



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANNY ISADORA ARAÚJO SENA

MODELAGEM POR DIFERENÇAS FINITAS DO TELHADO VERDE PARA O
CLIMA DE CRATEÚS

CRATEÚS
2022

ANNY ISADORA ARAÚJO SENA

MODELAGEM POR DIFERENÇAS FINITAS DO TELHADO VERDE PARA O CLIMA
DE CRATEÚS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima.

CRATEÚS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A687 Araújo Sena, Amy isadora.
Modelagem por diferenças finitas do telhado verde para o clima da cidade de Crateús / Amy isadora
Araújo Sena. – 2022.
82 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima.

1. Telhado verde. 2. Modelo matemático . 3. Desempenho térmico. I. Título.

CDD 620

ANNY ISADORA ARAÚJO SENA

MODELAGEM POR DIFERENÇAS FINITAS DO TELHADO VERDE PARA O CLIMA
DE CRATEÚS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Aos meus pais, irmãos e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde e por ter me dado forças para enfrentar todos os obstáculos que aconteceram nessa reta final do curso.

Ao Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima, pela sua paciência, compreensão e por compartilhar seu conhecimento para realização deste trabalho.

Aos meus queridos pais, Maria Eurídice Araújo e Valdemar Gonçalves Sena, pelo amor, apoio e incentivo.

Aos amigos, José Mota de Sousa Neto, Maria Zilda Chaves Martins, Samuel da Costa Siqueira e José Jailson de Oliveira Sampaio por ter influenciado minha vida acadêmica a ser mais leve, não sei como teria sido sem eles. Agradeço também pelos conselhos e pelos bons momentos que passamos juntos.

Ao meu namorado, Mário Kempes Lacerda Pereira Filho, pela cumplicidade e por me apoiar em todos os meus projetos.

A Universidade Federal do Ceará, pela qualidade do ensino público e gratuito.

As professoras participantes da banca examinadora Heloína Nogueira da Costa e Janine Brandão de Farias Mesquita pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

“A forma mais fácil de se transformar é conviver com aqueles que já são quem você quer ser.”

(Reide Hoffman)

RESUMO

O telhado verde tem sido proposto como alternativa para mitigar o desconforto térmico causado pelo aumento da temperatura do meio urbano, de forma a reduzir o consumo energético das edificações e proporcionar um desenvolvimento mais sustentável e ecológico do espaço. Com essa finalidade, o presente estudo teve como objetivo comparar o desempenho térmico de duas edificações, uma com cobertura convencional de concreto maciço e outra com cobertura verde de babosa aplicados às condições meteorológicas da cidade de Crateús-CE. Para tal finalidade, foi desenvolvido um modelo matemático em regime transiente unidimensional da transferência de calor das paredes e do telhado, tendo como ferramenta a análise do balanço de energia para determinar a variação de temperatura no interior do ambiente a cada hora durante 24 horas. A solução numérica do modelo matemático foi realizada através do método das diferenças finitas implementado no software Matlab no qual foram obtidos, através da simulação, valores da temperatura do teto e interna dos ambientes, tendo como dados de entrada a radiação solar, a velocidade do vento e a temperatura ambiente do dia analisado. Os dados de entrada foram adquiridos da estação meteorológica A342 localizada no município de Crateús disponibilizados no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para efeitos de comparação, foi escolhido o dia 27 de maio de 2021, durante o período denominado como quadra chuvosa, e o dia 16 de outubro de 2021, no período seco, com a finalidade de entender o comportamento térmico dessas coberturas em épocas diferentes do ano. Os resultados comprovam a eficiência do telhado verde em comparação com o telhado convencional, uma vez que eles reduzem as flutuações de temperatura no interior do edifício em quase 2 °C e são mais isolantes térmicos, isto é, possuem menor facilidade em trocar calor com o ambiente externo. Assim, foi possível constatar que os telhados verdes inseridos nas condições meteorológicas da cidade de Crateús podem ser considerados como uma alternativa viável para promover o conforto térmico em edificações do município.

Palavras-chave: Telhado verde. Modelo matemático. Desempenho térmico.

ABSTRACT

The green roof has been proposed as an alternative to mitigate the thermal discomfort caused by the increase in temperature in the urban environment, in order to reduce the energy consumption of buildings and provide a more sustainable and ecological development of the space. For this purpose, the present study aimed to compare the thermal performance of two buildings, one with a conventional solid concrete roof and the other with a green aloe roof applied to the meteorological conditions of the city of Crateús-CE. For this purpose, a mathematical model was developed in a one-dimensional transient regime of heat transfer from walls and roof, using the energy balance analysis as a tool to determine the temperature variation inside the environment every hour during 24 hours. The numerical solution of the mathematical model was carried out using the finite difference method implemented in the Matlab software, in which values of the temperature of the roof and interior of the environments were obtained, through simulation, using solar radiation, wind speed as input data. and the ambient temperature of the analyzed day. The input data were acquired from the meteorological station A342 located in the municipality of Crateús, available on the website of the National Institute of Meteorology (INMET). For comparison purposes, May 27, 2021 was chosen, during the period known as the rainy season, and October 16, 2021, during the dry period, in order to understand the thermal behavior of these roofs at different times of the year. The results prove the efficiency of the green roof compared to the conventional roof, since they reduce temperature fluctuations inside the building by almost 2 °C and are more thermal insulators, that is, they are less likely to exchange heat with the environment. external environment. Thus, it was possible to verify that the green roofs inserted in the meteorological conditions of the city of Crateús can be considered as a viable alternative to promote thermal comfort in buildings in the municipality.

Keywords: Green roof. Mathematical model. Thermal performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas de um telhado verde.....	21
Figura 2 – Condução de calor através de uma grande parede plana de espessura Δx e área A	24
Figura 3 – Transferência de calor de uma superfície quente para o ar por convecção.....	25
Figura 4 – Transferência de calor por radiação entre uma superfície e superfícies vizinhas ...	27
Figura 5 – Condução de calor permanente e transiente em uma superfície plana.....	28
Figura 6 – Esquema dos nós e das temperaturas nodais utilizados no desenvolvimento da formulação das diferenças finitas da transferência de calor na parede plana.....	30
Figura 7 – Balanço de energia de qualquer sistema	31
Figura 8 – Fontes de calor do telhado convencional	33
Figura 9 – Condição de contorno em telhado convencional com elemento de volume de espessura Δx	33
Figura 10 – Transferência de calor em parede plana.....	35
Figura 11 – Discretização do espaço; pontos da malha com suas temperaturas	36
Figura 12 – Fontes de calor no telhado verde.....	40
Figura 13 – Representação das camadas do telhado verde e suas equações heterogêneas de transferência de calor.....	41
Figura 14 – Disposição dos sensores de temperatura e umidade	51
Figura 15 – Nomenclatura das paredes.....	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Dados meteorológicos de 24h do dia 27/05/2021 da cidade de Crateús; temperatura ambiente e velocidade do vento	46
Gráfico 2 – Dados meteorológicos de 24h do dia 27/05/2021 da cidade de Crateús; radiação solar	47
Gráfico 3 - Dados meteorológicos de 24h do dia 16/10/2021 da cidade de Crateús; temperatura ambiente e velocidade do vento	47
Gráfico 4 – Dados meteorológicos de 24h do dia 16/10/2021 da cidade de Crateús; radiação solar	48
Gráfico 5 – Dados meteorológicos de 24h do dia 04/11/2015 do Agreste Pernambucano; radiação solar.....	53
Gráfico 6 - Dados meteorológicos de 24h do dia 04/11/2015 do Agreste Pernambucano; temperatura ambiente e velocidade do vento	53
Gráfico 7 – Validação do modelo; telhado verde de babosa	56
Gráfico 8 – Validação do modelo; telhado verde de coroa-de-frade.....	57
Gráfico 9 – Comportamento da temperatura do teto do telhado convencional e verde no dia 25/05/2021	59
Gráfico 10 – Comportamento da temperatura do teto do telhado convencional e verde no dia 16/10/2021	60
Gráfico 11 – Comparação da temperatura no interior do edifício em cada hora do dia 27/05/2021	61
Gráfico 12 – Comparação da temperatura no interior do edifício em cada hora do dia 16/10/2021	61
Gráfico 13 – Análise da temperatura ambiente e temperaturas internas das coberturas no dia 16/10/2021	62
Gráfico 14 – Temperatura superficial interna das paredes pertencentes ao ambiente do telhado verde e do telhado convencional no dia 27/05/2021	63
Gráfico 15 – Temperatura superficial interna das paredes pertencentes ao ambiente do telhado verde e do telhado convencional no dia 16/10/2021	64
Gráfico 16 – Influência da radiação solar na temperatura interna do telhado convencional e verde no dia 27/05/2021	65
Gráfico 17 – Influência da radiação solar na temperatura interna do telhado convencional e verde no dia 16/10/2021	65

Gráfico 18 – Influência da velocidade do vento na temperatura interna do telhado convencional e verde no dia 27/05/2021	66
Gráfico 19 – Influência da velocidade do vento na temperatura interna do telhado convencional e verde no dia 16/10/2021	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos materiais	48
Tabela 2 – Valores paramétricos	49
Tabela 3 - Dados das áreas de cada elemento envolvente	52
Tabela 4 - Valores geométricos da validação	55
Tabela 5 – Erro relativo do telhado verde de babosa e de coroa-de-frade em relação a Santos (2016).	58
Tabela 6 – Variação da temperatura interna em função da velocidade dos ventos para pequenas de radiação solar (menor igual a 10%), com média da radiação no intervalo de 13:00 -16:00 igual a 851,02 W/m ² e 826,34 W/m ² , para os dias 27/05/2021 e 16/10/2021, respectivamente.	67

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Comprimento
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor
k	Condutividade térmica
q_{cond}	Fluxo de transferência de calor por condução
A	Área da superfície sujeita à transferência de calor
T_s	Temperatura na superfície
T_∞	Temperatura do fluido para todos os pontos distantes
q_{cv}	Fluxo de transferência de calor por convecção
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
Nu	Número de Nusselt
L_c	Comprimento característico da geometria da superfície
C	Constante
Ra	Número de Rayleigh
Gr	Número de Grashof
Pr	Número de Prandtl
g	Aceleração gravitacional
β	Coefficiente de expansão volumétrica do fluido
ν	Viscosidade cinemática do fluido
q_{em}	Fluxo de emissão de radiação líquida
ε	Emissividade da superfície
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
α	Absorvidade da superfície
T_{cir}	Temperatura na superfície circundante
q_{sr}	Fluxo de calor devido a absorção de radiação
q_{sri}	Fluxo de radiação incidente na superfície
ρ	Densidade do material que compõe o telhado
C_p	Calor específico do material que compõe o telhado
t	Tempo
Q_{ent}	Taxa de transferência de calor que entra em um sistema
Q_{sai}	Taxa de transferência de calor que sai em um sistema
E_{ger}	Energia da geração de calor que ocorre em um sistema

$\Delta E_{ter,sis}$	Mudança da energia térmica no sistema
$\Delta \dot{E}_{vol}$	Taxa temporal de variação de energia dentro do elemento de volume por unidade de área
Σ	Somatório
T_{in}	Temperatura interna do ambiente
m	Massa de ar contida no interior do edifício
T_{amb}	Temperatura do ambiente externo
K	Graus Kelvin
ϕ	Fração volumétrica
V	Volume
T_G	Temperatura da camada verde
T_S	Temperatura do substrato
T_L	Temperatura da laje
q_{et}	Fluxo de calor transferido por evapotranspiração
q_{ps}	Fluxo de calor líquido necessário para realização de fotossíntese e respiração das plantas
TC	Coeficiente de transpiração
λ	Calor latente de vaporização
e_f	Fator de conversão
R_{ep}	Taxa de evaporação
R_{tp}	Taxa de transpiração
TR	Diferença de temperatura máxima e mínima
$^{\circ}C$	Graus Celsius
v	Velocidade dos ventos local
AT	Área do telhado
AP	Área da parede
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contexto	16
1.2	Problemática da pesquisa	17
1.3	Objetivos.....	17
1.4	Justificativa	18
1.5	Delimitação.....	18
1.6	Roteiro temático.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Telhado verde.....	20
<i>2.1.1</i>	<i>Camadas.....</i>	<i>20</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Tipos de vegetação</i>	<i>22</i>
2.2	Clima e vegetação	22
2.3	Mecanismos de transferência de calor.....	23
<i>2.3.1</i>	<i>Condução</i>	<i>23</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Convecção</i>	<i>24</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Radiação</i>	<i>26</i>
2.4	Transferência de calor no regime transiente unidimensional	27
2.5	Métodos numéricos em condução de calor.....	29
2.6	Diferenças finitas	29
2.7	Balanco de energia.....	31
3	MÉTODO DE PESQUISA	32
3.1	Modelagem matemática de transferência de calor para o telhado convencional	32
3.2	Solução numérica para transferência de calor no telhado convencional	35
3.3	Modelagem matemática de transferência de calor para o telhado verde.....	40
3.4	Solução numérica para transferência de calor no telhado verde.....	43
3.5	Implementação do modelo	45
3.6	Validação do modelo.....	50
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	56
4.1	Validação do modelo.....	56
4.2	Análise da temperatura do teto e da temperatura interna do telhado convencional e verde.....	59

4.3	Análise da temperatura superficial dos elementos envolventes	62
4.4	Análise da temperatura interna e a radiação	64
4.5	Análise da temperatura interna e a velocidade do vento.....	65
5	CONCLUSÃO	68
	REFERÊNCIAS	69
	APÊNDICE A – DADOS DO DIA 27-05-2021	72
	APÊNDICE B – DADOS DO DIA 16-10-2021	73
	APÊNDICE C – ALGORITMO DO TELHADO CONVENCIONAL.....	74
	APÊNDICE D – ALGORITMO DO TELHADO VERDE	77
	ANEXO A – TABELA COM PROPRIEDADES DO AR A 1 ATM DE PRESSÃO	82

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

Em virtude da ascensão da economia resultante da implementação de novas universidades, a expansão urbana da cidade de Crateús no Ceará pode ser observada pelas novas construções, novos loteamentos e a chegada de novos projetos de urbanização e arquitetura no município.

Assim, tendo em vista os aspectos acima mencionados e as características do clima tropical quente semiárido do referido município, caracterizado por precipitações concentradas no período conhecido como quadra chuvosa, que se estende de fevereiro a maio, torna-se necessária a busca por um plano de desenvolvimento socioambiental de ocupação do espaço urbano da cidade. Tal plano se faz necessário pois uma ampliação desordenada do ambiente pode conferir alterações na temperatura das edificações para além daquela devido ao clima quente, na canalização dos ventos e na exposição solar indesejada (BARBOSA, ROSSI, DRACH, 2014).

Além disso, com o aumento da urbanização pode acontecer a formação de um fenômeno conhecido como ilhas de calor. Este efeito está relacionado com um aumento na capacidade de absorção de calor de superfícies urbanas motivado pela utilização de materiais inapropriados associada com possíveis bloqueios de ventilação. Outros fatores que contribuem para a formação das ilhas de calor é a falta de áreas revestidas de vegetação, a impermeabilização dos solos e a emissão de dióxido de carbono (BARBOSA; DRACH; CORBELLA, 2010).

Segundo Song et al. (2013), o efeito ilhas de calor também são sentidos não só pela retenção de calor dos materiais utilizados no ambiente urbano, como também devido os edifícios liberarem calor antropogênico e poluentes gasosos que restringem os padrões normais de fluxo de ar.

Nesta direção, visando minimizar o desconforto térmico causado pelo aumento da temperatura do meio urbano e proporcionar um desenvolvimento mais sustentável e ecológico, o telhado verde (TV) vem sendo uma medida bastante eficaz e cada vez mais usada. Este tipo de cobertura vegetal é uma prática construtiva feita com plantas escolhidas de acordo com o tipo de vegetação mais apropriada para a região, podendo ser aplicado em lajes planas ou telhados inclinados, usando técnicas de impermeabilização e sistemas de drenagens adequados (FERREIRA, 2008; MONTEIRO, 1976).

Dentre outras vantagens da instalação do telhado verde, é importante citar que esse tipo de cobertura não deixa a radiação solar incidir diretamente na telha, armazena água, atua como isolante térmico, ameniza o calor nas horas mais quentes e o mantém nas mais frias. Pela capacidade das plantas reterem o carbono, o TV melhora a qualidade do ar, e ainda serve como isolante acústico por absorver ruídos (VACILIKIO; FLEISCHFRESSA, 2011).

Os telhados verdes ainda melhoram a eficiência energética dos edifícios, reduzindo a utilização de sistemas de refrigeração durante o verão e de aquecimento durante o inverno, já que fornecem sombra para aliviar a radiação solar e proporcionam o isolamento térmico (REN *et al.*, 2017; JAFFAL; OULDBOUKHITINE; BELARBI, 2012).

Em Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012), afirmam que se faz necessário mais estudos sobre coberturas verdes, uma vez que existem muitas vertentes que não foram muito bem compreendidas. Um exemplo está na falta de detalhamento de modelos sobre a quantificação do impacto dos telhados verdes na temperatura do ar no interior das edificações.

1.2 Problemática da pesquisa

Considerando o exposto acima, este trabalho de conclusão de curso tem a seguinte questão de pesquisa: **O telhado verde pode ser uma alternativa para promover o conforto térmico em habitações dos sertões de Crateús?**

1.3 Objetivos

Diante da problemática do presente estudo, o objetivo principal deste trabalho foi verificar, a partir do ponto de vista energético, a viabilidade de uma cobertura do tipo telhado verde para o clima da cidade de Crateús.

De forma mais específica, os objetivos são:

- Analisar, a partir do método numérico de diferenças finitas, o comportamento térmico e a eficiência de uma construção cuja cobertura é um telhado verde para o clima da cidade de Crateús;
- Comparar o comportamento de um telhado convencional com o telhado verde, a partir dos valores obtidos das temperaturas internas e externas das coberturas;
- Analisar a interferência da velocidade dos ventos e da radiação na temperatura interna dos ambientes;

- Comparar o desempenho térmico do telhado verde no período seco e chuvoso para cidade de Crateús.

1.4 Justificativa

Esse estudo primário na região é significativo para a comunidade acadêmica e para o desenvolvimento do município, uma vez que há a carência nas pesquisas relacionadas ao uso do telhado verde em climas semiáridos. A pesquisa pode servir de parâmetro para futuros projetos de telhado verde, como também pode servir de apoio para outros estudos à medida que o assunto amplia e reconhece oportunidades de melhoria. Outro aspecto importante e que impulsiona este trabalho é o desejo de poder contribuir, por meio de recursos sustentáveis, para busca pelo conforto térmico do espaço urbano, de modo a reduzir o consumo energético das edificações e proporcionar também a sensação de bem-estar causado pela presença de superfícies verdes.

1.5 Delimitação

O trabalho foi realizado tendo a cidade de Crateús como modelo, na qual foram realizadas simulações baseadas nas suas condições climáticas, utilizando o banco de dados da estação meteorológica automática de Crateús e o método numérico de diferenças finitas.

1.6 Roteiro temático

Este trabalho está subdividido nos seguintes capítulos:

1. INTRODUÇÃO, que consta a justificativa, problema de pesquisa, objetivos gerais e específicos, delimitação da pesquisa e esta seção de estruturação do trabalho;
2. REFERENCIAL TEÓRICO, que fundamenta este estudo, no qual é abordado os principais conceitos relacionados ao telhado verde, os mecanismos de transferência de calor e a aplicação dos métodos numéricos usados;
3. MÉTODO DE PESQUISA, que segue o delineamento do modelo matemático empregado para análise do comportamento do telhado verde e convencional e sua validação.
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES no qual é apresentado a validação do modelo através da comparação com os dados de um estudo experimental e a interpretação dos dados da simulação para os telhados submetidos ao clima de Crateús, e por último;

5. CONCLUSÃO que sumariza os resultados obtidos em consonância com os objetivos pretendidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Telhado verde

A cobertura vegetal é uma técnica onde se cultiva vegetações diversas sobre superfícies, fachadas ou coberturas (FERREIRA, 2008). Ela pode ainda ser considerada como uma forma de trazer a vegetação original do solo para a implementação no edifício (CAETANO; TIBIRIÇA; SANTOS, 2010 *apud* GARRIDO NETO, 2012).

Estas coberturas verdes são separadas em três tipos principais: os intensivos, extensivos e os semi-intensivos. O telhado do tipo intensivo necessita de uma estrutura de suporte mais reforçada uma vez que a espessura do substrato é maior, entre 15 a 40 cm, podendo abrigar plantas de pequeno e médio porte (PALMEIRA, 2016). Esses tipos de coberturas demandam de manutenção periódica e são considerados mais caros, uma vez que precisam de cuidados como a irrigação, a aplicação de fertilizantes e a poda (VACILIKIO; FLEISCHFRESSA, 2011).

Os tipos extensivos carecem de uma camada com pouco solo, em torno de 5 a 15 cm, e acomodam apenas espécies de pequeno porte que necessitam de manutenção mínima, devido sua taxa de crescimento ser baixa. Outras características desse teto verde é possibilidade de serem instalados em superfícies com declividade com aplicação de uma camada filtrante retentora capaz de eliminar a água em excesso e operar apenas com uma pequena quantidade de água para proporcionar umidade à vegetação (VACILIKIO; FLEISCHFRESSA, 2011).

Já a cobertura verde semi-intensiva é intermediário entre os intensivos e extensivos, tanto na espessura do substrato quanto no porte da vegetação. A inclinação é inversamente proporcional a espessura do substrato e demanda de manutenção periódica. É importante aludir que nem todos os autores consideram esta classificação, subdividindo os tipos apenas em extensivos e intensivos (FERRAZ, 2012).

2.1.1 Camadas

Para a construção de um TV, é necessário a implementação de camadas seguindo uma ordem específica como ilustrado na Figura 1, uma vez que o conjunto de procedimentos deve ser feito de modo a garantir a impermeabilização e um sistema de drenagem adequado (SANTOS, 2016).

Figura 1 – Camadas de um telhado verde



Fonte: Modificado de Google Imagens.

A cobertura vegetal necessita de um substrato vegetal ou terra para o plantio, isto pode acarretar em uma cobertura mais pesada do que as convencionais, o que implica na verificação ou, eventualmente, reforço da estrutura já existente (FERREIRA, 2008, p. 4). Assim, o suporte (laje) deve ser instalado levando em consideração a carga média que irá suportar, isto significa que no seu dimensionamento o peso de todas as camadas que compõem o telhado verde deve ser considerado.

Quanto a impermeabilização, sua função é evitar o contato do suporte com a água, ou seja, impedir que ocorra infiltrações. Já a função da camada de drenagem é evitar alagamentos e possíveis estresses das culturas, pois a maioria desses telhados possuem um ângulo de inclinação mínimo. Esta camada pode ser constituída de britas, seixos, argila expandida ou elementos a base de poliestireno (HEINEINE, 2008; SANTOS, 2016).

O filtro evita o arraste de partículas do solo pela ação da água, processo importante, uma vez que sem esta barreira o sistema pode ser danificado através da obstrução dos poros da camada de drenagem (SANTOS, 2016).

Em relação a camada de substrato, sua espessura depende das espécies a serem plantadas e tipologia, sendo seu papel dar suporte para a fixação da vegetação e fornecer água e nutrientes necessários para a manutenção das plantas (SANTOS, 2016).

Por último, a camada de vegetação deve ser a mais adaptada possível às condições climáticas do local onde será instalada, sendo ideal a utilização de espécies nativas (SANTOS, 2016).

2.1.2 Tipos de vegetação

Foi exposto em Ferreira (2008) que existem três tipos de vegetação usadas nos tetos verdes. A contínua, onde sobrepõe-se sobre o substrato de forma direta. Os módulos pré-elaborados, que são planejados para aplicação rápida, normalmente trata-se de uma bandeja contendo o solo e a vegetação já preparados para serem colocados diretamente na cobertura, e o tipo aérea, que possui a vegetação separada do suporte estrutural e não tem o mesmo efeito isolante dos outros.

Sobre a escolha do tipo de vegetação a ser adotada é fundamental definir previamente a vegetação, escolhendo de modo que sejam adaptadas ao clima da região e que evitem dificuldades na manutenção. Além disso, é importante considerar outros aspectos como:

[...] a incidência solar, índices pluviométricos, temperatura do local, ventos dominantes, a inclinação do telhado verde e a necessidade de retenção de água pela vegetação[...]. Fatores estéticos e olfativos também podem contribuir na escolha (FERREIRA, 2008, P.08).

Quanto a definição da inclinação, nos tetos planos devemos ter uma preocupação com a drenagem para evitar que o excesso de umidade apodreça as raízes e naqueles com inclinação superior à 30% é necessário o uso de travamentos para evitar que a planta e o substrato deslizem. Uma alternativa mais recomendada é a de coberturas com inclinação entre 10 a 30%, que facilitam a drenagem sem as complicações de deslizamento (FERREIRA, 2008).

2.2 Clima e vegetação

O Nordeste do Brasil é em sua maior parte formado pelo semiárido, e o bioma predominante nesta região é exclusivamente brasileiro, chamado de caatinga. Este nome possui origem tupi-guarani e significa “floresta branca”, que representa as características da vegetação desse ecossistema, cujas folhas caem no período da seca (SOUZA, 2022).

Este bioma apresenta algumas espécies de cactáceas, em que suas folhas são modificadas em espinhos para evitar que a planta perca água pelo processo de transpiração e também para impedir que animais se alimentem delas. Além do mais, os cactos apresentam grande capacidade de armazenamento de água, e há também plantas que apresentam em suas folhas uma espécie de cera para evitar a perda de água (SOUZA, 2022).

De acordo com Parente *et al.* (2013) a babosa (*Aloe Vera*) é uma vegetação típica de regiões desérticas, sendo nativa do norte da África. Esta planta consegue sobreviver em habitats hostis e se adaptou bem ao Cerrado brasileiro, adotando a forma de cacto. Ela também é uma planta perene, que possui um bulbo que desabrocha cerca de cinquenta folhas levemente espinhosas, verdes, carnudas e cerosas com formato de lanças.

A folha da planta pode ser usada para fins medicamentosos como para sanar disfunções estomacais, aumentar a secreção da bile, clarear a pele e o sumo das folhas ainda pode ser utilizado como laxante (PARENTE, 2013).

2.3 Mecanismos de transferência de calor

Para estudar os mecanismos de transferência de calor que ocorre nos telhados, é necessário entender seu conceito. Segundo Çengel (2010, p. 02) “A transferência de calor (ou calor) é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço.”

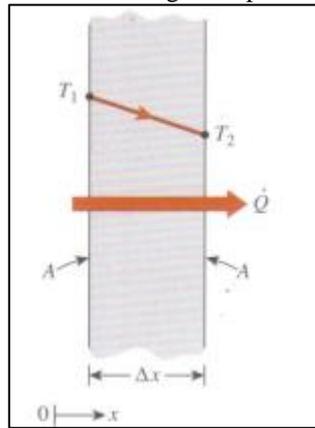
Nas edificações térreas, o maior calor absorvido ocorre principalmente nas coberturas, por ser a superfície mais exposta à radiação solar, que, por consequência, absorve grande parte da energia e a transfere para o interior da edificação, aumentando assim sua temperatura (MICHELS, 2007).

Em vista disso, é relevante entender os diferentes mecanismos físicos de transferência de calor.

2.3.1 Condução

Pode ser entendida como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância em razão das interações entre partículas. Na presença de um gradiente de temperatura que pode acontecer em um sólido ou fluido estacionário, a condução ocorre na direção da diminuição da temperatura (ÇENGEL, 2010). Na Figura 2 está representado a condução de calor em regime permanente através de uma grande parede plana de espessura L com taxa \dot{Q} de transferência de calor.

Figura 2 – Condução de calor através de uma grande parede plana de espessura Δx e área A



Fonte: Çengel (2010).

Segundo Çengel (2010), a condução térmica com fluxo de calor unidimensional é regida pela lei de Fourier, conforme a equação 1:

$$q_{cond} = \frac{\dot{Q}}{A} = k \frac{dT}{dX} \quad (1)$$

Sendo:

\dot{Q} = taxa de transferência de calor

A = área da superfície sujeita à transferência de calor

q_{cond} = fluxo de transferência de calor por condução na direção X

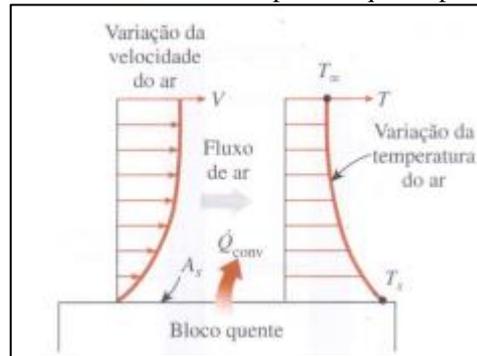
k = condutividade térmica do material que compõe a parede

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura

2.3.2 Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre pelo contato entre um fluido em movimento e uma superfície com temperaturas diferentes. Este modo de transferência de calor ocorre devido ao movimento molecular aleatório e pela energia transferida através do movimento de massa. A energia transferida é a térmica interna do fluido (Sensível) e em alguns processos pode acontecer a troca de calor latente, que acontece quando existe uma mudança de fase (ÇENGEL, 2010). A Figura 3 ilustra este processo através de um resfriamento de um bloco quente por ar frio soprando sobre sua superfície superior.

Figura 3 – Transferência de calor de uma superfície quente para o ar por convecção



Fonte: Çengel (2010).

A transmissão do calor por convecção é classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido, em convecção natural ou convecção forçada. Na convecção natural o movimento do fluido é induzido por forças de empuxo, causadas a partir de diferenças de densidade devido as variações de temperatura no fluido. Já a convecção forçada, o escoamento é causado por meios externos, ou seja, é necessário algum mecanismo para ativar a circulação do fluido (ÇENGEL, 2010).

Na equação 2 é representada a expressão conhecida como lei do resfriamento de Newton, que apresenta o fluxo de calor por convecção.

$$q_{cv} = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Onde q_{cv} é o fluxo de calor para a área que a convecção ocorre, T_s é a temperatura da superfície, T_∞ é a temperatura do fluido para todos os pontos distantes da superfície e h é o coeficiente de transferência por convecção, dependente das propriedades do fluido e da velocidade de escoamento, que é calculado pelo número de Nusselt.

No caso de convecção natural, através de correlações empíricas simples o número de Nusselt médio pode ser calculado por meio da equação 3:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C(Gr_L Pr)^n = CRa_L^n \quad (3)$$

em que L_c é o comprimento característico da geometria da superfície, os valores das constantes C e n dependem da geometria da superfície e do regime de escoamento, e Ra_L é o número de Rayleigh que é produto do número de Grashof (Gr_L) pelo número de Prandtl

(Pr) que descreve a relação entre a difusividade da quantidade de movimento e a difusividade térmica.

Na convecção natural, o movimento do fluido é regido pelo número adimensional de Grashof, que representa a razão entre a força de empuxo e a força viscosa, sendo seu principal objetivo determinar se o escoamento é laminar ou turbulento (ÇENGEL, 2010).

O parâmetro adimensional chamado de número de Grashof é dado por:

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (4)$$

onde

g = aceleração gravitacional. m/s^2

β = coeficiente de expansão volumétrica do fluido

T_s = temperatura da superfície, $^\circ C$

T_∞ = temperatura do fluido suficientemente longe da superfície, $^\circ C$

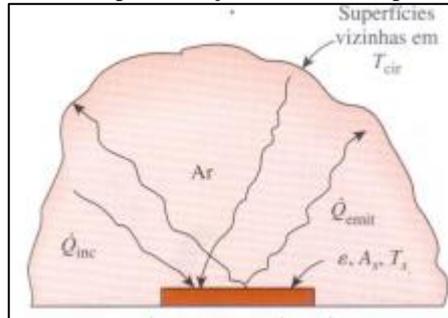
L_c = comprimento característico da geometria, m

ν = viscosidade cinemática do fluido, m^2/s

2.3.3 Radiação

A radiação é a energia transportada pela matéria em forma de ondas eletromagnéticas que não exige a presença de um meio interveniente, ou seja, pode ocorrer no vácuo. Esse é o mecanismo de transferência de calor que faz a energia do sol atingir a terra (ÇENGEL, 2010). Qualquer corpo em dada temperatura apresenta a capacidade de emitir radiação bem como de absorver a mesma. A Figura 4 mostra a transferência de calor por radiação entre superfícies separadas pelo ar.

Figura 4 – Transferência de calor por radiação entre uma superfície e superfícies vizinhas



Fonte: Çengel (2010).

O fluxo de emissão de radiação líquida q_{em} , isto é, a parte da radiação emitida por uma superfície devido a diferença de temperatura entre esta superfície e outra superfície circundante é dada pela equação 5:

$$q_{em} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{cir}^4) \quad (5)$$

Em que ε é a emissividade da superfície, cujo valor está na faixa de $0 \leq \varepsilon \leq 1$, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, T_s a temperatura na superfície e T_{cir} a temperatura da superfície circundante.

Já o fluxo de calor devido a absorção de radiação por uma superfície é determinado a partir da equação 6:

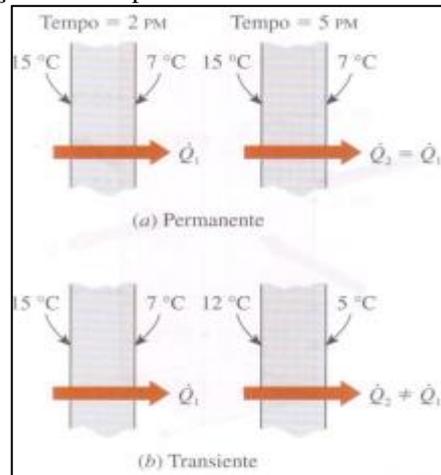
$$q_{sr} = \alpha q_{sri} \quad (6)$$

Onde q_{sri} é a radiação incidente na superfície e α é absorvidade da superfície.

2.4 Transferência de calor no regime transiente unidimensional

A transferência de calor pode ser classificada em regime permanente ou regime transiente. Quando é classificado como permanente significa que não há variação de grandezas de interesse em nenhum ponto no meio ao longo do tempo, ou seja, a temperatura ou fluxo de calor permanecem inalterados ao longo do tempo, enquanto que o transiente se observa o inverso (ÇENGEL, 2010). A Figura 5 mostra a condução de calor dos dois tipos de regime.

Figura 5 – Condução de calor permanente e transiente em uma superfície plana



Fonte: Çengel (2010).

Outra classificação importante em problemas de transferência de calor é definir a direção que o fluxo de calor ocorre, que podem ser considerados como unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais, no qual depende da magnitude das taxas de transferência de calor e da exatidão desejada. O problema será considerado unidimensional se a temperatura no meio variar apenas em única direção e o calor for transferido na mesma direção, sendo a variação de temperatura e transferência de calor nas outras direções desprezíveis ou zero (ÇENGEL, 2010).

Para condução de calor através de uma extensa parede plana, telhados e muitas outras geometrias, o problema pode ser aproximado como unidimensional, já que a condução de calor nessas geometrias é predominantemente em uma direção, sendo desprezível nas outras (ÇENGEL, 2010).

A transferência de calor por condução em regime unidimensional e transiente na direção x é dada pela Equação 7.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (7)$$

Onde

ρ = densidade do material que compõe o telhado;

C_p = calor específico do material que compõe o telhado;

T = temperatura em ponto x do telhado

k = condutividade térmica do material que compõe o telhado

t = tempo

2.5 Métodos numéricos em condução de calor

Os métodos numéricos em condução de calor se fundamentam através da substituição de equações diferenciais por um conjunto de equações algébricas para temperaturas desconhecidas em cada ponto do espaço discretizado, e a solução do sistema composto por essas equações fornecem os valores das temperaturas nestes pontos (ÇENGEL, 2010).

Existem vários métodos numéricos que podem ser utilizados em problemas de condução de calor, neste trabalho utilizaremos o método das diferenças finitas com o uso do balanço de energia.

No método das diferenças finitas as derivadas são substituídas pelas diferenças, enquanto que na abordagem de balanço de energia em volume de controle é realizada a análise do fluxo de energia dentro de um volume de controle de interesse. Os dois métodos resultam nas mesmas equações algébricas, a diferença é que o segundo método facilita o entendimento dos problemas físicos (ÇENGEL, 2010).

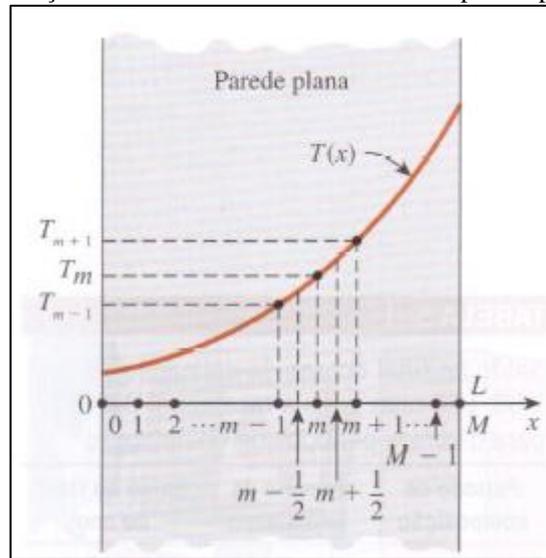
2.6 Diferenças finitas

Com relação ao método das diferenças finitas, de forma sucinta podemos dizer que sua formulação é baseada na substituição das derivadas pelas diferenças apropriadas. Para isso, é necessário realizar aproximações das derivadas de primeira ordem e de ordem superior (ÇENGEL, 2010). As equações 8 e 9 representam a derivada primeira da temperatura com relação a posição (dT/dx), respectivamente nos pontos médios $m - \frac{1}{2}$ e $m + \frac{1}{2}$ em torno do nó m , utilizando o esquema para frente, que expressa a variação da temperatura no próprio nó através da temperatura do nó da frente e o esquema para trás que o exprime a variação da temperatura de um nó a partir do conhecimento do nó anterior, conforme a Figura 6.

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{m-\frac{1}{2}} \cong \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x} \quad (8)$$

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{m+\frac{1}{2}} \cong \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} \quad (9)$$

Figura 6 – Esquema dos nós e das temperaturas nodais utilizados no desenvolvimento da formulação das diferenças finitas da transferência de calor na parede plana



Fonte: Çengel (2010).

Considerando que a derivada segunda é a derivada da derivada primeira, a equação 10 mostra a aproximação para a derivada segunda da temperatura no nó m .

$$\frac{d^2T}{dx^2} \Big|_m \cong \frac{\frac{dT}{dx} \Big|_{m+\frac{1}{2}} - \frac{dT}{dx} \Big|_{m-\frac{1}{2}}}{\Delta x} = \frac{\frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} - \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}}{\Delta x^2} \quad (10)$$

Note que a derivada segunda da temperatura no nó m é expressa através de temperaturas no próprio nó e dos seus dois nós vizinhos, essa fórmula é conhecida como método das diferenças finitas com aplicação do esquema central.

Sabendo que as temperaturas nodais em problemas transientes normalmente mudam durante o passo de tempo (Δt), é possível classificar as diferenças finitas em implícita ou explícita. No método implícito as temperaturas em cada nó, no instante atual (t), são determinadas a partir do conhecimento das temperaturas em cada nó no instante de tempo anterior ($t - \Delta t$), já no método explícito as temperaturas de cada nó no instante atual (t) são definidas a partir dos dados de entrada das temperaturas em cada nó no instante posterior ($t + \Delta t$) de tempo (ÇENGEL, 2010).

2.7 Balanço de energia

A primeira lei da termodinâmica diz que a energia não pode ser criada nem destruída durante um processo; pode apenas mudar de forma (ÇENGEL, 2010). Diante disso, o balanço de energia de um sistema sofrendo qualquer processo pode ser expresso pelo esquema da Figura 7:

Figura 7 – Balanço de energia de qualquer sistema

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energia total} \\ \text{na entrada} \\ \text{do sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energia total} \\ \text{na saída do} \\ \text{sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Mudança de} \\ \text{energia total} \\ \text{no sistema} \end{array} \right)$$

Fonte: Çengel (2010).

A energia transferida do sistema ou para o sistema pode ser na forma de calor, trabalho ou massa. Na análise de transferência de calor, essa energia é transferida em decorrência de uma diferença de temperatura entre o sistema e a vizinhança. Assim, segundo Çengel (2010), o balanço de energia nesse caso pode ser escrita como:

$$(Q_{ent} - Q_{sai}) + E_{ger} = \Delta E_{ter,sis} \quad (11)$$

Onde o primeiro termo em parênteses é o calor líquido transferido para dentro do sistema, E_{ger} é a geração de calor que pode ocorrer durante algum processo e $\Delta E_{ter,sis}$ é a mudança da energia térmica no sistema.

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 Modelagem matemática de transferência de calor para o telhado convencional

Para a modelagem do telhado convencional, seguindo os princípios apresentados por Polo-Labarríos *et al.* (2020), foram adotados os seguintes pontos:

a) condução de calor unidimensional transiente, sem geração de calor no telhado e nas paredes do ambiente analisado, conforme tópico 2.4;

b) os elementos do telhado convencional foram qualificados como constituídos por um único material opaco e uniforme (concreto) e as paredes foram consideradas como feitas de bloco cerâmico revestidas de argamassa, tanto no lado externo como no interno;

c) foi usada a $T(t, x) = T(x)$ como condição inicial, ou seja, em $t = 0$ todos os pontos do telhado estão sobre a mesma temperatura. Essa condição foi adotada considerando que horário inicial das simulações realizadas foi a partir de 00:00 h do dia;

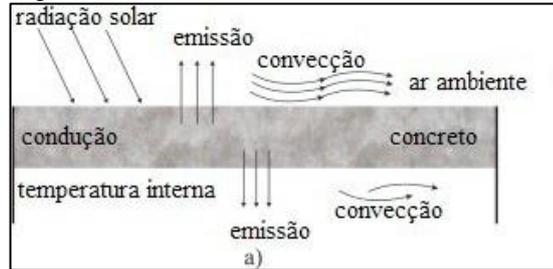
d) não foi levada em consideração nenhuma abertura de portas e janelas;

e) foram considerados as transferências de calor por radiação e convecção, nas superfícies internas e externas do telhado, conforme Figura 8. Para a fronteira do TC com o ambiente externo da edificação, em $x=0$, foi usado o balanço de energia feito em um elemento de volume de espessura Δx na interface desta região, como mostrado na Figura 9, de forma que a partir equação 11, descrita na forma de taxa de transferência de energia, temos:

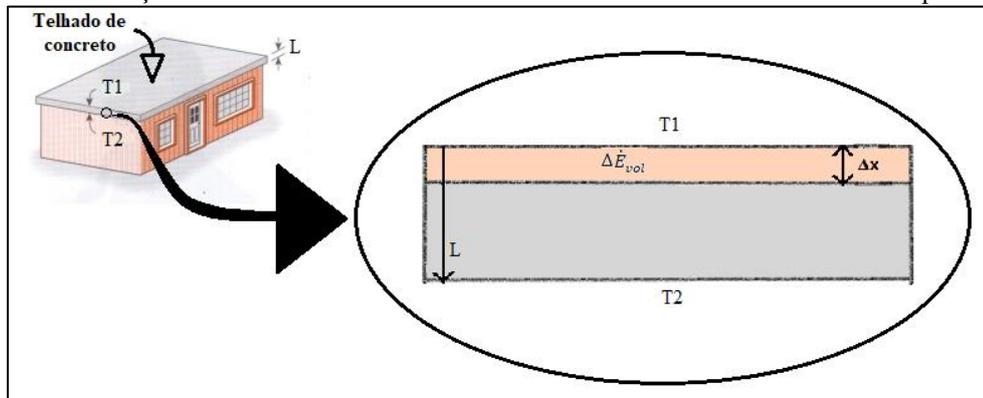
$$q_{sr} - q_{em} - q_{cv} - q_{cond} = \Delta \dot{E}_{vol} \quad (12)$$

, com q_{sr} sendo o fluxo de calor por radiação absorvido pela superfície externa calculado a partir da equação 6, q_{em} o fluxo de calor por emissão perdido para o ambiente externo calculado através da equação 5, q_{cv} o fluxo de calor por convecção perdido para o ambiente externo determinado através da equação 2, q_{cond} o fluxo de calor por condução para as partes internas do telhado além da espessura Δx determinado através da equação 1 e $\Delta \dot{E}_{vol}$ é a taxa temporal de variação de energia dentro do elemento de volume por unidade de área;

Figura 8 – Fontes de calor do telhado convencional



Fonte: adaptado pela autora, de Polo-Labarrios *et al.* (2020).

Figura 9 – Condição de contorno em telhado convencional com elemento de volume de espessura Δx 

Fonte: adaptado pela autora, de Çengel (2010).

f) de forma semelhante ao que foi feito na fronteira do TC com o ambiente externo da edificação, para a fronteira do TC com o ambiente interno do edifício, em $x = L$, foi usado o balanço de energia feito em um elemento de volume de espessura Δx na interface desta região tendo em conta a equação 11 que descrita através taxa de transferência de energia assume a forma da equação 13:

$$q_{cond} - q_{em} - q_{cv} = \Delta \dot{E}_{vol} \quad (13)$$

com q_{cond} o fluxo de calor por condução para o elemento de espessura Δx calculado através da equação 1, q_{em} o fluxo de calor por emissão perdido para o ambiente interno calculado através da equação 5, q_{cv} o fluxo de calor por convecção perdido para o ambiente interno determinado através da equação 2 e $\Delta \dot{E}_{vol}$ é a taxa temporal de variação energia dentro do elemento de volume por unidade de área;

g) para o balanço de energia no interior do edifício em função do tempo, foi assumido a existência de transferência de calor na forma de emissão e convecção através do teto e paredes. Assim, foi considerado na análise todas essas contribuições, dado por:

$$\dot{Q} = \sum_i (q_{em} + q_{cv})_i A_i \quad (14)$$

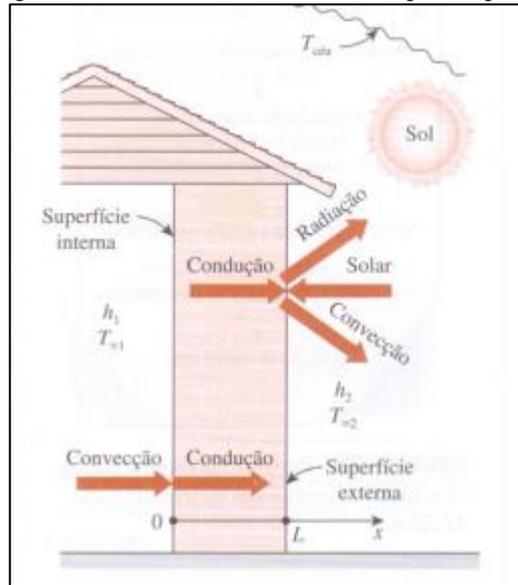
Em que o termo \dot{Q} refere-se a taxa de transferência de calor total transferida para o interior da construção, i representa a identificação de cada elemento envolvente (teto, paredes) e A é a área de cada elemento envolvente. Foi assumido que todo calor recebido pelo ambiente interno causa mudança do ar dentro da sala, tal que a variação da temperatura dentro do ambiente interno foi calculada da seguinte forma:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{(mC_p)_{in}} \quad (15)$$

Onde T_{in} é a temperatura interna do ambiente, m é a massa de ar contida no interior do edifício e C_p é o calor específico do ar.

h) o modelo que descreve a transferência de calor nas paredes é o mesmo aplicado para o telhado convencional, ou seja, a condição inicial presente no ponto c), e as condições de contorno apresentadas nos pontos e), f) e g) também são aplicadas no modelo matemático das paredes levando em consideração suas propriedades. A Figura 10 retrata os mecanismos de transferência de calor que ocorrem nas paredes.

Figura 10 – Transferência de calor em parede plana



Fonte: Fonte: Çengel (2010).

3.2 Solução numérica para transferência de calor no telhado convencional

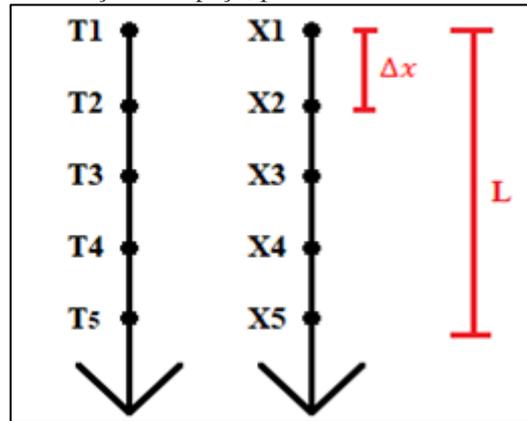
Para solucionar as equações diferenciais utilizadas no modelo matemático de transferência de calor do telhado convencional foi aplicado o método das diferenças finitas. Para isso, inicialmente foi realizada a discretização do espaço e do tempo. O espaço do telhado convencional foi dividido em um número finito de sub-regiões, a fim de tornar o elemento inicialmente contínuo em discreto, que nada mais é que definir um conjunto de pontos e determinar suas temperaturas correspondentes. Assim, Nx sendo a quantidade de divisões e L a espessura total do telhado convencional, o intervalo entre os pontos (Δx) foi determinado por:

$$\Delta x = \frac{L}{Nx} \quad (16)$$

A Figura 11 mostra uma representação da divisão do telhado convencional de espessura de 15 cm usado neste trabalho. Independentemente da quantidade de repartições, a posição de qualquer ponto Xi foi calculado a partir da equação 17.

$$Xi = (i - 1)\Delta x \quad (17)$$

Figura 11 – Discretização do espaço; pontos da malha com suas temperaturas



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Quanto ao tempo, considerando o tempo total t_f para análise da transferência de calor no telhado convencional, a temperatura de cada ponto foi determinada a cada intervalo de tempo definido a partir da equação 18, sendo Nt o número de divisão entre o instante inicial e final.

$$\Delta t = \frac{t_f}{Nt} \quad (18)$$

tal que o instante de tempo qualquer t_j foi determinado conforme a equação 19:

$$t_j = (j - 1)\Delta t \quad (19)$$

Após a discretização do espaço e do tempo foram discretizadas a equação de condução de calor no regime transiente no interior do telhado convencional e usado o balanço de energia na interface do ambiente externo/telhado convencional, na interface telhado convencional/ambiente interno e no próprio ambiente interno, conforme equações 12, 13 e 14, respectivamente. Cada discretização foi realizada como segue:

a) Discretização do balanço de energia na interface ambiente externo/telhado convencional

Os termos da equação 12 foram discretizados usando o esquema para frente, segundo os procedimentos abaixo:

$$q_{sr} = \alpha_1 q_{sri_1}(j) \quad (20)$$

$$q_{em} = \epsilon_1 \sigma ((T_1(j))^4 - T_{céu}^4) \quad (21)$$

$$q_{cv} = h_{1ext}(T_1(j) - T_{amb}) \quad (22)$$

$$q_{cond} \cong -k_{conc} \left(\frac{T_2(j) - T_1(j)}{\Delta x} \right) \quad (23)$$

$$\Delta \dot{E}_{vol} \cong \rho_{conc} C_{pconc} \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T_1(j+1) - T_1(j)}{\Delta t} \right) \quad (24)$$

Onde a numeração em subscrito é a temperatura nos pontos indicados na Figura 11 e j é o tempo discretizado conforme a equação 17 e k_{conc} é a condutividade térmica do concreto.

Para determinação do fluxo de calor por emissão a partir da equação 21 o céu foi considerado como superfície circundante, calculada a partir da norma ISO 13790:

$$T_{céu} = (T_{amb} - 13)K \quad (25)$$

Onde T_{amb} é a temperatura do ambiente externo.

Considerando as equações 20-24 na equação 12 e usando o método implícito, a temperatura no ponto 1 foi determinada no instante posterior $j + 1$ de maneira iterativa através da equação 26:

$$T_1(j+1) = T_1(j) + \frac{2\Delta t}{(\rho_{conc} \cdot C_{pconc} \cdot \Delta x)} [\alpha_1 q_{sri_1}(j) - \epsilon_1 \sigma ((T_1(j))^4 - T_{céu}^4) - h_{1ext}(T_1(j) - T_{amb}) - k_{conc}(T_2(j) - T_1(j))/\Delta x] \quad (26)$$

ii) Discretização da equação de condução de calor no regime transiente no interior do telhado convencional

Para realizar a discretização da equação de condução de calor no regime transiente no interior do telhado convencional, referentes aos pontos centrais da Figura 11 ($i = 2,3,4$), foi utilizado o esquema para frente do método de diferença finitas para o termo da esquerda da equação 7 tal que:

$$\rho_{conc} C_{pconc} \frac{\partial T}{\partial t} \cong \rho_{conc} C_{pconc} \left(\frac{T_i(j+1) - T_i(j)}{\Delta t} \right) \quad (27)$$

Para o termo da direita da equação 7 foi aplicado o esquema central do método das diferenças finitas. Assim:

$$k_{conc} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cong k_{conc} \left(\frac{T_{i+1}(j) - 2T_i(j) + T_{i-1}(j)}{\Delta x^2} \right) \quad (28)$$

Igualando os termos da equação 7 temos:

$$\rho_{conc} C_{pconc} \left(\frac{T_i(j+1) - T_i(j)}{\Delta t} \right) = k_{conc} \left(\frac{T_{i+1}(j) - 2T_i(j) + T_{i-1}(j)}{\Delta x^2} \right) \quad (29)$$

Para resolver a equação 29 foi usado o método implícito, de forma que a temperatura nos pontos $i = 2, 3$ e 4 , no instante de tempo posterior $j + 1$, foi determinada de forma iterativa a partir da equação 30:

$$T_i(j+1) = T_i(j) + \frac{k_{conc}}{\rho_{conc} C_{p,conc}} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}(j) - 2T_i(j) + T_{i-1}(j)) \quad (30)$$

iii) Discretização do balanço de energia na interface telhado convencional/ambiente interno

A discretização do balanço de energia na interface telhado convencional/ambiente interno foi realizada de forma similar aos procedimentos adotados na discretização para o balanço de energia na interface ambiente externo/telhado convencional. Assim os termos da equação 13 tomam as formas discretizadas mostradas nas equações 31-34:

$$q_{em} = \epsilon_5 \sigma ((T_5(j))^4 - T_{in}^4) \quad (31)$$

$$q_{cv} = h_{5int} (T_5(j) - T_{in}) \quad (32)$$

$$q_{cond} \cong -k_{conc} \left(\frac{T_5(j) - T_4(j)}{\Delta x} \right) \quad (33)$$

$$\Delta \dot{E}_{vol} \cong \rho_{conc} C_{pconc} \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T_5(j+1) - T_5(j)}{\Delta t} \right) \quad (34)$$

Para determinação do fluxo de calor por emissão da equação 31 foi considerado a temperatura da superfície circundante como sendo igual a temperatura do ambiente interno. Tendo em conta as equações 31-34 na equação 13 e usando o método implícito, a temperatura no ponto 5 foi determinada no instante posterior $j + 1$ de maneira iterativa através da equação 35:

$$T_5(j + 1) = T_5(j) + \frac{2\Delta t}{(\rho_{conc} \cdot \Delta x \cdot c_{pconc})} \left[-\frac{k_{conc}(T_5(j) - T_4(j))}{\Delta x} - \epsilon_5 \sigma ((T_5(j))^4 - T_{int}^4(j)) - h_{5-int}(T_5(j) - T_{in}(j)) \right] \quad (35)$$

iv) *Discretização do balanço de energia nas paredes*

Seguindo a mesma lógica da discretização feita para o telhado convencional, considerando uma parede de espessura de 25 cm foi realizada uma discretização do espaço tendo em conta 3 sub-regiões, ou seja, 4 pontos. Assim, as temperaturas do primeiro ponto na interface do ambiente externo com a parede, dos pontos centrais ($i = 2$ e 3) e do último na interface da parede com o ambiente interno, foram determinadas seguindo os tópicos *i.*, *ii.* e *iii.*, resultando nas equações 36, 37 e 38, respectivamente.

$$T_1(j + 1) = T_1(j) + \frac{2\Delta t}{(\rho_{parede} \cdot C_{parede} \cdot \Delta x)} \left[\alpha_1 q r i_1(j) - \epsilon_1 \sigma ((T_1(j))^4 - T_{céu}^4) - h_{p1ext}(T_1(j) - T_{amb}) - k_{parede}(T_2(j) - T_1(j))/\Delta x \right] \quad (36)$$

$$T_i(j + 1) = T_i(j) + \frac{k_{parede}}{\rho_{parede} C_{p,parede}} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}(j) - 2T_i(j) + T_{i-1}(j)) \quad (37)$$

$$T_4(j + 1) = T_4(j) + \frac{2\Delta t}{(\rho_{parede} \cdot \Delta x \cdot c_{p,parede})} \left[-\frac{k_{conc}(T_4(j) - T_3(j))}{\Delta x} - \epsilon_5 \sigma ((T_4(j))^4 - T_{int}^4(j)) - h_{p4int}(T_4(j) - T_{in}(j)) \right] \quad (38)$$

v) *Discretização do balanço de energia no ambiente interno*

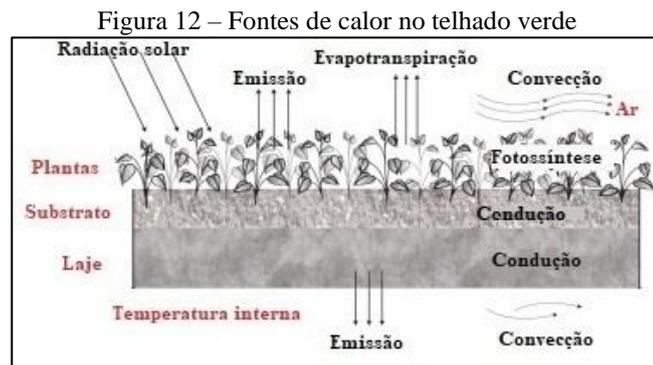
A discretização da equação 14, referente a variação de temperatura no interior do edifício, foi realizada usando os mesmos procedimentos acima, tal que:

$$T_{in}(j + 1) = \frac{\dot{Q}}{(mC_p)_{in}} + T_{in}(j) \quad (39)$$

A solução numérica da transferência de calor para o telhado convencional, realizada de forma interativa através das equações 26, 30, 33, 36, 37, 38 e 39 foi implementada no software MATLAB versão 9.12, cujo algoritmo é apresentado no Apêndice C. Detalhes dos valores das constantes usadas, da determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção e da implementação estão apresentados na seção 3.6.

3.3 Modelagem matemática de transferência de calor para o telhado verde

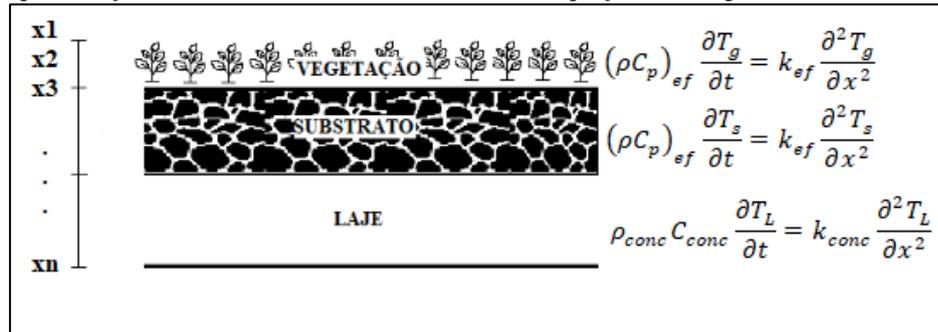
As trocas de calor do telhado verde e seus elementos constituintes são apresentados na Figura 12.



Fonte: adaptado pela autora, de Polo-Labarrios *et al.*

O modelo para o telhado verde segue os mesmos princípios e a mesma sequência do modelo apresentado para o telhado convencional nos pontos a), d) f) e g). A diferença se dá nos pontos b), c) e e), pelo fato que no telhado verde a transferência de calor nas camadas é dado por equações heterogêneas efetivas diferentes, expressa pela Figura 13. Assim os pontos b), c) e e) para o telhado verde foram assumidos como segue:

Figura 13 – Representação das camadas do telhado verde e suas equações heterogêneas de transferência de calor



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

b) Na parte da vegetação foi considerado um primeiro sistema concebido por planta e ar, formando a camada verde de propriedades efetivas que levam em conta o volume ocupado pela planta e pelo ar e suas propriedades, um segundo de substrato constituído por solo e água, formando a camada substrato com propriedades efetivas resultante da média das propriedades do solo e água, ponderada pelo volume ocupado por cada material. Dessa forma, para a condução de calor em regime transiente nas camadas mencionadas e na laje, foram consideradas as equações 40, 41 e 42.

$$(\rho C_p)_{ef} \frac{\partial T_g}{\partial t} = k_{ef} \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} \text{ (camada verde)} \quad (40)$$

$$(\rho C_p)_{ef} \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_{ef} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \text{ (camada substrato)} \quad (41)$$

$$\rho_{conc} C_{conc} \frac{\partial T_L}{\partial t} = k_{conc} \frac{\partial^2 T_L}{\partial x^2} \text{ (laje)} \quad (42)$$

Onde T_g é a temperatura da camada verde, T_s a temperatura da camada de substrato, T_L a temperatura da laje, ρ_{conc} a densidade do concreto, C_{conc} o calor específico do concreto, k_{conc} a condutividade térmica do concreto e $(\rho C_p)_{ef}$ e k_{ef} são propriedades efetivas das camadas verde e substrato, obtidas a partir das equações 43 e 44.

$$(\rho C_p)_{ef} = (\rho C_p)_1 (1 - \phi) + (\rho C_p)_2 \phi \quad (43)$$

$$k_{ef} = k_1 (1 - \phi) + k_2 \phi \quad (44)$$

Onde os subscritos 1 e 2 refere-se respectivamente ao ar e as plantas para a camada verde ou água e solo para a camada de substrato, e \emptyset é a fração volumétrica ocupada pelo componente 1 (ar ou água) no volume total (V_t), logo:

$$\emptyset = \frac{V_1}{V_t} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (45)$$

c) foram usadas as condições iniciais $T_g(t, x) = T_g(x)$ em $t = 0$ e $T_s(t, x) = T_{s,0}(x)$ para as equações 40 e 41, respectivamente, ou seja, em $t = 0$ todos os pontos da camada verde/substrato estão sobre a mesma temperatura. Além disso, para qualquer instante de tempo t , nas interfaces entre as camadas verde, do substrato e da laje foram consideradas as seguintes condições de contorno:

$$T_g = T_s \text{ (na interface camada verde/substrato)} \quad (46)$$

$$T_s = T_L \text{ (na interface camada de substrato/laje)} \quad (47)$$

e) além da transferência de calor por radiação e convecção foram considerados o fluxo de calor por evapotranspiração e fluxo de calor para fotossíntese e respiração da planta, tal que o balanço de energia no elemento de volume de espessura Δx na interface camada verde/ambiente externo foi determinado pela equação 48, como segue:

$$q_{sr} - q_{em,g} - q_{cv,g} - q_{et} - q_{ps} - q_{cond,g} = \Delta \dot{E}_{vol} \quad (48)$$

com q_{sr} sendo o fluxo de calor por radiação absorvido pela camada verde na interface com o ambiente externo, calculado a partir da equação 6, $q_{em,g}$ o fluxo de calor por emissão perdido pela camada verde para o ambiente externo, calculado através da equação 5, $q_{cv,g}$ o fluxo de calor por convecção perdido pela camada verde para o ambiente externo, determinado através da equação 2, q_{et} o fluxo de calor transferido por evapotranspiração da camada verde para o ambiente externo, q_{ps} o fluxo de calor líquido necessário para realização de fotossíntese e respiração das plantas, $q_{cond,g}$ o fluxo de calor por condução para as partes internas da

camada verde, além da espessura Δx , determinado através da equação 1 e $\Delta \dot{E}_{vol}$ é a taxa temporal de variação da energia dentro do elemento de volume por unidade de área;

O fluxo de calor líquido necessário para realização de fotossíntese e respiração das plantas q_{ps} foi calculado pela correlação apresentada por Feng, Meng, Zhang (2010):

$$q_{ps} = \frac{6,5}{TC(1 + \frac{R_{ep}}{R_{tp}})} q_{et} \quad (49)$$

, em que TC é coeficiente de transpiração igual a 20, conforme usado em Polo-Labarrios, R_{ep} $[\frac{kg}{s \cdot m^2}]$ é a taxa evaporação e R_{tp} $[\frac{kg}{s \cdot m^2}]$ a taxa de transpiração. Nesse estudo foi considerado que essas taxas são iguais, ou seja, a razão $\frac{R_{ep}}{R_{tp}}$ sendo igual a 1.

Já o fluxo de calor transferido por evapotranspiração da camada verde para o ambiente externo q_{et} foi determinado dado por (FENG; MENG; ZHANG, 2010):

$$q_{et} = \lambda e_f 0,0023 q_{sri} (T_{amb} - 255,35) TR^{0,5} \quad (50)$$

Onde λ [j/kg] é o calor latente de vaporização da água, e_f é um fator de conversão igual a $5,218987 \times 10^{-7} \frac{kg \cdot dia}{m^2 \cdot s \cdot mm}$, T_{amb} a temperatura do ambiente e TR a diferença de temperatura entre a temperatura máxima e mínima atingida durante o dia.

3.4 Solução numérica para transferência de calor no telhado verde

Assim como no telhado convencional, no telhado verde também foi feito a discretização do espaço e do tempo, conforme apresentado na seção 3.2, e para solucionar as equações diferenciais utilizada no modelo matemático foi empregado o método das diferenças finitas. Essas equações e sua resolução é similar ao que foram feitos para o telhado convencional, a diferença é que o TV possui mais camadas e outros fluxos de calor a considerar.

Pormenorizando, a solução numérica para o telhado verde segue os mesmos princípios e a mesma sequência apresentado para o telhado convencional nos itens *iii*), *iv*) e *v*), referente a discretização do balanço de energia na interface laje/ambiente interno,

discretização do balanço de energia nas paredes e discretização do balanço de energia no ambiente interno, respectivamente.

A discretização da equação de condução de calor no regime transiente no interior da camada verde, no substrato e na laje e do balanço de energia na interface do ambiente externo/camada verde foi feita como segue:

i. Discretização do balanço de energia na interface ambiente externo/camada verde

Os termos da equação 48 foram discretizados usando o esquema para frente, segundo os procedimentos abaixo:

$$q_{sr} = \alpha_1 q_{sri_1}(j) \quad (51)$$

$$q_{em,g} = \epsilon_1 \sigma ((T_{g1}(j))^4 - T_{céu}^4) \quad (52)$$

$$q_{cv,g} = (5,7 + 3,8v)(T_{g1}(j) - T_{amb}) \quad (53)$$

$$q_{cond,g} \cong -k_g \left(\frac{T_{g2}(j) - T_{g1}(j)}{\Delta x} \right) \quad (54)$$

$$\Delta \dot{E}_{vol} \cong \rho_g C_{p,g} \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T_{g1}(j+1) - T_{g1}(j)}{\Delta t} \right) \quad (55)$$

Substituindo os termos acima detalhados e as equações 51-55 na equação 48 e usando o método implícito, a temperatura no ponto 1 foi determinada no instante posterior $j + 1$ de maneira iterativa através da equação 56:

$$\begin{aligned} T_{g1}(j+1) = T_{g1}(j) &+ \frac{2\Delta t}{(\rho_g \cdot C_{p,g} \cdot \Delta x)} \left[\alpha_1 q_{sri_1}(j) - \epsilon_1 \sigma ((T_{g1}(j))^4 - T_{céu}^4) \right. \\ &- (5,7 + 3,8v)(T_{g1}(j) - T_{amb}) \\ &- \lambda e_f 0,0023 q_{sri}(T_{amb} - 255,35) TR^{0,5} \left[\frac{6,5}{TC \left(1 + \frac{R_{ep}}{R_{tp}} \right)} + 1 \right] \\ &\left. + k_g (T_{g2}(j) - T_{g1}(j)) / \Delta x \right] \quad (56) \end{aligned}$$

ii. *Discretização da equação de condução de calor no regime transiente no interior do telhado verde para a camada verde, de substrato e laje*

Para realizar a discretização das equações de condução de calor no regime transiente na camada verde, no substrato e na laje foi utilizado o método implícito nas equações 40, 41 e 42, de forma que a temperatura nos pontos centrais da Figura 13, ($i = 3, 4$ e $n - 1$), no instante de tempo posterior $j + 1$, foi determinada de forma iterativa a partir das equações 57, 58 e 59:

$$T_{g(i)}(j + 1) = T_{g(i)}(j) + \frac{k_{ef}}{(\rho C_p)_{ef}} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{g(i+1)}(j) - 2T_{g(i)}(j) + T_{g(i-1)}(j)) \quad (57)$$

$$T_{s(i)}(j + 1) = T_{s(i)}(j) + \frac{k_{ef}}{(\rho C_p)_{ef}} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{s(i+1)}(j) - 2T_{s(i)}(j) + T_{s(i-1)}(j)) \quad (58)$$

$$T_{L(i)}(j + 1) = T_{L(i)}(j) + \frac{k_{conc}}{\rho_{conc} C_{p,conc}} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{L(i+1)}(j) - 2T_{L(i)}(j) + T_{L(i-1)}(j)) \quad (59)$$

A solução numérica da transferência de calor para o telhado verde também foi implementada no software MATLAB versão 9.12, cujo algoritmo é apresentado no Apêndice D.

3.5 Implementação do modelo

O modelo foi aplicado para os dados meteorológicos da cidade de Crateús, extraídos da estação A342, localizada nas coordenadas de latitude 5°11'12'' S e longitude 40°40'20'' W, com altitude de 298,19 m, através do site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). A simulação foi feita para cada hora do dia, e as datas escolhidas foram dia 27 do mês de maio de 2021, onde foi registrado a menor temperatura máxima atingida no período da quadra chuvosa, com 19,2 °C, e o dia 16 de outubro de 2021, que foi considerado o dia mais quente do ano, com temperatura máxima diária de 38,2 °C.

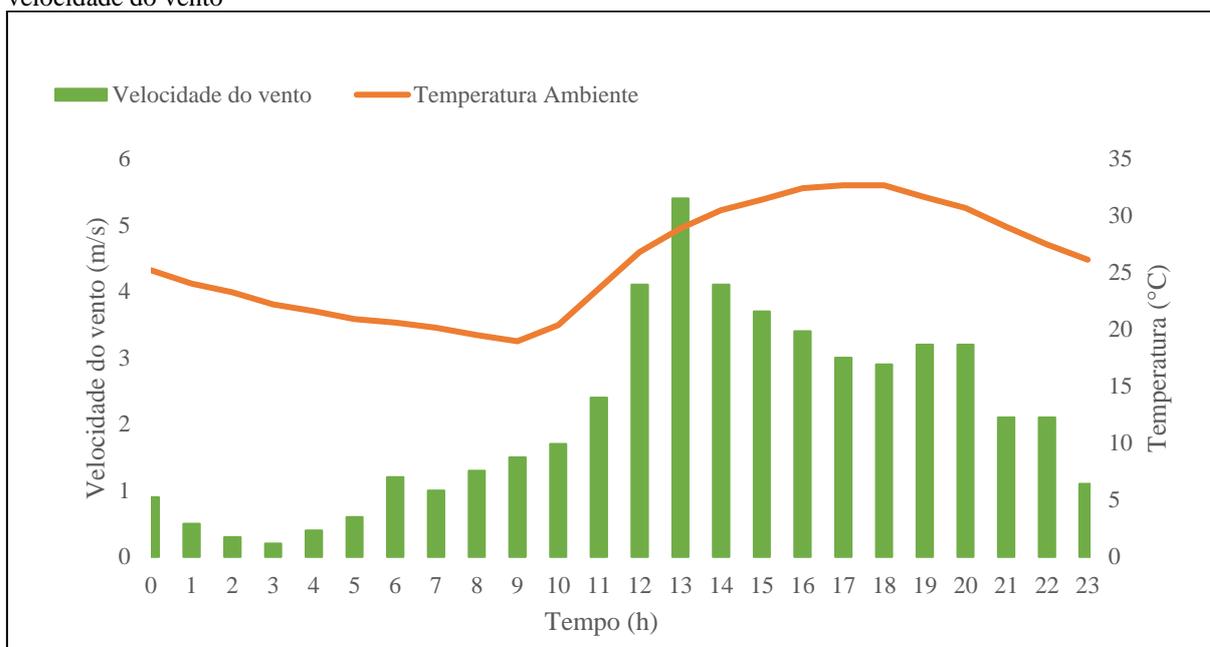
É relevante mencionar que o modelo proposto neste trabalho requer apenas as propriedades dos materiais e as variáveis climáticas temperatura ambiente, velocidade do vento e radiação solar obtidas a partir da estação A342.

Para a implementação do modelo foi considerado um ambiente com telhado verde de babosa e o outro com telhado convencional. Os dados de entrada para aplicação do

modelo, como a temperatura superficial e a temperatura interna do teto e das paredes no primeiro ponto no instante inicial foram obtidos através de uma interpolação linear dos valores de Santos (2016) aplicados para a temperatura ambiente do instante analisado, uma vez que no sistema a transferência de calor pelas paredes e teto foram consideradas e suas posições em relação ao sol e dimensões foram encaradas como as mesmas apresentadas em Santos (2016). Para este estudo as Tabelas 1, 2 e 3 também são utilizadas, assim como os Gráficos 1, 2, 3 e 4.

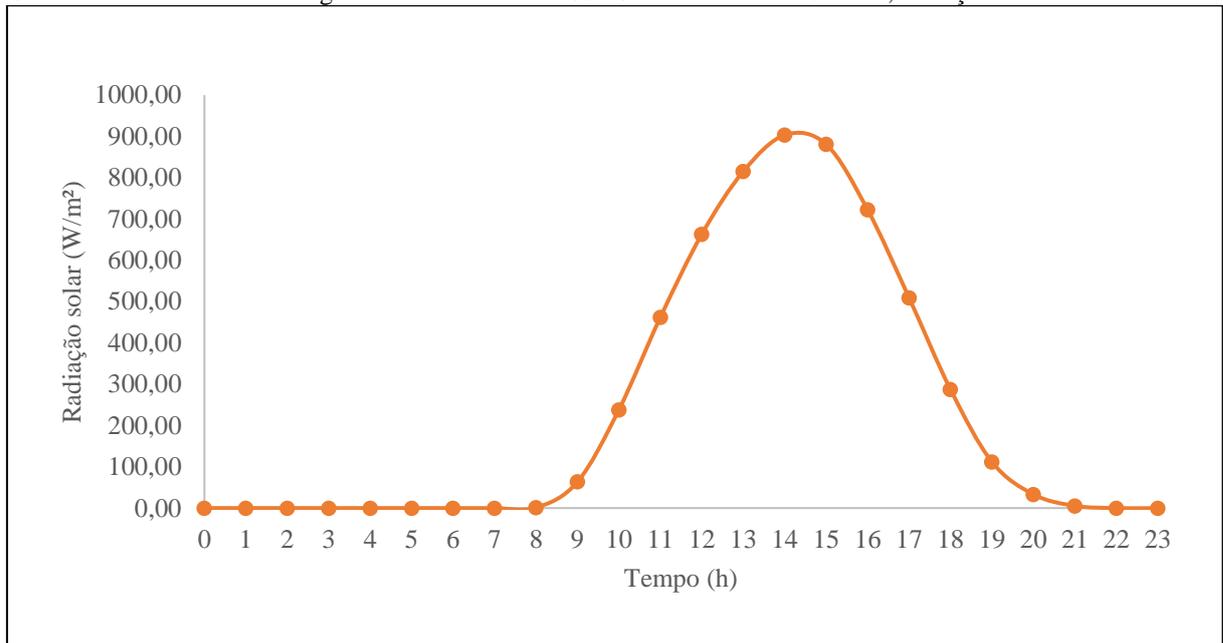
Os Gráfico 1 e 3 mostram a velocidade do vento e a temperatura ambiente, e os Gráfico 2 e 4 exibem as radiações registradas nos dias 27/05/2021 e 16/10/2021 respectivamente.

Gráfico 1 – Dados meteorológicos de 24h do dia 27/05/2021 da cidade de Crateús; temperatura ambiente e velocidade do vento



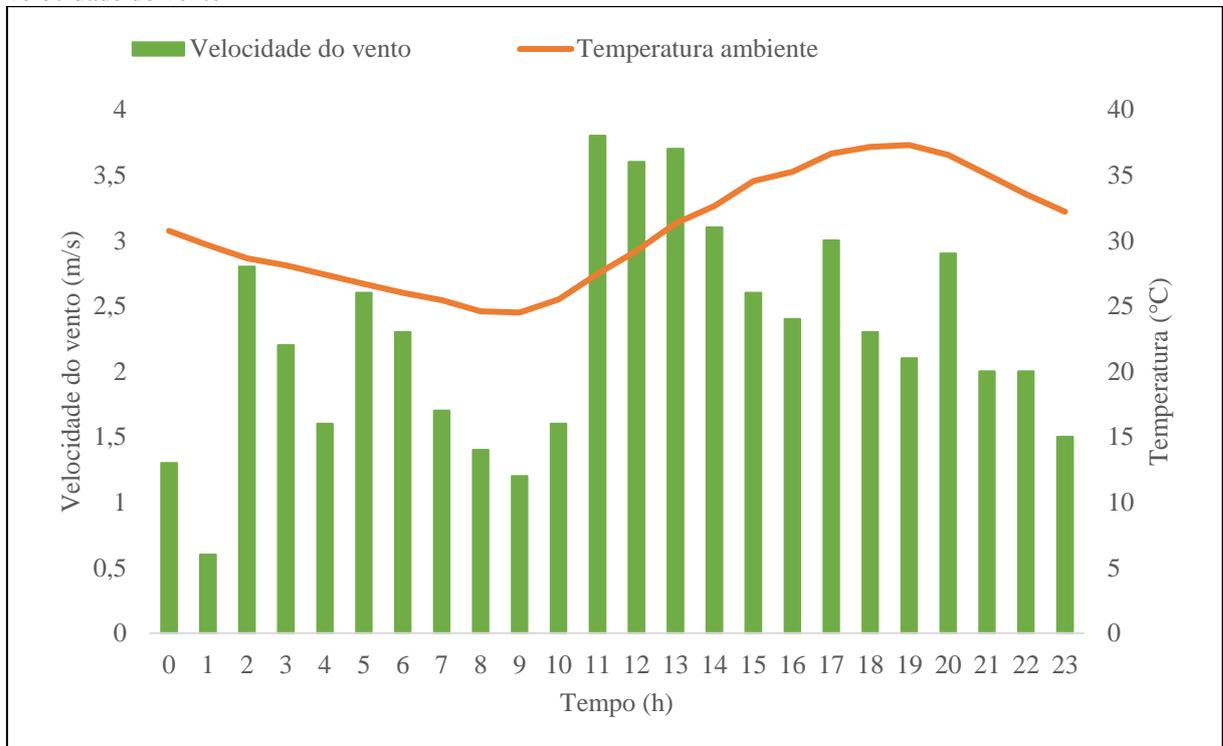
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 2 – Dados meteorológicos de 24h do dia 27/05/2021 da cidade de Crateús; radiação solar



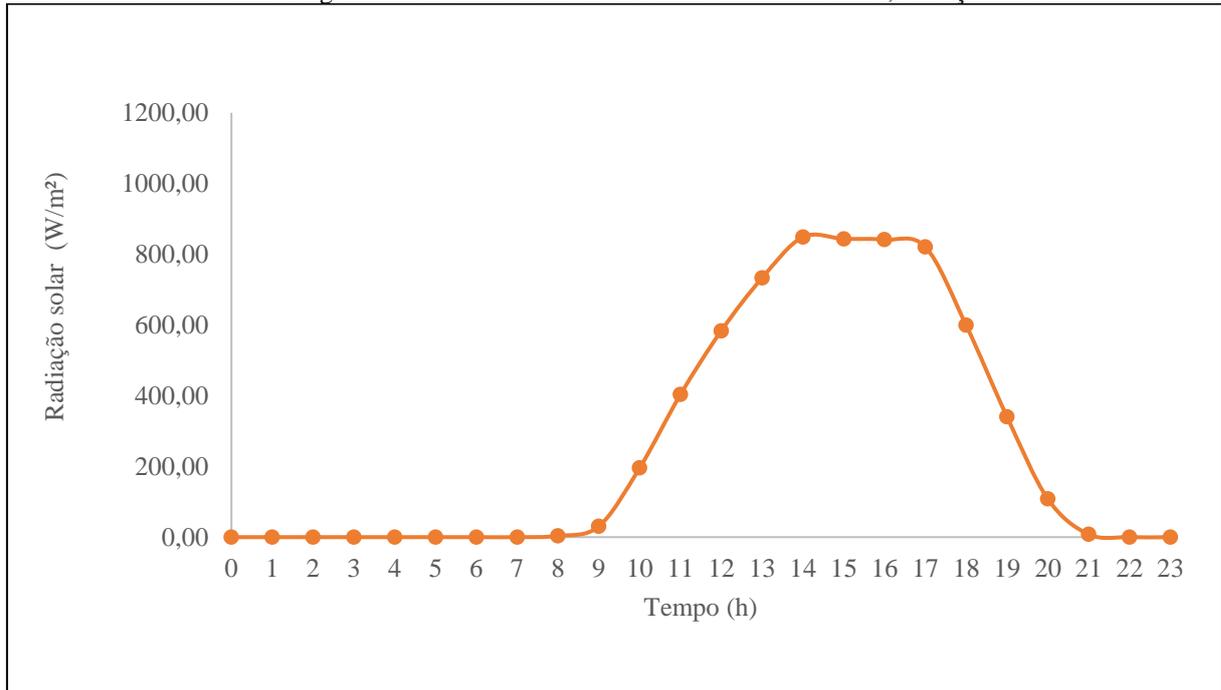
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 3 - Dados meteorológicos de 24h do dia 16/10/2021 da cidade de Crateús; temperatura ambiente e velocidade do vento



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 4 – Dados meteorológicos de 24h do dia 16/10/2021 da cidade de Crateús; radiação solar



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

É relevante mencionar que os modelos propostos neste trabalho requerem apenas as propriedades dos materiais e parâmetros já conhecidos na literatura, cujos valores usados na simulação estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais

Propriedade	Plantas	Solo	Concreto	Ar	Água
$C_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$	4800	840	840	1007	4186
$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	582	1200	1800	1,184	1000
$k \left(\frac{W}{mK} \right)$	0,350	1,000	0,800	0,0255	0,580

Fonte: Polo-Labarrios *et al.* (2020).

Tabela 2 – Valores paramétricos

Parâmetro	Legenda	Valor	Referência
α	Absorvidade	0,85	Feng; Meng; Zhang, 2010, p. 962
ε	Emissividade	1,0	Feng; Meng; Zhang, 2010, p. 962
TC	Coeficiente de transpiração	20	Feng; Meng; Zhang, 2010, p. 962
R_{ep}/R_{tp}	Taxa de evaporação/Taxa de transpiração	1,0	Feng; Meng; Zhang, 2010, p. 962
$\emptyset 1$	Volume da fração do componente 1	0,53	Polo-Labarrios <i>et al.</i> , 2020, p. 7
$\emptyset 2$	Volume da fração do componente 2	0,26	Polo-Labarrios <i>et al.</i> , 2020, p. 7
λ (J/kg)	Calor latente de vaporização	2430000	Feng; Meng; Zhang, 2010, p. 962
σ (W/K ⁴ m ²)	Constante de Stefan-Boltzmann	$5,67 \times 10^{-8}$	Feng; Meng; Zhang, 2010, p. 962

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

No presente trabalho, para simulações dos modelos de telhado convencional e verde, a transferência de calor pelas paredes foi assumida como sendo similar àquela apresentada em Santos (2016), tendo em vista as posições das paredes em relação ao sol. Quanto ao tipo de vegetação da camada verde, foi usado a babosa, com altura média de 30 cm, uma vez que suas folhas podem crescer até 75 cm e pesar até 2,3 kg (PARENTE, 2013). A altura média foi adotada como espessura da camada verde. A escolha pela babosa foi motivada por ser uma planta que se desenvolve muito bem em clima semiárido como de Crateús.

Por fim, para determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos ambientes estudados, foi considerado a convecção natural nos telhados e nas paredes. Dessa forma, o coeficiente de convecção foi determinado usando a equação 3, cujo número de Nusselt médio foi determinado como segue, conforme o tipo de estrutura:

a) Telhado convencional

Para encontrar o coeficiente de transferência de calor por convecção para o telhado convencional o valor do número de Nusselt médio da equação 4 foi determinado assumindo $C=0,54$ e $n=1/4$ (ÇENGEL, 2007).

$$Nu = 0,54Ra^{1/4} \quad (60)$$

Já número de Rayleigh na equação 4 foi determinado a partir do número de Prandtl (Pr) e o número de Grashof (Gr). O número Grashof foi determinado através dos valores de viscosidade cinemática do ar (ν) nas temperaturas ambientes, conforme Anexo A, e quando necessário foi feito a interpolação dos dados. Sabendo que se o telhado possuir inclinação é necessário apenas substituir g por $g\cos\theta$ na determinação do número de Grashof, neste estudo foi considerado que o telhado apresenta uma inclinação de 20° .

b) Paredes verticais

As paredes verticais foram consideradas como placas verticais, tal que número de Nusselt médio foi calculado usando a correlação empírica definida pela equação 61 (ÇENGEL, 2007):

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (61)$$

c) Telhado verde

O coeficiente de transferência de calor de convecção do telhado verde considerado neste trabalho foi o mostrado por QL Meng, Y. Zang, L. Zangque (2006), estimado através da equação 62:

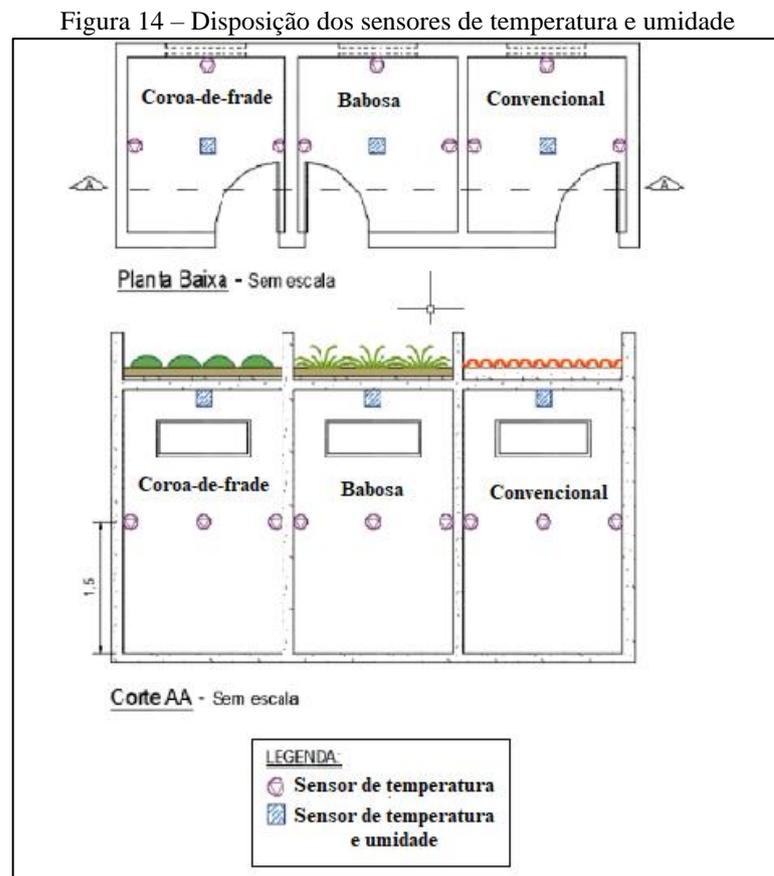
$$h = 5,7 + 3,8v \quad (62)$$

onde v é a velocidade dos ventos local.

3.6 Validação do modelo

A validação do modelo foi feita por meio da comparação com os dados medidos em campo de uma dissertação de mestrado realizado no agreste pernambucano, de Santos (2016). Foram utilizados os dados meteorológicos da região, como velocidade do vento, temperatura ambiente e valores de radiação solar coletados durante o verão, do dia 04 de novembro de 2015.

Nesse trabalho foi feito um estudo comparativo de desempenho térmico de dois tipos de telhado verde, babosa e coroa-de-frade, e um telhado convencional de telha cerâmica, onde foi analisado as variações diárias de temperaturas médias dos ambientes a cada hora. Para isso, foi instalado sensores de temperatura e umidade no teto de todos os ambientes e sensores de temperatura nas paredes perpendiculares ao teto. Na Figura 14 é indicado a disposição dos aparelhos utilizado por de Santos (2016).

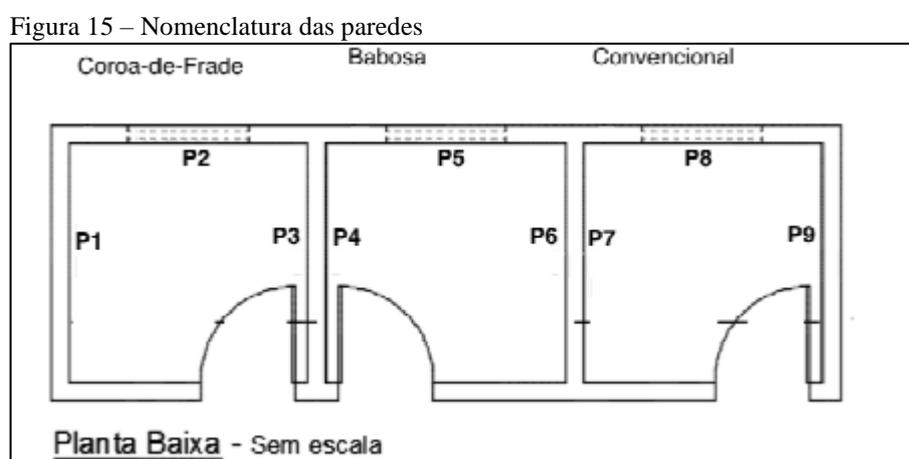


Fonte: Santos (2016).

Diante disso, a validação do modelo foi efetuada pela comparação das temperaturas internas registradas pelos sensores presentes nos ambientes do telhado verde de babosa e coroa-de-frade, com os valores de temperatura interna encontradas na simulação.

Para a realização dos testes, o último ponto xi da discretização do espaço no teto (ver a Figura 13) foi considerado equivalente a temperatura dada pelo sensor do teto. Já os valores de temperatura obtidos pelos sensores colocados nas paredes foram comparados com os valores de temperatura obtidos da simulação do ponto mais interno nas paredes. Sobre os valores da temperatura interna, em Santos (2016), foi dada pela média entre teto e paredes, sendo estes comparados com a temperatura interna encontrada pela simulação.

Na Figura 15 é representado a nomenclatura dada para as paredes de cada ambiente e na Tabela 3 estão os valores das áreas correspondente ao telhado de cada tipo e das paredes.



Fonte: Santos (2016).

Tabela 3 - Dados das áreas de cada elemento envolvente

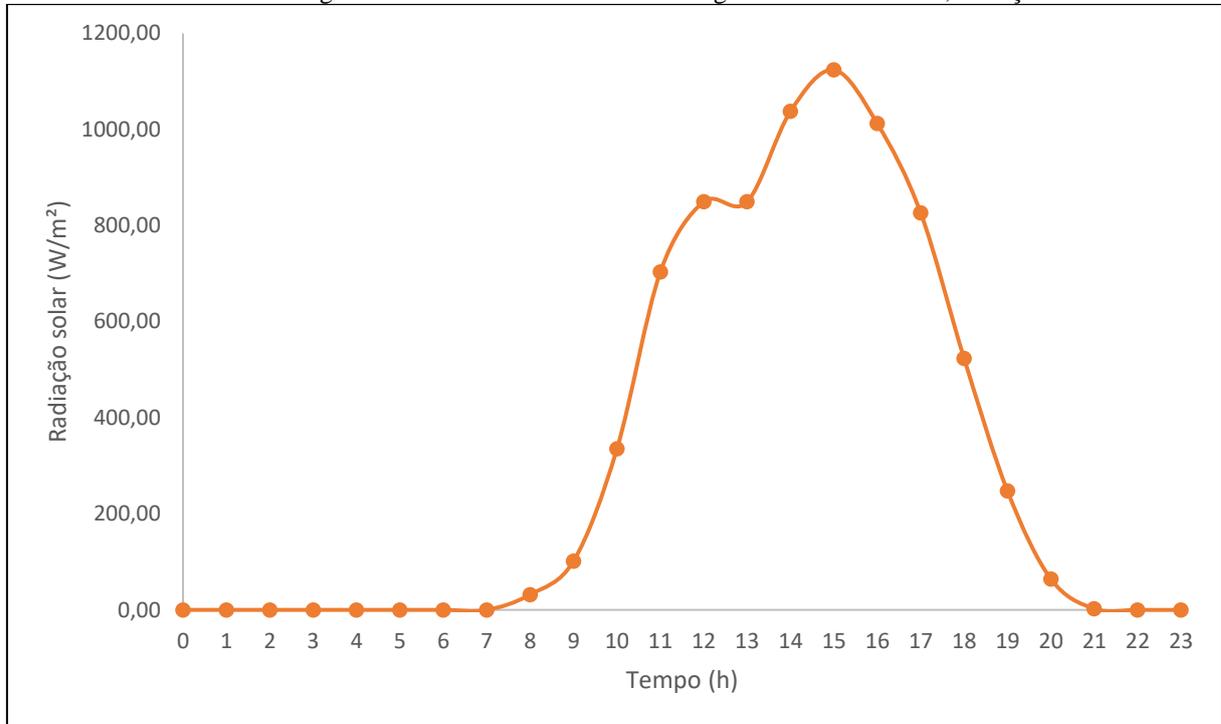
Áreas	Valor (m ²)
AT_b	4,11
AT_{cf}	3,42
AT_c	4,11
$Ap1, Ap4$ e $Ap7$	5,62
$Ap3, Ap6$ e $Ap9$	5,62
$Ap2, Ap5$ e $Ap8$	7,36

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Onde AT significa área do telhado e os subscritos b, cf e c, babosa, coroa-de-frade e convencional respectivamente. AP refere-se a área da parede e a numeração relacionada foi ilustrada na Figura 12.

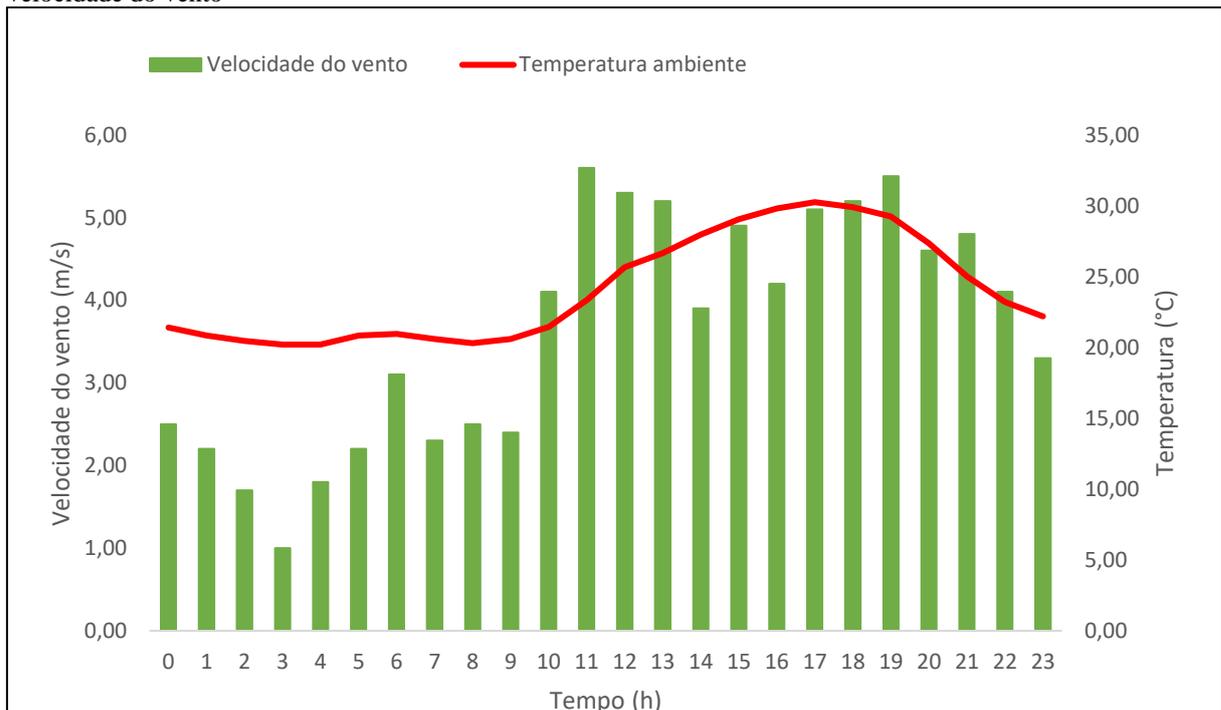
No Gráfico 5 e Gráfico 6 estão os dados meteorológicos de 24 horas do dia 14/11/2015 do Agreste Pernambucano extraídos de Santos (2016) usados na validação.

Gráfico 5 – Dados meteorológicos de 24h do dia 04/11/2015 do Agreste Pernambucano; radiação solar



Fonte: Dados extraídos de Santos (2016).

Gráfico 6 - Dados meteorológicos de 24h do dia 04/11/2015 do Agreste Pernambucano; temperatura ambiente e velocidade do vento



Fonte: Dados extraídos de Santos (2016).

Por fim, as propriedades dos materiais e os valores paramétricos mostrados nas Tabela 1 e 2 também foram utilizados na validação. Quanto aos dados utilizados na validação para as espessuras das camadas de substrato, concreto, alvenaria, camada verde da babosa, da coroa-de-frade, e para o intervalo utilizado para cada ponto da malha do teto Δx e da parede Δy são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores geométricos da validação

Espessura	Valor (m)
Babosa	0,30
Coroa-de-frade	0,10
Substrato	0,10
Concreto (laje)	0,15
Δx	0,05
Alvenaria (paredes)	0,25
Δy	0,05

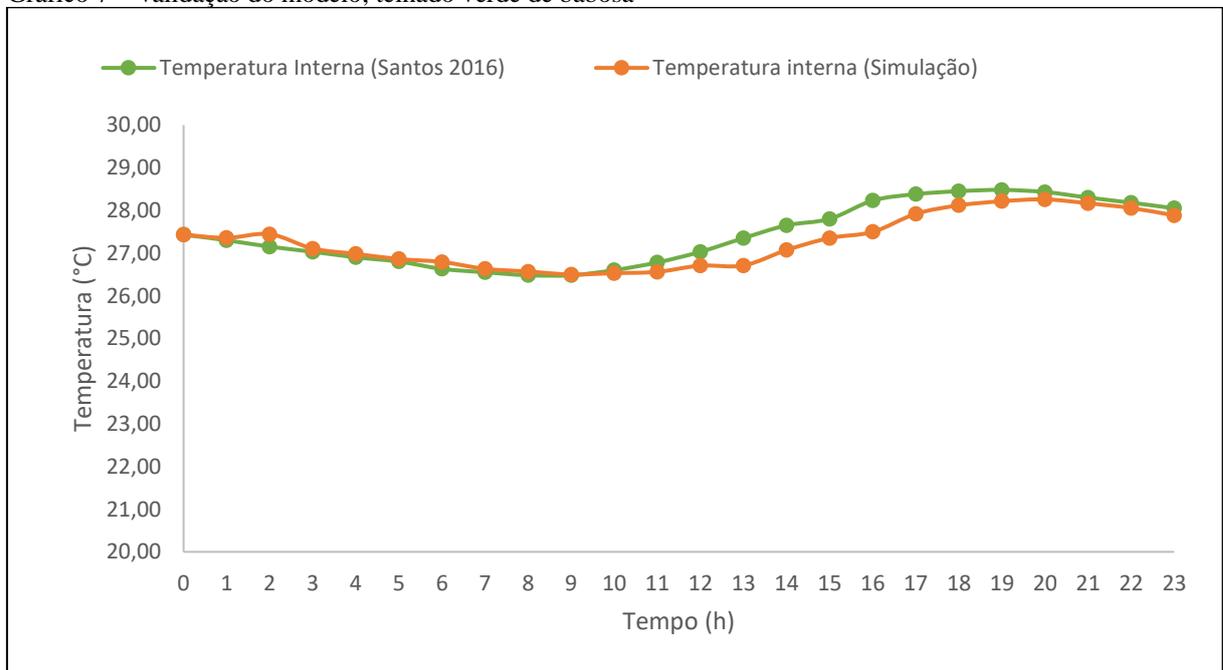
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 Validação do modelo

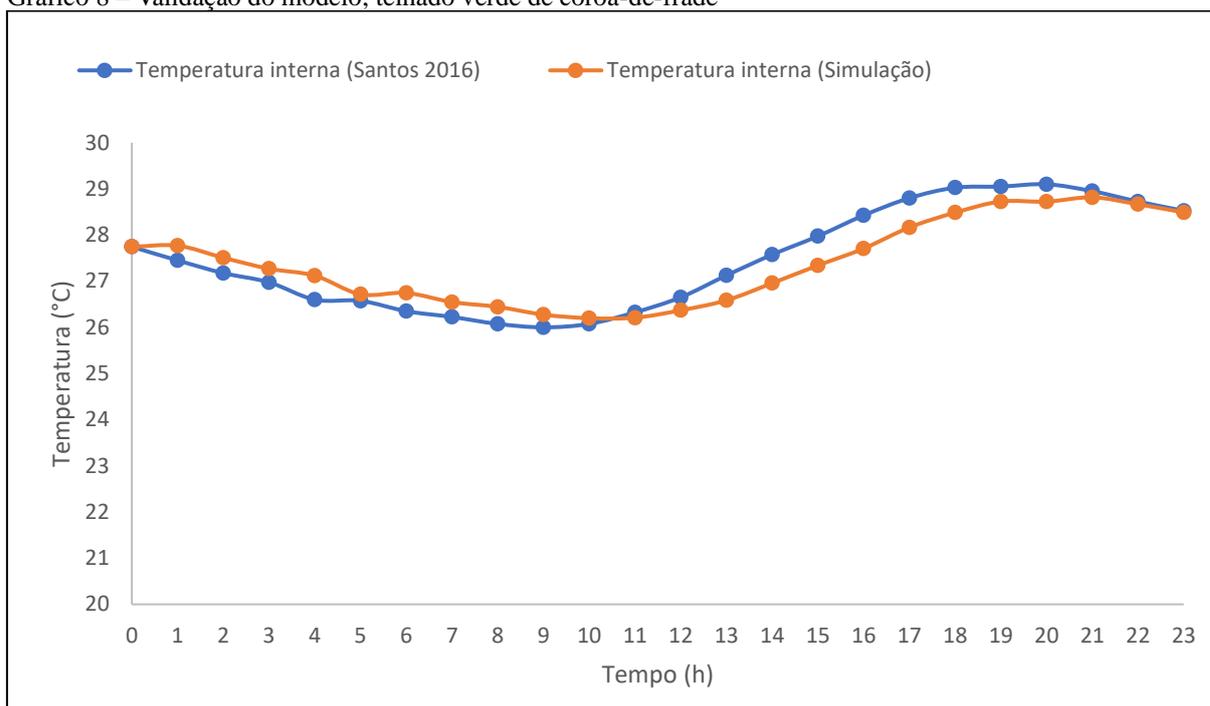
Nos Gráfico 7 e 8 são mostrados a comparação da temperatura interna do estudo de Santos com as temperaturas internas encontradas na simulação para o telhado de babosa e telhado de coroa-de-frade, respectivamente.

Gráfico 7 – Validação do modelo; telhado verde de babosa



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 8 – Validação do modelo; telhado verde de coroa-de-frade



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Da análise dos resultados da validação, observa-se que os principais desvios da simulação apresentam um erro absoluto inferior a 1 °C em relação a Santos (2016), tanto para o telhado de babosa como para o telhado de coroa-de-frade. Diante disso e dos valores apresentados na Tabela 5, que mostra o erro relativo de cada hora para os dois tipos de cobertura verde empregados aqui em relação a Santos (2016), é possível concluir que o modelo proposto simula de maneira aceitável o que ocorre em situações reais.

Tabela 5 – Erro relativo do telhado verde de babosa e de coroa-de-frade em relação a Santos (2016).

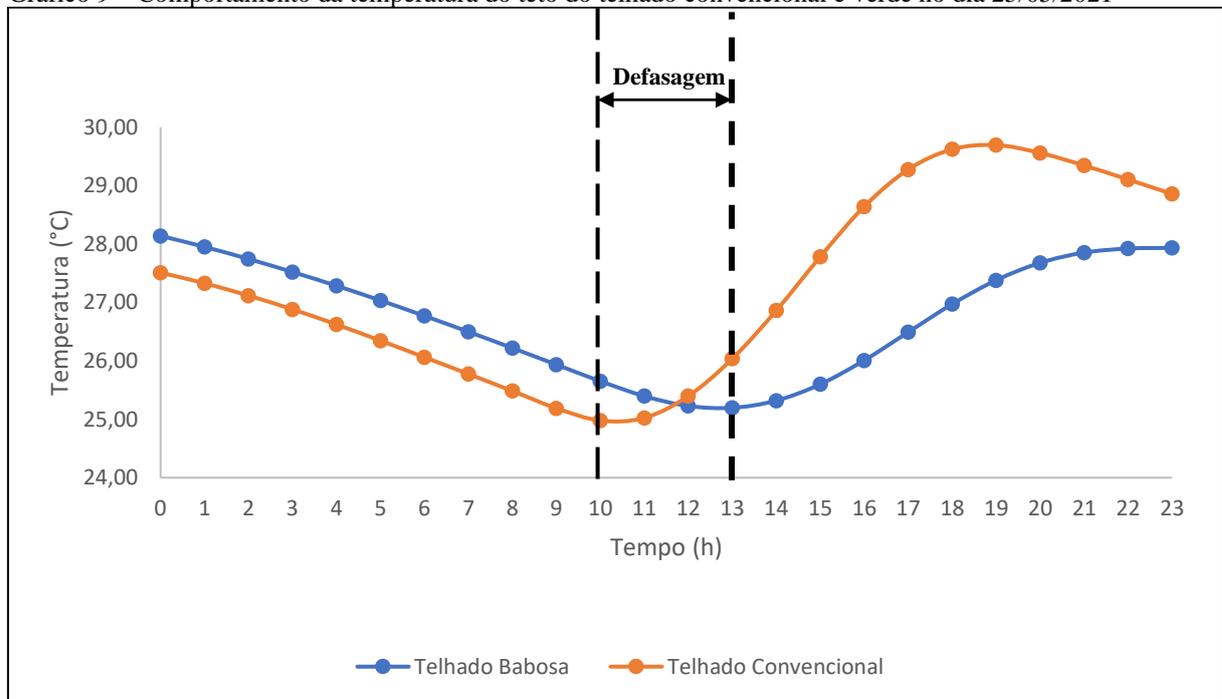
Hora	Babosa (erro %)	Coroa-de-frade (erro %)
0	2,59039E-14	2,56098E-14
1	0,204395604	1,165391621
2	1,078084715	1,22575897
3	0,279319275	1,091751622
4	0,301115242	1,95075188
5	0,225373134	0,529444967
6	0,604956816	1,501328273
7	0,305084746	1,226692088
8	0,330060423	1,413614573
9	0,068353474	1,057307692
10	0,265413534	0,47325024
11	0,823375653	0,441025641
12	1,199038106	1,053658537
13	2,341499086	1,987834101
14	2,095117541	2,242248413
15	1,608633094	2,265951743
16	2,602196245	2,528408091
17	1,621916843	2,206944444
18	1,170474517	1,860120586
19	0,931530899	1,11222031
20	0,606049947	1,296563574
21	0,469964664	0,459758204
22	0,44251242	0,206788512
23	0,5942959	0,123751096

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2 Análise da temperatura do teto e da temperatura interna do telhado convencional e verde

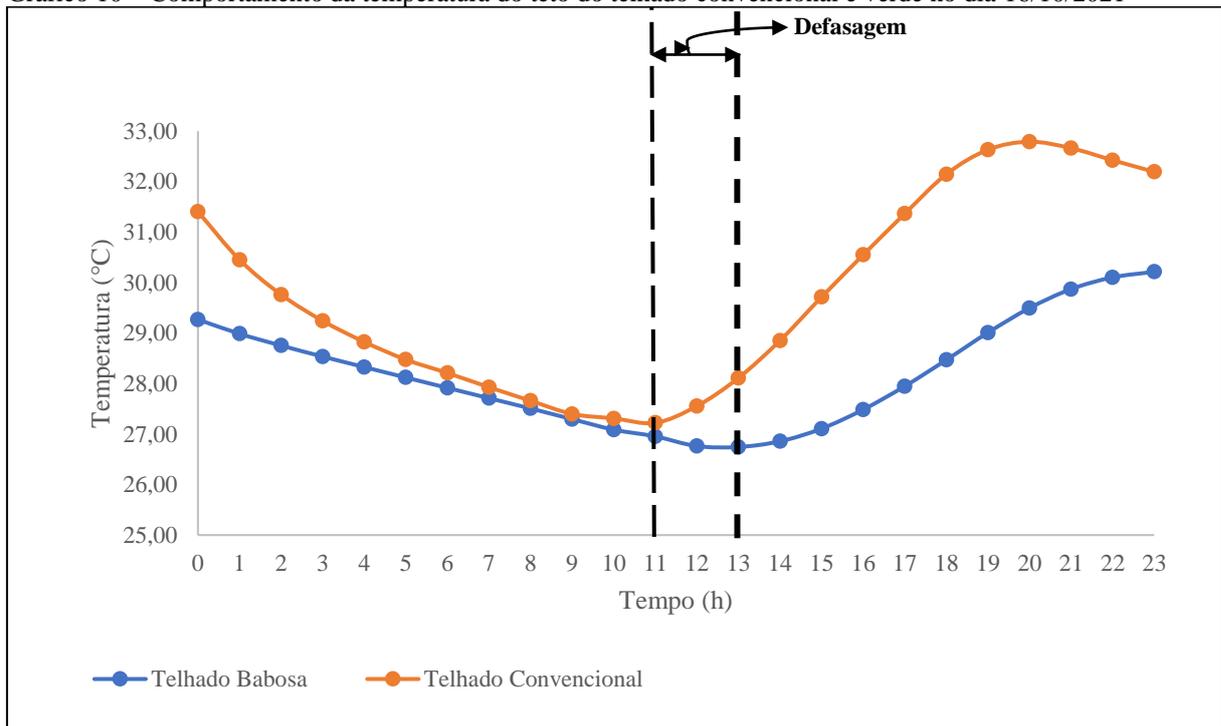
A partir dos Gráficos 9 e 10, é possível observar que os maiores valores encontrados para a temperatura no teto pertencem ao telhado convencional, evidenciando que o mesmo possui maior facilidade em trocar calor com o ambiente externo. Este fenômeno pode ser constatado principalmente pela existência de uma defasagem de três e duas horas do telhado verde de babosa para o telhado convencional quanto ao aumento da temperatura no teto nos dias 25/05/2021 e 16/10/2021, respectivamente.

Gráfico 9 – Comportamento da temperatura do teto do telhado convencional e verde no dia 25/05/2021



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Gráfico 10 – Comportamento da temperatura do teto do telhado convencional e verde no dia 16/10/2021

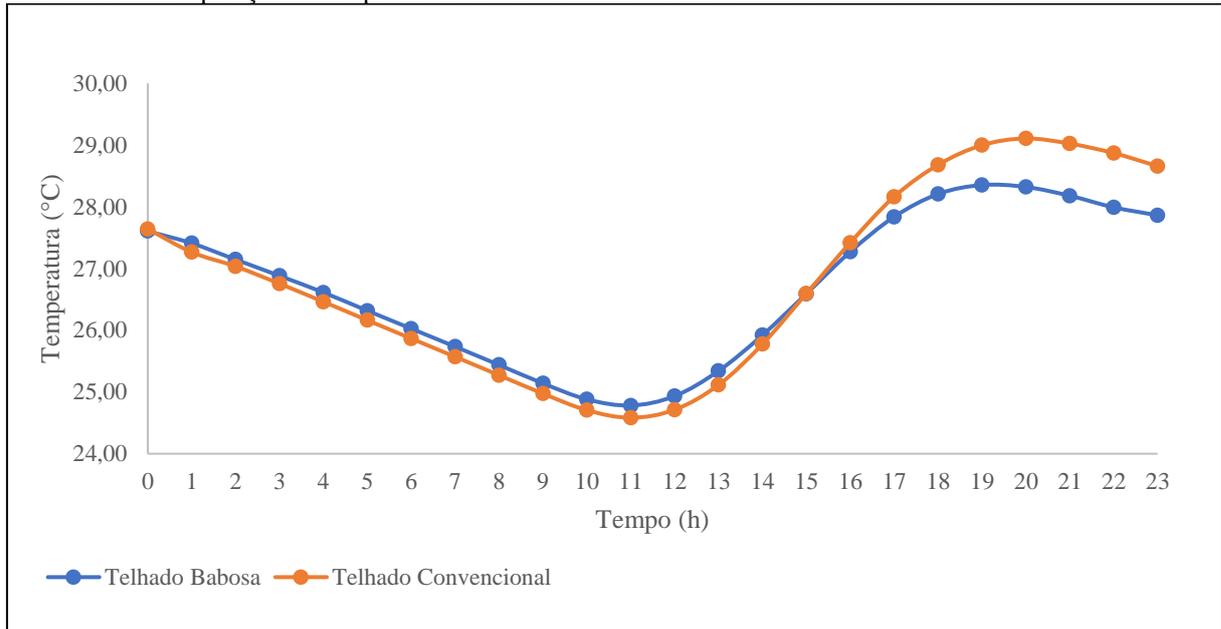


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Além dos efeitos sobre a temperatura do teto, como mostrado nos Gráficos 11 e 12, o telhado verde exerce influência na redução da temperatura interna de um edifício. Quando é registrado a menor temperatura máxima atingida no período da quadra chuvosa, no dia 27 de maio de 2021, a diferença das temperaturas internas dos dois tipos de cobertura é menos expressiva, “isso porque eles proporcionam um efeito de resfriamento significativo durante o verão ou em regiões com clima quente” (POLO-LABARRIOS *et al.*, 2020, p. 9).

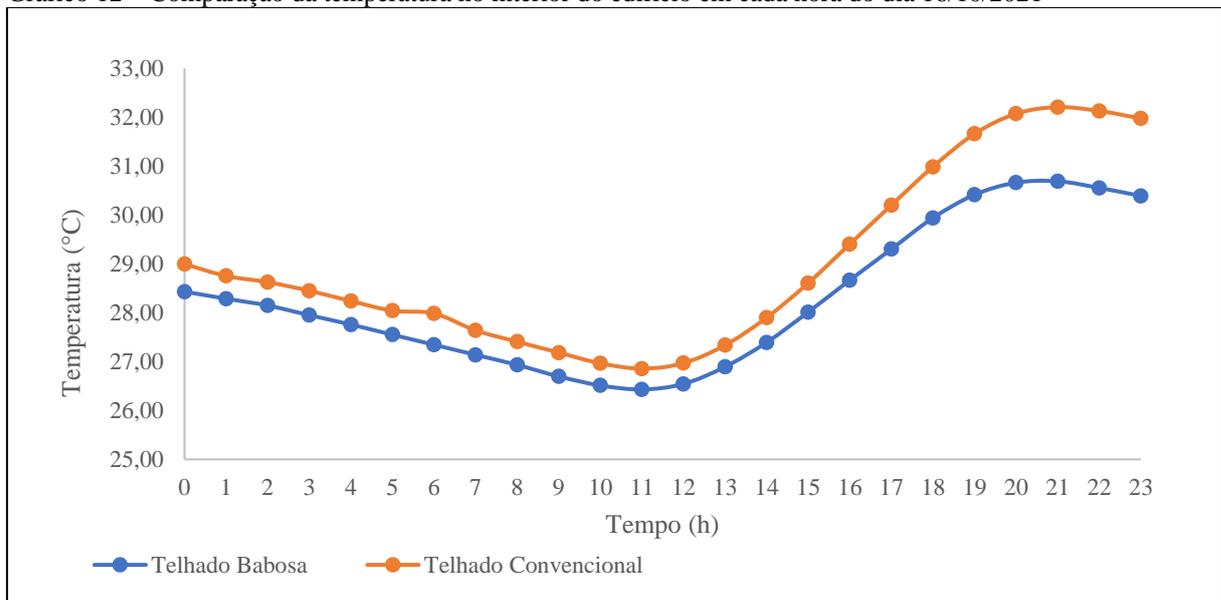
Analisando o Gráfico 11, a mudança mais considerável foi sentida as 22h com quase 1 °C de diferença do telhado convencional para o telhado verde, já no Gráfico 12, em que as temperaturas ambientes são mais elevadas, essa variação é mais notável, com quase 2 °C. Estes resultados são consistentes com outras pesquisas que afirmam que os telhados verdes são uma solução para mitigar as flutuações de temperatura interna dos edifícios (POLO-LABARRIOS *et al.*, 2020).

Gráfico 11 – Comparação da temperatura no interior do edifício em cada hora do dia 27/05/2021



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 12 – Comparação da temperatura no interior do edifício em cada hora do dia 16/10/2021

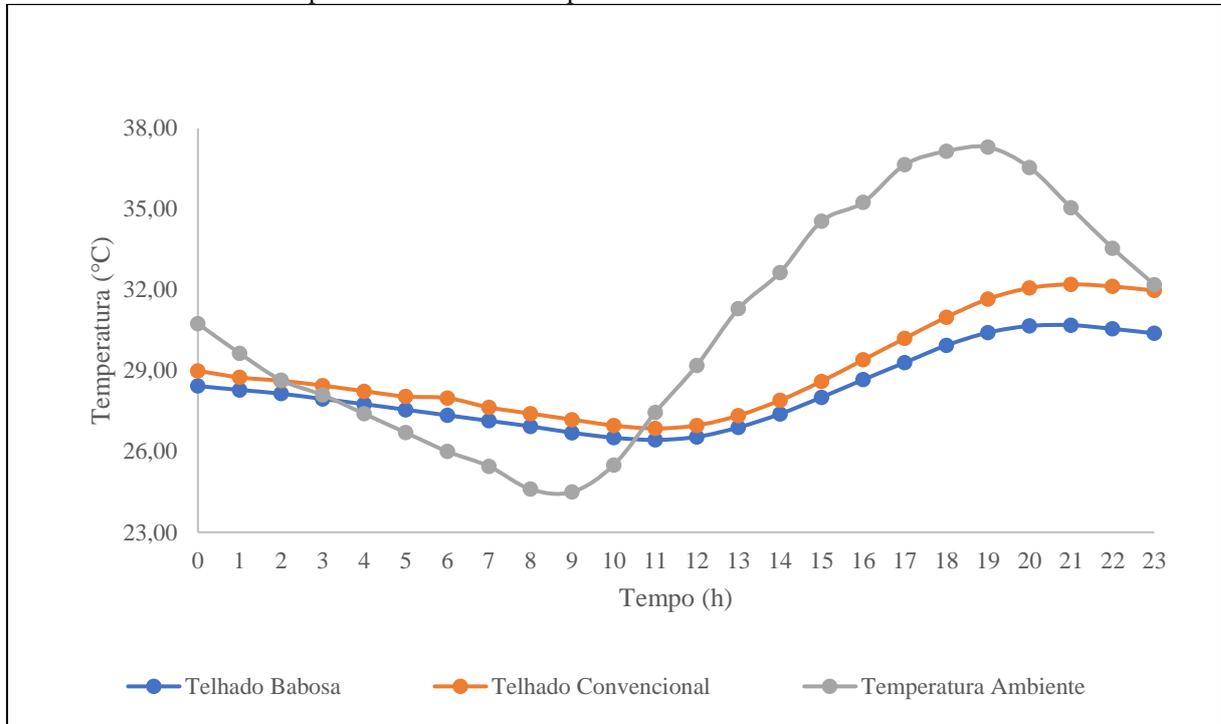


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Adicionalmente, para o dia mais quente de 2021, o Gráfico 13 mostra uma comparação que permite examinar as temperaturas ambientes em cada hora do dia registradas na estação A342 com relação as temperaturas internas das duas coberturas analisadas através da simulação. Neste gráfico, é possível perceber que o telhado convencional fornece valores de temperatura mais elevados ao longo do dia do que o telhado verde de babosa, isso pode ter

ocorrido devido o telhado convencional ter facilidade em trocar calor com o ambiente, enquanto que o sistema do TV proporciona um isolamento térmico.

Gráfico 13 – Análise da temperatura ambiente e temperaturas internas das coberturas no dia 16/10/2021



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.3 Análise da temperatura superficial dos elementos envolventes

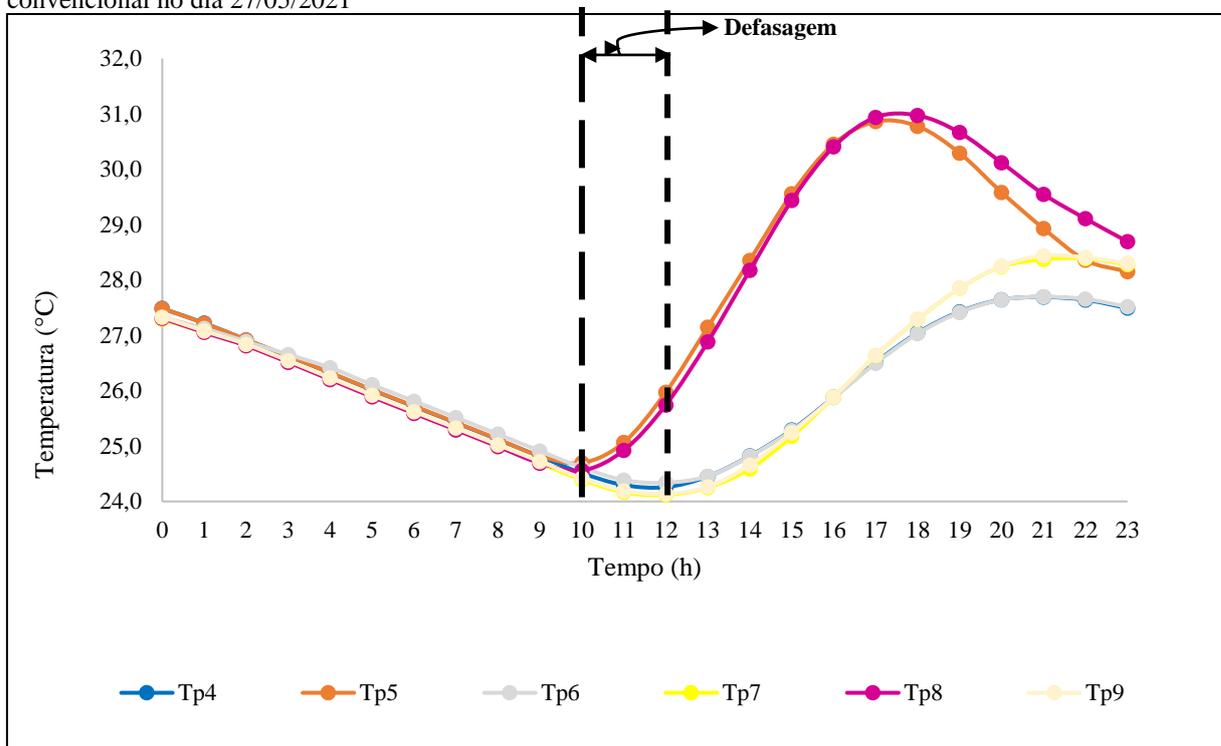
Na pesquisa realizada por Polo-Labarrrios (2020) foi feita uma análise das alterações que a transferência de calor através das paredes implica na temperatura da cobertura e na temperatura interna dos ambientes, sendo que o resultado mostrou que essa transferência tem impacto relevante apenas na temperatura interna dos edifícios e que esse fato é crucial para o conforto térmico e para a economia de energia.

Pensando nisso, no presente trabalho, a temperatura superficial das paredes realizada através da simulação foi monitorada para os dois ambientes, por meio da comparação dos valores das temperaturas internas das paredes referente ao telhado verde e telhado convencional.

Assim, considerando a nomenclatura das paredes conforme apresentado na Figura 14, ou seja, P4, P5, P6 pertencem ao ambiente com telhado convencional, e P7, P8 e P9 ao ambiente com telhado de babosa, os Gráficos 14 e 15 expõem as temperaturas internas de cada hora de todas as paredes envolvidas no dia 27/05/2021 e no dia 16/10/2021,

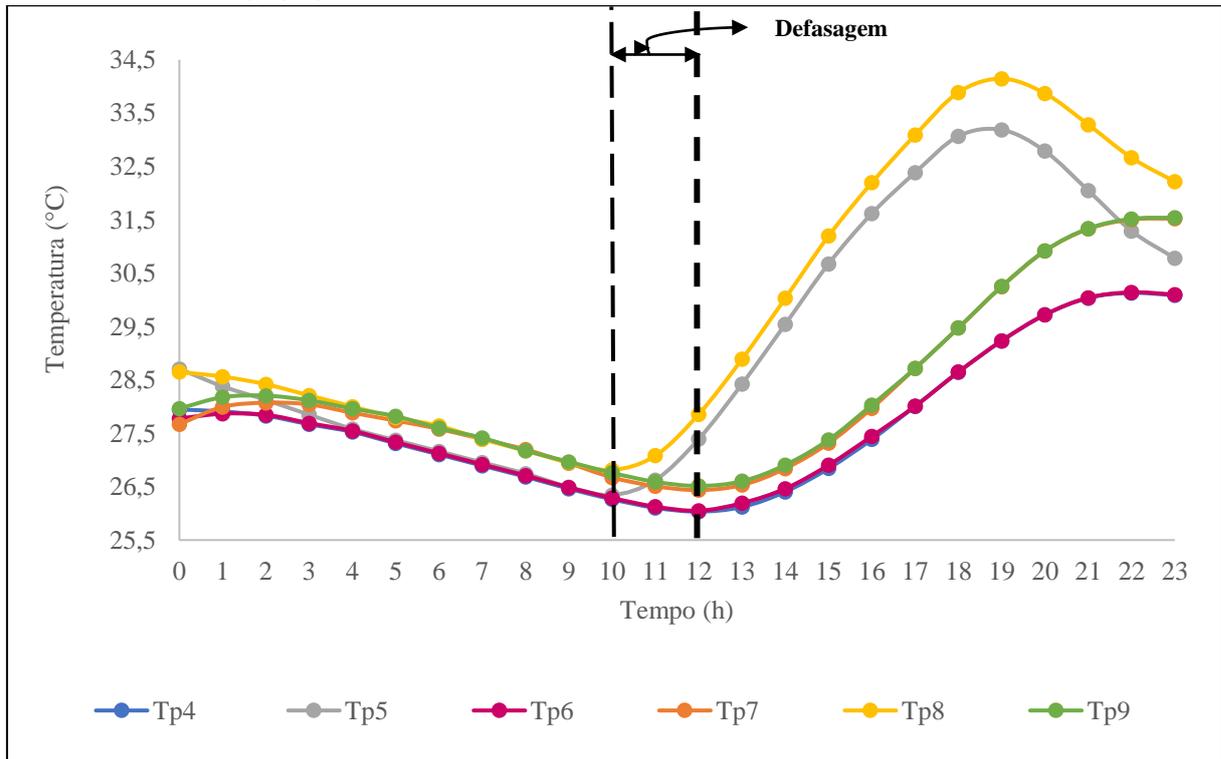
respectivamente. É importante mencionar que aqui acontece o mesmo efeito que foi observado na análise da temperatura interna dos ambientes, em dias com temperaturas mais amenas as diferenças de temperatura interna dos dois ambientes são menos expressivas. Além disso, na análise desses gráficos também é possível perceber que ocorre uma defasagem de duas horas das outras paredes com relação as paredes P5 e P8. Isso acontece devido a radiação incidir diretamente nas paredes P5 e P8 e resultaram, como era esperado, na maior variação de temperatura ao longo dia.

Gráfico 14 – Temperatura superficial interna das paredes pertencentes ao ambiente do telhado verde e do telhado convencional no dia 27/05/2021



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 15 – Temperatura superficial interna das paredes pertencentes ao ambiente do telhado verde e do telhado convencional no dia 16/10/2021



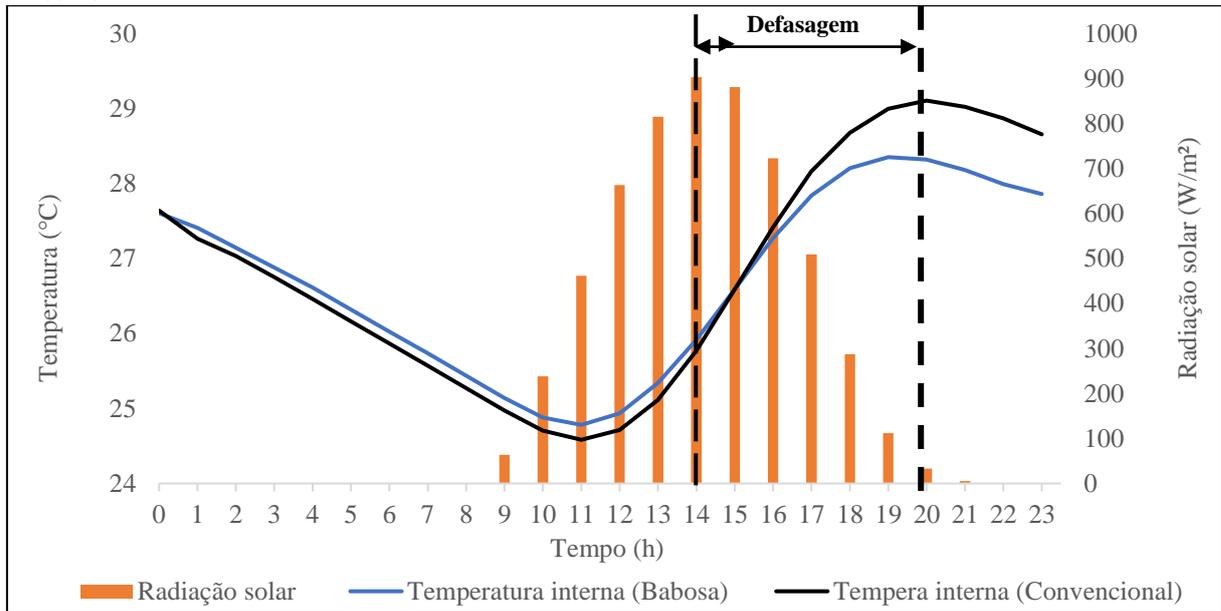
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.4 Análise da temperatura interna e a radiação

Os dados obtidos da temperatura interna através da simulação indicam uma relação direta com a radiação solar. Como era esperado, as temperaturas começam a subir com o acréscimo da radiação e diminuem com a redução da mesma.

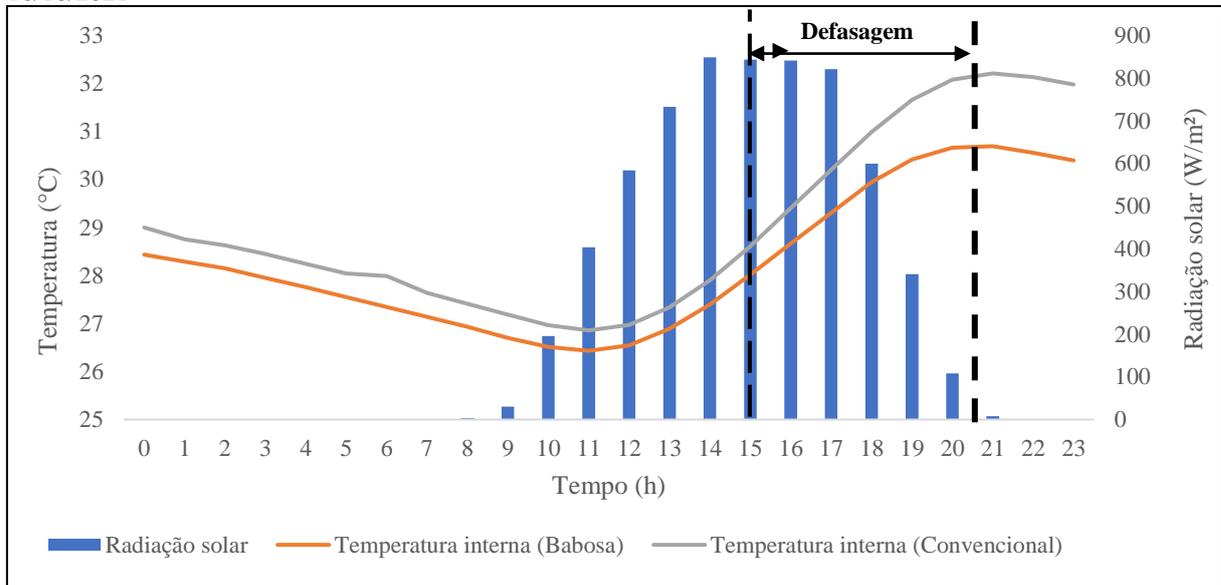
Nos Gráficos 16 e 17 é apresentado a influência que a radiação solar exerce sobre a temperatura interna, tanto do telhado convencional como do telhado verde de babosa. É observado que os valores de pico da temperatura interna ocorrem com uma defasagem de pelo menos seis horas depois do pico de radiação tanto para o dia 27/05/2021 como para dia 16/10/2021.

Gráfico 16 – Influência da radiação solar na temperatura interna do telhado convencional e verde no dia 27/05/2021



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 17 – Influência da radiação solar na temperatura interna do telhado convencional e verde no dia 16/10/2021



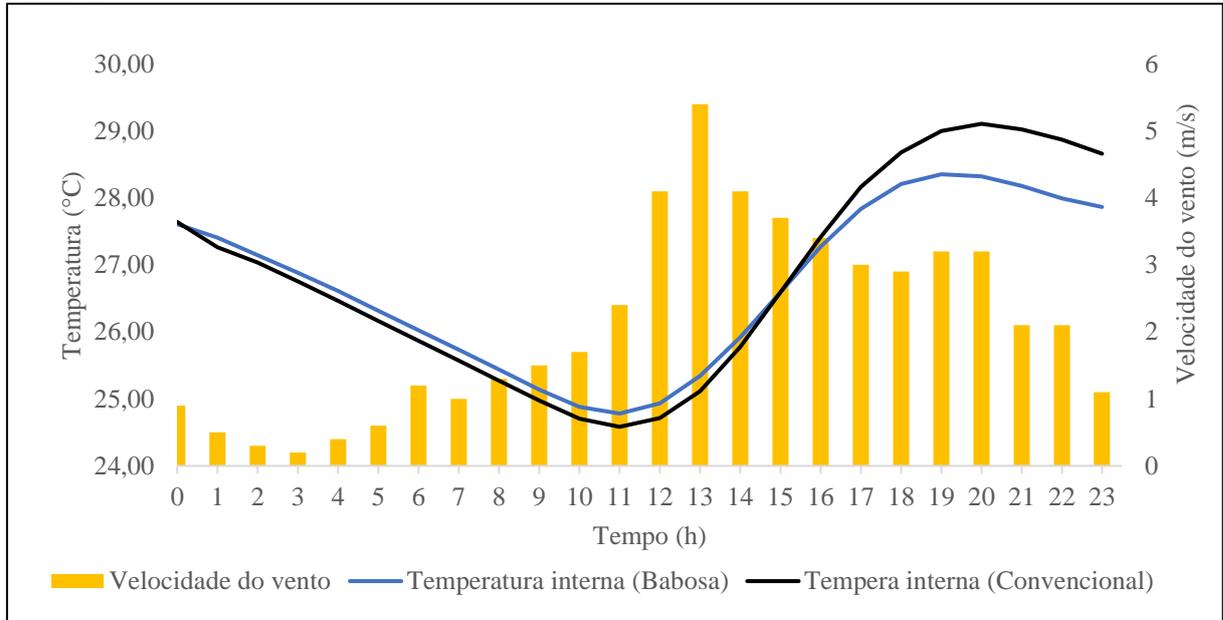
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.5 Análise da temperatura interna e a velocidade do vento

Com relação a velocidade do vento, é observado que possui variações irregulares. No Gráfico 18, referente ao dia 27/05/2021 onde as temperaturas são mais amenas, os valores das velocidades dos ventos são superiores aos do dia 16/10/2021, designado o dia mais

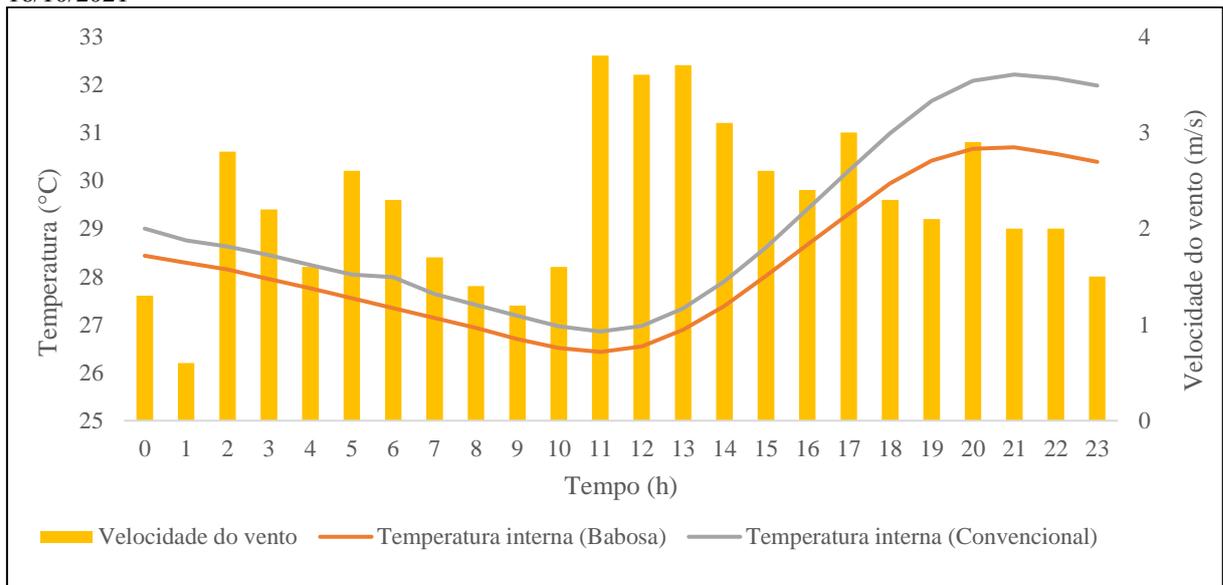
quente, representado no Gráfico 19. Também é possível perceber que para valores de temperatura interna mais elevadas as velocidades dos ventos são maiores e que seus picos estão próximos dos picos de radiação.

Gráfico 18 – Influência da velocidade do vento na temperatura interna do telhado convencional e verde no dia 27/05/2021



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 19 – Influência da velocidade do vento na temperatura interna do telhado convencional e verde no dia 16/10/2021



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para elucidar melhor os efeitos da velocidade dos ventos, a Tabela 6 mostra a situação na qual os efeitos da radiação solar são minimizados, já que seus valores estão próximos com uma variação menor igual a 10% da média em todo intervalo analisado

Tabela 6 – Variação da temperatura interna em função da velocidade dos ventos para pequenas radiações solar (menor igual a 10%), com média da radiação no intervalo de 13:00 -16:00 igual a 851,02 W/m² e 826,34 W/m², para os dias 27/05/2021 e 16/10/2021, respectivamente.

Intervalo Horário	27/05/2021				16/10/2021			
	Radiância média (W/m ²)	Velocidade dos ventos média (m/s)	Variação da Tin (°C)		Radiância média (W/m ²)	Velocidade dos ventos média (m/s)	Variação da Tin (°C)	
			TC	TV			TC	TV
13:00- 14:00	859,27	4,75	0,66	0,58	790,66	3,4	0,56	0,50
14:00- 15:00	892,07	3,90	0,82	0,67	845,97	2,85	0,71	0,62
15:00- 16:00	801,71	3,55	0,82	0,68	842,40	2,5	0,80	0,65

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Da Tabela 6 é possível observar que quanto maior a velocidade dos ventos menor é a variação da temperatura interna, o que confirma o fato da velocidade dos ventos contribuir com fluxo de calor por convecção e, portanto, favorece a dissipação do calor do ambiente interno para o ambiente externo. Além disso, para o mesmo dia, nos intervalos analisados, a variação de temperatura do ambiente interno do telhado verde é menor que aqueles observados no telhado convencional, indicando que o telhado verde aproveita melhor os efeitos da velocidade dos ventos. Esse comportamento pode ser explicado tendo em vista que no telhado verde há outros mecanismos de transferência de calor, especialmente a evapotranspiração.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo foi baseado no trabalho de Polo-Labarríos *et al.* (2020), em que foi desenvolvido um modelo modificado para o regime transiente de transferência de calor para dois ambientes, um com cobertura convencional e outro com cobertura verde. A fim de validar o modelo, foi feita uma comparação entre o estudo experimental realizado por Santos (2016) e os dados obtidos pela simulação realizada no modelo proposto no presente trabalho. Os resultados mostraram uma boa concordância entre o modelo proposto e os dados experimentais coletados por Santos (2016). Diante da validade do modelo, foi testado o desempenho térmico de um telhado verde nos dias de menor e maior temperatura registrado durante o ano de 2021 na cidade de Crateús, tendo a babosa como vegetação.

Como hipótese inicial era esperado que o telhado verde apresentasse um desempenho térmico melhor em comparação com o telhado convencional. Tal fato foi comprovado, especialmente, no dia 16 de outubro de 2021, caracterizado por apresentar as temperaturas ambientes mais elevadas e os maiores índices de radiação solar. De forma similar, foi observado um comportamento térmico parecido para o dia mais frio, sendo que neste caso a diferença de temperatura entre o telhado verde e o convencional foi menos significativa.

Quanto ao fluxo de calor que atravessa os telhados, é classificado como mais eficiente aquele que promove maior isolamento térmico, isto é, a transferência de calor para o interior e para o exterior é a menor possível, a depender das condições climáticas.

Em concordância com análise feita para as temperaturas superficiais dos tetos, o telhado verde de babosa se sobressaiu no isolamento térmico da edificação em comparação com o telhado convencional, visto que apresentou temperatura interna menor que a externa nas horas mais quentes do dia, e temperatura interna maior que a externa em horas mais frias. Foi possível constatar que o telhado convencional apresentou essas mesmas condições quando comparado com a temperatura ambiente, porém quando comparado ao telhado de babosa, o mesmo tornou-se menos eficiente.

Diante disso, a presente pesquisa contribuiu para a construção do conhecimento a respeito desta técnica construtiva ecológica aplicada ao clima semiárido. Também foi possível constatar que os telhados verdes inseridos as condições meteorológicas da cidade de Crateús apresentaram um significativo desempenho térmico, sendo assim, podem ser considerados como uma alternativa viável para promover o conforto térmico do município.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, G. S.; ROSSI, A. M. G.; DRACH, P. R. C. Análise de Projeto Urbano a partir de parâmetros urbanos sustentáveis: alteração morfológica de Copacabana e algumas de suas consequências climáticas (1930-1950-2010). **URBE - Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 6, n. 583, p. 275, 2014.

BARBOSA, Gisele; ROSSI, Angela Maria; DRACH, Patrícia Regina. Análise de Projeto Urbano a partir de parâmetros urbanos sustentáveis: alteração morfológica de Copacabana e algumas de suas consequências climáticas (1930-1950-2010). **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 6, n. 3, p. 275-287, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/urbe/a/YYm5mQZk6z4GftKTzB5jKFG/?format=pdf>. Acesso em: 5 jul. 2022.

FENG, Chi; MENG, Qinglin; ZHANG, Yufeng. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p. 959-965, jun. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.014>. Acesso em: 6 jul. 2022.

FERREIRA, Manoela. **Teto verde: o uso de coberturas vegetais em edificações**. [S. l.: s. n.], 2008. 11 p. Disponível em: https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2007/relatorios/art/art_manoela_de_freitas_ferreira.pdf.

FERRAZ, Iara Lima. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica**. 2012. PublishedVersion — Universidade de São Paulo, [s. l.], 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-07062013-144209/>. Acesso em: 14 jul. 2022.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.3, n.26, p.403-10, 1991.

GARRIDO NETO, P. de S. **Telhados verdes associados com sistema de aproveitamento de água de chuva: Elaboração de dois projetos para futuros estudos sobre esta técnica compensatória em drenagem urbana e prática sustentável na construção civil**. 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

HENEINE, Maria Cristina de Souza, **Cobertura Verde** -Monografia – Curso Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – **INMET**.

JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S.-E.; BELARBI, R. Um Estudo Abrangente do Impacto dos Telhados Verdes no Desempenho Energético dos Edifícios. **Energia Renovável**, v. 43, p. 157–164, jul. 2012.

MICHELS, Caren. **Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes**. 2007. 117 p. Dissertação de mestrado — UFSC, Florianópolis, 2007. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/Dissertação_Caren%20Michels.pdf. Acesso em: 2 out. 2021.

PALMEIRA, Aline Nogueira. **BALANÇO DE ENERGIA EM TELHADO VERDE**. 2016. PublishedVersion — Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7664>. Acesso em: 1 jul. 2022.

PARENTE, L. M. L.; CARNEIRO, L. M.; TRESVENZOL, L. M. F.; GARDIN, N. E.. Aloe Vera: Características Botânicas, Fitoquímicas e Terapeúticas. *Arte Médica Ampliada*, [S. l.], 33 (4), 160-164, 2013.

PEREIRA, Osvaldo. **Estimativas do balanço de energia e fluxo de carbono por diferentes métodos em floresta de transição no sudoeste da Amazônia**. 2013. Tese de doutorado — Universidade federal de Mato Grosso Instituto de Física programa de pós-graduação em física ambiental, Cuiabá, 2013. Disponível em: <https://pgfa.ufmt.br/index.php/en/utilities/files/banco-de-teses-do-programa/273-osvaldo-alves-pereira-1/file>.

POLO-LABARRIOS, Marco A. et al. Comparison of thermal performance between green roofs and conventional roofs. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 21, p. 100697, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100697>. Acesso em: 27 jun. 2022.

QL Meng , Y. Zang , L. Zang **Medição da resistência térmica equivalente de gramados de telhado em um túnel de vento de clima quente**, J. Harbin Inst. Tecnol. , 13 (2006) , p. 53-56.

SANTOS, Gilles Chaves dos. **Desempenho térmico de telhados verdes no agreste pernambucano**. 2016. 95 p. Dissertação de mestrado — UFPE, Caruaru, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/10266/SENA,%20JULIO%20CESAR%20LOPES.pdf>. Acesso em: 2 maio 2022.

SENA, J. C. L. **Estudo das componentes do balanço de energia em uma cultura de arroz irrigado no sul do Brasil**. Dissertação em mestrado em meteorologia na Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2012.

SOUSA, Rafaela. "Caatinga"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/brasil/caatinga.htm>. Acesso em 21 de junho de 2022.

SONG, Uhram *et al.* Wetlands are an effective green roof system. **Building and Environment**, v. 66, p. 141-147, ago. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.024>. Acesso em: 6 jul. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza, 2013.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2011, Paraná. **II Simpósio Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná**. [S. l.: s. n.].

VACILIKIO, Douglas; FLEISCHFRESSER, Luciano. Comparação entre Telhado Verde e Convencional nas Temperaturas Internas de Ambientes. *In: II SIMPÓSIO AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ*, 2011, Paraná. **II Simpósio Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná**. [S. l.: s. n.].

ÇENGEL, Yunus A. **Heat and mass transfer: a practical approach**. 4. ed. Boston: McGraw-Hill, 2010. ISBN 0073398128.

ÇENGEL, Y. A.; E-LIBRO, C. **Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico**. México D.F.: Mcgraw-Hill Interamericana, 2007.

APÊNDICE A – DADOS DO DIA 27-05-2021

Hora	Temperatura ambiente (°C)	Telhado de Babosa					Telhado Convencional					Velocidade do vento (m/s)	Radiação (W/m ²)
		Temperatura (°C)					Temperatura (°C)						
		P4	P5	P6	Teto	Interna	P7	P8	P9	Teto	Interna		
00:00	25,20	27,49	27,48	27,32	28,14	27,61	27,29	27,31	27,33	27,51	27,64	0,90	0,00
01:00	24,00	27,22	27,22	27,13	27,95	27,41	27,05	27,05	27,08	27,33	27,26	0,50	0,00
02:00	23,25	26,92	26,92	26,89	27,74	27,15	26,81	26,81	26,84	27,12	27,03	0,30	0,00
03:00	22,20	26,63	26,63	26,65	27,52	26,88	26,52	26,52	26,54	26,88	26,76	0,20	0,00
04:00	21,23	26,32	26,33	26,42	27,29	26,61	26,20	26,20	26,23	26,62	26,46	0,40	0,00
05:00	20,90	26,01	26,02	26,11	27,03	26,32	25,89	25,89	25,92	26,35	26,16	0,60	0,00
06:00	20,60	25,72	25,72	25,81	26,77	26,03	25,59	25,59	25,62	26,06	25,87	1,20	0,00
07:00	20,15	25,42	25,43	25,52	26,50	25,73	25,29	25,29	25,32	25,78	25,57	1,00	0,00
08:00	19,50	25,12	25,12	25,22	26,22	25,44	24,99	24,99	25,02	25,48	25,27	1,30	1,03
09:00	18,95	24,81	24,82	24,91	25,94	25,14	24,69	24,69	24,72	25,19	24,97	1,50	63,57
10:00	20,35	24,51	24,70	24,61	25,65	24,88	24,39	24,56	24,42	24,98	24,71	1,70	238,03
11:00	23,60	24,30	25,07	24,38	25,40	24,78	24,16	24,92	24,19	25,02	24,58	2,40	462,00
12:00	26,80	24,26	25,97	24,34	25,23	24,93	24,12	25,74	24,14	25,40	24,71	4,10	663,14
13:00	28,85	24,45	27,15	24,46	25,20	25,34	24,25	26,88	24,26	26,04	25,11	5,40	815,26
14:00	30,45	24,82	28,36	24,82	25,32	25,92	24,59	28,17	24,66	26,86	25,78	4,10	903,28
15:00	31,40	25,29	29,56	25,28	25,60	26,59	25,18	29,44	25,24	27,78	26,59	3,70	880,86
16:00	32,40	25,88	30,46	25,87	26,01	27,27	25,88	30,41	25,89	28,64	27,42	3,40	722,57
17:00	32,65	26,51	30,86	26,50	26,49	27,84	26,64	30,94	26,64	29,28	28,16	3,00	509,43
18:00	32,65	27,04	30,78	27,03	26,97	28,21	27,29	30,97	27,29	29,62	28,68	2,90	287,21
19:00	31,60	27,43	30,29	27,42	27,38	28,35	27,85	30,66	27,86	29,69	29,00	3,20	111,92
20:00	30,65	27,65	29,58	27,64	27,68	28,32	28,24	30,12	28,25	29,56	29,11	3,20	33,25
21:00	29,00	27,69	28,93	27,70	27,85	28,18	28,37	29,55	28,44	29,35	29,02	2,10	5,46
22:00	27,45	27,64	28,36	27,65	27,92	27,99	28,39	29,11	28,41	29,10	28,87	2,10	0,00
23:00	26,10	27,49	28,15	27,52	27,93	27,86	28,28	28,69	28,30	28,86	28,66	1,10	0,00

APÊNDICE B – DADOS DO DIA 16-10-2021

Hora	Temperatura ambiente (°C)	Telhado de Babosa					Telhado Convencional					Velocidade do vento (m/s)	Radiação (W/m ²)
		Temperatura (°C)					Temperatura (°C)						
		P4	P5	P6	Teto	Interna	P7	P8	P9	Teto	Interna		
00:00	30,75	27,95	28,71	27,78	29,27	28,43	27,67	28,65	27,97	31,41	29,00	1,30	0,00
01:00	29,65	27,91	28,38	27,87	28,99	28,29	28,00	28,56	28,18	30,45	28,75	0,60	0,00
02:00	28,65	27,83	28,13	27,85	28,75	28,15	28,07	28,42	28,21	29,76	28,63	2,80	0,00
03:00	28,10	27,67	27,85	27,69	28,54	27,95	28,04	28,21	28,12	29,24	28,45	2,20	0,00
04:00	27,40	27,53	27,58	27,55	28,33	27,76	27,88	28,00	27,96	28,83	28,24	1,60	0,00
05:00	26,70	27,31	27,37	27,33	28,12	27,55	27,74	27,80	27,82	28,48	28,04	2,60	0,00
06:00	26,00	27,10	27,16	27,13	27,92	27,35	27,58	27,64	27,60	28,21	27,99	2,30	0,00
07:00	25,45	26,89	26,95	26,92	27,71	27,14	27,39	27,39	27,41	27,93	27,64	1,70	0,00
08:00	24,60	26,69	26,75	26,71	27,51	26,93	27,20	27,17	27,17	27,66	27,41	1,40	3,53
09:00	24,50	26,46	26,49	26,49	27,30	26,70	26,94	26,95	26,97	27,40	27,18	1,20	30,60
10:00	25,50	26,26	26,34	26,29	27,09	26,51	26,67	26,81	26,76	27,31	26,97	1,60	195,33
11:00	27,45	26,10	26,63	26,13	26,95	26,43	26,51	27,08	26,59	27,22	26,86	3,80	403,21
12:00	29,20	26,03	27,39	26,05	26,76	26,54	26,44	27,86	26,51	27,55	26,97	3,60	583,40
13:00	31,30	26,12	28,42	26,19	26,75	26,89	26,53	28,89	26,60	28,11	27,34	3,70	732,86
14:00	32,65	26,41	29,55	26,46	26,86	27,39	26,84	30,03	26,91	28,85	27,90	3,10	848,46
15:00	34,55	26,84	30,68	26,91	27,11	28,01	27,32	31,20	27,38	29,71	28,61	2,60	843,49
16:00	35,25	27,39	31,62	27,45	27,49	28,67	27,97	32,20	28,03	30,55	29,40	2,40	841,31
17:00	36,65	28,01	32,39	28,01	27,95	29,30	28,72	33,09	28,72	31,36	30,20	3,00	820,60
18:00	37,15	28,65	33,07	28,65	28,47	29,94	29,48	33,89	29,48	32,15	30,99	2,30	599,14
19:00	37,30	29,23	33,19	29,23	29,01	30,41	30,25	34,14	30,25	32,63	31,66	2,10	340,54
20:00	36,55	29,72	32,79	29,72	29,50	30,66	30,92	33,87	30,92	32,79	32,07	2,90	108,08
21:00	35,05	30,04	32,05	30,04	29,87	30,69	31,33	33,29	31,34	32,66	32,21	2,00	7,96
22:00	33,55	30,13	31,29	30,14	30,10	30,56	31,51	32,66	31,52	32,43	32,13	2,00	0,00
23:00	32,20	30,09	30,78	30,10	30,22	30,39	31,53	32,22	31,54	32,20	31,98	1,50	0,00

APÊNDICE C – ALGORITMO DO TELHADO CONVENCIONAL

```

clear all
% Modelo para TC intervalo [0,1]
% Condição inicial T [K]
ans ='Iteracao01h'
T1 =302.2647
T2 =302.2647
T3 =302.2647
T4 =302.2647
T1P1 =273.16+28.4
T2P1 =273.16+28.4
T3P1 =273.16+28.4
T4P1 =273.16+28.4
T1P2 =273.16+29.1
T2P2 =273.16+29.1
T3P2 =273.16+29.1
T4P2 =273.16+29.1
T1P3 =273.16+28.4
T2P3 =273.16+28.4
T3P3 =273.16+28.4
T4P3 =273.16+28.4
Tin =302.0303
Tamb=300.61 % [K]
% Tempo máximo/dt [s]
tempomax=3600;
tempo=0;
dt=12;

% Número de iterações
iter=0

% Definição de variáveis velhas
T1_old=T1
T2_old=T2
T3_old=T3
T4_old=T4
Tin_old=Tin
T1P1_old=T1P1
T2P1_old=T2P1
T3P1_old=T3P1
T4P1_old=T4P1
T1P2_old=T1P2
T2P2_old=T2P2
T3P2_old=T3P2
T4P2_old=T4P2
T1P3_old=T1P3
T2P3_old=T2P3
T3P3_old=T3P3

```

```

T4P3_old=T4P3
% Propriedades concreto
dx=0.05; % [m]
kconc=0.8; % [W/mK]
rhoconc=1800; % [kg/m³]
Cpconc=840; % [j/kgK]
%propriedade teto
epsilon=1;
alpha=0.85;
h1=1.31; % [W/m²*K]
h5=0.64; % [W/m²*K]
AT=1.93*2.13; % m²
%Propriedade das paredes
hp1f=1.41
hp2f=1.68
hp3f=1.42
hp1=1.15
hp2=0.93
hp3=1.14
Ap1=5.62
Ap2=7.36
Ap3=5.62
Vint=12.54
rhomed=1181.58
kmed=0.63
rhocpmed=1149115.53
dy=14/3*10^-2
%constantes
sigma=5.67*10^-8; % [W/m²*K^4]
qri=0; % [W/m²] (valor aproximado às 8 h no artigo)
Tsky=Tamb-13; % [K]
%propriedade do ambiente interno
rhoar=1.184; % kg/m³ (densidade do ar dentro do ambiente)
Cpar=1007; % [j/kgK]
while tempo<tempomax
T1= T1_old+2*dt/(rhoconc*dx*Cpconc)*[alpha*qri-epsilon*sigma*(T1_old^4-Tsky^4)-
h1*(T1_old-Tamb)-kconc*(T2_old-T1_old)/dx]
T2=T2_old+kconc/(rhoconc*Cpconc)*dt/(dx)^2*(T3_old-2*T2_old+T1_old)
T3=T3_old+kconc/(rhoconc*Cpconc)*dt/(dx)^2*(T4_old-2*T3_old+T2_old)
T4=T4_old+2*dt/(rhoconc*dx*Cpconc)*(-kconc*(T4_old-T3_old)/dx-
epsilon*sigma*(T4_old^4-Tin_old^4)-h5*(T4_old-Tin_old))
T1P1= T1P1_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*[-epsilon*sigma*(T1P1_old^4-Tsky^4)-
hp1f*(T1P1_old-Tamb)-kmed*(T2P1_old-T1P1_old)/dy]
T2P1=T2P1_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dy)^2*(T3P1_old-2*T2P1_old+T1P1_old)
T3P1=T3P1_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dy)^2*(T4P1_old-2*T3P1_old+T2P1_old)
T4P1=T4P1_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*(-kmed*(T4P1_old-T3P1_old)/dy-
epsilon*sigma*(T4P1_old^4-Tin_old^4)-hp1*(T4P1_old-Tin_old))
T1P2= T1P2_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*[alpha*qri-epsilon*sigma*(T1P2_old^4-Tsky^4)-
hp2f*(T1P2_old-Tamb)-kmed*(T2P2_old-T1P2_old)/dy]
T2P2=T2P2_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dy)^2*(T3P2_old-2*T2P2_old+T1P2_old)

```

```

T3P2=T3P2_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dy)^2*(T4P2_old-2*T3P2_old+T2P2_old)
T4P2=T4P2_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*(-kmed*(T4P2_old-T3P2_old)/dy-
epsilon*sigma*(T4P2_old^4-Tin_old^4)-hp2*(T4P2_old-Tin_old))
T1P3= T1P3_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*[-epsilon*sigma*(T1P3_old^4-Tsky^4)-
hp3f*(T1P3_old-Tamb)-kmed*(T2P3_old-T1P3_old)/dy]
T2P3=T2P3_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dx)^2*(T3P3_old-2*T2P3_old+T1P3_old)
T3P3=T3P3_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dy)^2*(T4P3_old-2*T3P3_old+T2P3_old)
T4P3=T4P3_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*(-kmed*(T4P3_old-T3P3_old)/dy-
epsilon*sigma*(T4P3_old^4-Tin_old^4)-hp3*(T4P3_old-Tin_old))
Tin=(epsilon*sigma*(T4_old^4-Tin_old^4)*AT + epsilon*sigma*(T4P1_old^4-
Tin_old^4)*Ap1+epsilon*sigma*(T4P2_old^4-
Tin_old^4)*Ap2+epsilon*sigma*(T4P3_old^4-Tin_old^4)*Ap3+h5*(T4_old-
Tin_old)*AT+hp1*(T4P1_old-Tin_old)*Ap1+hp2*(T4P2_old-
Tin_old)*Ap2+hp3*(T4P3_old-Tin_old)*Ap3)/(rhoar*Vint*Cpar)+Tin_old
tempo=tempo+dt;
T1_old=T1;
T2_old=T2;
T3_old=T3;
T4_old=T4;
Tin_old=Tin;
T1P1_old=T1P1;
T2P1_old=T2P1;
T3P1_old=T3P1;
T4P1_old=T4P1;
T1P2_old=T1P2;
T2P2_old=T2P2;
T3P2_old=T3P2;
T4P2_old=T4P2;
T1P3_old=T1P3;
T2P3_old=T2P3;
T3P3_old=T3P3;
T4P3_old=T4P3;
iter=iter+1
hold on
xlabel('Tempo')
ylabel('Temperatura')
plot(tempo,Tin_old,'r--o')
legend('Tin')
end
diary('Telhado convencional.txt')

```

APÊNDICE D – ALGORITMO DO TELHADO VERDE

```

clear all
% Modelo para TV 1
% Condição inicial T [K]
ans ='Iteracao01h'
T1 = 301.0828
T2 = 301.0828
T3 = 301.0828
T4 = 301.0828
T5 = 301.0828
T6 = 301.0828
T7 = 301.0828
T8 = 301.0828
T9 = 301.0828
T10 = 301.0828
T11 = 301.0828
T12 = 301.0828
T1P1 = 273.16+27.6
T2P1 = 273.16+27.6
T3P1 = 273.16+27.6
T4P1 = 273.16+27.6
T1P2 = 273.16+28.7
T2P2 = 273.16+28.7
T3P2 = 273.16+28.7
T4P2 = 273.16+28.7
T1P3 = 273.16+27.6
T2P3 = 273.16+27.6
T3P3 = 273.16+27.6
T4P3 = 273.16+27.6
Tin = 301.1515
Tamb= 300.61

% Tempo máximo/dt [s]
tempomax=3600;
tempo=0;
dt=5;

% Número de iterações
iter=0

% Definição de variáveis velhas
T1_old=T1
T2_old=T2
T3_old=T3
T4_old=T4
T5_old=T5
T6_old=T6
T7_old=T7

```

```

T8_old=T8
T9_old=T9
T10_old=T10
T11_old=T11
T12_old=T12
T1P1_old=T1P1
T2P1_old=T2P1
T3P1_old=T3P1
T4P1_old=T4P1
T1P2_old=T1P2
T2P2_old=T2P2
T3P2_old=T3P2
T4P2_old=T4P2
T1P3_old=T1P3
T2P3_old=T2P3
T3P3_old=T3P3
T4P3_old=T4P3
Tin_old=Tin

```

```
% Propriedades da camada de Solo
```

```

dx=0.05; % [m]
ksub=1000; % [W/mK]
rhow=1200; % [kg/m³]
Cpsub=840; % [j/kgK]

```

```
% Propriedades da água
```

```

kw=0.58; % [W/mK]
rhow=1000; % [kg/m³]
Cpw=4186; % [j/kgK]

```

```
% Propriedades da planta
```

```

kpl=0.35; % [W/mK]
rhopl=582; % [kg/m³]
Cppl=4800; % [j/kgK]

```

```
% Propriedades do ar
```

```

kar=0.0255; % [W/mK]
rhoar=1184; % [kg/m³]
Cpar=1007; % [j/kgK]

```

```
% Propriedades efetivas [planta+ar]
```

```

fi1=0.53
rhoCp1=rhoar*Cpar*(1-fi1)+rhopl*Cppl*fi1
k1=kar*(1-fi1)+kpl*fi1

```

```
% Propriedades efetivas [solo+água]
```

```

fi2=0.26
rhoCp2=rhow*Cpw*(1-fi2)+rhow*Cpsub*fi2
k2=kw*(1-fi2)+ksub*fi2

```

```

% Propriedades concreto
kconc=0.8; %[W/mK]
rhoconc=1800; %[kg/m³]
Cpconc=840; %[j/kgK]
%propriedade da superfície
epsilon=1;
alpha=0.85;
AT=1.93*2.13;% m²
TC=20
h5=0.47;%[W/m²*K]
%constantes
sigma=5.67*10^-8;%[W/m²*K^4]
qri=0;%[W/m²]
Tsky=Tamb-13; % [K]
v=2.1 %[m/s]
Lambda=2430000 %[j/kg]
Tmax=273.16+33.9 % [K]
Tmin=273.16+18.7 % [K]
TR=Tmax-Tmin
ef=5.218987*10^-7
REP=1
RTP=1

%propriedade do ambiente interno
rhoar=1.184;%kg/m³ (densidade do ar dentro do ambiente)
Cpar=1007; %[j/kgK]
%Propriedade das paredes
hp1f=0.87
hp2f=1.04
hp3f=1.06
hp1=1.05
hp2=1.06
hp3=1.04
Ap1=5.62
Ap2=7.36
Ap3=5.62
Vint=12.54
rhomed=1181.58
kmed=0.63
rhoCPmed=1149115.53
dy=14/3*10^-2
while tempo<tempomax
% Transferência de calor da camada verde
T1=T1_old+2*dt/(rhoCp1*dx)*(alpha*qri-epsilon*sigma*(T1_old^4-Tsky^4)-
(5.7+3.8*v)*(T1_old-Tamb)-Lambda*ef*0.0023*qri*(Tamb-
255.35)*TR^0.5*(6.5/(TC*(1+REP/RTP))+1)+k1*(T2_old-T1_old)/dx)
T2=T2_old+k1/(rhoCp1)*dt/dx^2*(T3_old-2*T2_old+T1_old)
T3=T3_old+k1/(rhoCp1)*dt/dx^2*(T4_old-2*T3_old+T2_old)
T4=T4_old+k1/(rhoCp1)*dt/dx^2*(T5_old-2*T4_old+T3_old)
T5=T5_old+k1/(rhoCp1)*dt/dx^2*(T6_old-2*T5_old+T4_old)

```

```

T6=T6_old+k1/(rhoCp1)*dt/dx^2*(T7_old-2*T6_old+T5_old)
T7=T7_old+k1/(rhoCp1)*dt/(dx)^2*(T8_old-2*T7_old+T6_old)
T8=T8_old+k2/(rhoCp2)*dt/dx^2*(T9_old-2*T8_old+T7_old)
T9=T9_old+k2/(rhoCp2)*dt/dx^2*(T10_old-2*T9_old+T8_old)
T10=T10_old+kconc/(rhoconc*Cpconc)*dt/(dx)^2*(T11_old-2*T10_old+T9_old)
T11=T11_old+kconc/(rhoconc*Cpconc)*dt/(dx)^2*(T12_old-2*T11_old+T10_old)
T12=T12_old+2*dt/(rhoconc*dx*Cpconc)*(-kconc*(T12_old-T11_old)/dx-
epsilon*sigma*(T12_old^4-Tin_old^4)-h5*(T12_old-Tin_old))
T1P1= T1P1_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*[-epsilon*sigma*(T1P1_old^4-Tsky^4)-
hp1f*(T1P1_old-Tamb)-kmed*(T2P1_old-T1P1_old)/dy]
T2P1=T2P1_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dy)^2*(T3P1_old-2*T2P1_old+T1P1_old)
T3P1=T3P1_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dy)^2*(T4P1_old-2*T3P1_old+T2P1_old)
T4P1=T4P1_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*(-kmed*(T4P1_old-T3P1_old)/dy-
epsilon*sigma*(T4P1_old^4-Tin_old^4)-hp1*(T4P1_old-Tin_old))
T1P2= T1P2_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*[alpha*qri-epsilon*sigma*(T1P2_old^4-Tsky^4)-
hp2f*(T1P2_old-Tamb)-kmed*(T2P2_old-T1P2_old)/dy]
T2P2=T2P2_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dy)^2*(T3P2_old-2*T2P2_old+T1P2_old)
T3P2=T3P2_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dy)^2*(T4P2_old-2*T3P2_old+T2P2_old)
T4P2=T4P2_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*(-kmed*(T4P2_old-T3P2_old)/dy-
epsilon*sigma*(T4P2_old^4-Tin_old^4)-hp2*(T4P2_old-Tin_old))
T1P3= T1P3_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*[-epsilon*sigma*(T1P3_old^4-Tsky^4)-
hp3f*(T1P3_old-Tamb)-kmed*(T2P3_old-T1P3_old)/dy]
T2P3=T2P3_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dx)^2*(T3P3_old-2*T2P3_old+T1P3_old)
T3P3=T3P3_old+kmed/(rhocpmed)*dt/(dy)^2*(T4P3_old-2*T3P3_old+T2P3_old)
T4P3=T4P3_old+2*dt/(rhocpmed*dy)*(-kmed*(T4P3_old-T3P3_old)/dy-
epsilon*sigma*(T4P3_old^4-Tin_old^4)-hp3*(T4P3_old-Tin_old))
Tin=(epsilon*sigma*(T12_old^4-Tin_old^4)*AT + epsilon*sigma*(T4P1_old^4-
Tin_old^4)*Ap1+epsilon*sigma*(T4P2_old^4-
Tin_old^4)*Ap2+epsilon*sigma*(T4P3_old^4-Tin_old^4)*Ap3+h5*(T12_old-
Tin_old)*AT+hp1*(T4P1_old-Tin_old)*Ap1+hp2*(T4P2_old-
Tin_old)*Ap2+hp3*(T4P3_old-Tin_old)*Ap3)/(rhoar*Vint*Cpar)+Tin_old
tempo=tempo+dt;
T1_old=T1
T2_old=T2
T3_old=T3
T4_old=T4
T5_old=T5
T6_old=T6
T7_old=T7
T8_old=T8
T9_old=T9
T10_old=T10
T11_old=T11
T12_old=T12
Tin_old=Tin
T1P1_old=T1P1;
T2P1_old=T2P1;
T3P1_old=T3P1;
T4P1_old=T4P1;
T1P2_old=T1P2;

```

```
T2P2_old=T2P2;
T3P2_old=T3P2;
T4P2_old=T4P2;
T1P3_old=T1P3;
T2P3_old=T2P3;
T3P3_old=T3P3;
T4P3_old=T4P3;
iter=iter+1;
hold on
xlabel('Tempo')
ylabel('Temperatura')
plot(tempo,Tin_old,'r--o')
legend('Tin')% 'T2','T3','T4','Tin'
end
diary('Telhado verde.txt')
```

ANEXO A – TABELA COM PROPRIEDADES DO AR A 1 ATM DE PRESSÃO

TABELA A-15							
Propriedades do ar a 1 atm de pressão							
Temp. T, °C	Densidade ρ , kg/m ³	Calor específico c_p , J/kg · K	Condutividade térmica k, W/m · K	Difusividade térmica α , m ² /s ²	Viscosidade dinâmica μ , kg/m · s	Viscosidade cinemática ν , m ² /s	Número de Prandtl Pr
-150	2,866	983	0,01171	$4,158 \times 10^{-6}$	$8,636 \times 10^{-6}$	$3,013 \times 10^{-5}$	0,7246
-100	2,038	966	0,01582	$8,036 \times 10^{-6}$	$1,189 \times 10^{-5}$	$5,837 \times 10^{-5}$	0,7263
-50	1,582	999	0,01979	$1,252 \times 10^{-5}$	$1,474 \times 10^{-5}$	$9,319 \times 10^{-5}$	0,7440
-40	1,514	1,002	0,02057	$1,356 \times 10^{-5}$	$1,527 \times 10^{-5}$	$1,008 \times 10^{-5}$	0,7436
-30	1,451	1,004	0,02134	$1,465 \times 10^{-5}$	$1,579 \times 10^{-5}$	$1,087 \times 10^{-5}$	0,7425
-20	1,394	1,005	0,02211	$1,578 \times 10^{-5}$	$1,630 \times 10^{-5}$	$1,169 \times 10^{-5}$	0,7408
-10	1,341	1,006	0,02288	$1,696 \times 10^{-5}$	$1,680 \times 10^{-5}$	$1,252 \times 10^{-5}$	0,7387
0	1,292	1,006	0,02364	$1,818 \times 10^{-5}$	$1,729 \times 10^{-5}$	$1,338 \times 10^{-5}$	0,7362
5	1,269	1,006	0,02401	$1,880 \times 10^{-5}$	$1,754 \times 10^{-5}$	$1,382 \times 10^{-5}$	0,7350
10	1,246	1,006	0,02439	$1,944 \times 10^{-5}$	$1,778 \times 10^{-5}$	$1,426 \times 10^{-5}$	0,7336
15	1,225	1,007	0,02476	$2,009 \times 10^{-5}$	$1,802 \times 10^{-5}$	$1,470 \times 10^{-5}$	0,7323
20	1,204	1,007	0,02514	$2,074 \times 10^{-5}$	$1,825 \times 10^{-5}$	$1,516 \times 10^{-5}$	0,7309
25	1,184	1,007	0,02551	$2,141 \times 10^{-5}$	$1,849 \times 10^{-5}$	$1,562 \times 10^{-5}$	0,7296
30	1,164	1,007	0,02588	$2,208 \times 10^{-5}$	$1,872 \times 10^{-5}$	$1,608 \times 10^{-5}$	0,7282
35	1,145	1,007	0,02625	$2,277 \times 10^{-5}$	$1,895 \times 10^{-5}$	$1,655 \times 10^{-5}$	0,7268
40	1,127	1,007	0,02662	$2,346 \times 10^{-5}$	$1,918 \times 10^{-5}$	$1,702 \times 10^{-5}$	0,7255
45	1,109	1,007	0,02699	$2,416 \times 10^{-5}$	$1,941 \times 10^{-5}$	$1,750 \times 10^{-5}$	0,7241
50	1,092	1,007	0,02735	$2,487 \times 10^{-5}$	$1,963 \times 10^{-5}$	$1,798 \times 10^{-5}$	0,7228
60	1,059	1,007	0,02808	$2,632 \times 10^{-5}$	$2,008 \times 10^{-5}$	$1,896 \times 10^{-5}$	0,7202
70	1,028	1,007	0,02881	$2,780 \times 10^{-5}$	$2,052 \times 10^{-5}$	$1,995 \times 10^{-5}$	0,7177
80	0,9994	1,008	0,02953	$2,931 \times 10^{-5}$	$2,096 \times 10^{-5}$	$2,097 \times 10^{-5}$	0,7154

Fonte: Çengel (2010).