

CRITÉRIOS METODOLÓGICOS PARA SELEÇÃO DE INTERVALOS DE ESTRESSE TÉRMICO NA AVALIAÇÃO DE TELHADOS VERDES

METHODOLOGICAL CRITERIA FOR SELECTING THERMAL STRESS TIME INTERVALS IN THE EVALUATION OF GREEN ROOFS

CRITERIOS METODOLÓGICOS PARA LA SELECCIÓN DE INTERVALOS DE ESTRÉS TÉRMICO EN LA EVALUACIÓN DE TECHOS VERDES

Agnes Rayol Guedes¹, Beatriz Moreno Albuquerque Gonçalves², Elaine Garrido Vazquez³

DOI: 10.54899/dcs.v23i96.7020

Recibido: 10/08/2026 | Aceptado: 31/08/2026 | Publicación en línea: 11/09/2026.

RESUMO

A intensificação das ilhas de calor urbanas tem impulsionado a adoção de estratégias passivas para mitigação do aquecimento em áreas urbanas, dentre as quais se destacam os telhados verdes. Contudo, a literatura apresenta predominância de estudos conduzidos em climas temperados, cujos parâmetros nem sempre são diretamente aplicáveis a contextos tropicais, caracterizados por elevada radiação solar e predominância de cargas térmicas de resfriamento. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo propor critérios para a seleção de intervalos horários representativos na avaliação do desempenho térmico de coberturas vegetais em clima tropical. A metodologia adotada baseia-se na análise experimental de dois protótipos em escala reduzida, correspondentes a um módulo com cobertura vegetal e um módulo de controle com cobertura convencional, a partir de dados de temperatura monitorados ao longo do tempo. Os resultados indicam variação significativa do comportamento térmico das coberturas ao longo do dia, evidenciando a influência do atraso térmico e da radiação solar incidente. Conclui-se que a definição de intervalos horários adequados é essencial para a correta avaliação do desempenho térmico de telhados verdes em climas tropicais, contribuindo para maior precisão na análise e interpretação dos resultados.

Palavras-chave: Intervalos Representativos. Estresse Térmico. Inércia Térmica. Validação Experimental. Clima Tropical.

ABSTRACT

The intensification of urban heat islands has driven the adoption of passive strategies to mitigate warming in urban areas, among which green roofs stand out. However, literature is dominated by studies conducted in temperate climates, whose parameters are not always directly applicable to tropical contexts, characterized by high solar radiation and a predominance of cooling loads. In

¹ Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: agnesguedes.20231@poli.ufrj.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-6037-0937>

² Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: beatrizmoreno.20241@poli.ufrj.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-7228-6697>

³ Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: elaine@poli.ufrj.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7262-6753>

this context, this study aims to propose criteria for selecting representative time intervals in the evaluation of the thermal performance of vegetated roofs in tropical climates. The methodology adopted is based on the experimental analysis of two small-scale prototypes, a module with a vegetated roof and a control module with a conventional roof, using temperature data monitored over time. The results indicate significant variation in the thermal behavior of the roofs throughout the day, highlighting the influence of time lag and incident solar radiation. It is concluded that the definition of appropriate hourly intervals is essential for the correct evaluation of the thermal performance of green roofs in tropical climates, contributing to greater precision in the analysis and interpretation of the results.

Keywords: Representative Time Intervals. Thermal Stress. Thermal Inertia. Experimental Validation. Tropical Climate.

RESUMEN

La intensificación de las islas de calor urbanas ha impulsado la adopción de estrategias pasivas para mitigar el calentamiento en las zonas urbanas, entre las que destacan los tejados verdes. Sin embargo, en la bibliografía predominan los estudios realizados en climas templados, cuyos parámetros no siempre son directamente aplicables a contextos tropicales, caracterizados por una elevada radiación solar y un predominio de cargas térmicas de refrigeración. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo proponer criterios para la selección de intervalos horarios representativos en la evaluación del rendimiento térmico de las cubiertas vegetales en climas tropicales. La metodología adoptada se basa en el análisis experimental de dos prototipos a escala reducida, correspondientes a un módulo con cubierta vegetal y un módulo de control con cubierta convencional, a partir de datos de temperatura monitorizados a lo largo del tiempo. Los resultados indican una variación significativa del comportamiento térmico de las cubiertas a lo largo del día, lo que pone de manifiesto la influencia del desfase térmico y de la radiación solar incidente. Se concluye que la definición de intervalos horarios adecuados es esencial para la correcta evaluación del rendimiento térmico de los tejados verdes en climas tropicales, lo que contribuye a una mayor precisión en el análisis y la interpretación de los resultados.

Palabras clave: Intervalos Representativos. Estrés Térmico. Inercia Térmica. Validación Experimental. Clima Tropical.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a expansão das grandes cidades mudou drasticamente a composição do ambiente urbano ao diminuir áreas de vegetação em razão de novas construções, contribuindo para alterações negativas no clima regional (Yang *et al.*, 2017). As edificações presentes nas cidades são em sua maioria compostas por materiais impermeáveis, que ao contrário de

superfícies naturais, dificultam a regulação térmica do ambiente (Pearlmutter *et al.*, 2020). A substituição de superfícies naturais por pavimentação e edificações contribui com o avanço da impermeabilização do solo, diminui o sombreamento e interrompe processos ecológicos como a evapotranspiração, fundamentais para a regulação natural da temperatura das cidades (Vujovic *et al.*, 2021).

Em locais onde há concentração desse tipo de construção ocorre o fenômeno chamado de ilha de calor urbano, cuja principal característica é a discrepância entre as temperaturas da cidade e as zonas rurais em seu entorno (Matias *et al.*, 2020). Além dos impactos climáticos, as ilhas de calor representam um grande problema financeiro, pois torna-se necessário aumentar o consumo energético para resfriar o espaço urbano a fim de melhorar o conforto térmico (Yang *et al.*, 2020). Assim, compreender a influência do contexto climático brasileiro sobre esse fenômeno é essencial para orientar estratégias de planejamento urbano e mitigação do desconforto térmico (Palme *et al.*, 2022).

Em áreas densamente construídas, a baixa permeabilidade térmica das superfícies convencionais contribui para a elevação da temperatura do ar e do fluxo de calor para o interior das edificações, pressionando sistemas de ar-condicionado e ampliando o consumo energético residencial e comercial (Islam *et al.*, 2024; Joshi *et al.*, 2024; Ramesh, 2016). Dada a relevância do consumo energético para satisfazer as necessidades de conforto, existe uma preocupação em buscar estratégias que contribuam para maximizar o desempenho ambiental das edificações urbanas (Lamberts *et al.*, 2014). De acordo com Correia *et al.* (2024), estratégias de projeto responsivas ao clima que incorporem técnicas passivas reduzem a necessidade da energia utilizada para o conforto condicionado em edificações residenciais. Desse modo, faz-se necessária a adaptação das edificações com técnicas sustentáveis a fim de minimizar tais impactos ambientais, como por exemplo a implantação de telhados verdes em substituição dos telhados convencionais (Scolaro *et al.*, 2024). Assim, o telhado verde aparece como uma alternativa para melhorar o desempenho térmico de edificações e consequentemente a economia de energia (Cascone *et al.*, 2018). O telhado verde possui propriedades que ajudam na manutenção da neutralidade térmica, como: propriedades insulativas pois resistem à passagem de calor do meio externo para o meio interno, sendo também bons isolantes térmicos; possui inércia térmica ou capacidade térmica pois absorvem e retêm calor (Ferraz, 2012). O desempenho dessas coberturas também está associado ao sombreamento proporcionado pela vegetação e à evapotranspiração,

que reduzem a incidência direta da radiação solar e favorecem a dissipação térmica (Squier *et al.*, 2016).

Estudos iniciais de Koehler (2005) precursor do ideal de estruturas verdes e mais recentemente de Unal e Middel (2025) e de Chagolla-Aranda *et al.* (2025) indicam que a presença do substrato e a camada vegetal diminuem significativamente o ganho de calor em edificações localizadas em climas tropicais e subtropicais, especialmente durante horas de elevada radiação solar, reforçando o potencial desse sistema como estratégia mitigadora. O solo age como uma massa térmica com alta capacidade térmica, alto atraso térmico e baixa transmitância térmica, e promove resfriamento por meio da evaporação; enquanto a vegetação promove sombreamento, permitindo trocas de calor por convecção abaixo das folhas, absorve parte da energia térmica para realização da fotossíntese, e promove resfriamento por meio da evapotranspiração.

Em climas quentes, a problemática se intensifica nos horários de pico térmico, quando a radiação solar direta e difusa é maximizada e o fluxo de calor para as superfícies horizontais atinge seus maiores valores. No intervalo de elevação progressiva do fluxo térmico, reconhecido como um dos períodos mais críticos para o superaquecimento das coberturas, observa-se o aumento da solicitação térmica sobre os sistemas construtivos, favorecido pela intensificação da radiação solar incidente e pelo consequente acúmulo de calor nas superfícies. Esse comportamento é discutido por Budhiyanto e Tampubolon (2025) e Santamouris *et al.* (2014). Nessas condições, telhados convencionais apresentam rápida resposta térmica e baixa capacidade de amortecimento, enquanto telhados verdes funcionam como regulador térmico, retardando a propagação do calor e suavizando o pico interno de temperatura. Trabalhos como os de Cascone e Vitaliano (2025) demonstram que, justamente nesses intervalos críticos de radiação, a combinação entre vegetação e substrato reduz o fluxo de calor incidente na laje, mitigando os impactos do calor extremo e contribuindo para melhorias no conforto térmico e para a redução da energia consumida em climatização. Diante desse cenário, torna-se imprescindível avançar para uma investigação experimental capaz de quantificar, com precisão, o desempenho térmico dos telhados verdes sob condições reais de pico de calor, fornecendo evidências objetivas que fundamentam seu uso como estratégia eficaz de mitigação em climas quentes.

Apesar de ser uma estratégia amplamente pesquisada, os estudos sobre telhados verdes concentram-se majoritariamente em climas temperados (Grullón-Penkova *et al.*, 2020). Entretanto, o desempenho energético e térmico das coberturas vegetais está diretamente relacionado às condições do clima (Jamei, *et al.*, 2023), pois o efeito de resfriamento dessas

estruturas varia entre diferentes zonas climáticas, com potenciais distintos de redução de temperatura e carga térmica de acordo com cada uma delas (Jamei, *et al.*, 2021). Dessa forma, apesar da ampla literatura existente, ainda existem poucos trabalhos que analisam de forma abrangente o desempenho dos telhados verdes no contexto tropical, no qual a principal demanda térmica é a redução das altas temperaturas ao longo do dia (Scolaro *et al.*, 2024).

Nesse contexto, entende-se que o clima tropical representa um desafio adicional em função da alta radiação solar (Simmons *et al.*, 2015). Nesses casos, o efeito de atraso térmico provoca uma defasagem entre o pico de radiação e a resposta da cobertura, impactando diretamente no funcionamento do telhado verde (Bevilacqua *et al.*, 2018). Assim, é necessário avaliar o desempenho das coberturas nos intervalos de maior solicitação térmica, uma vez que a análise global do dia pode ocultar variações relevantes de eficiência ao longo das 24h.

Desta forma, o presente estudo tem como objetivo desenvolver e propor critérios metodológicos para a seleção de intervalos temporais mais representativos na avaliação do desempenho térmico de telhados verdes em climas tropicais, a partir de um estudo experimental. Busca-se, assim, identificar períodos críticos de maior solicitação térmica ao longo do dia, de modo a capturar com maior precisão a eficiência dessas coberturas na mitigação do aquecimento, superando limitações associadas a análises baseadas em médias diárias.

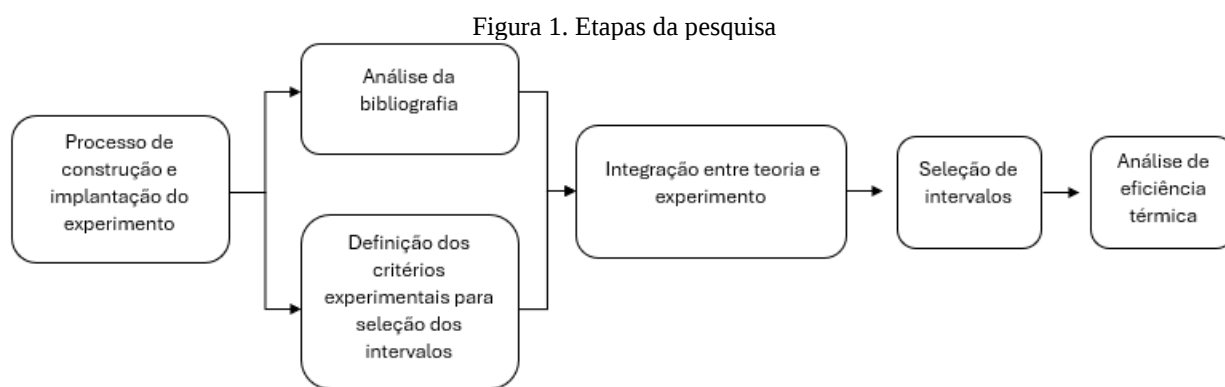
A partir dessa análise, a investigação busca compreender como uma determinada faixa horária influencia o comportamento térmico das superfícies e do ambiente interno. Pretende-se identificar variações de desempenho e suas implicações para o conforto térmico, fornecendo subsídios para a otimização de estratégias de mitigação. Dessa forma, o estudo contribui para o entendimento de soluções capazes de reduzir o superaquecimento em edificações expostas a elevadas cargas térmicas.

METODOLOGIA

A seção de Materiais e Métodos descreve os procedimentos adotados para o desenvolvimento e a análise do presente estudo, abrangendo desde a construção do sistema experimental até a avaliação dos resultados obtidos, como ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 1. A presente investigação fundamenta-se em uma abordagem metodológica de natureza integrativa e inferencial, estruturada com o objetivo de superar a tradicional dissociação entre construção teórica e validação empírica no campo do desempenho térmico de edificações.

Nesse sentido, a metodologia foi concebida como um sistema analítico contínuo, no qual os intervalos temporais de estresse térmico não são previamente assumidos, mas emergem como produto da convergência entre constructos teóricos consolidados e evidências experimentais observadas em condições reais de operação.

A arquitetura metodológica foi estruturada em quatro etapas interdependentes: (1) construção dos protótipos, instalação dos sensores e aquisição dos dados; (2) elaboração do referencial teórico sobre estresse térmico e dinâmica radiativa; (3) definição dos critérios técnicos para seleção dos intervalos horários representativos; e (4) validação experimental dos intervalos propostos com base em dados climáticos e medições in situ. Esse encadeamento permitiu integrar fundamentação teórica e evidências experimentais de forma coerente.



Fonte: Elaborado pelos autores.

1ª Etapa - Processo de Construção e Implantação do Experimento

O experimento foi realizado em Xerém, no município de Duque de Caxias, estado do Rio de Janeiro, que possui um clima tropical úmido. Para efeitos comparativos dos dados climáticos obtidos pelos sensores no experimento, as mesmas informações foram coletadas da estação meteorológica do INMET A603 do bairro em questão, localizada a aproximadamente 9,5 km de onde foi montado o experimento.

A investigação experimental foi conduzida ao longo do ano de 2024, em dois protótipos em escala reduzida, com as mesmas dimensões e geometria, apenas com diferentes coberturas, sendo uma convencional e a outra com telhado verde. Sendo assim, a diferença entre os dois módulos está no telhado, pois enquanto o Módulo de Controle (MC) possui uma cobertura tradicional, o Módulo Verde (MV) foi projetado com camadas de geotêxtil fino e espesso,

impermeabilizante, substrato e cobertura vegetal, com a espécie *Callisia repens* (dinheiro-em-penca) (figura 2).

Figura 2. Protótipos MV e MC



Fonte: Elaborado pelos autores.

O material utilizado na construção das estruturas foi a madeira pinus para os apoios, piso e paredes. O telhado tinha fechamento em chapa de aço galvanizado e sob este foram construídas duas bases modulares em compensado naval (15 mm) revestidos com tinta esmalte branca, como pode ser observado na figura 3.

Figura 3. Estrutura dos protótipos (a) e base modular (b).



(a) (b)

Fonte: Elaborado pelos autores.

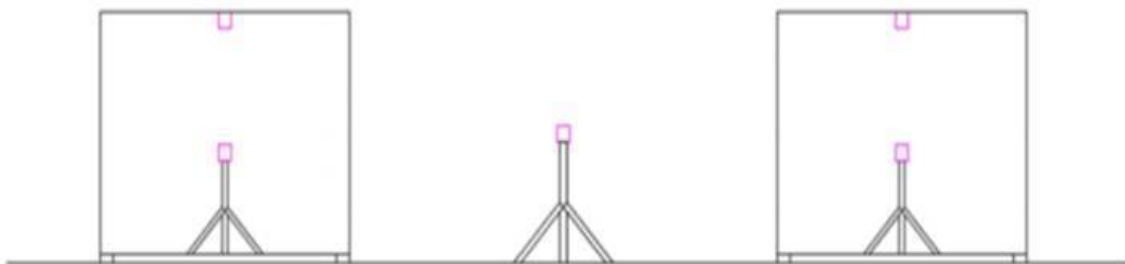
Essas bases modulares tinham como finalidade para o MV servir como suporte para o assentamento da cobertura vegetal e no caso do MC como replicabilidade do MV. As juntas das laterais e do fundo foram isoladas termicamente com polietileno expandido de 45 mm para minimizar as trocas de calor entre os ambientes interno e externo, e assim garantir que os dois

módulos estejam sujeitos às mesmas condições ambientais. As entradas foram vedadas, e os módulos foram posicionados a 3 metros de distância um do outro.

Para o desenvolvimento desta pesquisa os protótipos foram igualmente instrumentados, expostos às condições climáticas externas e sob as mesmas variáveis ambientais. As análises foram realizadas por sensores “HOBOWare” onde foi possível medir as temperaturas e umidades internas e de superfície dos módulos, assim como a temperatura do ambiente externo aos módulos no local do experimento. Para o monitoramento e aquisição de dados acerca do comportamento térmico, foi adotado o sistema eletrônico (data *loggers*), constituído por dois aparelhos registradores de temperatura e umidade relativa do ar, além da temperatura superficial. Os modelos foram o U12-013 e UX100-023, fabricados nos Estados Unidos pela empresa “ONSET Computer Corporation”.

As medições foram feitas simultaneamente para garantir que os dados coletados possam ser comparados entre um módulo e outro em um mesmo instante. As variáveis medidas foram: Temperatura (°C) e Umidade (%) interna no teto do protótipo; Temperatura (°C) e Umidade (%) interna no protótipo a uma altura de 30 cm (°C); Temperatura externa do ar (temperatura de bulbo seco (°C) e Umidade do ar externa (%) (figura 4).

Figura 4. Posicionamento dos sensores.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A utilização de módulos em escala reduzida foi adotada por permitir maior controle das variáveis experimentais e facilitar a comparação entre diferentes tipos de cobertura sob as mesmas condições ambientais. Embora não represente uma edificação em escala real, esse tipo de modelo possibilita a análise do comportamento térmico de forma simplificada, especialmente no que se refere à influência da cobertura na variação da temperatura interna. Contudo, é importante considerar que o uso de modelos reduzidos apresenta limitações. Dessa forma, os resultados obtidos devem ser interpretados como indicativos de tendências térmicas, permitindo a

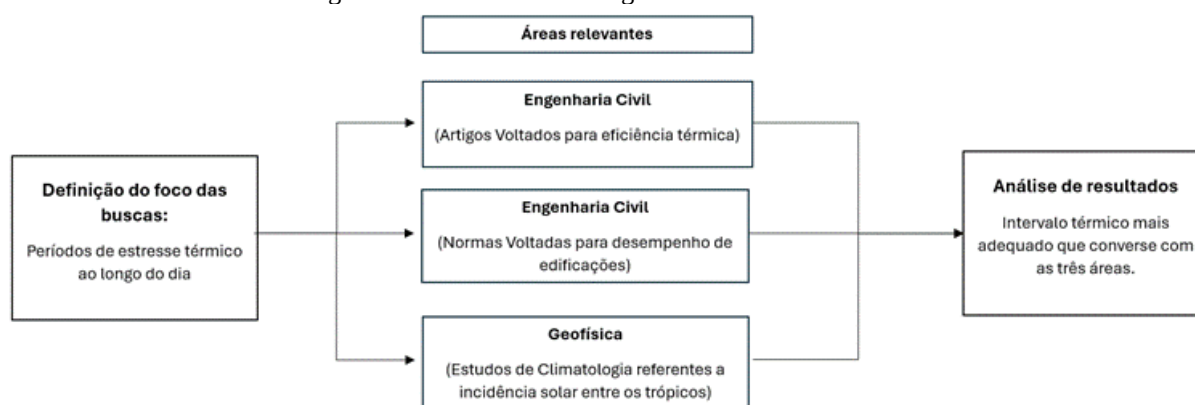
comparação entre o telhado convencional e o telhado verde, mas sem a pretensão de representar de forma exata o comportamento térmico de edificações reais.

2ª Etapa - Referencial Teórico

A construção do referencial teórico foi conduzida sob uma perspectiva interdisciplinar, visando à compreensão aprofundada dos processos que governam o estresse térmico em envoltórias construtivas, particularmente em coberturas expostas à radiação solar direta.

A metodologia adotada para a definição dos intervalos de estresse térmico baseada na literatura é sintetizada na figura 5, que apresenta de forma esquemática as etapas e os eixos conceituais que orientaram a revisão de literatura. Inicialmente, definiu-se como foco das buscas a identificação de períodos de estresse térmico ao longo do dia, considerando sua relevância para o desempenho térmico de edificações. A partir desse recorte, a revisão foi estruturada em três áreas complementares: estudos da Engenharia Civil voltados à eficiência térmica, normas técnicas relacionadas ao desempenho de edificações e pesquisas da Geofísica e Climatologia referentes à incidência solar em regiões tropicais. A integração desses três eixos permitiu uma análise convergente dos resultados, subsidiando a definição de intervalos térmicos representativos e tecnicamente fundamentados para a etapa experimental do estudo.

Figura 5. Estrutura da estratégia da revisão de literatura.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A revisão de literatura foi conduzida com o objetivo de identificar, analisar e sintetizar estudos relevantes relacionados ao estresse térmico e ao conforto térmico em edificações, com ênfase em abordagens experimentais e critérios de seleção de intervalos térmicos. Inicialmente,

foram definidas as bases de dados científicas a serem consultadas, priorizando repositórios amplamente reconhecidos, como *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar*.

A estratégia de busca utilizou combinações de palavras-chave relacionadas ao tema, incluindo termos como *thermal stress*, *thermal peak*, *thermal comfort*, *building performance*, *heat stress periods* e *tropical climate*, aplicados aos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos. Como critérios de inclusão, consideraram-se estudos publicados em periódicos revisados por pares, com foco em edificações e análise térmica, preferencialmente nos últimos anos. Foram excluídos trabalhos duplicados, estudos sem acesso ao texto completo e publicações que não apresentavam relação direta com o escopo da pesquisa.

No que se refere ao arcabouço normativo, a literatura indica que normas técnicas nacionais e internacionais voltadas ao desempenho térmico e ao conforto ambiental estabelecem critérios e parâmetros que subsidiam a avaliação de condições de estresse térmico em edificações. Documentos como normas de desempenho térmico, conforto ambiental e eficiência energética frequentemente definem limites de temperatura, radiação solar, ventilação e condições de uso, que, embora nem sempre empreguem explicitamente o termo “estresse térmico”, fornecem referências fundamentais para sua caracterização. A análise dessas normas permite compreender os critérios técnicos adotados para avaliação do conforto térmico e identificar diretrizes aplicáveis à definição de intervalos críticos de exposição térmica no ambiente construído.

A ABNT NBR 15220 estabelece critérios para a avaliação do desempenho térmico das edificações, incluindo métodos de cálculo e o zoneamento bioclimático brasileiro, que orienta a adoção de soluções construtivas adequadas às condições climáticas locais. Em sua atualização de 2024, a norma passou de oito zonas bioclimáticas, baseadas em temperatura e umidade (versão de 2005), para seis zonas classificadas de “Muito Fria” a “Muito Quente”, com subdivisões conforme a severidade do inverno e os níveis de umidade. Essa revisão, fundamentada em dados climáticos mais recentes, permite recomendações mais precisas para o conforto térmico e a eficiência energética das edificações.

A ABNT NBR 15575:2013 foi utilizada para definir os dias típicos, ampliando sua aplicação para incluir primavera e outono, além de verão e inverno. Os resultados obtidos foram comparados com os parâmetros da norma para o Rio de Janeiro. Posteriormente, considerou-se a atualização de 2021, que substitui o conceito de dias típicos por uma faixa operativa anual.

Sob uma perspectiva da geografia física e climatologia, diversos estudos abordam a incidência solar e o balanço energético da superfície terrestre, destacando as particularidades das

regiões situadas entre os trópicos. Nessas latitudes, a maior altura solar ao longo do ano resulta em elevados níveis de radiação incidente, contribuindo para intensos fluxos de calor sobre as superfícies edificadas. Essa condição é agravada pela reduzida variabilidade sazonal da insolação, o que favorece a ocorrência recorrente de períodos de estresse térmico. A incorporação dessa abordagem geográfica permite contextualizar os fenômenos térmicos observados, reforçando a importância de considerar a posição latitudinal e os padrões de insolação na análise do desempenho térmico das edificações em climas tropicais.

Após a etapa de triagem, os artigos, normas e estudos geofísicos selecionados foram analisados qualitativamente, considerando-se os métodos empregados, os critérios de definição de estresse térmico e os principais resultados reportados. Por fim, as informações extraídas foram organizadas de forma temática, permitindo a identificação de tendências, lacunas de pesquisa e subsídios teóricos para a definição dos intervalos de estresse térmico adotados neste estudo.

3ª Etapa - Definição dos Critérios Experimentais para Seleção dos Intervalos

A operacionalização dos conceitos teóricos demandou a definição de critérios técnicos capazes de traduzir princípios físicos em procedimentos analíticos aplicáveis aos dados empíricos. Nesse contexto, foram estabelecidos quatro critérios estruturantes, concebidos de forma a capturar diferentes dimensões do fenômeno térmico.

O critério radiativo baseia-se na identificação dos períodos de máxima incidência de radiação solar global, constituindo o principal vetor de entrada de energia no sistema. Em complemento, o critério térmico visa à determinação dos horários de máxima temperatura do ar e das superfícies, refletindo a resposta acumulativa do sistema às condições de excitação radiativa.

O critério dinâmico incorpora explicitamente o conceito de *time lag*, permitindo considerar a defasagem temporal entre os picos de entrada de energia e a resposta térmica observada, aspecto fundamental para a caracterização da inércia térmica das coberturas. Por sua vez, o critério de abrangência do ciclo térmico assegura a inclusão não apenas da fase de aquecimento, mas também do início do processo de dissipação de calor, possibilitando a análise do ciclo térmico em sua integralidade.

Para a aplicação desses critérios, foram utilizados dois conjuntos complementares de informações. O primeiro corresponde aos dados experimentais obtidos pelos sensores instalados

nos protótipos, responsáveis pelo monitoramento contínuo das variáveis térmicas ao longo de todo o ano de 2024. O segundo compreende os dados meteorológicos da estação automática A603 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada aproximadamente a 9,5 km da área experimental, dos quais foram obtidas as séries temporais de temperatura do ar e radiação solar global.

Os dados experimentais foram registrados pelos sensores em intervalos regulares de duas horas, permitindo o acompanhamento contínuo do comportamento térmico dos protótipos ao longo do período de monitoramento. Essa discretização temporal foi adotada com o objetivo de reduzir oscilações instantâneas e evidenciar o comportamento térmico predominante ao longo do dia, preservando a representatividade das variações diárias. Paralelamente, os dados do INMET foram utilizados para caracterizar o comportamento da radiação solar e da temperatura do ar na região de Duque de Caxias durante o período de monitoramento.

A partir dessas bases, foram identificados os horários de maior radiação solar e temperatura, bem como a defasagem entre os picos radiativos e a resposta térmica das coberturas, considerando também as fases de aquecimento e início da dissipação de calor. Assim, os intervalos de estresse térmico foram definidos pela integração entre dados experimentais, condições climáticas locais e referências da literatura, conferindo maior fundamentação à seleção dos períodos analisados.

4ª Etapa - Integração entre Teoria e Experimento

A etapa final consistiu na integração crítica entre os referenciais teóricos e os resultados experimentais, configurando um processo de validação empírico-conceitual dos intervalos de estresse térmico propostos. Essa integração foi operacionalizada por meio da comparação sistemática entre os padrões temporais descritos na literatura e aqueles observados nos dados coletados in situ. Tal procedimento possibilitou avaliar a transferibilidade dos modelos teóricos para o contexto climático específico analisado, bem como ajustar os intervalos temporais de modo a refletir com maior precisão a dinâmica térmica real dos sistemas estudados.

Dessa forma, os intervalos adotados neste estudo configuram-se como constructos empiricamente validados, resultantes de um processo iterativo de calibração entre teoria e observação. Essa abordagem não apenas reforça a robustez metodológica da pesquisa, mas

também amplia sua relevância científica, ao propor um modelo analítico fundamentado e replicável para a análise do estresse térmico em coberturas.

Para a determinação dos intervalos de estresse térmico avaliados neste estudo experimental, realizou-se inicialmente uma revisão de literatura, com o objetivo de identificar se já haviam sido estabelecidos, em trabalhos anteriores, intervalos ou horários consolidados para a análise do conforto térmico em edificações. Em seguida, os intervalos identificados foram confrontados e validados a partir da análise global dos dados diários registrados ao longo de 2024 pelos sensores instalados, garantindo a adequação dos períodos selecionados às condições climáticas reais observadas no local de estudo. Esse procedimento permitiu alinhar critérios teóricos e dados empíricos, conferindo maior robustez à análise experimental.

A avaliação da eficiência térmica concentra-se especialmente nos intervalos de estresse térmico, períodos nos quais a demanda por resfriamento das edificações é mais elevada. Dessa forma, a análise desses intervalos críticos permite uma avaliação mais fiel da capacidade do telhado verde em reduzir o ganho de calor e reforça sua relevância como estratégia de mitigação térmica.

Complementarmente, a eficiência térmica (ET) do telhado verde foi quantificada por meio da Equação 1.

$$ET (\%) = \frac{(MC - MV)}{MC} \times 100 \quad (1)$$

onde:

ET= eficiência térmica

MV= temperatura superficial do módulo verde

MC = temperatura superficial do módulo de controle

Esse índice foi calculado ao longo de toda a série temporal, permitindo analisar o comportamento da eficiência térmica durante as 24 horas do dia, bem como em dois intervalos específicos de estresse térmico, compreendidos entre 9h e 17h e entre 11h e 15h. A comparação entre essas três abordagens possibilitou verificar como a seleção do intervalo temporal influencia a representação da eficiência térmica do sistema, evidenciando se a análise restrita aos períodos de maior carga térmica permite destacar de forma mais consistente o desempenho do telhado verde em relação à análise realizada considerando todo o ciclo diário.

RESULTADOS

Resultados da Revisão Bibliográfica

Com base nos 40 artigos analisados, observa-se um padrão consistente quanto à ocorrência dos picos térmicos em coberturas expostas à radiação solar direta, especialmente em climas tropicais, subtropicais e mediterrâneos. De modo geral, os estudos convergem para a identificação de dois momentos críticos: o pico de radiação solar global, que ocorre em torno do meio-dia solar (12h – 13h), e o pico de temperatura superficial e/ou do ar, que se manifesta com um atraso térmico de aproximadamente 1 a 3 horas, situando-se entre 11h e 15h.

No contexto brasileiro, Menezes e Teixeira (2019) identificaram maiores temperaturas operativas entre 12h e 16h, indicando o período pós-meio-dia como crítico para o estresse térmico e reforçando o intervalo de 11h–15h como representativo do pico térmico. De forma complementar, Niachou *et al.* (2001) observaram maiores diferenças entre telhados verdes e convencionais em períodos de alta radiação solar, com intensificação do aquecimento após 9h e redução após 17h, sustentando o intervalo de 9h–17h como representativo do ciclo diurno de ganho térmico.

Resultados semelhantes são observados em Tseng *et al.* (2022), no estudo “A study of green roof and impact on the temperature of buildings using integrated IoT system”, realizado em Taipei. A partir de monitoramento em tempo real com sensores NB-IoT, os autores identificaram que as temperaturas do solo e do ar atingem seus valores mais elevados no período da tarde, coincidindo com o pico de radiação solar. Esse comportamento evidencia a defasagem térmica entre radiação máxima (aproximadamente 12h – 13h) e temperatura superficial máxima (aproximadamente 13h – 15h).

Do ponto de vista de modelagem energética, Sailor (2008), em “A green roof model for building energy simulation programs”, destaca que o fluxo de calor através da cobertura é dominado pela radiação solar de ondas curtas durante as horas de sol. O modelo demonstra que parâmetros como índice de área foliar (LAI) e umidade do substrato exercem maior influência exatamente nos horários de maior irradiância, corroborando que o intervalo de 9h–17h abrange o período crítico de solicitação térmica em edificações.

Em escala radiativa, Soneye *et al.* (2019), no estudo “Diurnal and seasonal variations of the incoming solar radiation flux at a tropical station”, identificaram que o fluxo máximo de

radiação solar global ocorre entre 13h e 14h (horário local), com valores superiores a 700 W/m² em meses secos. Esse achado fornece fundamentação física direta para o recorte 11h – 15h como núcleo do estresse radiativo máximo em regiões tropicais.

Gagliano *et al.* (2016) observaram que o pico de radiação solar ocorreu às 13h, enquanto a temperatura superficial máxima da cobertura convencional foi registrada às 14h, evidenciando o atraso térmico decorrente da inércia dos materiais. Bevilacqua *et al.* (2017) também identificaram temperaturas superficiais elevadas entre 10h e 16h. De forma complementar, Takebayashi e Moriyama (2007) mostraram que, mesmo após o pico radiativo próximo ao meio-dia, o fluxo de calor sensível permanece elevado durante a tarde, reforçando a relevância do intervalo de 11h–15h para a análise do estresse térmico.

De maneira geral, os artigos convergem para três conclusões principais: (1) o pico de radiação solar global ocorre tipicamente entre 12h e 13h; (2) o pico de temperatura superficial ocorre entre 13h e 15h devido à inércia térmica; e (3) o intervalo de 9h–17h representa o ciclo completo de aquecimento diurno, no qual o balanço térmico é majoritariamente positivo. Nos telhados verdes, observa-se não apenas redução da temperatura máxima, mas também deslocamento temporal do pico e amortecimento da amplitude térmica.

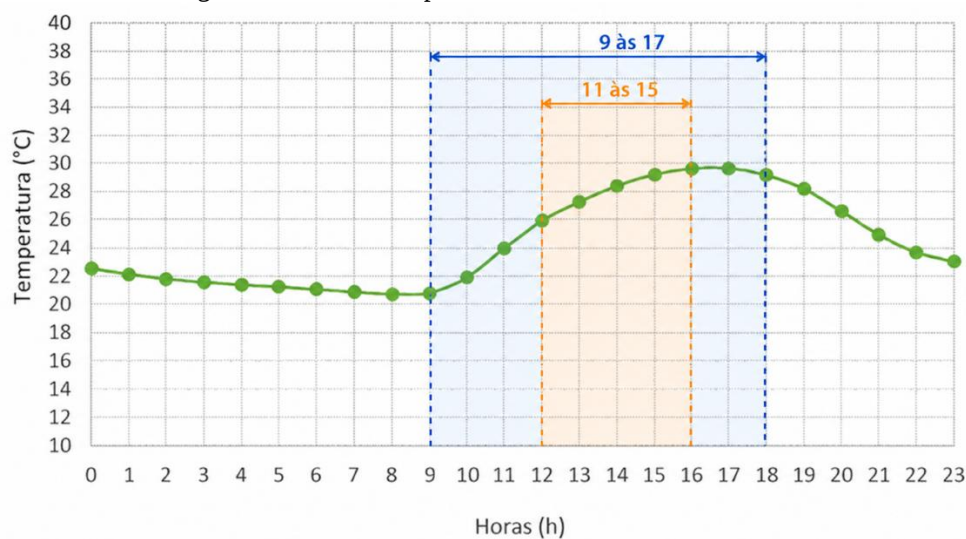
Portanto, a literatura técnica demonstra consenso de que o período entre 11h e 15h corresponde ao núcleo do pico térmico radiativo e superficial, enquanto o intervalo de 9h às 17h é metodologicamente adequado para capturar o ciclo integral de ganho, armazenamento e dissipação de calor em coberturas, sendo ambos fundamentais para a avaliação da eficiência térmica de telhados verdes. Por isso, ambos os intervalos são indicados para uso neste artigo, após a devida comprovação experimental subsequente.

A análise crítica dos estudos selecionados evidenciou um conjunto de regularidades físicas e temporais. Observa-se que o pico de radiação solar global ocorre em proximidade ao meio-dia solar, enquanto o pico de temperatura superficial se manifesta de forma defasada, em decorrência da inércia térmica dos materiais, fenômeno amplamente descrito como time lag. Ademais, a literatura converge no entendimento de que o estresse térmico deve ser analisado como um processo transiente e não estacionário, sendo inadequada sua representação por meio de métricas médias diárias.

Definição dos Critérios Técnicos de Seleção dos Intervalos

A partir da média horária dos dados de temperatura do ar de 2024 fornecidos pelo INMET, observa-se que a temperatura começa a se elevar de forma mais expressiva a partir das 9h, estabilizando em valores máximos entre aproximadamente 14h e 17h e passa a decrescer após esse período. Assim, esse padrão evidencia que o intervalo das 9h às 17h corresponde à janela temporal de maior aquecimento térmico diário, sendo a fase mais representativa do dia.

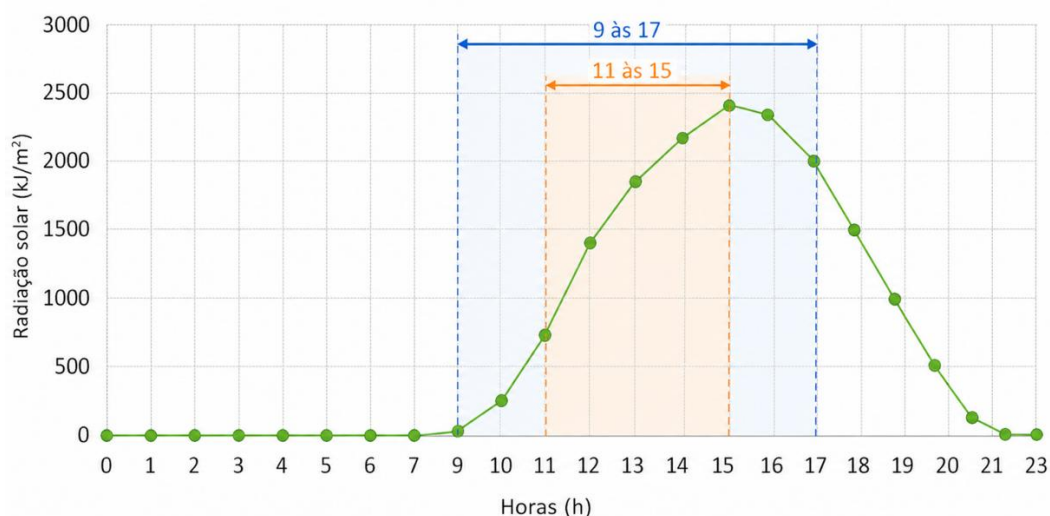
Figura 6. Média de temperatura do ano de 2024 - INMET.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise da média horária anual de radiação solar apresenta valores praticamente nulos nas primeiras horas do dia, com aumento expressivo a partir das 9h e máximos concentrados próximos às 15h, sendo este o horário de pico, seguido de redução progressiva após 17h. Considerando que a radiação solar constitui o principal fator de ganho térmico em coberturas expostas, o comportamento do gráfico justifica a definição de um intervalo crítico mais restrito, entre 11h e 15h, correspondente ao período de maior solicitação térmica da cobertura. Dessa forma, enquanto o intervalo das 9h às 17h representa a janela geral de aquecimento atmosférico, o intervalo das 11h às 15h concentra a máxima intensidade da força radiativa.

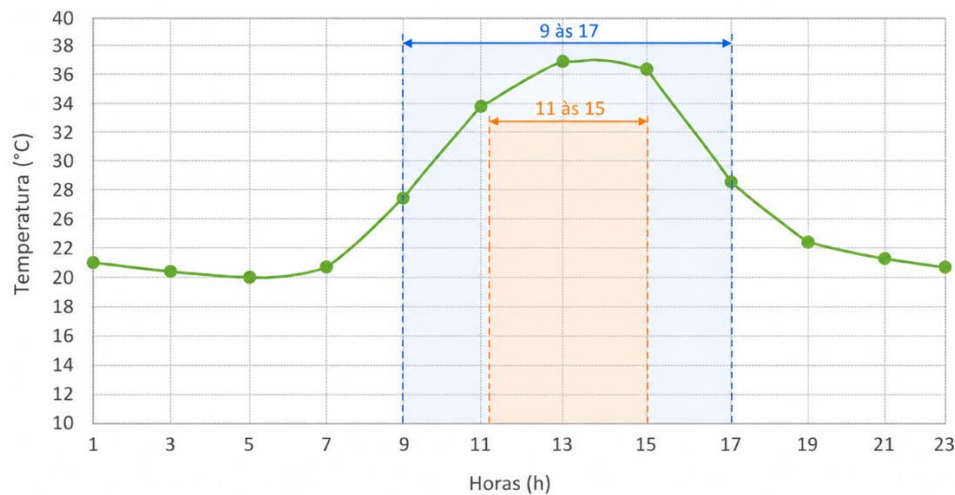
Figura 7. Média de radiação do ano de 2024 - INMET.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Por fim, os dados médios horários registrados no módulo de controle confirmam o comportamento esperado a partir das variáveis climáticas externas, evidenciando elevação térmica a partir de um pouco antes das 9h, intensificação entre 11h e 15h e pico médio às 13h. Nota-se que o intervalo das 11h às 15h engloba não apenas o valor máximo diário, mas também a fase de maior taxa de aquecimento e maior sensibilidade da cobertura às condições radiativas externas. Já o intervalo das 9h às 17h contempla o ciclo completo de aquecimento e início da dissipação térmica, incluindo tanto a fase crescente quanto a decrescente da curva. A coerência entre o padrão climático regional (temperatura do ar e radiação solar) e a resposta térmica experimental reforça a adequação dos intervalos adotados, visto que sua definição está fundamentada na dinâmica energética diária observada na região de estudo.

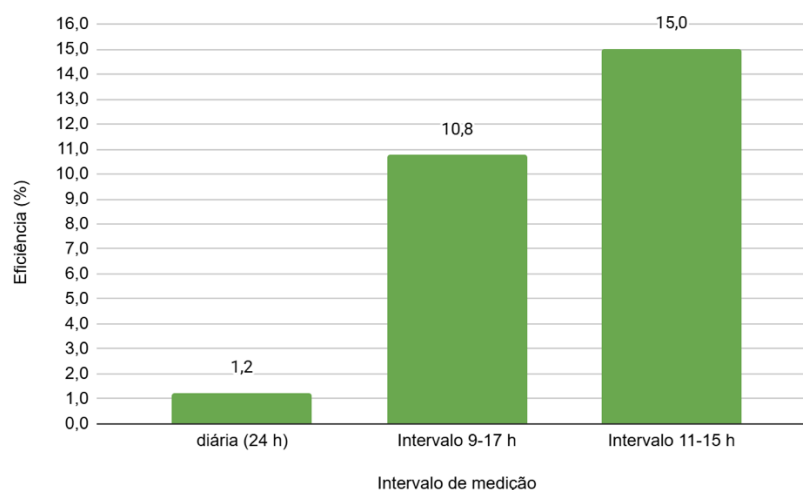
Figura 8. Média de temperatura do ano de 2024 - MC



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base nos dados experimentais obtidos ao longo do ano de 2024 pelos módulos verde (MV) e de controle (MC), foi calculada a eficiência térmica do sistema utilizando a Equação 1. A partir desses resultados, comparou-se a eficiência média considerando três abordagens temporais distintas: toda a série diária (24 h), o intervalo de estresse térmico compreendido entre 9 h e 17 h e o intervalo mais crítico entre 11 h e 15 h. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 11, permitindo avaliar a influência da seleção do intervalo de análise sobre a eficiência térmica observada do telhado verde.

Figura 9. Eficiência do módulo verde no ano de 2024



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados demonstram que a escolha do intervalo temporal de análise exerce influência significativa sobre a eficiência térmica observada do telhado verde. Considerando toda a série diária (24 h), a eficiência média obtida foi de apenas 1,2%, indicando que a inclusão dos períodos noturnos e das horas de baixa incidência de radiação solar reduz substancialmente o desempenho médio do sistema. Esse comportamento era esperado, uma vez que, durante esses períodos, o fluxo de calor incidente sobre a cobertura é reduzido e as temperaturas superficiais do módulo verde e do módulo de controle tendem a se aproximar, diminuindo a diferença térmica entre os sistemas.

Quando a análise foi restrita ao intervalo de 9 h às 17 h, correspondente ao período de maior carga térmica ao longo do dia, a eficiência média aumentou para 10,8%, representando um incremento de aproximadamente nove vezes em relação ao valor obtido para as 24 horas. Esse resultado evidencia que a avaliação concentrada nos horários de maior estresse térmico permite representar de forma mais adequada o desempenho do telhado verde, uma vez que é nesse período que ocorre maior absorção de radiação solar e, conseqüentemente, maior potencial de mitigação do ganho de calor.

A seleção de um intervalo ainda mais restrito, compreendido entre 11 h e 15 h, resultou na maior eficiência observada, alcançando 15,0%. Esse período coincide com as horas de máxima incidência de radiação solar e temperaturas superficiais mais elevadas, condições nas quais o telhado verde apresenta sua maior capacidade de reduzir a temperatura da cobertura em comparação ao módulo convencional. Em relação à análise diária, esse intervalo evidencia uma eficiência aproximadamente 12,5 vezes superior, enquanto representa um aumento de cerca de 39% em relação ao intervalo de 9 h às 17 h.

Esses resultados corroboram a metodologia proposta neste estudo, na qual os intervalos de estresse térmico foram definidos a partir da integração entre os referenciais teóricos e a análise empírica dos dados experimentais. A comparação entre os diferentes períodos demonstra que a análise de toda a série diária pode mascarar o desempenho real do sistema, uma vez que incorpora intervalos em que praticamente não há demanda por resfriamento das edificações. Por outro lado, a avaliação concentrada nos períodos críticos evidencia de maneira mais fiel a contribuição do telhado verde para a mitigação do ganho térmico, permitindo uma caracterização mais representativa de sua eficiência sob condições efetivas de maior solicitação térmica.

Assim, os resultados confirmam que a definição criteriosa dos intervalos de análise não constitui apenas uma escolha metodológica, mas um fator determinante para a correta

interpretação do desempenho térmico de coberturas vegetadas. A utilização dos intervalos de 9 h às 17 h e, principalmente, de 11 h às 15 h, mostra-se mais adequada para a avaliação da eficiência térmica do sistema, por concentrar os períodos em que o telhado verde efetivamente desempenha sua principal função de reduzir o aquecimento da cobertura e, conseqüentemente, contribuir para a diminuição da carga térmica das edificações.

Interpretação Integrada

A análise integrada dos resultados evidencia, de forma consistente, a existência de dois intervalos temporais com significância distinta, porém complementar, na caracterização do estresse térmico em sistemas de cobertura. O intervalo compreendido entre 11h e 15h destaca-se como o período de máxima solicitação térmica, no qual se verifica a convergência simultânea de três fatores críticos: elevada intensidade de radiação solar incidente, maior taxa de variação positiva da temperatura (indicando aquecimento acelerado) e máxima sensibilidade térmica do sistema de cobertura. Essa sobreposição de condições caracteriza esse intervalo como o núcleo crítico do estresse térmico, sendo particularmente relevante para análises de desempenho sob condições extremas.

Por outro lado, o intervalo mais amplo, compreendido entre 9h e 17h, revela-se fundamental para a compreensão do comportamento térmico em sua totalidade, uma vez que abrange o ciclo completo de ganho energético do sistema. Nesse período, são contempladas tanto a fase inicial de aquecimento, marcada pela intensificação progressiva da radiação solar, quanto a fase subsequente de armazenamento e posterior dissipação de calor, associada à liberação da energia acumulada nos materiais. Tal abordagem permite capturar a natureza transiente do fenômeno térmico, incorporando não apenas os picos de solicitação, mas também os processos de acúmulo e redistribuição de energia ao longo do dia.

A forte correspondência observada entre os padrões identificados nos dados experimentais e aqueles amplamente reportados na literatura especializada confere robustez aos critérios metodológicos adotados, validando a pertinência dos intervalos definidos. Ademais, os resultados indicam que a utilização desses recortes temporais possibilita uma representação mais fiel do desempenho térmico de coberturas, em particular de telhados verdes, ao evitar simplificações excessivas inerentes ao uso de médias diárias. Dessa forma, a abordagem proposta permite

evidenciar nuances térmicas que seriam, de outra forma, mascaradas por processos de agregação temporal.

Contribuições do Estudo

O presente estudo apresenta contribuições relevantes tanto no âmbito metodológico quanto aplicado, ao propor uma abordagem estruturada e replicável para a definição de intervalos temporais representativos do estresse térmico em sistemas de cobertura.

Diferentemente de práticas convencionais, frequentemente baseadas em recortes arbitrários ou em métricas agregadas, o método desenvolvido fundamenta-se na articulação rigorosa entre princípios teóricos e validação empírica, conferindo maior consistência analítica às avaliações de desempenho térmico.

Adicionalmente, destaca-se como contribuição central a integração sistemática entre revisão de literatura e experimentação, operacionalizada por meio de um processo iterativo de calibração entre modelos conceituais e dados observados. Essa integração não apenas reforça a confiabilidade dos resultados, mas também estabelece um referencial metodológico que pode ser adaptado e aplicado em diferentes contextos de estudo.

No plano empírico, o trabalho fornece evidências específicas para condições de clima tropical brasileiro, contribuindo para o preenchimento de lacunas existentes na literatura, predominantemente centrada em climas temperados. Tal especificidade confere relevância prática aos resultados, especialmente no contexto de avaliações normativas e de diretrizes de projeto para edificações em regiões tropicais.

Em síntese, a abordagem proposta amplia significativamente a precisão das análises de desempenho térmico, ao incorporar a dimensão temporal de forma mais refinada e fisicamente fundamentada. Nesse sentido, o método apresenta potencial de aplicação em investigações futuras, bem como na revisão e aprimoramento de critérios normativos relacionados ao desempenho térmico de edificações.

CONCLUSÃO

O presente estudo teve como propósito central a proposição de critérios metodológicos robustos para a definição de intervalos temporais representativos na avaliação do desempenho

térmico de telhados verdes em contexto de clima tropical, a partir de uma abordagem integrativa que articula revisão sistemática da literatura e validação experimental. Ao adotar uma perspectiva que privilegia a convergência entre fundamentação teórica e evidência empírica, buscou-se superar limitações recorrentes associadas à adoção de recortes temporais arbitrários ou excessivamente agregados.

Os resultados obtidos evidenciam a existência de uma convergência consistente entre os padrões descritos na literatura científica e aqueles observados nos dados experimentais, no que se refere à dinâmica térmica diária de sistemas de cobertura. Em particular, identificou-se que o intervalo compreendido entre 11h e 15h configura o núcleo crítico do estresse térmico, caracterizado pela atuação simultânea de máximos fluxos radiativos e elevadas temperaturas, resultando em condições de maior solicitação térmica. De forma complementar, o intervalo mais amplo entre 9h e 17h mostrou-se representativo do ciclo completo de ganho energético do sistema, englobando tanto a fase de aquecimento quanto o início do processo de dissipação térmica, aspectos fundamentais para a compreensão do comportamento transiente das coberturas.

A validação experimental, conduzida com base em dados climáticos e medições *in situ* no contexto de Duque de Caxias, confirmou a aplicabilidade e a robustez dos intervalos propostos para condições tropicais, evidenciando a relevância de se considerar a variabilidade intra-diária como dimensão essencial na análise do desempenho térmico. Nesse sentido, os resultados demonstram que a substituição de abordagens baseadas em médias diárias por recortes temporais fisicamente fundamentados permite uma representação mais acurada dos fenômenos térmicos, reduzindo distorções e ampliando a sensibilidade analítica das avaliações.

Sob a perspectiva aplicada, os achados deste estudo oferecem subsídios relevantes para o aprimoramento de metodologias de avaliação térmica em edificações, com potencial impacto em processos de simulação energética, desenvolvimento de diretrizes projetuais e revisão de normativas técnicas voltadas ao desempenho térmico em regiões tropicais. A incorporação de critérios temporalmente refinados pode contribuir para decisões mais informadas no dimensionamento e na especificação de sistemas de cobertura, em especial no que se refere à adoção de soluções baseadas em infraestrutura verde.

Adicionalmente, a análise da eficiência térmica reforçou a importância da definição criteriosa dos intervalos temporais de avaliação. Os resultados demonstraram que a eficiência média calculada para todo o período diário (24 h) foi de apenas 1,2%, enquanto a análise restrita ao intervalo de 9 h às 17 h elevou esse valor para 10,8%, e o intervalo mais crítico, compreendido

entre 11 h e 15 h, apresentou eficiência média de 15,0%. Esses resultados evidenciam que a utilização de médias diárias pode mascarar o desempenho real dos telhados verdes, uma vez que incorpora períodos de baixa ou inexistente demanda térmica. Em contrapartida, a adoção de intervalos correspondentes aos períodos efetivos de estresse térmico permite representar de forma mais fidedigna a capacidade do sistema em reduzir o ganho de calor, evidenciando com maior clareza os benefícios proporcionados pela cobertura vegetada.

Por fim, destaca-se que a abordagem proposta abre perspectivas para o aprofundamento de investigações futuras, especialmente no que concerne à análise de diferentes tipologias de telhados verdes, à incorporação de variabilidades sazonais e à consideração de parâmetros construtivos específicos. Tais desdobramentos poderão ampliar a generalização dos critérios estabelecidos e contribuir para o avanço do conhecimento no campo do desempenho térmico de edificações. Além disso, os resultados obtidos sugerem que a padronização de intervalos de análise baseados em fundamentos físicos e experimentais pode representar um importante avanço metodológico para pesquisas futuras, favorecendo comparações mais consistentes entre estudos e avaliações mais representativas da eficiência térmica de telhados verdes em diferentes contextos climáticos. Dessa forma, o presente trabalho contribui não apenas para o entendimento do comportamento térmico dessas coberturas, mas também para o estabelecimento de uma metodologia de avaliação mais precisa, robusta e cientificamente fundamentada.

REFERÊNCIAS

BEVILACQUA, Piero *et al.* Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern mediterranean climate. *Energy and Buildings*, v. 150, p. 318-327, 2017.

BEVILACQUA, P.; MAZZEO, D.; ARCURI, N. Thermal inertia assessment of an experimental extensive green roof in summer conditions. *Building and Environment*, v. 131, p. 264-276, 2018.

BUDHIYANTO, A.; TAMPUBOLON, A. C. A comparative study of cool roof and green roof performance in tropical area of Indonesia. *Journal of Architectural Research and Design Studies*, v. 9, n. 1, p. 1–10, 2025. DOI: 10.20885/jars.vol9.iss1.art1.

CASCONI, S. *et al.* A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. *Building and Environment*, v. 136, p. 227-239, 2018.

CASCONI, S.; VITALIANO, S. Innovative green roof technologies in Mediterranean climate: implications for sustainable design of the built environment. *Building and Environment*, v. 273, art. 112715, 2025. DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.112715.

- CHAGOLLA-ARANDA, M. A.; SIMÁ, E.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, I.; PIÑA-ORTIZ, A.; ÁVILA-HERNÁNDEZ, A. Dynamic thermal evaluation of a green roof system under warm weather conditions: case of tropical and dry climates. *Journal of Building Engineering*, v. 103, art. 112053, 2025. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.112053.
- CORREIA, C. M. de A.; AMORIM, C. N. D.; SANTAMOURIS, M. Use of passive cooling techniques and super cool materials to minimize cooling energy and improve thermal comfort in Brazilian schools. *Energy and Buildings*, v. 312, art. 114125, 2024. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114125.
- FERRAZ, I. L. *O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. DOI: 10.11606/D.3.2012.tde-07062013-144209.
- GAGLIANO, A.; NOCERA, F.; DETOMMASO, M.; EVOLA, G. Thermal behavior of an extensive green roof: numerical simulations and experimental investigations. *International Journal of Heat and Technology*, v. 34, Special Issue 2, p. S226–S234, 2016. DOI: 10.18280/ijht.34S206.
- GRULLÓN-PENKOVA, I. F.; ZIMMERMAN, J. K.; GONZÁLEZ, G. Green roofs in the tropics: design considerations and vegetation dynamics. *Heliyon*, v. 6, n. 8, art. e04712, 2020. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04712.
- ISLAM, S.; KARIPOT, A.; BHAWAR, R.; SINHA, P.; KEDIA, S.; KHARE, M. Urban heat island effect in India: a review of current status, impact and mitigation strategies. *Discover Cities*, v. 1, art. 34, 2024. DOI: 10.1007/s44327-024-00033-3.
- JAMEI, E.; CHAU, H. W.; SEYEDMAHMOUDIAN, M.; STOJCEVSKI, A. Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Science of the Total Environment*, v. 791, art. 148407, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148407.
- JAMEI, E.; CHAU, H. W.; SEYEDMAHMOUDIAN, M.; MEKHILEF, S. S.; SAMI, F. A. Green roof and energy: role of climate and design elements in hot and temperate climates. *Heliyon*, v. 9, art. e15917, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e15917.
- JOSHI, M. Y.; RODLER, A.; MUSY, M.; GUERNOUTI, S.; TELLER, J. Influence of urban morphology on potential of green roofs in regulating local microclimate: a case study of Liège, Belgium. *Urban Climate*, v. 58, art. 102144, 2024. DOI: 10.1016/j.uclim.2024.102144.
- KÖHLER, M. The green roof movement: from a botanical idea to a new sustainable style in modern architecture. In: INTERNATIONAL LANDSCAPE EDUCATION SYMPOSIUM, 1., 2005, Shanghai. *Proceedings [...]*. Shanghai: Tongji University, 2005. p. 168–176.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência energética na arquitetura*. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/PROCEL, 2014.
- MATIAS, M.; LOPES, A. Surface radiation balance of urban materials and their impact on air temperature of an urban canyon in Lisbon, Portugal. *Applied Sciences*, v. 10, n. 6, p. 2193, 2020.

PALME, Massimo; CARRASCO, Claudio. Urban heat island in Latin American cities: a review of trends, impacts, and mitigation strategies. In: *Global Urban Heat Island Mitigation*. Elsevier, 2022. p. 251–267. DOI: 10.1016/B978-0-323-85539-6.00014-7.

PEARLMUTTER, D. *et al.* Enhancing the circular economy with nature-based solutions in the built urban environment: Green building materials, systems and sites. *Blue-Green Systems*, v. 2, n. 1, p. 46-72, 2020.

MENEZES, M. F. S.; TEIXEIRA, C. F. B. Avaliação do desempenho térmico de telhado verde na cidade de Aracaju-SE. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2019. *Anais [...]*, 2019. p. 1697–1705.

NIACHOU, A.; PAPAKONSTANTINO, K.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASSOULIS, A.; MIHALAKAKOU, G. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, v. 33, n. 7, p. 719–729, 2001. DOI: 10.1016/S0378-7788(01)00062-7.

RAMESH, S. Energy efficient landscape for thermal comfort in buildings and built-up areas. *International Journal of Environmental Science and Development*, v. 8, n. 5, p. 338–344, 2016. DOI: 10.7763/IJESD.2016.V8.909.

SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, v. 40, n. 8, p. 1466–1478, 2008. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.02.001.

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities: a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, v. 103, p. 682–703, 2014. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.003.

SCOLARO, T. P.; GHISI, E.; SILVA, C. M. Assessing the impact of evapotranspiration from green roofs on reducing surface temperatures. *Journal of Building Engineering*, v. 95, p. 110095, 2024.

SCOLARO, T. P.; GHISI, E.; SILVA, C. M. Effectiveness of cool and green roofs inside and outside buildings in the Brazilian context. *Sustainability*, v. 16, n. 18, p. 8104, 2024.

SIMMONS, M. T. Climates and microclimates: challenges for extensive green roof design in hot climates. In: *Green roof ecosystems*. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 63–80.

SONEYE, O. O.; AYOOLA, M. A.; AJAO, I. A.; JEGEDE, O. O. Diurnal and seasonal variations of the incoming solar radiation flux at a tropical station, Ile-Ife, Nigeria. *Heliyon*, v. 5, n. 5, art. e01673, 2019. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01673.

SQUIER, M.; DAVIDSON, C. I. Heat flux and seasonal thermal performance of an extensive green roof. *Building and Environment*, v. 107, p. 235–244, 2016.

TAKEBAYASHI, H.; MORIYAMA, M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, v. 42, n. 8, p. 2971–2979, 2007. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.06.017.

TSENG, K.-H.; CHUNG, M.-Y.; CHEN, L.-H.; CHOU, L.-A. A study of green roof and impact on the temperature of buildings using integrated IoT system. *Scientific Reports*, v. 12, art. 16140, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-20552-6.

UNAL, M.; MIDDEL, A. Improving thermal comfort in hot-arid Phoenix, Arizona courtyards: exploring the cooling benefits of ground surface cover and shade. *Building and Environment*, v. 278, art. 113001, 2025. DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113001.

VUJOVIC, Svetlana *et al.* Urban heat island: Causes, consequences, and mitigation measures with emphasis on reflective and permeable pavements. *CivilEng*, v. 2, n. 2, p. 459-484, 2021.

YANG, J. *et al.* Assessing the impacts of urbanization-associated green space on urban land surface temperature: A case study of Dalian, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 22, p. 1-10, 2017.

YANG, X. *et al.* Impact of urban heat island on energy demand in buildings: Local climate zones in Nanjing. *Applied Energy*, v. 260, p. 114279, 2020.