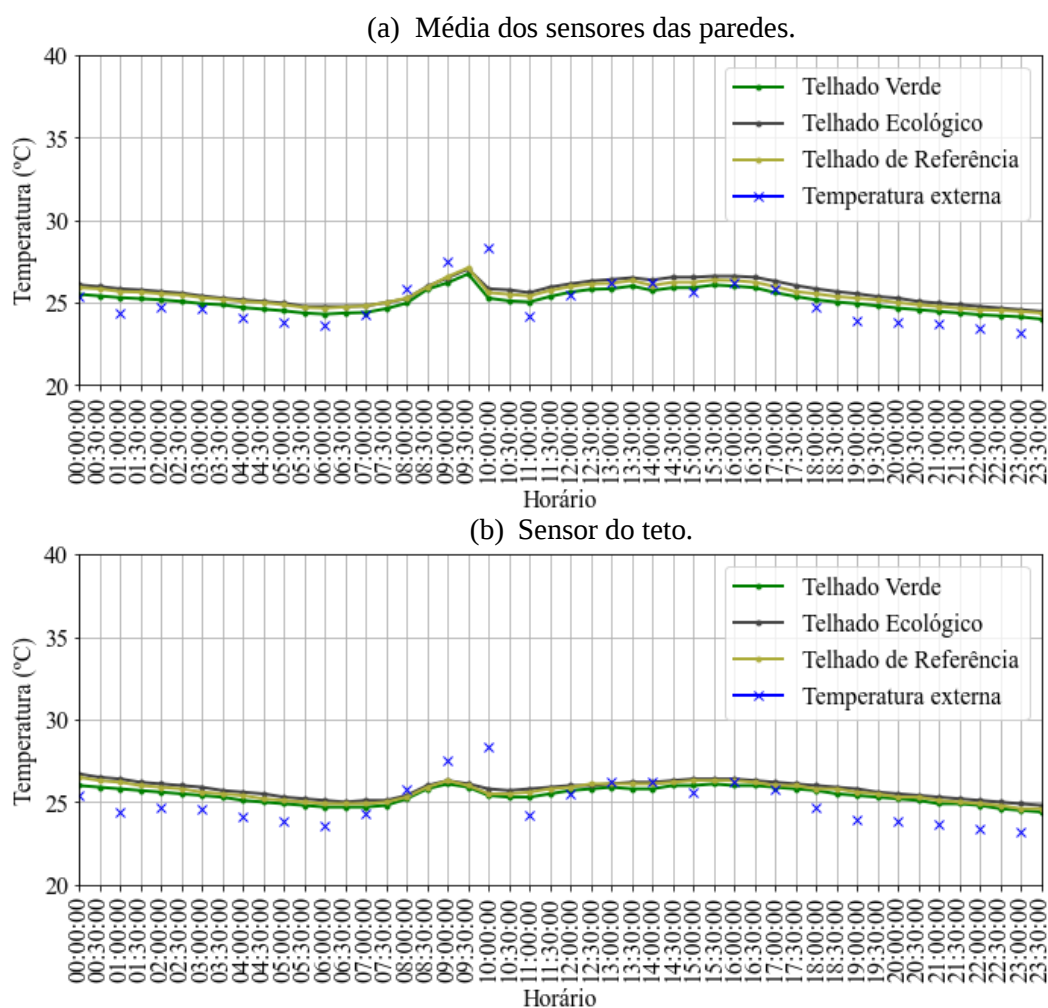
Fonte: A Autora (2021).

Evidenciou-se que os telhados verde e de referência apresentaram a mesma amplitude de umidade relativa do ar no interior dos ambientes abaixo das respectivas coberturas, entretanto o telhado verde apresentou valores de umidade relativa do ar mínima e máxima superiores às outras coberturas analisadas.

5.3.2.3 Dias de menor amplitude térmica e de maior precipitação

A Figura 51 apresenta os dados de temperatura ambiente registrados abaixo de cada cobertura e os dados de temperatura ambiente externa no local de estudo para o dia 15 de abril. Observou-se que diferentemente das curvas térmicas analisadas nos dias de maior temperatura externa e de maior amplitude térmica, o dia 15 de abril é caracterizado pela ocorrência de um evento de precipitação pluviométrica diária de 14,4 mm, associado ao fato de se observar ao longo dos dias anteriores do mês um total precipitado de 348,2 mm, ocasionando uma redução da amplitude de variação da temperatura externa nesse dia para 5,10°C. Observou-se atenuação da variação da temperatura ao longo dia, com valores de temperatura mais aproximados. As coberturas conservaram a temperatura no interior do ambiente com valores mais próximos, ou seja, com menor variação que a temperatura externa.

Figura 51 - Temperatura interna e externa no dia 15 de abril.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 1.

Fonte: A Autora (2021).

Observou-se que as curvas de temperaturas diárias são semelhantes, com pequenas variações de valores entre si, apresentando poucas amplitudes diárias. Como detalha na Tabela 23, para o dia 15 de abril a temperatura ambiente interna se manteve entre 23,20°C e 28,30°C, em média.

Para o ponto de mínima de temperatura, o telhado de maior conservação térmica foi o ecológico (arranjo 1), apresentando uma temperatura ambiente de 24,47°C, semelhante à evidenciada pelo telhado de referência de 24,37°C e pelo telhado verde de 24,00°C. Os telhados ecológico (arranjo 1), de referência e verde apresentaram temperaturas superiores à temperatura externa mínima em 1,27°C, 1,17°C e 0,80°C, respectivamente. A análise dos horários da ocorrência dos picos de temperatura evidenciou que houve um retardo de 03:00 horas entre a temperatura registrada nos telhados e a temperatura externa.

Tabela 23 - Temperaturas e horários de pico, em 15 de abril de 2021.

Cob .	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor-ponto (hh:mm)	Temp (°C)	ΔHor. (hh:m m)	ΔTemp. (°C)		Hor-ponto (hh:mm)	Temp . (°C)	ΔHor. (hh:m m)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv .				Ext.	Conv .	
Ext.	23:00	23,20	-	-	-1,17	10:00	28,30	-	-	1,20	5,10
TV	23:30	24,00	+03:00	0,80	-0,37	09:30	26,73	-00:30	-1,57	-0,37	2,73
TE	23:30	24,47	+03:00	1,27	0,10	09:30	27,03	-00:30	-1,27	-0,07	2,56
TR	23:30	24,37	+03:00	1,17	-	09:30	27,10	-00:30	-1,20	-	2,73

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

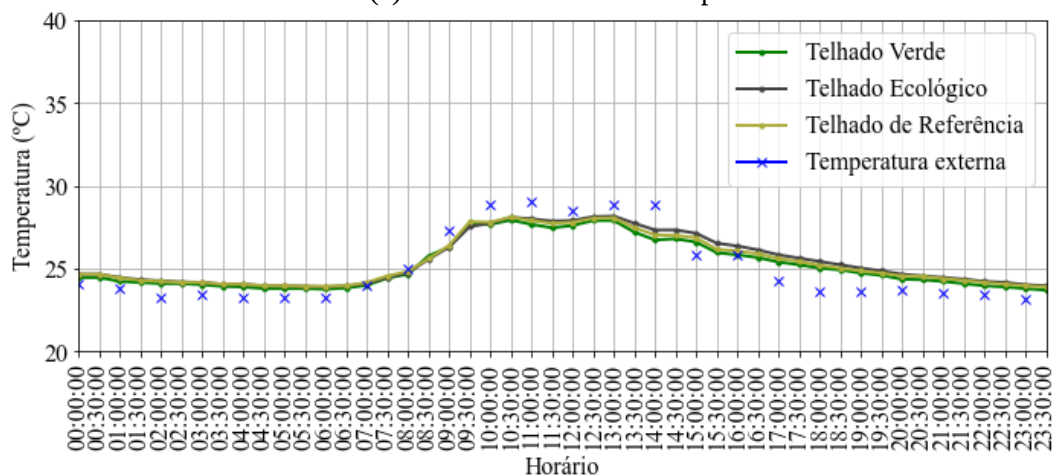
Fonte: A Autora (2021).

As coberturas apresentaram temperaturas máximas inferiores à temperatura externa, destacando-se, com a maior redução, o telhado verde (1,57°C), seguido pelo telhado ecológico – arranjo 1 (1,27°C), e pelo telhado de referência (1,20°C). O telhado ecológico (arranjo 1) apresentou a menor amplitude de temperatura diária (2,56°C), devido, provavelmente, à maior capacidade de conservação térmica e menor ocorrência de trocas de calor com o ambiente externo.

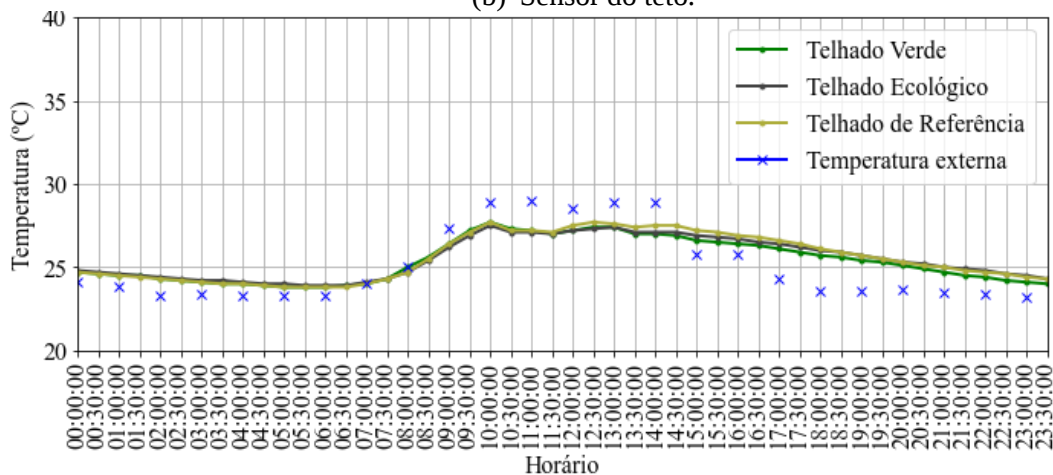
O dia 11 de abril é característico por apresentar um evento extremo de precipitação pluviométrica de 146,4 mm diários, resultando na mínima temperatura externa registrada de 23,60°C. Como detalhado na Figura 52, para essas características climáticas externas, o telhado verde apresentou a menor temperatura ambiente interna, seguido pelo telhado ecológico (arranjo 1) e o telhado de referência com 23,77°C, 23,90°C e 23,93°C respectivamente (Tabela 24).

Figura 52 - Temperatura interna e externa no dia 11 de abril.

(a) Média dos sensores das paredes.



(b) Sensor do teto.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 1.

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 24 - Temperaturas e horários de pico, em 11 de abril de 2021.

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor- ponto (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		Hor- ponto (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh: mm)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	04:00	23,30	-	-	-0,63	11:00	29,00	-	-	0,90	5,70
TV	06:00	23,77	+02:00	0,47	-0,16	10:30	27,93	-00:30	- 1,07	-0,17	4,16
TE	06:00	23,90	+02:00	0,60	-0,03	10:30	28,10	-00:30	- 0,90	0,00	4,20
TR	06:00	23,93	+02:00	0,63	-	10:30	28,10	-00:30	- 0,90	-	4,17

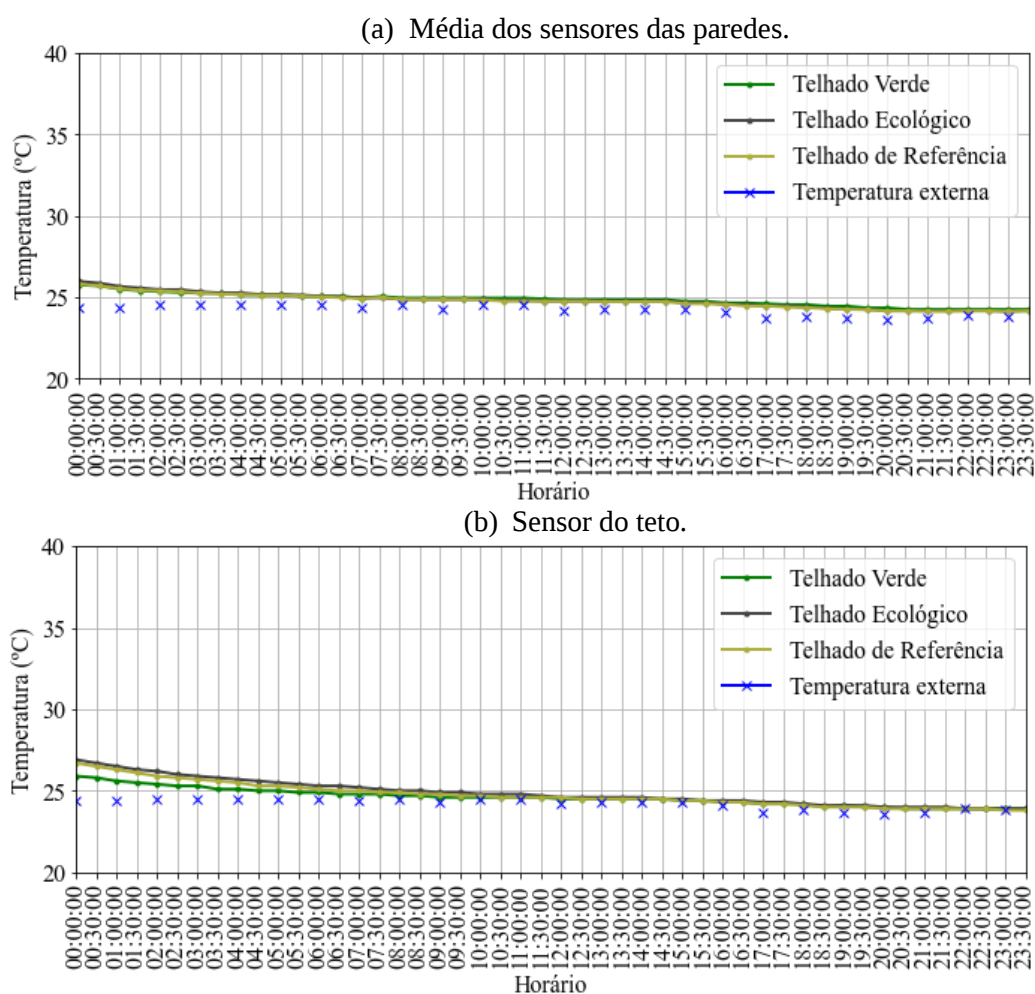
Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

O desempenho das coberturas para dias chuvosos foi semelhante ao observado por Michels, Güths e Silva (2020). Os autores desenvolveram estudos para a análise do desempenho térmico de uma cobertura de referência composta por telhas de fibrocimento sobre uma laje de concreto, e um telhado verde composto por grama esmeralda (*Zoysia japonica*). Michels, Güths e Silva (2020) ressaltaram que a cobertura verde contribuiu significativamente para reduzir a transferência de calor para o interior da bancada experimental, com exceção do dia nublado, e com ocorrência de precipitação, em que as duas coberturas apresentaram o desempenho térmico similar, com fluxo de calor máximo de $10,9 \text{ W/m}^2$ e de $10,3 \text{ W/m}^2$ para a cobertura com telhas de fibrocimento e para a cobertura verde, respectivamente.

Observou-se na Figura 53 que a temperatura externa no dia 13 de maio apresentou redução ao longo do dia, sendo caracterizado pela ocorrência de um evento de precipitação pluviométrica de 146,4 mm, ocasionando a redução da amplitude da temperatura externa para $0,90^\circ\text{C}$.

Figura 53 - Temperatura interna e externa no dia 13 de maio.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 2.

Fonte: A Autora (2021).

Evidenciou-se que as curvas térmicas das coberturas seguiram o padrão de variação da temperatura externa, reduzindo ao longo do dia, com valores mais altos nas horas iniciais do dia e valores mais baixos à noite. A análise da Figura 53 evidenciou que nas horas iniciais do dia as coberturas conservam por mais tempo a temperatura no interior dos ambientes, destacando-se nesse contexto o telhado ecológico, que apresentou uma temperatura ambiente 0,53°C superior à temperatura externa mínima e 1,47°C superior à temperatura externa máxima (Tabela 25). Assim como observado no dia 11 de abril, as coberturas apresentaram um retardo de 03:00 horas com relação ao ponto de mínimo.

Tabela 25 - Temperaturas e horários de pico, em 13 de maio de 2021.

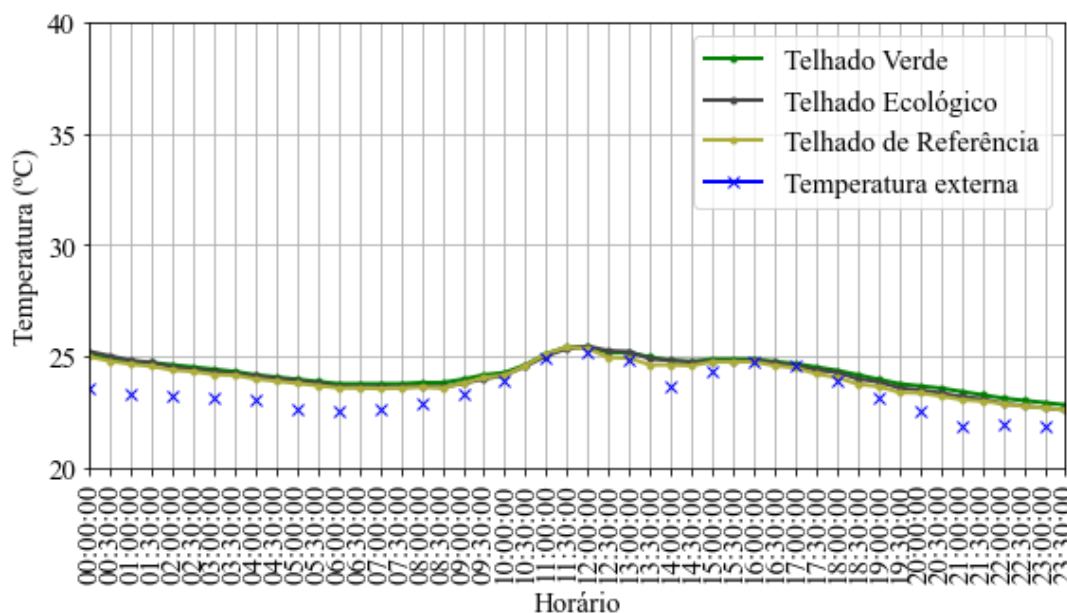
Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor- ponto (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		Hor- ponto (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	20:00	23,60	-	-	-0,53	02:00	24,50	-	-	-1,30	0,90
TV	23:00	23,93	+03:00	0,33	-0,20	00:00	25,47	-02:00	0,97	-0,33	1,54
TE	23:00	24,13	+03:00	0,53	0,00	00:00	25,97	-02:00	1,47	0,17	1,84
TR	23:00	24,13	+03:00	0,53	-	00:00	25,80	-02:00	1,30	-	1,67

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

O dia 18 de junho (Figura 54) foi caracterizado pela ocorrência de um evento chuvoso de 41,2 mm, ocasionando temperatura externa entre 21,80°C a 25,20°C. Observou-se que o telhado verde apresentou as maiores temperaturas ambiente diárias, entre 22,80°C e 25,40°C, aumentando o conforto térmico no interior do ambiente (Tabela 26).

Figura 54 - Temperatura interna e externa no dia 18 de junho.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 3.

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 26 - Temperaturas e horários de pico, em 18 de junho de 2021.

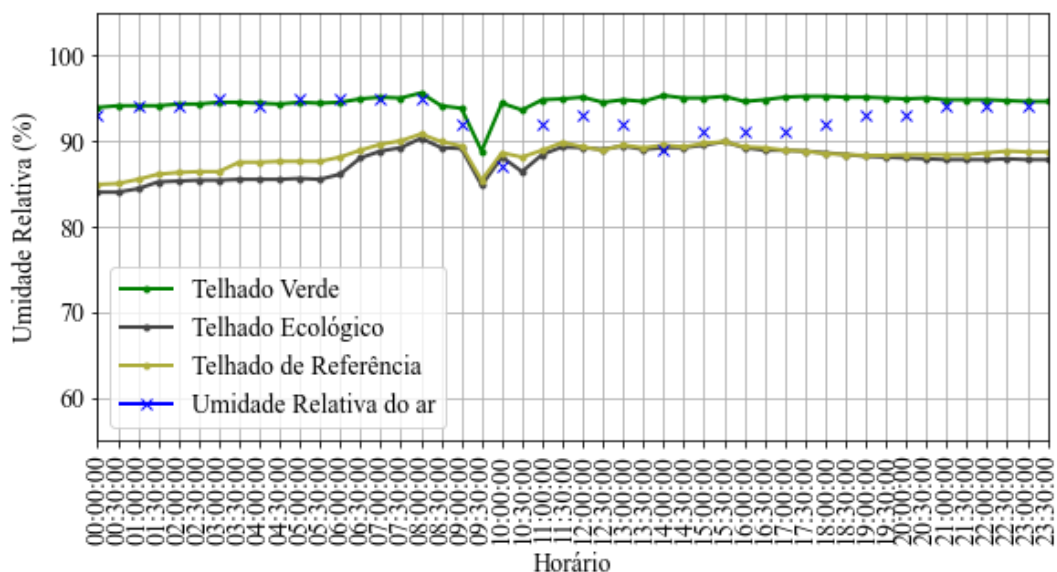
Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor- ponto (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		Hor- ponto (hh:mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh: mm)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	21:00	21,80	-	-	-0,77	12:00	25,20	-	-	-0,20	3,40
TV	23:30	22,80	+02:30	1,00	0,23	11:30	25,40	- 00:30	0,20	0,00	2,60
TE	23:30	22,57	+02:30	0,77	0,00	12:00	25,43	00:00	0,23	0,03	2,86
TR	23:30	22,57	+02:30	0,77	-	11:30	25,40	- 00:30	0,20	-	2,83

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

O telhado ecológico (arranjo 3) e o telhado de referência apresentaram valores semelhantes para o ponto de mínimo (22,57°C), 0,77°C superior à temperatura externa. As coberturas apresentaram um tempo de retardo de 02:30 horas em comparação com a temperatura externa mínima. O aumento da precipitação evidenciado nos meses de abril e maio ocasionou aumento da umidade relativa do ar externa e no interior dos ambientes (Figuras 55 e 56).

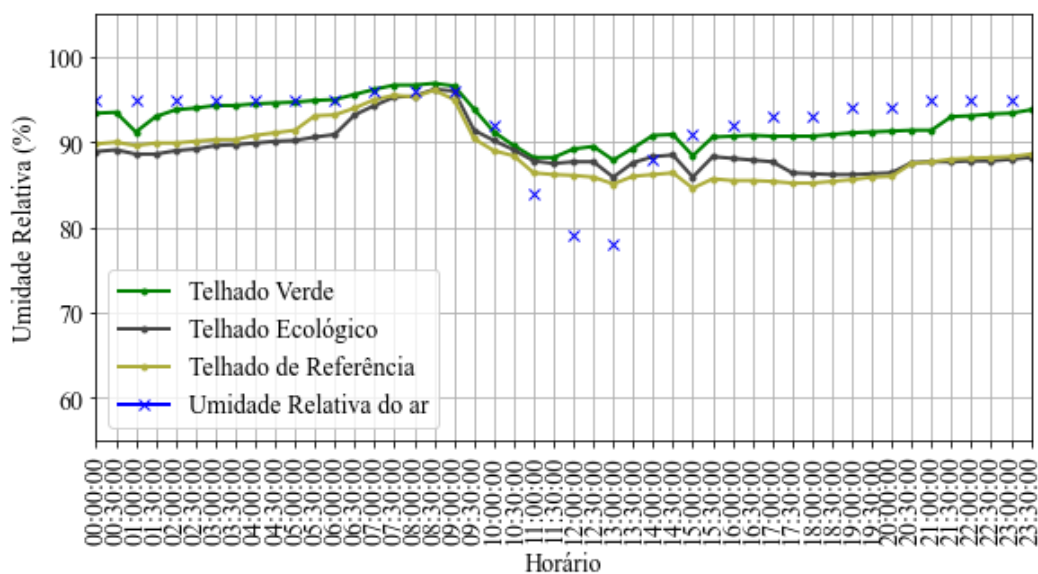
Figura 55 - Umidade interna e externa no dia 15 de abril.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 1.

Fonte: A Autora (2021).

Figura 56 - Umidade relativa do ar, interna e externa, no dia 11 de abril.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 1.

Fonte: A Autora (2021).

As curvas de umidade relativa do ar externa e interna apresentaram menores variações ao longo do dia, se apresentando valores semelhantes. Destacou-se que a umidade relativa do ar observada no ambiente abaixo do telhado verde foi maior do que as outras coberturas, e que os menores valores foram evidenciados no telhado ecológico (arranjo 1).

Observou-se que a umidade relativa do ar externa apresentou valores entre 87% e 95% ao longo do dia 15 de abril (Tabela 27). O telhado ecológico (arranjo 1) apresentou melhor desempenho na redução da umidade relativa do ar no interior do ambiente abaixo da cobertura, reduzindo em até 4,70% o ponto de máxima umidade relativa do ar externa. Entretanto pode-se observar que a menor amplitude de umidade relativa do ar foi verificada no ambiente abaixo do telhado de referência, variando em 5,40% a umidade relativa do ar ao longo do dia. O telhado verde apresentou a umidade relativa do ar 1,80% superior ao ponto de mínimo externo e 0,60% ao ponto de máximo externo. Possivelmente a presença do substrato e da vegetação aumentaram a capacidade de retenção hídrica da cobertura ocasionando o aumento da umidade relativa do ar no ambiente sob o qual está localizado o telhado.

Tabela 27 - Umidade relativa do ar e horários de pico, em 15 de abril de 2021.

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (%)
	Hor-ponto (hh:mm)	Umid. (%)	ΔHor. (hh:mm)	Δ Umid. (%)		Hor-ponto (hh:mm)	Umid. (%)	ΔHor. (hh:mm)	Δ Umid. (%)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	10:00	87,00	-	-	1,60	05:00	95,00	-	-	4,20	8,00
TV	09:30	88,80	-00:30	1,80	3,40	08:00	95,60	+03:00	0,60	4,80	6,80
TE	09:30	84,80	-00:30	- 2,20	-0,60	08:00	90,30	+03:00	- 4,70	-0,50	5,50
TR	09:30	85,40	-00:30	- 1,60	-	08:00	90,80	+03:00	- 4,20	-	5,40

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Umid. = umidade | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Observou-se menor variação e aumento dos valores de umidade para os dias em que ocorreram os eventos de precipitação pluviométrica. Na Tabela 28, para o dia 11 de abril, a umidade relativa do ar sofreu variação diária maior do que no dia 15 do mesmo mês. As coberturas proporcionaram redução dessa variação no interior do ambiente, com melhor desempenho de redução da amplitude da umidade relativa do ar pelo telhado verde, seguido pelo de referência e pelo ecológico (arranjo 1), reduzindo a amplitude diária para 9,0%, 9,7% e 10,3% respectivamente.

Tabela 28 - Umidade relativa do ar e horários de pico, em 11 de abril de 2021.

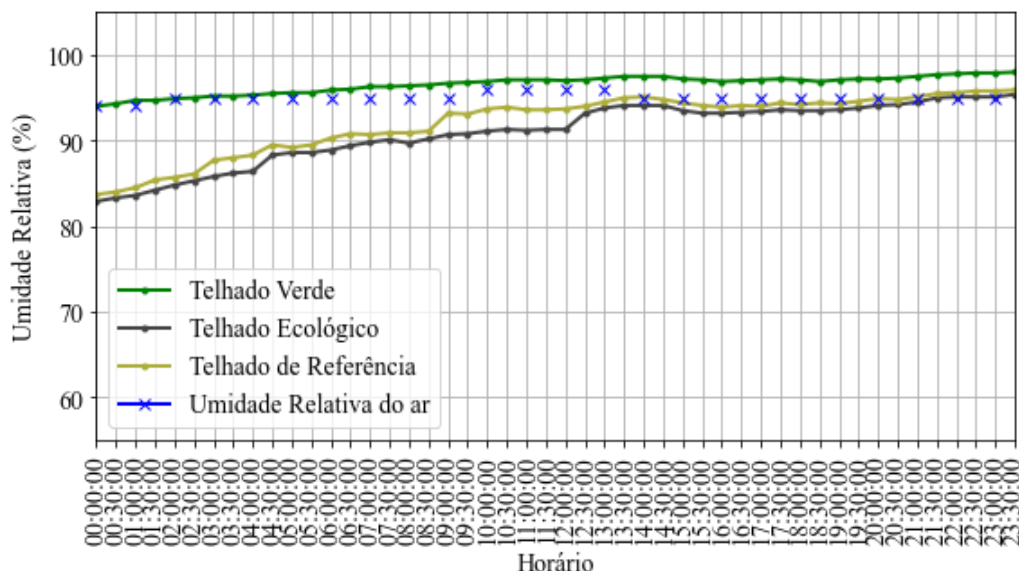
Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (%)
	Hor-ponto (hh:mm)	Umid. (%)	Δ Hor. (hh:mm)	Δ Umid. (%)		Hor-ponto (hh:mm)	Umid. (%)	Δ Hor. (hh:mm)	Δ Umid. (%)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	13:00	78,00	-	-	-8,40	07:00	96,00	-	-	-0,10	18,00
TV	13:00	87,90	00:00	9,90	1,50	08:30	96,90	+01:30	0,90	0,80	9,00
TE	15:00	85,90	+02:00	7,90	-0,50	08:30	96,20	+01:30	0,20	0,10	10,30
TR	15:00	86,40	+02:00	8,40	-	08:30	96,10	+01:30	0,10	-	9,70

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Umid. = umidade | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Dos dias com ocorrência de eventos pluviométricos, o dia 13 de maio (Figura 57) apresentou menor amplitude da umidade relativa do ar externo, variando a umidade relativa do ar diária em apenas 1%. Observou-se que ocorreu um aumento da umidade ao longo do dia, com valores mais baixos nas horas iniciais do dia, e valores mais baixos nas horas finais.

Figura 57 - Umidade interna e externa no dia 13 de maio.



Obs.: Telhado Ecológico – Arranjo 2.

Fonte: A Autora (2021).

Os telhados ecológico (arranjo 2) e de referência apresentaram o maior potencial de redução da umidade relativa do ar no interior do ambiente, reduzindo a umidade relativa do ar

externa mínima em 11,1% e 10,3%, respectivamente (Tabela 29). Em relação ao ponto de máxima umidade as coberturas apresentaram tempo de retardo de 30 minutos.

Tabela 29 - Umidade relativa do ar e horários de pico, em 13 de maio de 2021.

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (%)
	Hor- ponto (hh: mm)	Umid. (%)	ΔHor. (hh:mm)	Δ Umid. (%)		Hor- ponto (hh: mm)	Umid. (%)	ΔHor. (hh:mm)	Δ Umid. (%)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	00:00	94,00	-	-	10,30	23:00	95,00	-	-	-0,90	1,00
TV	00:00	94,00	00:00	0,00	10,30	23:30	98,00	+00:30	3,00	2,10	4,00
TE	00:00	82,90	00:00	- 11,10	-0,80	23:30	95,40	+00:30	0,40	-0,50	12,50
TR	00:00	83,70	00:00	- 10,30	-	23:30	95,90	+00:30	0,90	-	12,20

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-ponto = horário de ponto | Umid. = umidade | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

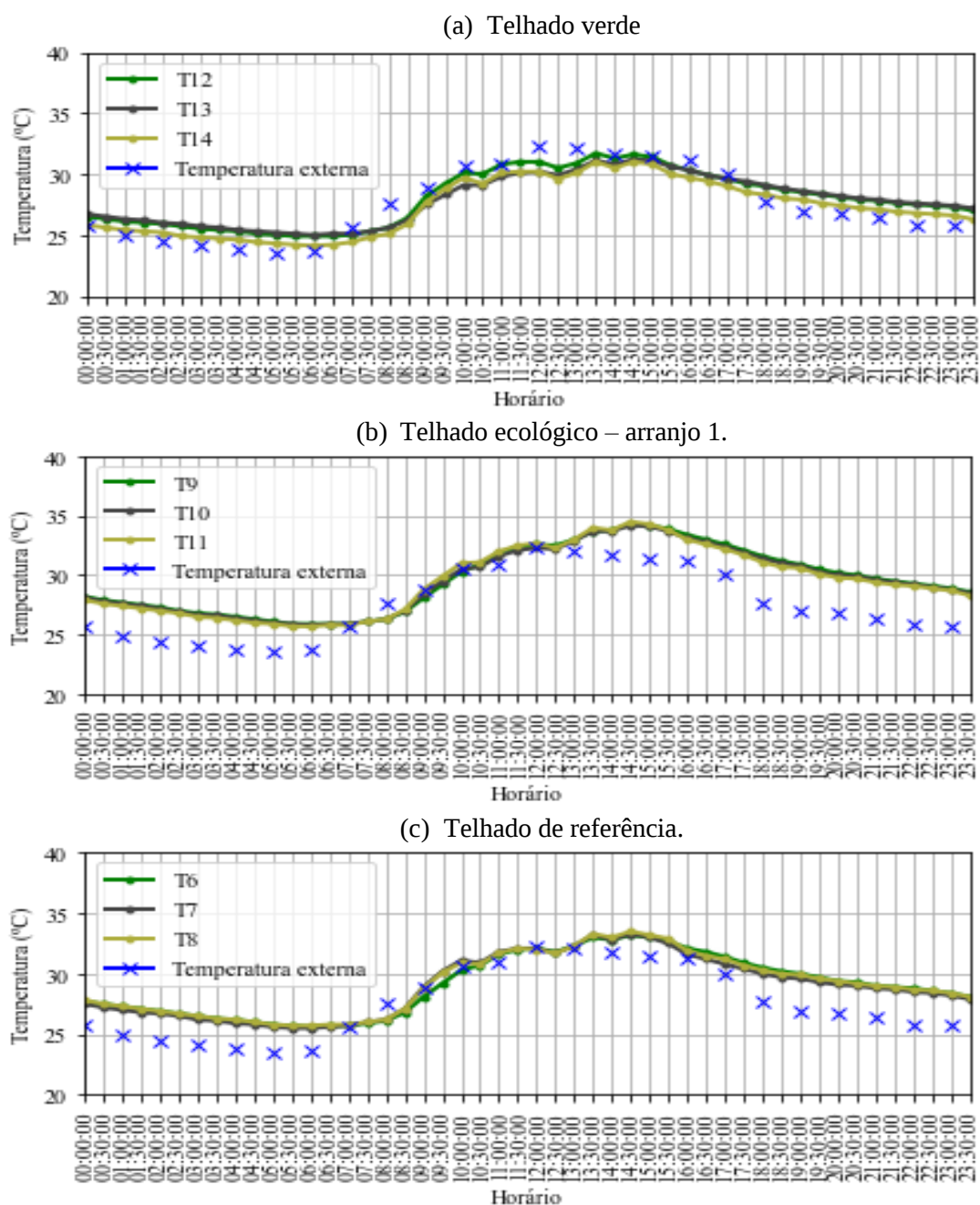
5.3.3 Análise do desempenho térmico das paredes

Santos (2016) observou diferença entre o desempenho térmico das paredes dos protótipos analisados em sua pesquisa, devido à localização, influenciando na radiação incidente sobre a superfície e alteração da temperatura verificada em cada sensor.

Os sensores T6, T9 e T12 estão instalados nas paredes localizadas à leste (paredes esquerdas) em cada ambiente, os sensores T7, T10 e T13, nas paredes posteriores, e os sensores T8, T11 e T14 nas paredes localizadas à oeste. A análise comparativa dos dados registrados em cada sensor foi separada por cobertura. Os sensores T6, T7 e T8 estão localizados no ambiente abaixo da cobertura de referência, os sensores T9, T10 e T11, do telhado ecológico (arranjos 1, 2 e 3), e os sensores T12, T13 e T14, no ambiente abaixo do telhado verde.

Com a finalidade de avaliar a precisão e acurácia dos dados observados, optou-se pela análise de cada parede do ambiente abaixo das coberturas no dia de maior temperatura externa de cada mês. Pode-se observar nas Figuras 58, 59, e 60 a temperatura ambiente interna registrada em cada sensor, e a temperatura ambiente externa para os dias 22 de abril, 20 de maio e 23 de junho, respectivamente.

Figura 58 - Temperatura ambiente por sensor em cada telhado no dia 22 de abril.

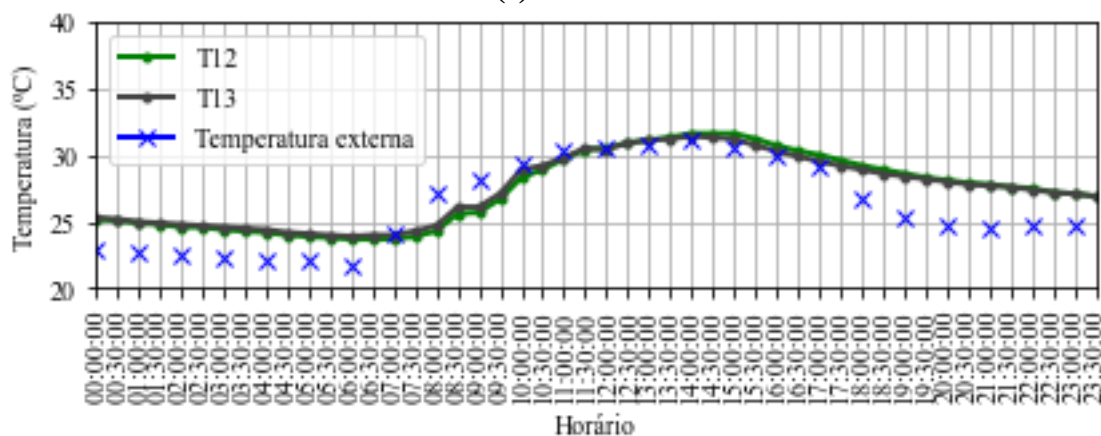


Fonte: A Autora (2021).

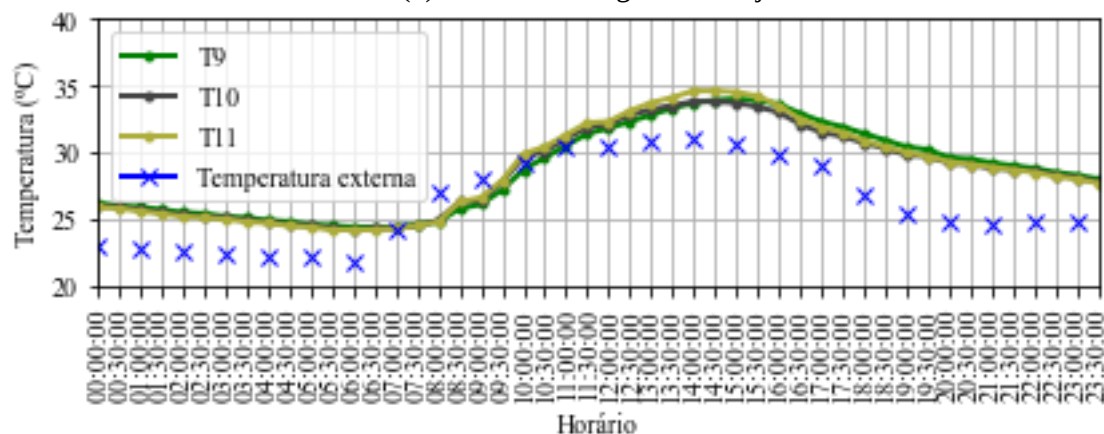
A análise do dia 22 de abril demonstrou que para o telhado verde os três sensores apresentam nos horários de mínima temperatura, que a temperatura ambiente esteve acima da temperatura externa, e nos horários mais quentes do dia, a temperatura ambiente esteve abaixo da temperatura externa. É possível observar que o sensor T12 (parede à leste) registrou valores mais altos de temperatura ambiente, e o sensor T14 (parede à oeste), os valores mais baixos. Para os outros telhados, as temperaturas registradas nos três sensores apresentaram valores semelhantes, com pouca variação.

Figura 59 - Temperatura ambiente por sensor em cada telhado no dia 20 de maio.

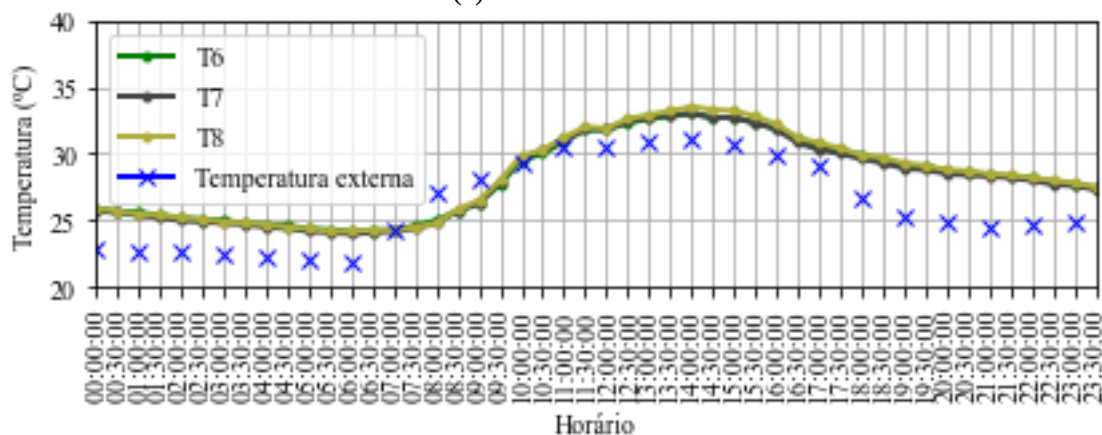
(a) Telhado verde.



(b) Telhado ecológico – arranjo 2.



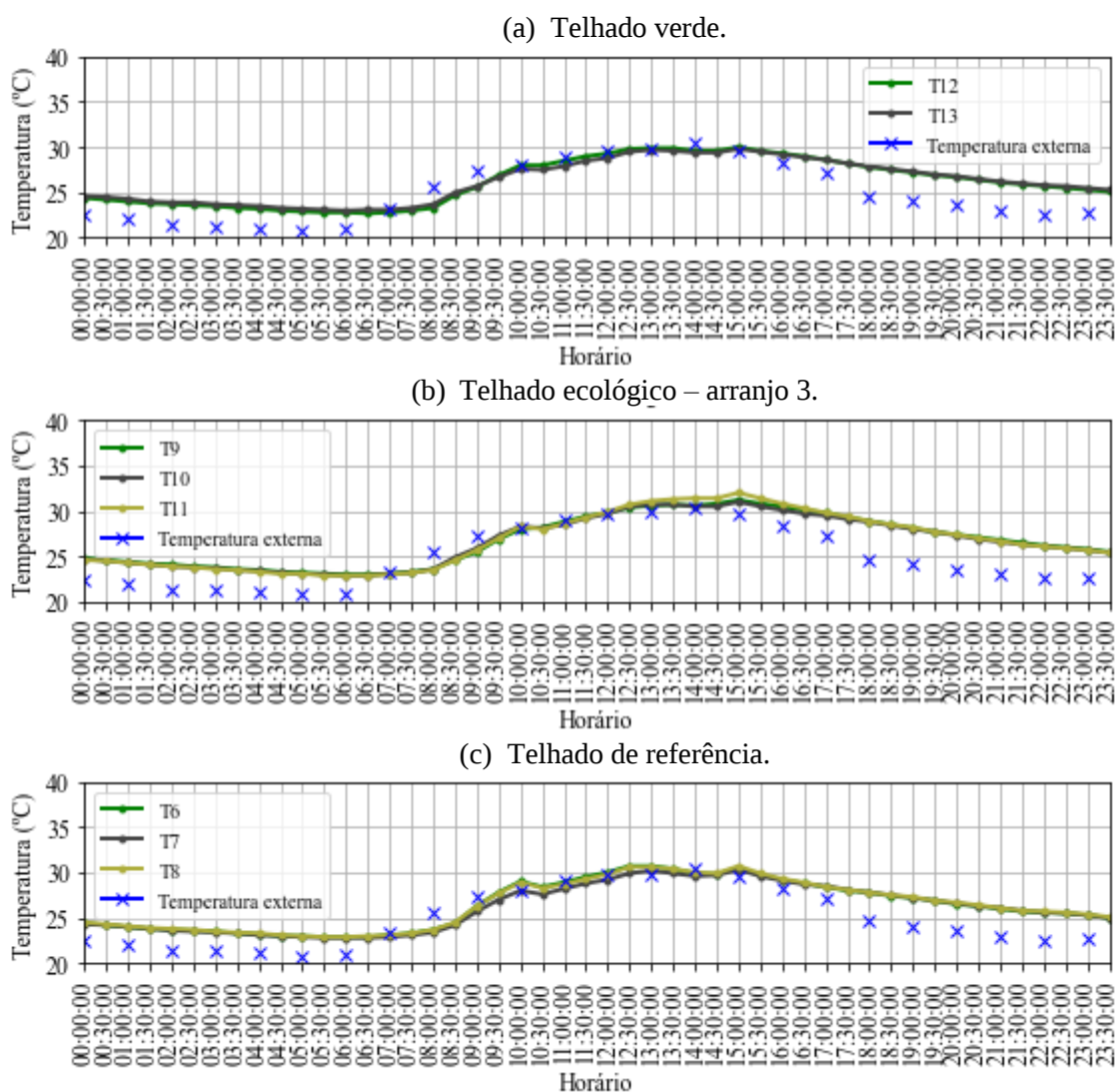
(c) Telhado de referência.



Fonte: A Autora (2021).

Para os três meses analisados, os dados registrados nos sensores apresentaram grande semelhança, sem grandes variações de valores. Logo, pode ser afirmar que a aplicação da temperatura ambiente média é representativa dos valores amostrais coleados. Apresenta-se na Figura 60 a variação da temperatura ambiente no dia 23 de junho.

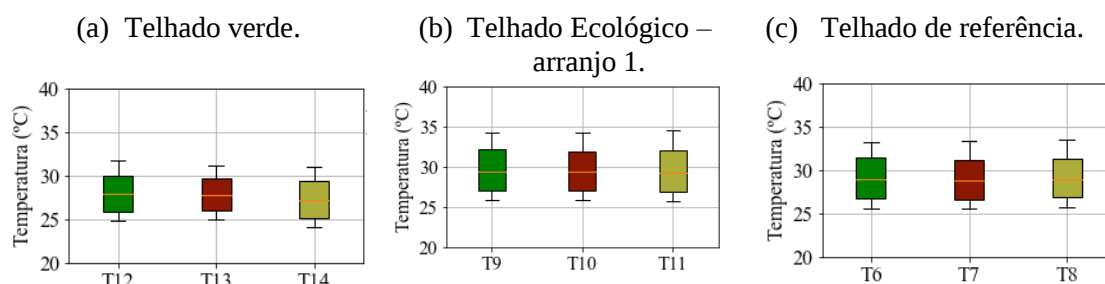
Figura 60 - Temperatura ambiente por sensor em cada telhado no dia 23 de junho.



Fonte: A Autora (2021).

Foram construídos gráficos *BoxPlot* com os dados de cada sensor por cobertura. Observou-se nas Figuras 61, 62, 63 e 64 a análise da variação dos valores de temperatura ambiente interna registrada em cada sensor para os dias analisados do mês de abril.

Figura 61 - *BoxPlot* da temperatura interna em cada sensor no dia 22 de abril.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 62 - *BoxPlot* da temperatura interna em cada sensor no dia 27 de abril.

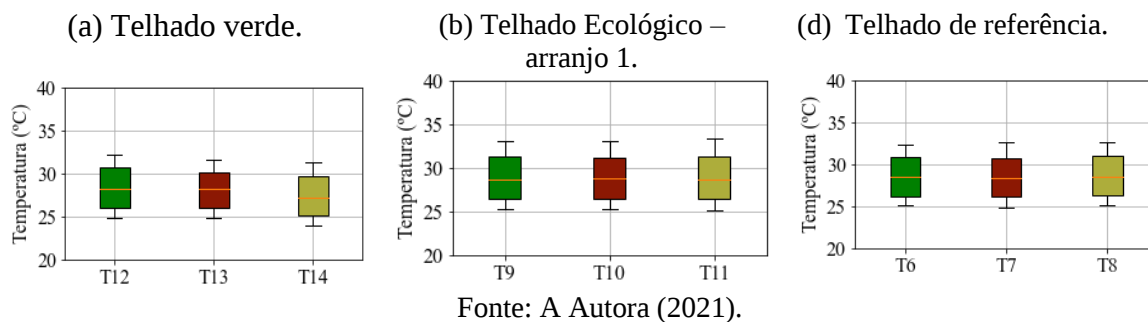


Figura 63 - *BoxPlot* da temperatura interna em cada sensor no dia 15 de abril.

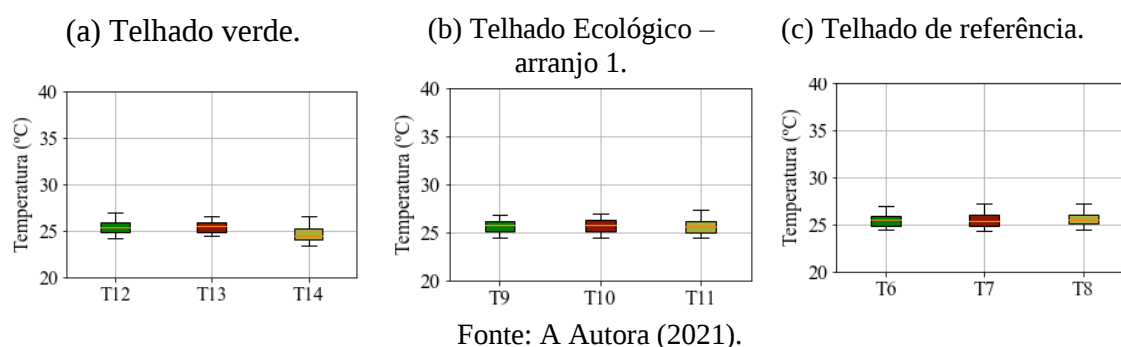
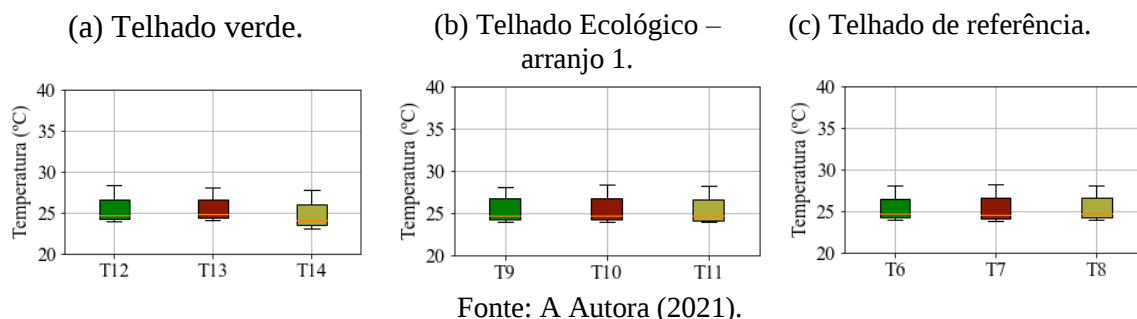


Figura 64 - *BoxPlot* da temperatura interna em cada sensor no dia 11 de abril.

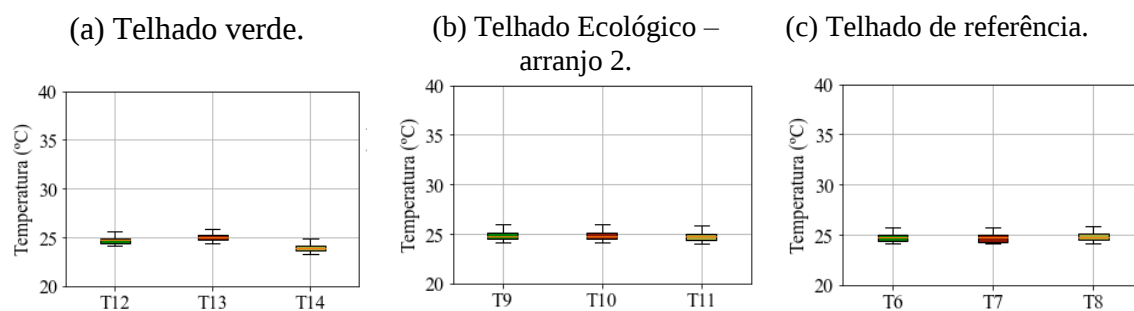


Para o dia 22 de abril os sensores do telhado ecológico (arranjo 1) apresentaram os maiores valores de temperatura, atingindo aproximadamente 34°C, em contrapartida, o telhado verde atingiu os menores valores de temperatura, com cerca de 24°C, registrado pelo sensor localizado na parede direita (parede à oeste) do ambiente abaixo da cobertura. O mesmo desempenho térmico foi observado no dia 27 de abril.

Para o dia 15 de abril evidenciou-se a redução na amplitude térmica em todas as coberturas, com valores de temperatura interna oscilando entre 27°C e 24,2°C. Em comparação com o dia 11 de abril, observou-se que a maior parte dos dados de temperatura apresentaram valores próximos ao extremo de menor valor, evidenciando a redução da temperatura observada

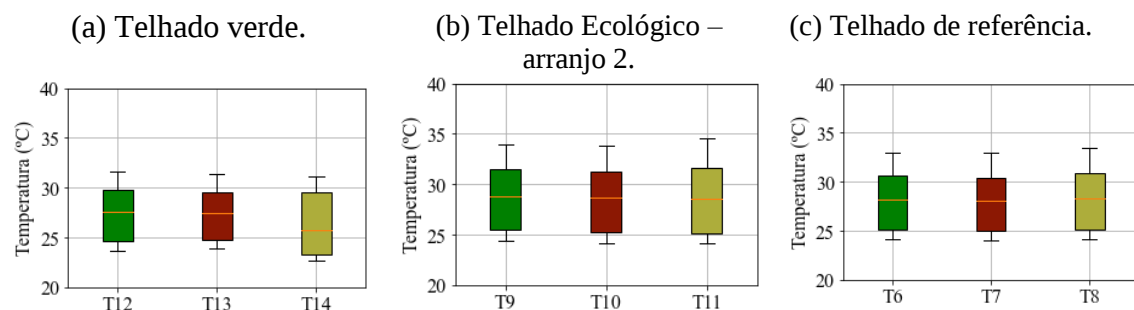
nesse dia. No mês de abril, observou-se que no telhado verde, a temperatura registrada no sensor T14 esteve sempre abaixo da temperatura registrada nos sensores T12 e T13. Nas Figuras 65, 66 e 67 pode-se observar os dados de temperatura registrados no mês de maio. Para o dia 20 de maio evidencia-se que os dados de temperatura apresentam valores mais próximos ao extremo de menor valor do conjunto, fator destacado pela menor distância entre o primeiro quartil e o valor mínimo, em comparação com a distância entre o terceiro quartil e o valor máximo.

Figura 65 - *BoxPlot* da temperatura interna em cada sensor no dia 13 de maio.



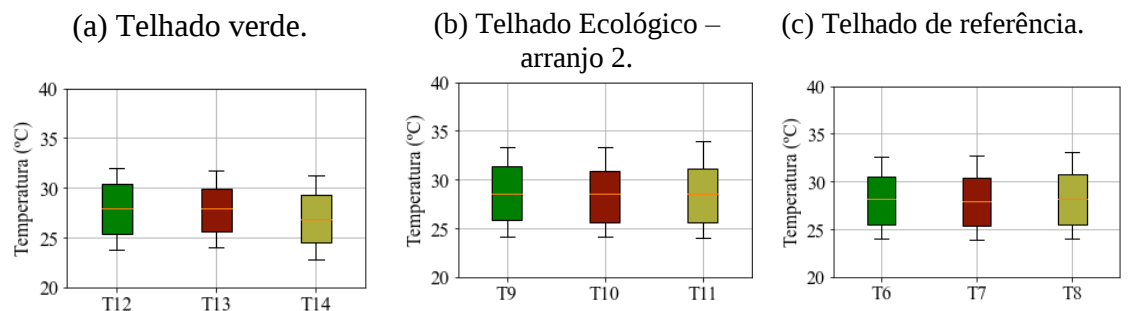
Fonte: A Autora (2021).

Figura 66 - *BoxPlot* da temperatura interna em cada sensor no dia 20 de maio.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 67 - *BoxPlot* da temperatura interna em cada sensor no dia 25 de maio.



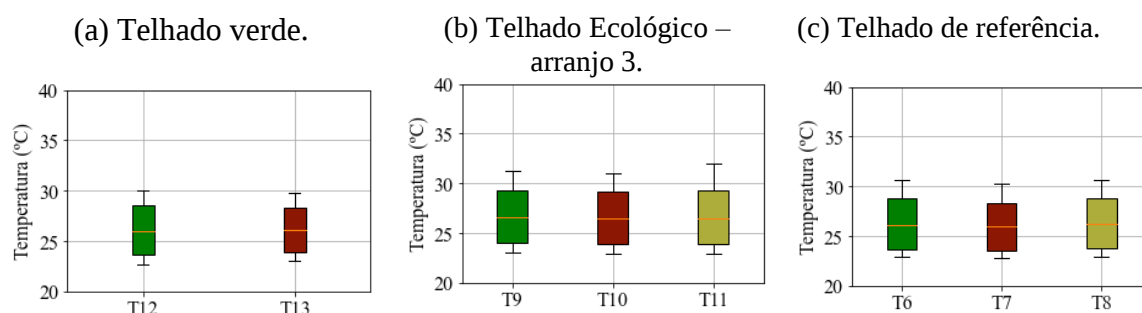
Fonte: A Autora (2021).

Para os dias 13, 20 e 25 de maio observou-se que para o telhado ecológico (arranjos 1, 2 e 3) e o telhado de referência, os sensores localizados nas paredes à oeste (T11 e T8) apresentaram valores amostrais máximos mais elevados que os outros sensores, porém os valores das medianas são semelhantes. A variação dos sensores do telhado verde foi similar ao observado no mês de abril.

No dia 13 de maio houve uma variação semelhante ao do dia 15 de abril, com redução da amplitude interquartílica, ou seja, redução na amplitude entre os valores do primeiro e terceiro quartil.

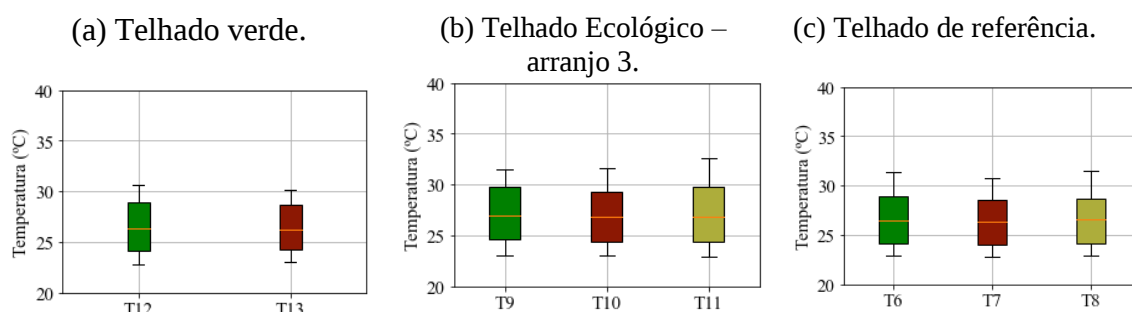
Nas Figuras 68, 69 e 70 observou-se a variação dos dados de temperatura registrados em cada sensor nos dias de análise do mês de junho, semelhante ao observado no mês de maio os dados encontram se mais próximos ao valor mínimo dos conjuntos. Para o dia 18 de junho houve a mesma redução da amplitude interquartílica evidenciada nos dias chuvosos dos meses de abril e maio.

Figura 68 - *BoxPlot* da temperatura interna em cada sensor no dia 23 de junho.



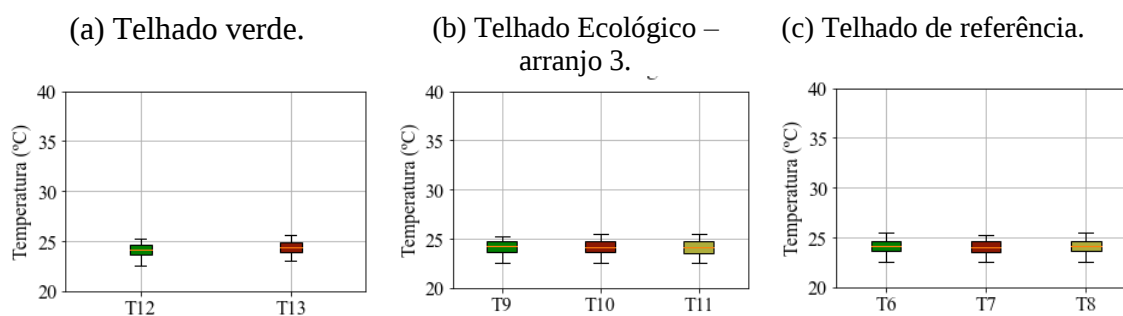
Fonte: A Autora (2021).

Figura 69 - *BoxPlot* da temperatura interna em cada sensor no dia 13 de junho.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 70 – *BoxPlot* da temperatura interna em cada sensor no dia 18 de junho.



Fonte: A Autora (2021).

5.3.4 Análise de variância

Observou-se que para os três meses de análise os dados de todos os sensores apresentaram valores e variações semelhantes, com valores de mediana próximos, comprovando que a média dos valores dos sensores é representativa para a análise das amostras coletadas.

Entretanto, a comprovação da semelhança entre as médias dos conjuntos de cada cobertura só é possível a partir da aplicação de uma análise estatística mais precisa, dessa forma utilizou-se a análise da variância para a verificação das hipóteses de semelhança ou diferença significativa entre as médias de temperatura para cada cobertura. A análise aplicada compara a semelhança dos três conjuntos de dados para cada dia analisado.

Os resumos dos resultados estão nas Tabelas 30, 31 e 32. Os resultados gerados pela aplicação da análise de variância estão no Apêndice C, nas Tabelas C.1, C.2, C.3, C.4, C.5, C.6, C.7, C.8, C.9 e C.10. Observou-se que no mês de abril, da comparação entre o telhado ecológico (arranjo 1) com o telhado verde e o telhado de referência, o desempenho das coberturas apenas apresenta semelhança para o dia de maior amplitude térmica e para o dia de maior precipitação pluviométrica. De maneira que para as análises com valores de F superiores ao F crítico e valor-P inferior à significância adotada, foi determinado que há diferença significativa entre os conjuntos de dados analisados.

Tabela 30 - Análise de variância entre os telhados no mês de abril.

Data	α	F	valor-P	F crítico	Resultado
22/04/2021	0,05	7,197	0,0011	3,0603	Diferença significativa
27/04/2021	0,05	1,931	0,1488	3,0603	Semelhança significativa
15/04/2021	0,05	7,550	0,0008	3,0603	Diferença significativa
11/04/2021	0,05	0,348	0,7069	3,0603	Semelhança significativa

Legenda: α = significância adotada.

Fonte: A Autora (2021).

Com relação ao mês de maio, a comparação entre o telhado ecológico (arranjo 2) com o telhado verde e o telhado de referência, destacou que as coberturas se comportaram de forma semelhante para os dias de maior temperatura ambiente externa e maior amplitude térmica, visto que se obteve, nesses dias, valores de F inferiores ao F crítico e valor-P superior à significância adotada.

Para o dia de maior precipitação e menor amplitude térmica do mês de maio, observou-se que há uma diferença significativa entre as médias amostrais dos três telhados, para esse dia observou-se que o telhado como maior capacidade de isolamento térmico foi o telhado ecológico, e que o telhado verde apresentou temperaturas ambiente internas inferiores as outras coberturas, gerando a diferença nas médias amostrais.

Tabela 31 - Análise de variância entre os telhados no mês de maio.

Data	α	F	valor-P	F crítico	Resultado
20/05/2021	0,05	2,087	0,1279	3,0603	Semelhança significativa
25/05/2021	0,05	1,507	0,2252	3,0603	Semelhança significativa
13/05/2021	0,05	5,637	0,0044	3,0603	Diferença significativa

Legenda: α = significância adotada.

Fonte: A Autora (2021).

Para o mês de junho, foi analisado a comparação entre o desempenho térmico do telhado ecológico (arranjo 3) com o telhado verde e o telhado de referência. Evidenciou-se que para todos os parâmetros analisados as coberturas apresentaram desempenhos semelhantes.

Tabela 32 - Análise de variância entre os telhados no mês de junho.

Data	α	F	valor-P	F crítico	Resultado
23/06/2021	0,05	0,524	0,5933	3,0603	Semelhança significativa
13/06/2021	0,05	0,629	0,5345	3,0603	Semelhança significativa
18/06/2021	0,05	0,961	0,3849	3,0603	Semelhança significativa

Legenda: α = significância adotada.

Fonte: A Autora (2021).

Com a finalidade de analisar estatisticamente a semelhança entre a variação dos registros de cada sensor, aplicou-se a ANOVA para o conjunto de sensores de cada cobertura, analisando-se os dados de temperatura em cada dia estudado. O resumo da análise é observado nas Tabelas 33, 34 e 35.

Tabela 33 - Análise de variância entre sensores de cada telhado no mês de abril.

Data	Cobertura	α	F	valor-P	F crítico	Resultado
22/04/2021	TV	0,05	1,333	0,267	3,0603	Semelhança significativa
	TE1	0,05	0,029	0,972	3,0603	Semelhança significativa
	TR	0,05	0,057	0,945	3,0603	Semelhança significativa
27/04/2021	TV	0,05	2,094	0,127	3,0603	Semelhança significativa
	TE1	0,05	0,006	0,994	3,0603	Semelhança significativa
	TR	0,05	0,085	0,918	3,0603	Semelhança significativa
15/04/2021	TV	0,05	23,959	1,1E-09	3,0603	Diferença significativa
	TE1	0,05	0,150	0,861	3,0603	Semelhança significativa
	TR	0,05	0,329	0,719	3,0603	Semelhança significativa
11/04/2021	TV	0,05	4,715	0,010	3,0603	Diferença significativa
	TE1	0,05	0,045	0,956	3,0603	Semelhança significativa
	TR	0,05	0,047	0,954	3,0603	Semelhança significativa

Legenda: α = significância adotada, TV = telhado verde, TE1 = telhado ecológico (arranjo 1), TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 34 - Análise de variância entre sensores de cada telhado no mês de maio.

Data	Cobertura	α	F	valor-P	F crítico	Resultado
20/05/2021	TV	0,05	0,467	0,627	3,0603	Semelhança significativa
	TE2	0,05	0,024	0,975	3,0603	Semelhança significativa
	TR	0,05	0,072	0,931	3,0603	Semelhança significativa
25/05/2021	TV	0,05	2,123	0,124	3,0603	Semelhança significativa
	TE2	0,05	0,029	0,971	3,0603	Semelhança significativa
	TR	0,05	0,087	0,917	3,0603	Semelhança significativa
13/05/2021	TV	0,05	100,678	6,9E-28	3,0603	Diferença significativa
	TE2	0,05	0,725	0,486	3,0603	Semelhança significativa
	TR	0,05	0,874	0,419	3,0603	Semelhança significativa

Legenda: α = significância adotada, TV = telhado verde, TE2 = telhado ecológico (arranjo 2), TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 35 - Análise de variância entre sensores de cada telhado no mês de junho.

Data	Cobertura	α	F	valor-P	F crítico	Resultado
23/06/2021	TV	0,05	0,009	0,923	3,0603	Semelhança significativa
	TE3	0,05	0,027	0,974	3,0603	Semelhança significativa
	TR	0,05	0,112	0,894	3,0603	Semelhança significativa
13/06/2021	TV	0,05	0,022	0,881	3,0603	Semelhança significativa
	TE3	0,05	0,073	0,929	3,0603	Semelhança significativa
	TR	0,05	0,133	0,875	3,0603	Semelhança significativa
18/06/2021	TV	0,05	4,975	0,028	3,0603	Diferença significativa
	TE3	0,05	0,353	0,703	3,0603	Semelhança significativa
	TR	0,05	0,334	0,717	3,0603	Semelhança significativa

Legenda: α = significância adotada, TV = telhado verde, TE3 = telhado ecológico (arranjo 3), TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Para o mês de abril observou-se diferença significativa dos dados apenas para os dias 11 e 15 de abril, nos sensores localizados no telhado verde. No mês de maio a diferença significativa foi evidenciada apenas no dia 13, nos sensores localizados no telhado verde. E para o mês de junho a diferença significativa foi observada no dia 18, para os sensores localizados no telhado verde. Portanto, os dados apresentaram diferença significativa apenas entre os sensores T12, T13 e T14, nos dias de menor amplitude térmica e maior precipitação pluviométrica, caracterizados pela redução da temperatura ambiente externa.

5.3.5 Análise comparativa dos telhados ecológicos

Para a comparação da variação térmica dos três arranjos de telhados ecológicos executado, optou-se pela separação dos dados com base nos eventos extremos de temperatura e precipitação de cada mês. Na Tabela 36 observou-se os dados de temperatura do ponto de máxima e na Tabela 37 do ponto mínima para os dias de maior temperatura externa dos meses de abril, maio e junho.

Com referência ao ponto de máxima temperatura observou-se que o telhado ecológico com maior diferença de temperatura com a temperatura externa é o arranjo 2, apresentando uma temperatura ambiente 9,65% (3,00°C) superior a temperatura externa, seguido pelo arranjo 1 que apresenta uma diferença de 2,03°C entre a temperatura ambiente interna e a externa, correspondente a um aumento percentual 6,28% com relação a temperatura externa. O arranjo 3 foi o que apresentou a menor diferença entre os dados de temperatura interna e externa, com relação ao ponto de máxima a temperatura ambiente interna foi 1,00°C superior a externa, gerando um aumento percentual de 3,29%.

Com relação ao ponto de máximo, os três arranjos apresentaram tempo de retardo na temperatura interna, destacando o arranjo 1 com o maior tempo de retardo (2:00 horas), o arranjo 3 apresenta o segundo maior tempo de retardo (01:00 hora), e o menor tempo de retardo foi evidenciado no arranjo 2, de 30 minutos.

Tabela 36 - Temperaturas e horários de ponto de máximo nos dias de maior temperatura externa.

Arr.	Data	Cob.	Ponto de máximo				
			Hor-pico (hh:mm)	Temp (°C)	Δ Hor. (hh:mm)	Δ Temp	
						Ext. (°C)	%
1	22/04/2021	Ext.	12:00	32,30	-	-	-
		TE	14:30	34,33	+02:00	2,03	6,28%
2	20/05/2021	Ext.	14:00	31,10	-	-	-
		TE	14:30	34,10	+00:30	3,00	9,65%
3	23/06/2021	Ext.	14:00	30,40	-	-	-
		TE	15:00	31,40	+01:00	1,00	3,29%

Legenda: Arr. = arranjo | Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | D Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 37 - Temperaturas e horários de ponto de mínimo nos dias de maior temperatura externa.

Arr.	Data	Cob.	Ponto de mínimo				
			Hor-pico (hh:mm)	Temp (°C)	Δ Hor. (hh:mm)	Δ Temp	
						Ext. (°C)	%
1	22/04/2021	Ext.	05:00	23,50	-	-	-
		TE	06:00	25,80	+01:00	2,30	9,79%
2	20/05/2021	Ext.	06:00	21,80	-	-	-
		TE	06:00	24,27	00:00	2,47	11,33%
3	23/06/2021	Ext.	05:00	20,80	-	-	-
		TE	06:00	22,93	+01:00	2,13	10,24%

Legenda: Arr. = arranjo | Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | D Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

O desempenho térmico das coberturas com relação ao ponto de mínimo é semelhante ao observado no ponto de máximo. Evidenciou-se que o telhado ecológico do arranjo 2 apresentou a maior variação de temperatura (2,47°C) comparado com a temperatura externa, apresentando uma temperatura ambiente interna 11,33% superior aos dados externo, evidenciando uma maior conservação térmica. Observou-se que o arranjo 1, apresenta a segunda maior conservação térmica, com uma temperatura ambiente interna 2,30°C superior a temperatura externa, correspondendo a um aumento percentual de 9,79%.

Nas Tabelas 38 e 39 observou-se os dados de temperatura para os pontos de máximos e mínimos, respectivamente, dos dias de maior amplitude térmica dos meses de abril, maio e

junho. Evidenciou-se que o arranjo 2 apresentou a maior diferença de temperatura interna quando comparada a temperatura externa, com uma temperatura interna 8,86% (2,73°C) superior a temperatura externa. Seguido pelo arranjo 3 com um aumento percentual da temperatura interna de 7,17% em comparação com a temperatura externa, e o menor aumento (6,47%) foi observado no arranjo 1.

Tabela 38 - Temperaturas e horários de ponto de máximo nos dias de maior amplitude térmica.

Arr.	Data	Cob.	Ponto de máximo				
			Hor-pico (hh:mm)	Temp (°C)	Δ Hor. (hh:mm)	Δ Temp	
						Ext. (°C)	%
1	27/04/2021	Ext.	14:00	31,10	-	-	-
		TE	14:30	33,10	+00:30	2,00	6,43%
2	25/05/2021	Ext.	13:00	30,80	-	-	-
		TE	14:00	33,53	+01:00	2,73	8,86%
3	13/06/2021	Ext.	14:00	29,70	-	-	-
		TE	13:30	31,83	-00:30	2,13	7,17%

Legenda: Arr. = arranjo | Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

Os arranjos 1 e 3 apresentaram um tempo retardo de 30 minutos com relação ao ponto de máximo, enquanto o arranjo 2 apresentou um tempo de retardo de 01;00 hora. Com relação ao ponto de mínimo, o tempo de retardo dos arranjos 2 e 3 foi semelhante (30 minutos), entretanto o arranjo 1 não apresentou tempo de retardo para o ponto de mínimo de temperatura.

Semelhante ao observado no ponto de máximo, para o ponto de mínimo o arranjo de maior aumento percentual da temperatura interna em comparação com a externa foi o arranjo 2 (14,76%), seguido pelo arranjo 3 (13,86%) e por último o arranjo 1 (13,00%).

Tabela 39 - Temperaturas e horários de ponto de mínimo nos dias de maior amplitude térmica.

Arr.	Data	Cob.	Ponto de mínimo				
			Hor-pico (hh:mm)	Temp (°C)	Δ Hor. (hh:mm)	Δ Temp	
						Ext. (°C)	%
1	27/04/2021	Ext.	06:00	22,30	-	-	-
		TE	06:00	25,20	00:00	2,90	13,00%
2	25/05/2021	Ext.	06:00	21,00	-	-	-
		TE	06:30	24,10	+00:30	3,10	14,76%
3	13/06/2021	Ext.	06:00	20,20	-	-	-
		TE	06:30	23,00	+00:30	2,80	13,86%

Legenda: Arr. = arranjo | Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

No que se refere aos dias de maior precipitação pluviométrica e menor amplitude térmica, observa-se que só há redução da temperatura máxima no mês de abril, com o arranjo 1, foi evidenciado uma redução percentual de 4,49% (1,27°C) da temperatura interna em comparação com a externa para o dia 15 de abril, e de 3,10% (0,90°C) para o dia 11 de abril.

Tabela 40 - Temperaturas e horários de ponto de máximo nos dias de maior precipitação e menor amplitude térmica.

Arr.	Data	Cob.	Ponto de máximo				
			Hor-pico (hh:mm)	Temp (°C)	Δ Hor. (hh:mm)	Δ Temp	
						Ext. (°C)	%
1	11/04/2021	Ext.	11:00	29,00	-	-	-
		TE	10:30	28,10	-00:30	-0,90	-3,10%
	15/04/2021	Ext.	10:00	28,30	-	-	-
		TE	09:30	27,03	-00:30	-1,27	-4,49%
2	13/05/2021	Ext.	02:00	24,50	-	-	-
		TE	00:00	25,97	-02:00	1,47	6,00%
3	18/06/2021	Ext.	12:00	25,20	-	-	-
		TE	12:00	25,43	00:00	0,23	0,91%

Legenda: Arr. = arranjo | Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

O dia 13 de maio, referente ao arranjo 2, apresentou o maior aumento percentual da temperatura interna em relação a temperatura externa (6,00%). O arranjo 3, apresentou uma temperatura interna 0,91% (0,23°C) superior a temperatura externa.

Com relação ao ponto de mínimo, observou-se que o arranjo 1 apresentou uma temperatura interna 5,47% superior a temperatura externa no dia de menor amplitude térmica do mês de abril. O arranjo 3 apresentou o segundo maior aumento percentual (3,53%) da temperatura interna com relação a temperatura externa. Semelhantemente aos resultados do ponto de máximo, o arranjo 2 apresentou o menor aumento percentual (2,25%) da temperatura interna com relação a temperatura externa.

Tabela 41 - Temperaturas e horários de ponto mínimo nos dias de maior precipitação e menor amplitude térmica.

Arr.	Data	Cob.	Ponto de mínimo				
			Hor-pico (hh:mm)	Temp (°C)	Δ Hor. (hh:mm)	Δ Temp	
						Ext. (°C)	%
1	11/04/2021	Ext.	04:00	23,30	-	-	-
	1	TE	06:00	23,90	+02:00	0,60	2,58%
	15/04/2021	Ext.	23:00	23,20	-	-	-
	1	TE	23:30	24,47	+03:00	1,27	5,47%
2	13/05/2021	Ext.	20:00	23,60	-	-	-
	1	TE	23:00	24,13	+03:00	0,53	2,25%
3	18/06/2021	Ext.	21:00	21,80	-	-	-
	1	TE	23:30	22,57	+02:30	0,77	3,53%

Legenda: Arr. = arranjo | Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: A Autora (2021).

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa evidenciou os benefícios na implementação de quatro tipos de telhados ecológicos, sendo um telhado verde convencional e três telhados ecológicos de baixo custo com empregos de materiais reutilizados. A concepção dos telhados ecológicos implantados envolveu aspectos econômicos, sociais e ambientais a partir da reutilização de resíduos sólidos urbanos, neste caso as embalagens refletivas de Tetra Pak e as garrafas PET. Os telhados ecológicos de baixo custo caracterizaram-se pela facilidade de aplicação, manuseio e manutenção, tornando-se uma alternativa de viabilidade econômica e sustentável para a reutilização de materiais descartados, proporcionando benefícios térmicos às edificações.

A caracterização meteorológica da cidade do Recife ressaltou a ocorrência de eventos extremos de precipitação e consequente redução da temperatura externa no decorrer dos meses de abril a junho de 2021. De maneira que as análises do desempenho térmico dos telhados foram fundamentais para a compreensão e aplicação da cobertura adequada as características e necessidades específicas de cada cenário.

Evidenciou-se que o telhado de referência apresentou os maiores valores de temperatura. A cobertura de telhado verde destacou-se por apresentar as menores temperatura no interior do ambiente, apresentando também a menor variação nos valores durante o dia nos meses de abril, maio e junho. A comparação dos diferentes telhados ecológicos com as outras coberturas, ressaltou que o desempenho térmico do telhado ecológico foi semelhante nos três meses, ou seja, os três sistemas implantados apresentaram desempenhos semelhantes, com uma variação da temperatura diária intermediária às outras coberturas.

A presença da água no interior das garrafas PET funcionou como uma camada de retenção térmica, a radiação solar incidente, ao longo dos dias anteriores aqueceu a camada de água que reteve o calor e realizou a transmissão para o interior do ambiente, funcionando como uma barreira térmica as trocas de calor entre o ambiente interno e externo. A análise das temperaturas de pico evidenciou que o telhado ecológico atingiu a máxima temperatura interna diária em média uma hora após a temperatura externa, caracterizando um tempo de retardo no ponto de máxima.

O telhado ecológico apresentou o melhor desempenho na redução da umidade no interior do ambiente abaixo da cobertura, reduzindo em até 11,1% a umidade relativa do ar. Para os meses de abril, maio e junho, os maiores valores de umidade relativa do ar são observados no ambiente abaixo do telhado verde.

A comparação dos três arranjos de telhado ecológico executados demonstrou que com relação aos dias de maior temperatura externa e aos dias de maior amplitude térmica, o arranjo 2 destacou-se por apresentar os maiores aumentos percentuais da temperatura interna em comparação com a temperatura externa, 11,33% e 14,76%, respectivamente. Para esses dias o arranjo 1 se destacou por apresentar o maior tempo de retardo. Com relação aos dias de maior precipitação pluviométrica e menor amplitude térmica o arranjo 1 se destacou por reduzir a temperatura no interior do ambiente em até 4,49% quando comparado com a temperatura externa máxima.

Os resultados destacaram que no âmbito da redução de temperatura ambiente interna, o telhado verde apresentou melhores desempenhos que o telhado ecológico (arranjos 1, 2 e 3), visto que o ecológico apresentou o maior potencial de conservação térmica mantendo a temperatura no ambiente abaixo da cobertura reduzindo as trocas térmica, porém destacou-se com a vantagem de reduzir a umidade relativa do ar no ambiente em comparação com as outras coberturas. Portanto, ressalta-se a semelhança entre o desempenho térmico dos telhados ecológicos implantados e as diferenças entre a aplicação dessa tecnologia em comparação com os telhados verdes, sendo necessárias mais análises nos âmbitos térmicos e hidrológicos para a viabilidade da adesão da tecnologia ambiental de maneira econômica e sustentável.

7 TRABALHOS FUTUROS

Para a identificação e análise completa dos benefícios da tecnologia, a continuação dessa pesquisa de forma a analisar as estruturas em um ciclo completo de um ano, já que observou-se diferença entre os meses, estudos comparativos com outros tipos de telhados verdes, incluindo telhados verdes com a aplicação de garrafas PET. Além da implementação da tecnologia em escala real, de maneira a compreender os benefícios microclimáticos gerados no local de aplicação.

Recomenda-se a aplicação de estudos complementares envolvendo a análise da retenção hídrica e da qualidade da água escoada dos sistemas de telhado ecológico e verde desenvolvidos, além de simulações para compreensão do impacto na implementação da tecnologia em larga escala, a fim de avaliar os proveitos proporcionados a partir da aplicação em uma cidade.

Assim como estudos voltados ao potencial de sustentabilidade gerado pela reutilização dos materiais advindo dos resíduos sólidos urbanos e do potencial econômico gerado pela implementação dos telhados ecológicos.

REFERÊNCIAS

- ABOELATA, A.. Vegetation in different street orientations of aspect ratio (H/W 1:1) to mitigate UHI and reduce buildings' energy in arid climate. **Building and Environment**, 172, 106712, 2020.
- 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.
- 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 16401**: Instalações de ar condicionado: sistemas centrais e unitários: Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 7 p., 2008.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 60 p., 2013
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 37120**: Desenvolvimento sustentável de comunidades — Indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida. Rio de Janeiro, 87 p., 2017.
- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/ 2019**. São Paulo, 68 p., 2019.
- AKBARI, H.; POMERANTZ, M.; TAHA, H.. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. **Solar Energy**, 70 (3): 295–310. 2001.
- ALBERTO, E. Z.; RECCHIA, F. M.; PENEDO, S. R. M.; PALETTA, F. C.. Estudo do telhado verde nas construções sustentáveis. XII Safety, Health and Environment World Congress. **Anais...** São Paulo – SP, 3 p., 2012.
- ALENCAR, A. K. B.. **Urbanismo sensível às águas: O paradigma da sustentabilidade na concepção de projetos para recuperação de rios urbanos**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pernambuco, 295 p., 2016.
- ALMEIDA, P. M. C.. **Reciclagem de polímeros – uma abordagem em contexto escolar**. Dissertação de Mestrado em Ciências - Formação Contínua de Professores da Universidade do Minho, Portugal, 104 p., 2012.
- ALMEIDA, S. P. C.; BRITO, G. P.; SANTOS, S. M.. Revisão Histórica dos Telhados Verdes: da Mesopotâmia aos dias atuais. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 2 (1): 042-051. 2018.

- ALTÓE, 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**, v. 11, n. 2, pp. 201-210, 2019.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G.. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22 (6): 711–728, 2014.
- AMORIM, M. C. C. T.. Intensidade e forma da ilha de calor urbana em Presidente Prudente/SP: episódios de inverno. **Geosul**, 20 (39): 65-82, 2005.
- AMUPE - Associação Municipalista de Pernambuco. Disponível em: http://www2.condepefidem.pe.gov.br/web/condepe-fidem/planejamento-regionalizado?p_p_id=110_INSTANCE_k3CP&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_110_INSTANCE_k3CP_struts_action=%2Fdocument_library_display%2Fview&_110_INSTANCE_k3CP_folderId=143436. Acesso em: 20 de junho de 2021.
- ANDRADE, H. V.. Mapeamento das políticas estaduais de adaptação das cidades às mudanças climáticas no Brasil. **Revista Geográfica Acadêmica**, 11 (2): 24-49, 2017.
- ARAÚJO, S. R.. **As Funções dos Telhados Verdes no Meio Urbano, na Gestão e no Planejamento de Recursos Hídricos**. Monografia do Curso de Graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica – RJ, 21 p., 2007.
- ARAÚJO, D. C.; MORAIS, C. R. S. ALTIDES, M.E.D. Avaliação mecânica e físico-química entre telhas convencionais e alternativas usadas em habitações populares. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. v.3., n. 2, p. 50-56, 2008.
- ARAÚJO, B. G.; SOUSA, A. M. S.; PERES, M. D.. Telhado verde de garrafa PET. I Simpósio de Produção Científica, **Anais...**, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, PA, pp. 1-3, 2017.
- AZEVEDO, R. C. M.. **Uso de tecnologias sociais para adequação da qualidade da água armazenada em cisternas para consumo humano**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste. 93 p., 2014.
- BARROS, H. R.; LOMBARDO, M. A. Zoneamento climático urbano da cidade do Recife: Uma contribuição ao planejamento urbano. **GEOUSP – espaço e tempo**, São Paulo, n. 33, pp. 187-197, 2013.

BARROS, H. R.; LOMBARDO, M. A.; GALVINCIO, J. D.. **Capítulo 17 - Interferência de Fatores Antrópicos e Fenômenos Climáticos na Mudança e Variação da Temperatura da Superfície da Cidade do Recife: Utilização de Técnicas de Sensoriamento Remoto.** Mudanças Climáticas e Impactos Ambientais. Galvinctio, J.D.(org)- Recife-PE; Ed. Universitária: UFPE, 275- 290, 2010.

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 6.938** de 31 de Agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Presidência da República. 1981.

BRASIL. **Plano Nacional Sobre Mudança do Clima (PNMC)**. Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima, Decreto nº 6.263, de 21 de novembro de 2007. Brasília – DF, 129 p., 2008.

BRASIL. **Lei Nº 12187** de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Presidência da República, 2009.

BRASIL. **Lei Nº 12305** 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.

BONIN, L. C.. Considerações sobre a utilização do conceito de desempenho como instrumento para a modernização tecnológica na construção de edificações. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 7º, **Anais...** Florianópolis: UFSC/ANTAC, v. 2, pp. 447-552, 1998.

CABRAL, J. J. S. P.; ALENCAR, A. V.. **Recife e a convivência com as águas.** Hydroaid (Itália); Pmss/Ministério das Cidades. Gestão do Território e Manejo Integrado das Águas Urbanas. Brasília: Gráfica Brasil, p. 111-130, 2005.

CARDOSO, G. T.; VECCHIA, F.. Thermal Behavior of Green Roofs Applied to Tropical Climate. **Journal of Construction Engineering**, 2013: Article ID 940386, 7p., 2013.

CARNEIRO, T. A.; GUISELINI, C.; PANDORFI, H.; LOPES NETO, J. P.; LOGES, V.; SOUZA, R. F. L.. Condicionamento térmico primário de instalações rurais por meio de diferentes tipos de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 19 (11): 1086-1092, 2015.

CATUZZO, H.. **Telhado Verde: impacto positivo na temperatura e umidade do ar. O caso da Cidade de São Paulo.** Tese de Doutorado da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 206 p., 2013.

- COELHO, T. M.; CASTRO, R.; GOBBO, J. A.. PET containers in Brazil: opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, 55 (3): 291-299, 2011.
- COIMBRA, I. V.; DAMATO NETO, J.. A logística reversa de embalagens de PET e sua contribuição para o meio ambiente. 2º. Congresso Amazônico de Meio Ambiente e Energias Renováveis, 2016, Belém-PA, **Anais..**, 11 p., 2016.
- CONFALONIERI, U. E. C.. Variabilidade climática, vulnerabilidade social e saúde no Brasil. **Terra Livre**, Ano 19, 1 (20): 193-204, 2003.
- CORREA, C.B., GONZALEZ, F.J.N. O uso de coberturas ecológicas na restauração de coberturas planas. Núcleo de Pesquisa em Tecnologia de Arquitetura e Urbanismo-NUTAU. **Anais..** São Paulo-SP: Pró-reitoria de Pesquisa, Universidade de São Paulo, pp. 686-696, 2002.
- CORTÉS, C. F.; CASTILLO, C. A. D.. Mejora de las condiciones de habitabilidad y del cambio climático a partir de ecotechos extensivos. **Cuaderno de Viviendas y Urbanismo**, 4 (8): 316-329, 2011.
- DIMITRIJEVIĆ, D. G.; ŽIVKOVI, P. M.; STOJILJKOVI, M. M.; TODOROVI, M. N.; SPASI-DJORDJEVI, S. Z.. Green Living Roof Implementation and Influences of the soil layer on its properties. **Thermal science**, 20 (1): 511 – 520, 2016.
- ESPÍNOLA, D. M.. **Telhados verdes, uma proposta para redução térmica em Foz do Iguaçu-PR**. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da União Dinâmica de Faculdades Cataratas, Foz do Iguaçu-PR. Pp. 1-52, 2010.
- FARIAS, M. M. M. W. E. C.. **Aproveitamento de águas da chuva por telhados**: aspectos quantitativos e qualitativos. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, 117 f., 2012.
- FENSTERSEIFER, P.; TASSI, R.; CECONI, D. E.; ALLASIA, D. G.; MINETTO, B.; CHAMMA, A. L.; CELANTE, R.; FENSTERSEIFE, M. J.. Reaproveitamento de embalagens Tetra Pak® como suporte de telhados verdes. 8º. 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**, v. 5, n. 1, p. 13-17, 2014.
- FERRAZ, I. L.. **O Desempenho Térmico de um Sistema de Cobertura Verde em Comparação ao Sistema Tradicional de Cobertura com Telha Cerâmica**. Dissertação de

Mestrado, Departamento de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, Brasil, 150 p., 2012.

FLUBACHER, L. L.. **Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen**. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau E. V. 2002.

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.

FREITAS, R.. O que é conforto. VIII Encontro Nacional e IV Encontro Latino Americano Sobre Conforto no Ambiente Construído, Maceió – AL, **Anais...**, 726-735, 2005.

FRIZON, A. J.; CANTERAS, F. B. Telhados verdes: análise de custo de implantação e desempenho térmico no verão. **Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP**, Campinas, SP, n. 26, 2018. DOI: 10.20396/revpibic262018123.

FUNFGELT. 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. 5ª Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnologia Interdisciplinar. 2012, Camboriú. **Anais...** Camboriú: Instituto Federal Catarinense, 6 p., 2012.

GAFFIN, S. R.; ROSENZEWEIG, C.; KHANBILVARDI, R.; EICHENBAUM-PIKSER, J.; HILLEL, D.; CULLIGAN, P.; MCGILLIS, W.; ODLIN, M.. Stormwater Retention for a Modular Green Roof Using Energy Balance Data. **Center for Climate Systems Research**, Columbia University, New York. 2011.

GARCÍA, S. Q.; LABARRIOS, M. A. P.; MORA, H. S.; IZQUIERDO, M. A. E.; RAMÍREZ, R. I. C.. Desempenho Térmico dos Telhados Verdes em relação aos Telhados Convencionais. TULLIO, F.. **Engenharia na Prática: Importância Teórica e Tecnológica**. Atena: Ponta Grossa-PR, 74-87, 2020.

GAGLIANO, A.; DETOMMASO, M.; NOCERA, F.; EVOLA, G.. A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. **Building and Environment**, 90: 71e81, 2015.

GIVONI, B.. **Homem, Clima e Arquitetura**. 2ª Edição, Applied Science Publishers, Ltd., Londres, 483 p., 1976.

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**, Florianópolis, v.7, n.2, pp. 57-66, 2021.

- HAMAD, K.; KASEEM, M.; DERI, F.. Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. **Polymer Degradation and Stability**, 98 (12): 2801-2812 2013.
- HARZMANN, U.. German green roofs. Annual Green Roof Construction Conference, 2002. **Anais..** Chicago: Roofscapes, Inc., 2002.
- HASAN, A.. Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost. **Appl Energy**, 63: 115e24, 1999.
- HEBER, F.; SILVA, E. M. D.. Institucionalização da Política Nacional de Resíduos Sólidos: dilemas e constrangimentos na Região Metropolitana de Aracaju (SE). **Revista de Administração Pública**, 48 (4): 913-937, 2014.
- HEIERLI, U. **Marketing safe water systems: Why it is so hard to get safe water to the poor-and so profitable to sell it to the rich.** SDC – Swiss Agency for Development and Cooperation, Employment and Income Division. 1ª ed., 120p. 2008.
- HENEINE, M. C. A. S.. **Cobertura Verde.** Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 49f., 2008.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. **Cidades e Estados. Recife.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>. Acesso em 20 de maio de 2021.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos> . Acesso em 05 de julho de 2021.
- JIM, C. Y.; PENG, L. L. H.. Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. **Urban Forestry & Urban Greening**, 11: 73-85, 2012.
- JOBIM, A. L.. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo de água pluvial.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria - Rio Grande do Sul, 76 f., 2013.
- KOZMHINSKY, M; PINHEIRO, S. M. G.; EL-DEIR, S. G.. **Telhados Verdes: uma iniciativa sustentável.** EDUFRPE: Recife-PE, 1ª. Ed., 65 p., 2016.
- KREBS, L. F.. **Coberturas verdes extensivas: Análise da utilização em projetos na região metropolitana de Porto Alegre e Serra Gaúcha.** Dissertação do Mestrado Profissionalizante em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 181 f., 2005.
- KREBS, L. F.; SATTLER, M. A.. Coberturas vivas extensivas: Análise da utilização em projetos na região metropolitana de Porto Alegre e Serra Gaúcha. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 4, n. 4, pp. 1-12, 2012.

KRUTI, J.; SHILPA, D. Solar Water Disinfection under real conditions with or without Solar collector. **Journal of Environmental Research and Development**. v. 7, n. 2A, pp.1085-1098, 2012.

LACERDA, F. F.. **Tendências de temperatura e precipitação e cenários de mudanças climáticas de longo prazo no nordeste do Brasil e em ilhas oceânicas**. Tese de Doutorado da Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 110 f., 2015.

LEONARDO, H. R. A. L.; SANTOS, G. C.; SILVA, T. F.; MACEDO, P. M. T.; VILARIM, M. B.; PAIVA, A. L. R.; SANTOS, S. M.. Análise de variância de dados aplicada no estudo do desempenho térmico de telhados verdes. XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte – MG, **Anais...** pp. 1-10, 2021.

LESSA, M. L. S.. **Critérios de Sustentabilidade Para Elementos Construtivos: um estudo sobre telhas “ecológicas” empregadas na construção civil**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Escola de Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador. 153 p., 2009.

LIN, B. S.; YU, C. C.; SU, A. T.; LIN, Y. J.. Impact of climatic conditions on the thermal effectiveness of an extensive green roof. **Building and Environment**, 67: 26-33, 2013.

MACHADO, M.; BRITO, C.; NEILA, J.. Comportamiento térmico em modelos com cubiertas ecológicas. **Tecnologia y Construccion**, 19 (3): 49-58, 2003.

MACHADO, P. A. L.. Princípios da política nacional de resíduos sólidos. **Revista do Tribunal Regional Federal da 1ª Região**, 24 (7), pp. 25-33, 2012.

MAGALHÃES, R. J.. **Desempenho térmico de telhas: Um estudo comparativo entre telhas ecológicas e telhas de fibrocimento**. Publicação ENC. PF-001A/07, Trabalho de Conclusão de Curso, curso de Engenharia Civil. Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, GO, 53 p., 2018.

MANHÃES, G. S.; ARAÚJO, R. S.. Sustentabilidade nas construções. **Revista Científica Perspectivas Online**, 4 (11): 14-24, 2014.

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

MASCARÓ, J. L.; MASCARO, L. E. R.; STORCHI, C.; CAMARGO, E. G.; MACIEL, Â.; GUTERRES, H. E.; BRENTANO, A. K.; FRANARIN, A. C.. **Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios**. Rio Grande do Sul, 134 p., 1992.

- 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.
- MENTES, 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: 217-226, 2006.
- MICHELS, C.; GÜTHS, S.; SILVA, L. C.. Desempenho térmico de uma cobertura verde testada em bancada experimental. **Brazilian Journal of Development**, 6 (11): 92254-92266, 2020.
- MISAKA, B. L. S.. **Avaliação do conforto térmico entre os sistemas de telhado verde, ecológico e convencional**. Trabalho de Conclusão de Curso, curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa. Alegrete, RS, 87 p., 2021.
- MOREIRA, E. B. M.. **Balanco de energia e evapotranspiração na cidade do Recife por sensoriamento remoto**. Tese do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 152 p., 2014.
- MOREIRA, E. B. M.; NÓBREGA, R. S.; SILVA, B. B.; RIBEIRO, E. P.. O modelo Sebal para estudos de clima intraurbano: Aplicação em Recife, Pernambuco, Brasil. **Revista RAEGA**, 39, 247 – 265, 2017.
- MOURA, A. E. S. S.; CORREA, M. M.; SILVA, E. R.; LIMA, G. S.; SENA, J. R.; FIGUEIRÊDO, A. C.. Precipitação Efetiva nos Períodos Chuvoso e Pouco Chuvoso em um Fragmento de Mata Atlântica, Recife-PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 17 (4): 7-16, 2012.
- NIACHOU, A.; PAPAKONSTANTINO, K.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASSOULIS, A.; MIHALAKAKOU, G.. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and buildings**, 33: 719-729, 2001.
- NÓBREGA, R. S.; VITAL, L. A. B.. Influência da Urbanização sobre o Microclima de Recife e Formação de Ilha de Calor. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 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 Tetrapak como uma alternativa sustentável na construção civil. **Tecno-Lógica**, 13 (2): 64-69, 2009.
- OBERNDOFER, E.; LUNDHOLM, J. T.; BASS, B.; COFFMAN, R.; DOSHI, H.; DUNNETT, N.; GAFFIN, S.; KOHLER, M.; LIU, K. K. Y.; ROWE, D. B.. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. **BioScience**, 57 (10): 823-833, 2007.

- OHNUMA JÚNIOR, A. A.. **Medidas não convencionais de reservação d'água e controle da poluição hídrica em lotes domiciliares**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 331 f., 2008.
- OLIVEIRA, M. C. F., ROCHA, J. P., RIBEIRO, J. B. M., MOTA, G. V.. Estudo das alterações meteorológicas associadas a urbanização na grande Belém - PA. IX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Campina Grande-PB, **Anais...**, p. 177-179, 1995.
- OLIVEIRA, E. W. N.. **Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 87 f., 2009.
- OULDBOUKHITINE, S. E.; BELARBI, R.; JUFFAL, I.; TRABELSI, A.. Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model. **Building and Environment**, 46: 2624-2631, 2011.
- PAIVA, A. L. R.; SANTOS, S. M.; SILVA, T. F.; SANTOS, G. C.. Capacidade de retenção de água em um telhado verde: estudo de caso em Caruaru. 13º. Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, 2017, Porto, Portugal. **Anais...**, 10 p., 2017.
- PALMEIRA, A. N.. **Balanco de energia em telhado verde**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 94 p., 2016.
- PANZIERA, A. G.; CALIL, V. S.; AMARAL, F. D.; SWAROVSKY, A.. Desempenho de diferentes tipos de telhado verde no conforto térmico urbano na cidade de Santa Maria, RS. **Disciplinarum Scientia**, 16 (3): 445-457, 2015.
- PAPPU, A.; SAXENA, M.; ASOLEKAR, S. R.. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. **Building and Environment**, 42(6): 2311-2320, 2007.
- PATERNIANI, J. E. S.; SILVA, M. J. M. Desinfecção de efluentes com tratamento terciário utilizando energia solar (SODIS): Avaliação do uso do dispositivo para concentração dos raios solares. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 10, n. 1, p. 9-13, 2005.
- 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, p. 1-30, 2011.
- PERNAMBUCO. **Lei Nº 11.725**, de 23 de dezembro de 1999, que dispõe, nos termos do art. 123, § 1º, da Constituição Estadual, sobre o Plano Plurianual do Estado para o quadriênio 2000-2003 e dá outras providências. Governo do Estado de Pernambuco, 1999.

PERNAMBUCO. **Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado**. Disponível em: <https://www.pdui-rmr.pe.gov.br/RMR>. Acesso em 18 de novembro de 2021.

PESSANHA, L. B.. **Proposta de implantação de um sistema de telhado verde extensivo utilizando a técnica de wetland, na Escola Politécnica – UFRJ**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 50 f., 2017.

PIRES, G. W. M. O.; PASCHOALIN FILHO, J. A.. Blocos intertravados manufaturados com concreto dosado utilizando-se resíduos de PET (politereftalato de etileno): Aspectos econômicos e ambientais. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente: Desafios da Sustentabilidade na Economia de Baixo Carbono, São Paulo-SP, **Anais..**, artigo 108, 1-15 2015.

PLANEJ. **O uso do telhado verde como método de drenagem na fonte**. Disponível em: <https://www.planejpb.com.br/post/uso-do-telhado-verde-como-m%C3%A9todo-de-drenagem-na-fonte>. Acesso em 21 de junho de 2021.

PORTAL DO GOVERNO BRASILEIRO. **Objetivos de Desenvolvimento sustentável, Agenda 2030**. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>. Acesso em 21 de abril de 2021.

RECIFE. **Lei Nº 18.112** de 13 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”. Prefeitura Municipal de Recife, 2015.

ROAF, S.. **Ecohouse: a casa ambientalmente sustentável**. Porto Alegre: Bookman, 408 p., 2006.

ROLA, S. M.. **A Natureza como ferramenta para a sustentabilidade de cidades: estudo da capacidade do sistema de maturação em filtrar a água de chuva**. Tese de Doutorado em Ciências de Planejamento Energético da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 222 p., 2008.

ROCHA, R. S. T. M.. **Desempenho térmico de telhado verde ecológico de baixo custo em clima semiárido**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, 134 p., 2020.

SANSIGOLO, C. A.. Distribuições de extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba, SP (1917-2006). **Revista Brasileira de Meteorologia** 23 (3): 341-346, 2008.

- SANTOS, S. M.; MONTENEGRO, 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, 5., 2009, Recife, **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, G. C.. **Desempenho térmico de telhados verdes no agreste pernambucano**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru-PE, 96 p., 2016.
- SANTOS, L. R. L.; LIMA, J. V. F.; TIBÚRCIO NETO, L.; ROLEMBERG, R. R.; GONZAGA, G. B. M.. Telhado verde: uma proposta sustentável para a construção civil. **Cadernos de Graduação Ciências Exatas e Tecnológicas**, 4 (2): 195-206, 2017.
- SCHMIDT, M.. Influência da composição do substrato no desempenho térmico de telhados verdes. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavél-PR, 57 p., 2020.
- SECTMA – Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. **As Políticas Públicas Ambientais do Estado de Pernambuco**, 89 p., 2010.
- SENA, J. C. L.. **Estudo das componentes do balanço de Energia em uma cultura de arroz Irrigado no sul do Brasil**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 54 p., 2012.
- SENANAYAKE, I. P.; WELIVITIYA, W. D. D. P.; NADEEKA, P. M.. Remote sensing based analysis of urban heat islands with vegetation cover in Colombo city, Sri Lanka using Landsat-7 ETM+ data. **Urban Climate**, 5: 19-35, 2013.
- SHASHUA-BAR, L., POTCHTER, O., BITAN, A., BOLTANSKY D., YAAKOV, Y. Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. **International Journal of Climatology**, 30 (1): 44-57, 2010.
- SHEN, L.; WORRELL, E.; PATEL, M. K.. Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, 55(1): 34-5, 2010.
- SILVA, K. C. P.; CAMPOS, A. T.; YANAGI JUNIOR, T.; CECCHIN, D.; LOURENÇONI, D.; FERREIRA, J. C.. Reaproveitamento de resíduos de embalagens Tetra Pak-® em coberturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 19 (1): 58–63, 2015.

- SILVA, C. M.; GOMES, M. G.; SILVA, M.. Green roofs energy performance in Mediterranean climate. **Energy Build.** 116, 318–325. 2016. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.01.012
- 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**, v. 09, n. 06, pp. 2034-2053, 2016.
- SILVA, F. C. M.; SIQUEIRA, J. P.; ARAGÃO, S. F.. Telhados verdes e seus benefícios à sociedade e ao meio ambiente. **Repositório UniToledo**, 20 p., 2016. Disponível em: <https://servicos.unitoledo.br/repositorio/handle/7574/240>, Acesso em: 20 de junho de 2021.
- SOUCH, C.; GRIMMOND, S.. Applied climatology: urban climate. **Progress in Physical Geography**, 30 (2): 270–279, 2006.
- SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V.; ARAÚJO, L. E.. Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados às Chuvas na Cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2: 250-268, 2012.
- SOUZA, R. L. R.; FONTES, A. R. M.; SALOMÃO, S.. A triagem de materiais recicláveis e as variabilidades inerentes ao processo: estudo de caso em uma cooperativa. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 10, p. 4185-4195, 2014. SPANNENBERG, M. G.. **Análise de Desempenho Térmico, Acústico e Lumínico em Habitação de Interesse Social: Estudos de Caso em Marau–RS**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, 189 p., 2006.
- 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.
- SUSCA, T.; GAFFIN, S. R.; DELL’OSSO, G. R.. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. **Environmental Pollution**, 159: 2119-2126, 2011.
- SYNNEFA, A.; DANDOU, A.; SANTAMOURIS, M.; TOMBROU, M.; SOULAKELLIS, N.. On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy. **J Appl Meteorol Clim**, 47: 2846e56, 2008.
- 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.
- TUCCI, C. E. M.. Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2 (2): 5-12, 1997.
- TUCCI, C. E. M.. Gerenciamento da Drenagem Urbana. Porto Alegre, Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 7 (1): 5-27, 2002.

- UEMURA, M. B.. **Tetra Pak® e a Logística Reversa**. Disponível em: <https://mudarfuturo.fea.usp.br/wp-content/uploads/2015/03/06-Tetra-Pak%C2%AE-e-a-Logi%CC%81stica-Reversa.pdf>. Acesso em 23 de junho de 2021.
- VILARIM, M. B.; LEONARDO, H. R. A. L.; CÂMARA, C. P. S.; SANTANA, G. C. S.; SANTOS, S. M.. Contribuições dos instrumentos legais na difusão dos telhados verdes. XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Online, **Anais..**, 10 p., 2020.
- VIRK, G.; JANSZ, A.; MAVROGIANNI, A.; MYLONA, A.; STOCKER, J.; DAVIES, M.. Microclimatic effects of green and cool roofs in London and their impacts on energy use for a typical office building. **Energy and Buildings**, 88: 214-228, 2015.
- 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, 2015, Porto Alegre-RS, **Anais..**, 5p., 2015.
- WILLES, J. A.. **Tecnologias em telhados verdes extensivos: meios de cultura, caracterização hidrológica e sustentabilidade do sistemas**. Tese de doutorado da Escola Superior de Agricultura. “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba-SP, 70p., 2014.
- YANG, J.; YU, Q.; GONG, P.. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. **Atmos Environ**, 42 (31): 7266e73, 2008.
- ZOULIA, I.; SANTAMOURIS, M.; DIMOUDI, A.. Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens. **Environmental Monitoring and Assessment**, 156 (275): 275–292, 2009.

APÊNDICE A – VERIFICAÇÃO DOS SENSORES

Tabela A.1 – Dados de verificação dos sensores.

Data	Protótipo 1			Protótipo 2			Protótipo 3			Protótipo 4			Protótipo 5		
	Local	Sensor	Temp. (°C)	Local	Sensor	Temp. (°C)	Local	Sensor	Temp. (°C)	Local	Sensor	Temp. (°C)	Local	Sensor	Temp. (°C)
03/03/2021	PEsq	T2	26,30	PEsq	T6	Stop	PEsq	T9	26,20	PEsq	-	-	PEsq	T12	25,70
	PPost	T4	25,90	PPost	T7	25,90	PPost	T10	26,00	PPost	-	-	PPost	T13	25,90
	PDir	T5	26,00	PDir	T8	26,00	PDir	T11	26,10	PDir	-	-	PDir	T14	25,80
	Paredes	Média	26,07	Paredes	Média	25,95	Paredes	Média	26,10	Paredes	Média	-	Paredes	Média	25,80
	Teto	TH3	25,80	Teto	TH4	25,80	Teto	TH5	26,10	Teto	TH1	26,20	Teto	TH2	25,80
04/03/2021	PEsq	T5	27,20	PEsq	T8	27,30	PEsq	T11	26,90	PEsq	-	-	PEsq	T14	26,50
	PPost	T2	27,20	PPost	T6	Stop	PPost	T9	26,90	PPost	-	-	PPost	T12	26,70
	PDir	T4	27,00	PDir	T7	27,10	PDir	T10	27,30	PDir	-	-	PDir	T13	27,30
	Paredes	Média	27,13	Paredes	Média	27,20	Paredes	Média	27,03	Paredes	Média	-	Paredes	Média	26,83
	Teto	TH2	26,80	Teto	TH3	27,00	Teto	TH4	27,00	Teto	TH5	26,90	Teto	TH1	27,10
05/03/2021	PEsq	T4	27,70	PEsq	T7	27,90	PEsq	T10	28,20	PEsq	-	-	PEsq	T13	27,30
	PPost	T5	27,50	PPost	T8	27,80	PPost	T11	28,00	PPost	-	-	PPost	T14	26,80
	PDir	T2	27,70	PDir	T6	Stop	PDir	T9	28,20	PDir	-	-	PDir	T12	27,70
	Paredes	Média	27,63	Paredes	Média	27,85	Paredes	Média	28,13	Paredes	Média	-	Paredes	Média	27,27
	Teto	TH1	27,90	Teto	TH2	27,60	Teto	TH3	27,70	Teto	TH4	27,30	Teto	TH5	27,30

Legenda: Temp. = temperatura | PEsq = parede esquerda | PPost = parede posterior | PDir = parede direita.

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE B – TEMPERTURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS

Tabela B.1 – Temperaturas e horários de pico, em 22 de abril de 2021 (Sensor do teto).

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor- pico (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp.		Hor- pico (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh: mm)	ΔTemp.		
				(°C)					(°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	05:00	23,50	-	-	-2,80	12:00	32,30	-	-	-1,80	8,80
TV	07:00	25,10	+02:00	1,60	-1,20	14:30	30,80	+02:30	- 1,50	-3,30	5,70
TE	07:00	27,00	+02:00	3,50	0,70	15:00	34,10	+03:00	1,80	0,00	7,10
TR	07:00	26,30	+02:00	2,80	-	15:00	34,10	+03:00	1,80	-	7,80

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | D Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: Autor (2021).

Tabela B.2 – Temperaturas e horários de pico, em 27 de abril de 2021 (Sensor do teto).

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor- pico (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp.		Hor- pico (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh: mm)	ΔTemp.		
				(°C)					(°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	06:00	22,30	-	-	-3,50	14:00	31,10	-	-	-2,10	8,80
TV	07:30	25,00	+01:30	2,70	-0,80	15:00	30,90	+01:00	- 0,20	-2,30	5,90
TE	07:30	26,30	+01:30	4,00	0,50	15:00	33,10	+01:00	2,00	-0,10	6,80
TR	07:30	25,80	+01:30	3,50	-	15:00	33,20	+01:00	2,10	-	7,40

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | D Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: Autor (2021).

Tabela B.3 – Temperaturas e horários de pico, em 15 de abril de 2021 (Sensor do teto).

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor-pico (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh: mm)	ΔTemp. (°C)		Hor-pico (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh: mm)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	23:00	23,20	-	-	-1,40	10:00	28,30	-	-	2,00	5,10
TV	23:30	24,40	+00:30	1,20	-0,20	15:30	26,10	+05:30	-2,20	-0,20	1,70
TE	23:30	24,80	+00:30	1,60	0,20	15:30	26,40	+05:30	-1,90	0,10	1,60
TR	23:30	24,60	+00:30	1,40	-	15:30	26,30	+05:30	-2,00	-	1,70

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: Autor (2021).

Tabela B.4 – Temperaturas e horários de pico, em 11 de abril de 2021 (Sensor do teto).

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor- pico (hh:mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		Hor- pico (hh:mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	04:00	23,30	-	-	-0,50	11:00	29,00	-	-	1,30	5,70
TV	06:00	23,80	+02:00	0,50	0,00	12:30	27,40	+01:30	- 1,60	-0,30	3,60
TE	06:00	23,90	+02:00	0,60	0,10	13:00	27,40	+02:00	- 1,60	-0,30	3,50
TR	06:00	23,80	+02:00	0,50	-	12:30	27,70	+01:30	- 1,30	-	3,90

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: Autor (2021).

Tabela B.5 – Temperaturas e horários de pico, em 20 de maio de 2021 (Sensor do teto).

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp (°C)
	Hor- pico (hh: mm)	Temp, (°C)	ΔHor. (hh:m m)	ΔTemp. (°C)		Hor- pico (hh:m m)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:m m)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	06:00	21,80	-	-	-2,70	14:00	31,10	-	-	-2,80	9,30
TV	07:00	23,80	+01:00	2,00	-0,70	14:30	30,80	+00:30	- 0,30	-3,10	7,00
TE	07:00	25,00	+01:00	3,20	0,50	15:30	33,60	+01:30	2,50	-0,30	8,60
TR	07:00	24,50	+01:00	2,70	-	14:30	33,90	+00:30	2,80	-	9,40

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: Autor (2021).

Tabela B.6 – Temperaturas e horários de pico, em 25 de maio de 2021 (Sensor do teto).

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp. (°C)
	Hor- pico (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		Hor- pico (hh: mm)	Temp. (°C)	ΔHor. (hh:mm)	ΔTemp. (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	06:00	21,00	-	-	-3,60	13:00	30,80	-	-	-2,40	9,80
TV	07:30	24,00	+01:30	3,00	-0,60	14:00	30,80	+01:00	0,00	-2,40	6,80
TE	07:30	25,20	+01:30	4,20	0,60	15:30	32,90	+02:30	2,10	-0,30	7,70
TR	07:30	24,60	+01:30	3,60	-	14:00	33,20	+01:00	2,40	-	8,60

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: Autor (2021).

Tabela B.7 – Temperaturas e horários de pico, em 13 de maio de 2021 (Sensor do teto).

Cob.	Ponto de mínimo					Ponto de máximo					Amp (°C)
	Hor- pico (hh: mm)	Temp (°C)	ΔHor. (hh: mm)	ΔTemp (°C)		Hor- pico (hh: mm)	Temp (°C)	ΔHor. (hh: mm)	ΔTemp (°C)		
				Ext.	Conv.				Ext.	Conv.	
Ext.	20:00	23,60	-	-	-0,20	02:00	24,50	-	-	-2,20	0,90
TV	23:00	23,90	+03:00	0,30	0,10	00:00	25,90	-02:00	1,40	-0,80	2,00
TE	23:00	23,90	+03:00	0,30	0,10	00:00	26,90	-02:00	2,40	0,20	3,00
TR	23:00	23,80	+03:00	0,20	-	00:00	26,70	-02:00	2,20	-	2,90

Legenda: Cob. = cobertura | Hor-pico = horário de pico | Temp. = temperatura | Δ Hor. = diferença de horário | Ext. = externa | Conv. = convencional | Amp. = amplitude | TV = telhado verde | TE = telhado ecológico | TR = telhado de referência.

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Tabela C.1 – Análise de variância, em 22 de abril de 2021.

Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T6			48	1395,4	29,0708	6,139131
T7			48	1390	28,9583	6,291844
T8			48	1398,1	29,1271	6,17223
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,70875	2	0,35438	0,057147	0,94448	3,06029
Dentro dos grupos	874,350625	141	6,20107	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T9			48	1422,3	29,6313	7,545173
T10			48	1417,5	29,5313	7,247726
T11			48	1416,2	29,5042	7,800833
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,430138889	2	0,21507	0,028557	0,97185	3,06029
Dentro dos grupos	1061,905417	141	7,53124	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T12			48	1342,3	27,9646	5,050421
T13			48	1337	27,8542	3,977429
T14			48	1310	27,2917	5,043333
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	12,50263889	2	6,25132	1,332792	0,26704	3,06029
Dentro dos grupos	661,345625	141	4,69039	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
Telhado Verde			48	1329,767	27,703472	4,653108
Telhado Ecológico			48	1418,667	29,55556	7,513916
Telhado de Referência			48	1394,5	29,05208	6,18071
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	88,0391821	2	44,01959105	7,197553957	0,001055881	3,060291772
Dentro dos grupos	862,343287	141	6,115909837	-	-	-

Fonte: Autor (2021).

Tabela C.2 – Análise de variância, em 27 de abril de 2021.

Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T6			48	1370,5	28,5521	6,03319
T7			48	1364,8	28,4333	6,38865
T8			48	1374,9	28,6438	6,37528
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,06847	2	0,53424	0,08526	0,91832	3,06029
Dentro dos grupos	883,465	141	6,26571	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T9			48	1390,6	28,9708	6,9353
T10			48	1387,7	28,9104	6,85117
T11			48	1389	28,9375	7,65346
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,08792	2	0,04396	0,00615	0,99387	3,06029
Dentro dos grupos	1007,68	141	7,14664	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T12			48	1357,4	28,2792	6,30934
T13			48	1352	28,1667	5,20227
T14			48	1313,2	27,3583	5,8395
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	24,2239	2	12,1119	2,09415	0,12699	3,06029
Dentro dos grupos	815,503	141	5,78371	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
Telhado Verde			48	1340,866667	27,93472222	5,728035855
Telhado Ecológico			48	1389,1	28,93958333	7,127312352
Telhado de Referência			48	1370,066667	28,54305556	6,247279354
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	24,59279321	2	12,2963966	1,9311055	0,148803179	3,060291772
Dentro dos grupos	897,8234954	141	6,36754252	-	-	-

Fonte: Autor (2021).

Tabela C.3 – Análise de variância, em 15 de abril de 2021.

Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T6			48	1221,8	25,4542	0,3736
T7			48	1220,7	25,4313	0,46007
T8			48	1225,6	25,5333	0,41929
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,27542	2	0,13771	0,32972	0,71968	3,06029
Dentro dos grupos	58,889	141	0,41765	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T9			48	1230,3	25,6313	0,39709
T10			48	1232,5	25,6771	0,47372
T11			48	1228,9	25,6021	0,50021
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,13722	2	0,06861	0,15013	0,86073	3,06029
Dentro dos grupos	64,4377	141	0,45701	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T12			48	1216,4	25,3417	0,41993
T13			48	1221,4	25,4458	0,35147
T14			48	1180,6	24,5958	0,52041
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	20,6339	2	10,3169	23,9593	1,1E-09	3,06029
Dentro dos grupos	60,715	141	0,4306	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
Telhado Verde			48	1206,133333	25,12777778	0,419921198
Telhado Ecológico			48	1230,566667	25,63680556	0,452824567
Telhado de Referência			48	1222,7	25,47291667	0,414924645
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6,481435185	2	3,240717593	7,550187303	0,000767307	3,060291772
Dentro dos grupos	60,52050926	141	0,42922347	-	-	-

Fonte: Autor (2021).

Tabela C.4 – Análise de variância, em 11 de abril de 2021.

Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T6			48	1218,7	25,3896	2,03159
T7			48	1216,4	25,3417	2,27567
T8			48	1220,8	25,4333	2,1495
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,20181	2	0,1009	0,04688	0,95421	3,06029
Dentro dos grupos	303,468	141	2,15226	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T9			48	1222,2	25,4625	2,12622
T10			48	1224,6	25,5125	2,2858
T11			48	1220,2	25,4208	2,36509
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,20222	2	0,10111	0,04476	0,95624	3,06029
Dentro dos grupos	318,524	141	2,25904	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T12			48	1220,7	25,4313	2,20815
T13			48	1225,6	25,5333	1,79844
T14			48	1185,4	24,6958	2,36934
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	20,0426	2	10,0213	4,71522	0,01042	3,06029
Dentro dos grupos	299,669	141	2,12531	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
Telhado Verde			48	1210,57	25,2201	2,108971139
Telhado Ecológico			48	1222,33	25,4653	2,253142238
Telhado de Referência			48	1218,63	25,3882	2,145129531
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,50844	2	0,75422	0,347714396	0,706904485	3,060291772
Dentro dos grupos	305,84	141	2,16908	-	-	-

Fonte: Autor (2021).

Tabela C.5 – Análise de variância, em 20 de maio de 2021.

Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T6			48	1351,9	28,1646	8,8551
T7			48	1346,6	28,0542	9,24339
T8			48	1357,9	28,2896	9,78904
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,33181	2	0,6659	0,07163	0,9309	3,06029
Dentro dos grupos	1310,71	141	9,29584	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T9			48	1375,9	28,6646	10,8368
T10			48	1370,3	28,5479	10,6413
T11			48	1377,1	28,6896	12,3065
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,54889	2	0,27444	0,02437	0,97593	3,06029
Dentro dos grupos	1587,87	141	11,2615	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T12			48	1313,9	27,3729	7,43393
T13			48	1315,2	27,4	6,47745
T14			48	1258,8	26,225	124,696
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	43,1851	2	21,5926	0,46735	0,62763	3,06029
Dentro dos grupos	6514,54	141	46,2024	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
Telhado Verde			48	1314,55	27,38645833	6,937419105
Telhado Ecológico			48	1374,433333	28,63402778	11,20848651
Telhado de Referência			48	1352,133333	28,16944444	9,287888101
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	38,16535108	2	19,08267554	2,086770325	0,127903043	3,060291772
Dentro dos grupos	1289,388304	141	9,144597904	-	-	-

Fonte: Autor (2021).

Tabela C.6 – Análise de variância, em 25 de maio de 2021.

Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T6			48	1349,3	28,1104	7,68776
T7			48	1344,3	28,0063	7,8857
T8			48	1355,8	28,2458	8,28126
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,38542	2	0,69271	0,08712	0,91662	3,06029
Dentro dos grupos	1121,17	141	7,95158	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T9			48	1372,2	28,5875	9,13856
T10			48	1365,7	28,4521	8,84936
T11			48	1371,8	28,5792	10,1681
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,55292	2	0,27646	0,02946	0,97098	3,06029
Dentro dos grupos	1323,33	141	9,38533	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T12			48	1339,1	27,8979	7,52574
T13			48	1335,2	27,8167	6,32482
T14			48	1290,6	26,8875	7,52495
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	30,2543	2	15,1272	2,12306	0,12347	3,06029
Dentro dos grupos	1004,65	141	7,12517	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
Telhado Verde			48	1321,633333	27,53402778	7,088581068
Telhado Ecológico			48	1369,9	28,53958333	9,353931738
Telhado de Referência			48	1349,8	28,12083333	7,944946809
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	24,49334877	2	12,24667438	1,506512926	0,225227945	3,060291772
Dentro dos grupos	1146,210602	141	8,129153205	-	-	-

Fonte: Autor (2021).

Tabela C.7 – Análise de variância, em 13 de maio de 2021.

Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T6			48	1189,1	24,7729	0,19819
T7			48	1185,6	24,7	0,18979
T8			48	1191,3	24,8188	0,20283
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,34431	2	0,17215	0,87416	0,41946	3,06029
Dentro dos grupos	27,7679	141	0,19694	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T9			48	1192,1	24,8354	0,22404
T10			48	1192,4	24,8417	0,22461
T11			48	1187,4	24,7375	0,2292
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,32764	2	0,16382	0,72503	0,48611	3,06029
Dentro dos grupos	31,859	141	0,22595	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T12			48	1185,5	24,6979	0,15978
T13			48	1199,7	24,9938	0,14826
T14			48	1146,6	23,8875	0,16112
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	31,4893	2	15,7447	100,678	6,9E-28	3,06029
Dentro dos grupos	22,0504	141	0,15639	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
Telhado Verde			48	1177,266667	24,52638889	0,155789992
Telhado Ecológico			48	1190,633333	24,80486111	0,225578704
Telhado de Referência			48	1188,666667	24,76388889	0,196115051
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,170108025	2	1,085054012	5,63680286	0,004414799	3,060291772
Dentro dos grupos	27,14173611	141	0,192494582	-	-	-

Fonte: Autor (2021).

Tabela C.8 – Análise de variância, em 23 de junho de 2021.

Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T6			48	1264,1	26,33542	7,054251
T7			48	1254,8	26,14167	6,38844
T8			48	1266,1	26,37708	6,908613
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,515139	2	0,757569	0,111674	0,894415	3,060292
Dentro dos grupos	956,5113	141	6,783768	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T9			48	1283	26,72917	7,720833
T10			48	1278,7	26,63958	7,533506
T11			48	1285	26,77083	8,899557
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,431806	2	0,215903	0,026816	0,973545	3,060292
Dentro dos grupos	1135,233	141	8,051299	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T12			48	1256,6	26,17917	6,385514
T13			48	1258,9	26,22708	5,327549
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,055104	1	0,055104	0,009409	0,922933	3,942303
Dentro dos grupos	550,514	94	5,856531	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
Telhado Verde			48	1257,75	26,20313	5,838979
Telhado Ecológico			48	1282,233	26,71319	8,028971
Telhado de Referência			48	1261,667	26,28472	6,767232
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,206678	2	3,603339	0,523863	0,593376	3,060292
Dentro dos grupos	969,8536	141	6,878394	-	-	-

Fonte: Autor (2021).

Tabela C.9 – Análise de variância, em 13 de junho de 2021.

Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T6			48	1256,5	26,73404	7,737946
T7			48	1245,2	26,49362	6,859741
T8			48	1257,5	26,75532	7,736438
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,985674	2	0,992837	0,133361	0,875261	3,061716
Dentro dos grupos	1027,37	141	7,444709	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T9			48	1277,2	27,17447	8,25716
T10			48	1268,5	26,98936	7,930537
T11			48	1278,6	27,20426	10,07607
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,274184	2	0,637092	0,072772	0,929848	3,061716
Dentro dos grupos	1208,133	141	8,754588	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T12			48	1248	26,55319	7,042979
T13			48	1244,3	26,47447	5,963682
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,145638	1	0,145638	0,022394	0,88137	3,944539
Dentro dos grupos	598,3064	94	6,50333	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
Telhado Verde			48	1246,15	26,51383	6,487576
Telhado Ecológico			48	1274,767	27,1227	8,711358
Telhado de Referência			48	1253,067	26,66099	7,418421
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,486836	2	4,743418	0,629174	0,534554	3,061716
Dentro dos grupos	1040,398	141	7,539118	-	-	-

Fonte: Autor (2021).

Tabela C.10 – Análise de variância, em 18 de junho de 2021.

Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T6			48	1155,6	24,075	0,546596
T7			48	1150,7	23,97292	0,495634
T8			48	1155,8	24,07917	0,519131
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,347639	2	0,173819	0,333977	0,716635	3,060292
Dentro dos grupos	73,38396	141	0,520454	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T9			48	1161,1	24,18958	0,524357
T10			48	1160,5	24,17708	0,568187
T11			48	1155,5	24,07292	0,582017
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,393889	2	0,196944	0,352829	0,703316	3,060292
Dentro dos grupos	78,70438	141	0,558187	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
T12			48	1156,4	24,09167	0,460355
T13			48	1171	24,39583	0,432323
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,220417	1	2,220417	4,974735	0,028099	3,942303
Dentro dos grupos	41,95583	94	0,446339	-	-	-
Grupo			Contagem	Soma	Média	Variância
Telhado Verde			48	1163,7	24,24375	0,445279
Telhado Ecológico			48	1159,033	24,14653	0,555827
Telhado de Referência			48	1154,033	24,04236	0,518664
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,973765	2	0,486883	0,961098	0,384964	3,060292
Dentro dos grupos	71,42919	141	0,50659	-	-	-

Fonte: Autor (2021).