ANÁLISE TERMOENERGÉTICA COM ÊNFASE EM COBERTURAS DE UMA EDIFICAÇÃO UNIFAMILIAR LOCALIZADA NAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS 01 E 08

Queren-Hapuque de Oliveira Aquino (1); Matheus Mendonça Barbosa (2); Angelo Just Costa e Silva (3)

(1) Engenheira Civil, querenaquino99@gmail.com
(2) Engenheiro Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, matheusmendonca.b@gmail.com, Universidade Federal de Santa Catarina
(3) Doutor, Professor do departamento de Engenharia Civil, angelo@tecomat.com.br, Universidade de Pernambuco

RESUMO

Edificações concebidas para apresentar bom desempenho termoenergético podem reduzir o consumo de energia, deixar o ambiente mais agradável termicamente e auxiliar na atenuação dos efeitos causadores de ilhas de calor urbano. Além do clima em que a habitação está inserida, a refletância solar e a emitância térmica dos materiais que constituem os elementos de vedação podem influenciar nas trocas de calor existentes entre a edificação e o meio externo. Nesses termos, o presente trabalho tem como objetivo analisar de forma comparativa o comportamento termoenergético de coberturas com telhas convencionais de baixa refletância solar e coberturas frias com telhas de alta refletância solar, com e sem isolamento térmico resistivo, em uma habitação unifamiliar, considerando duas zonas bioclimáticas brasileiras (ZB01 e ZB08). A metodologia adotada foi realizada a partir de simulações computacionais realizadas no software EnergyPlus, que fornece dados de saída necessários para o cálculo dos seguintes indicadores: percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), consumo de cargas térmicas, temperatura superficial do telhado e fluxo de calor na cobertura. Acerca do desempenho térmico, no clima mais frio (ZB 01), as coberturas com isolamento térmico resistivo obtiveram melhores resultados de PHFT e cargas térmicas, sobretudo, as coberturas dispostas de telhas com baixa refletância solar. Por outro lado, no clima quente (ZB 08), as coberturas frias sem isolamento térmico resistivo alcançaram melhores índices de desempenho térmico. Quanto à redução da temperatura superficial externa e das emissões de calor, verificou-se que o uso de coberturas frias impactou nas maiores reduções desses parâmetros em ambas as zonas bioclimáticas.
Palavras-chave: coberturas, eficiência energética, simulação computacional.

ABSTRACT

Buildings designed to have good thermal energy performance can reduce energy consumption, make a more thermally pleasant environment, and help mitigate the effects of urban heat islands. In addition to the climate in which the dwelling is located, the solar reflectance and thermal emittance of the materials that constitute the envelope components can influence the heat exchanges between the building and the external environment. In this regard, the present study aims to comparatively analyze the thermal energy behavior of roofs with conventional low solar reflectance tiles and cool roofs with high solar reflectance tiles, with and without resistive thermal insulation, in a single-family dwelling, considering two Brazilian bioclimatic zones (ZB 01 and ZB 08). The adopted methodology was based on computational simulations carried out using the EnergyPlus software, which provides output data necessary for calculating the following indicators: percentage of occupied hours within an operative temperature range (PHFT), thermal load consumption, roof surface temperature, and heat flux in the roof. Regarding thermal performance, in the colder climate (ZB 01), roofs with resistive thermal insulation obtained better PHFT and thermal load results, particularly those with low solar reflectance tiles. On the other hand, in the hot climate (ZB 08), cool roofs without resistive thermal insulation achieved better thermal performance indices. As for the reduction in external surface temperature and heat emissions, it was observed that the use of cool roofs led to the greatest reductions in these parameters in both bioclimatic zones.
Keywords: roofs, energy efficiency, computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem-se observado um crescimento na demanda de energia elétrica pelo setor residencial. Dessa maneira, o consumo de energia elétrica em 2004 do setor residencial foi de aproximadamente 78 bilhões de quilowatt-hora e esse valor praticamente dobrou no ano de 2021, alcançando o consumo aproximado de 151 bilhões de quilowatt-hora (EPE, 2022). Vale citar que a energia elétrica utilizada nas residências alimenta principalmente os sistemas de iluminação, condicionamento de ar, aquecimento de água e os eletrodomésticos (EPE, 2021).

Ademais, com o crescimento das áreas urbanas e aumento populacional, ocorreu também a diminuição da vegetação, que foi substituída por edificações e áreas pavimentadas. Estes, são reconhecidos por diminuir a permeabilidade, apresentar alta capacidade de absorção solar, retenção de energia e liberação de calor. Como resultado, tornou-se mais perceptível o aumento da temperatura do ar em espaços urbanos, quando comparado com áreas menos urbanizadas e rurais. Esse fenômeno é conhecido como de ilha de calor urbano, que é responsável por causar alterações no microclima urbano, gerando desconforto térmico, sobretudo, durante os períodos de verão, aumento do consumo de energia para alcance do conforto térmico e elevação na emissão de gases causadores do efeito estufa (MAESTRI, 2017; PISELLI et al., 2017).

Destaca-se que o desempenho térmico das edificações está relacionado a certos fatores, sendo alguns deles, as características climáticas que a edificação está inserida, a orientação solar, o sistema construtivo, o entorno da edificação, cargas internas, ocupação, pé direito, formas de ventilação passiva e ou ativa, carga térmica de resfriamento e aquecimento e a envoltória (ROLIM, 2015; OLIVEIRA, 2017). A envoltória da edificação é constituída pelos elementos de fechamento, que são responsáveis por separar os ambientes internos dos externos, sabe-se, também, que os materiais que constituem a envoltória podem interferir no fluxo de calor que ocorre entre o meio interno e externo, por isso é necessário conhecer suas propriedades térmicas e radiantes (PEREIRA, 2014; MAESTRI, 2017; KUMAR et al., 2020; ANH; PASZTORY, 2021).

Dentre as alternativas para reduzir a formação de ilhas de calor e melhorar o desempenho térmico em climas quentes, destaca-se a utilização das coberturas frias que se caracterizam por possuir alta refletância solar, auxiliando na diminuição do fluxo de calor para o interior da edificação e favorecendo a manutenção de temperaturas amenas na superfície da cobertura, isso ocorre pois as coberturas frias apresentam altos valores de refletância solar e emitância térmica (PISELLI et al., 2017; TESTA; KRARTI, 2017).

É fundamental pontuar que, em decorrência da crise energética que ocorreu no ano de 2001, o Brasil mostrou-se mais interessado na redução do consumo de energia, por isso elaborou medidas voltadas para a eficiência energética e desempenho térmico em edificações. Surgiu, então, a Lei 10.295, conhecida como a lei de eficiência energética, que determinou os níveis mínimos de eficiência energética de edifícios, máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no Brasil (BRASIL, 2001). Em seguida, foi desenvolvida a NBR 15520 (ABNT, 2005) que, além de especificar inúmeros conceitos, recomendações e estratégias construtivas para obtenção de adequado desempenho térmico, também estabeleceu o zoneamento bioclimático brasileiro, que subdividiu o Brasil em oito Zonas Bioclimáticas (SOARES et al., 2021). Entretanto, diferente de outros países como os Estados Unidos da América e Itália que desenvolveram políticas públicas para estimular a implementação de coberturas frias, essa ainda não é uma realidade no Brasil.

2. OBJETIVO

O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho térmico de uma edificação unifamiliar nas zonas bioclimáticas brasileiras 01 e 08 com diferentes tipos de cobertura.

3. MÉTODO

O trabalho foi realizado a partir de simulações computacionais, em que as variáveis observadas na pesquisa consistiram no local de implantação da edificação e nos tipos de cobertura. A análise adotou os parâmetros estabelecidos no regimento brasileiro de desempenho térmico, conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2021), e inclui análise do fluxo de calor e temperatura superficial dos telhados avaliados.

Os modelos computacionais foram criados no software SketchUp com auxílio do plugin EUCLID e as simulações computacionais foram realizadas por meio do software EnergyPlus, versão 9.4. Foram consideradas as trocas térmicas presente entre a edificação e o solo, a modelagem do solo considerou o objeto *Ground Domain* por meio do método das diferenças finitas. Entretanto, desconsiderou-se as trocas de calor existentes com o entorno, além disso, as simulações foram realizadas considerando um período anual.

3.1. Configuração da simulação computacional

3.1.1 Modelo da edificação

Neste estudo, utilizou-se o projeto de uma habitação de interesse social, sendo esta, uma edificação unifamiliar térrea, com pé direito igual a 2,60m. Apenas os ambientes de permanência prolongada (APP) foram analisados, conforme mostra a Figura 1.

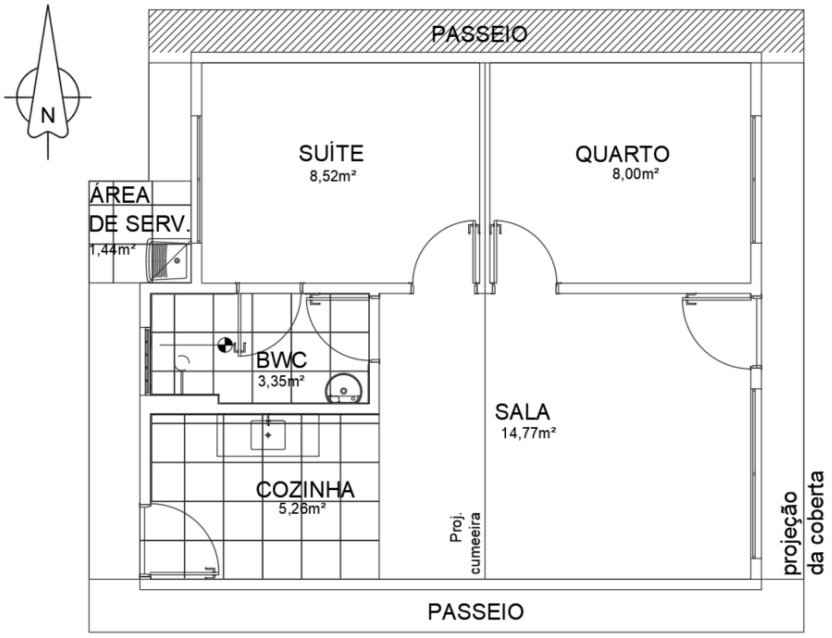

Figura 1 - Planta baixa da edificação estudada

3.1.2 Sistema de vedação vertical e piso

As paredes externas e internas, assim como o piso e os elementos transparentes foram adotados de acordo com o recomendado para os modelos de referência pela norma brasileira de desempenho térmico, onde os elementos de vedação apresentam 100mm de espessura e esses componentes foram mantidos inalterados em todos os cenários de simulação (Tabela 1).

Tabela 1 – Propriedades térmicas das paredes, piso e portas

Sistema	**Espessura** [m]	**Refletância solar** [adimensional]	**Transmitância Térmica** [W/m².K]	**Capacidade Térmica** [kJ/m².K]
Paredes Externas	0,10	0,42	4,40	240,0
Paredes internas	0,10	0,42	4,40	240,0
Piso	0,10	0,42	3,74	220,0

Fonte: adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021)

3.1.3 Cargas internas e ocupação

A modelagem das cargas internas e da ocupação dos ambientes de permanência prolongada foram realizadas de acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2021), considerando 2 ocupantes por dormitório, impactando, portanto, em ocupação de 4 usuários na unidade habitacional (UH). Os dormitórios têm 100% de ocupação das 22h00 até as 08h00 e a iluminação permanece ligada nos intervalos entre 22h00 e 0h00, e das 06h00 às 8h00. A sala tem 50% da ocupação total entre 14h00 e 18h00, quando, a partir daí, o ambiente é 100% ocupado até às 22h00, sendo que a iluminação é adicionada às 16h00 e permanece ligada até às 22h00.

Salienta-se que o padrão de uso e ocupação dos ambientes de permanência prolongada, bem como o padrão de uso dos equipamentos e sistemas de iluminação artificial permanecem iguais durante todo o ano, inclusive nos finais de semana.

Vale destacar que os sistemas de iluminação artificial, tanto da sala quanto dos dormitórios, apresentam densidade de potência instalada (DPI) igual a 5,00 W/m², fração radiante de 0,32 e a fração visível de 0,23. Além disso, considerou-se que apenas a sala possui equipamentos, com a densidade de cargas internas (potência) de 120W e fração radiante de 0,30 (ABNT, 2021).

3.1.4 Coberturas

As coberturas foram compostas com telhas de 6mm de espessura, câmara de ar com resistência térmica de 0,21m².K/W e laje com 100mm de espessura. No entanto, foram realizadas modificações em determinados cenários, dos quais, alterou-se o valor de refletância solar das telhas e adicionou-se uma camada de isolamento térmico resistivo com resistência térmica igual a 0,67m².K/W.

No total, adotou-se quatro combinações diferentes de coberturas, onde foram utilizadas telhas de acabamento natural, que apresentam baixa refletância solar e telhas que possuem alta refletância solar (constituindo os modelos de coberturas frias). A Tabela 2 exibe as composições e propriedades térmicas das coberturas presentes em cada modelo de simulação computacional. É importante destacar que, mesmo alterando-se o valor da refletância solar das telhas, a emitância térmica permaneceu constante em todos os cenários cujo valor foi igual a 0,9.

Tabela 2 - Cenários e propriedades térmicas das diferentes coberturas analisadas

Cobertura	**Composição**	**Transmitância Térmica** [W/m².K]	**Resistência Térmica** [m².K/W]	**Capacidade Térmica** [kJ/m².K]	**Refletância solar** [adimensional]
$M_{SI0,35}$	Telha de fibrocimento (0,006m) Câmara de ar (>0,05m) Laje maciça (0,10m)	2,1	0,48	252,8	0,35
M_{REF}*					0,35
$M_{SI0,75}$					0,75
$M_{CI0,35}$	Telha de fibrocimento (0,006m) Câmara de ar (>0,05m) Isolamento Térmico Resistivo Laje maciça (0,10m)	1,00	0,98	253,7	0,35
$M_{REF-ZB08}$**					0,35
$M_{CI0,75}$					0,75
*Corresponde ao sistema de cobertura indicado para o *modelo de referência* das zonas bioclimáticas 01 a 07. **Corresponde ao sistema de cobertura indicado para o *modelo de referência* da zona bioclimática 08.					

3.1.5 Cidades de referência e suas respectivas zonas bioclimáticas

A fim de adotar uma cidade representativa para as zonas bioclimáticas 01 e 08, foram considerados os municípios de Curitiba/PR, que se enquadra na zona bioclimática 01, e Recife/PE, localizado na zona bioclimática 08. Seguindo o recomendado pela a NBR 15575 (ABNT, 2021), foram admitidos os arquivos climáticos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no formato EnergyPlus Weather Format (EPW).

A Tabela 3 apresenta as zonas bioclimáticas e as suas respectivas cidades representativas, assim como, as temperaturas mínimas, máximas e médias anuais externas de bulbo seco.

Tabela 3 - Cidades estudadas e suas temperaturas máximas mínimas e médias, anuais externas de bulbo seco

Zona bioclimática	**Cidade - Estado**	**Temperaturas anuais externas de Bulbo Seco**		
		Máxima [ºC]	**Mínima** [ºC]	**Média** [ºC]
01	Curitiba - PR	31,75	3,81	17,38
08	Recife - PE	31,87	18,65	25,75

3.2 Simulações com e sem ventilação natural

Foram realizadas simulações considerando duas maneiras de utilização dos APPs: com e sem o uso da ventilação natural. Por meio do modelo que considerou a ventilação natural, foi possível obter aos valores de temperatura operativa dos ambientes, utilizada no cálculo do percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), fluxo de calor na cobertura e temperatura de superfície na face externa da cobertura. A partir dos modelos sem o uso da ventilação natural, foi possível estimar as cargas térmicas anuais de resfriamento (CgTR), aquecimento (CgTA) e a carga térmica total (CgTT) que é resultado da soma das cargas térmicas de resfriamento e aquecimento.

Nos modelos onde se adotou a ventilação natural, a porta do banheiro foi mantida constantemente fechada, enquanto as portas dos dormitórios e a janela do banheiro estiveram sempre abertas. Além disso, as janelas da sala e dos dormitórios permaneceram abertas sempre que a temperatura de bulbo seco no ambiente interno foi superior à temperatura de bulbo seco no ambiente externo e maior ou igual a 19 °C. Considerou-se, também, a ocorrência de infiltração de ar por frestas nos momentos que as janelas estiveram fechadas.

Nas simulações sem o uso da ventilação natural, todas as portas e janelas foram consideradas fechadas, exceto a janela do banheiro, e foi considerada a ocorrência de infiltração de ar pelas frestas. Foi empregado um sistema de condicionamento de ar ideal, de forma que este funcionou evitando as perdas de energia. Por esse motivo, o cálculo das cargas térmicas somente foi aplicado nos momentos em que a sala e os dormitórios estiveram ocupados. O sistema de resfriamento adotou temperatura de setpoint de 23 °C, enquanto, nos sistemas de aquecimento, a temperatura de setpoint foi de 21 °C.

3.3 Modelo de referência

O modelo de referência utilizou a mesma geometria e os mesmos sistemas construtivos já apresentados, no entanto, foram eliminados os elementos de sombreamento causados pelo beiral do telhado e os elementos transparentes foram redimensionados de tal maneira a sua área passou a ser equivalente a 17% da área do piso do ambiente. Ressalta-se que a tipologia, para os modelos de referência, da cobertura adotada entre as zonas bioclimáticas 01 e 07 foi $\boldsymbol{M_{SI0,35}}$, e, na zona bioclimática 08, foi utilizado o sistema $\boldsymbol{M_{CI0,35}}$.

3.4 Indicadores adotados

Como indicadores no trabalho, foram utilizados o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), a cargas térmica de resfriamento, a carga térmica de aquecimento e carga térmica total. Além disso, realizou-se o cálculo do balanço térmico de superfície para determinação dos fluxos de calor na cobertura e a sua temperatura superficial externa.

As faixas de temperatura operativa utilizadas para avaliar o PHFT e as cargas térmicas dependeram do intervalo de temperaturas de bulbo seco que a cidade avaliada se encontrava. Para identificar este intervalo foi necessário obter a temperatura anual média de bulbo seco presente no arquivo climático utilizado. A Tabela 4 apresenta os intervalos em que cada cidade avaliada se enquadra.

Tabela 4 - Critérios para estabelecer os intervalos de temperatura externa e classificação das cidades

Intervalos de temperaturas externas	**Critério**	**Cidade - Estado**	**Média anual da temperatura externa de bulbo seco de cada cidade** [ºC]
Intervalo 1	*TBSm < 25,0 °C	Curitiba - PR	17,38
Intervalo 2	25,0 °C ≤ TBSm < 27,0 °C	Recife - PE	25,75
*TBSm é a média anual da temperatura externa de bulbo seco [ºC]			

Fonte: Adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021)

3.4.1 PHFT

O PHFT é um indicador que retrata o percentual de horas do ano em que um ambiente ocupado se mantém dentro de um intervalo de temperatura operativa. A Tabela 5 apresenta a faixa de temperatura operativa para cada intervalo.

Através dos modelos de simulação com o uso da ventilação natural, foi possível obter os dados necessários para calcular o $PHFT_{APP}$ (equação 1), onde a variável Nh_{FT} representa a quantidade de horas em que o ambiente de permanência prolongada esteve ocupado e dentro de um intervalo de temperatura operativa estabelecida pela Tabela 5, o Nh_{Ocup} foi igual a 2920h pra a sala e 3650h para os dormitórios, e representa o total de horas do ano que esses ambientes estiveram ocupados.

$$PHFT_{APP} = \frac{Nh_{FT}}{Nh_{Ocup}} \times 100 \quad (1)$$

Para determinar o PHFT da unidade habitacional, foi realizado uma média aritmética entre aos valores de $PHFT_{APP}$ da sala e dos dormitórios.

Tabela 5 - Faixas de temperatura operativa para determinação do PHFT e das cargas térmicas

Intervalos de temperaturas externas	**Faixa de temperatura operativa a ser considerada no PHFT**	**Faixa de temperatura operativa a ser considerada para o cálculo da CgTR**	**Faixa de temperatura operativa a ser considerada para o cálculo da CgTA**
Intervalo 1	18,0 °C < *ToAPP < 26,0 °C	ToAPP ≥26,0 °C	ToAPP≤ 18,0 °C
Intervalo 2	ToAPP < 28,0 °C	ToAPP ≥ 28,0 °C	Não considera
*ToAPP é a temperatura operativa do APP, que atende aos limites estabelecidos nesta Tabela.			

Fonte: Adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021)

3.4.2 Carga térmica

A cargas térmica de resfriamento se refere à quantidade de calor que deve ser retirada do ar para que um ambiente mantenha as condições desejadas, enquanto a carga térmica de aquecimento expressa a quantidade de calor que deve ser fornecida ao ar para que um ambiente conserve determinadas condições.

As cargas térmicas de resfriamento e aquecimento foram calculadas a partir do modelo sem ventilação natural, considerando apenas os períodos em que as salas e quartos estiveram ocupados e dentro da faixa de temperatura operativa apresentada na Tabela 5.

A carga térmica total CgTT é resultado da soma das cargas de aquecimento e resfriamento de cada APP e remete-se à unidade habitacional. Vale evidenciar que as cargas térmicas de aquecimento somente foram consideradas na cidade de Curitiba, pois está presente no intervalo 1, conforme NBR 15575 (ABNT, 2021).

3.4.3 Fluxo de calor e temperatura de superfície

O balanço térmico foi realizado na superfície externa das telhas da sala. O cálculo do balanço térmico na superfície foi efetuado por meio da equação (2). Além disso, também foi calculado a temperatura na superfície externa da cobertura. Destaca-se que as simulações para a obtenção desses indicadores foram realizadas considerando a atuação da ventilação natural e os dados foram obtidos para cada mês do ano.

$$\mathbf{q_{rad,oc} + q_{rad,ol} + q_{condução} + q_{convecção} = 0} \quad (2)$$

Onde,

$q_{rad,oc}$ representa o fluxo de calor recebido pela radiação de ondas curtas [W/m²];

$q_{rad,ol}$ o fluxo de calor por emitido através da radiação de ondas longas [W/m²];

$q_{condução}$ é o fluxo de calor transferido por condução na superfície externa do telhado [W/m²];

$q_{convecção}$ é o fluxo calor de transferido por convecção na superfície externa do telhado [W/m²].

4. RESULTADOS

4.1. Zona bioclimática 01 - Curitiba

Na zona bioclimática 01 todos os modelos mostraram valores similares de PHFT, entretanto aqueles que adotaram o isolamento térmico obtiveram melhores resultados. O modelo $M_{CI0,35}$ alcançou o maior PHFT com 75,7%, superando o valor obtido pelo modelo de referência (M_{REF}) que foi de 74%. Os modelos que não fizeram uso do isolamento térmico tiveram valores de PHFT inferiores ao obtido pelo M_{REF}, e o sistema $M_{SI0,75}$ atingiu o menor PHFT com apenas 69,1%. A Figura 2 apresenta os valores de PHFT obtidos para a zona bioclimática 01.

Conforme exibido na Figura 3, os modelos $M_{CI0,35}$ e $M_{CI0,75}$, que utilizaram o isolamento térmico, obtiveram valores extremamente próximos de carga térmica total, com 31,4kWh/m² e 31,2kWh/m² respectivamente, porém ambos apresentaram valores inferiores ao obtido pelo modelo de referência que foi de 39,5kWh/m². Entretanto, vale salientar que o modelo $M_{CI0,35}$, que utiliza a telha de baixa refletância solar, as cargas de aquecimento e resfriamento apresentaram valores mais equilibrados com uma redução de 8,8% na carga de aquecimento e 37,7% na carga de refrigeração, em relação ao modelo de referência. Enquanto no modelo com telha de alta refletância solar ($M_{CI0,75}$), ocorreu uma redução de 70% na carga térmica de resfriamento, e um crescimento de 12,9% na carga térmica de aquecimento em relação ao modelo de referência. Os cenários que não utilizaram o isolamento térmico apresentaram resultados próximos e desfavoráveis, sendo o $M_{SI0,35}$ o modelo que apresentou maior CgTT de 43,8kWh/m², todavia, apesar do modelo $M_{SI0,75}$ possuir CgTT levemente menor, com 42,8 kWh/m², foi o que apresentou a maior elevação na CgTA, com um aumento de 57,9% em relação ao modelo de referência, por outro lado o modelo $\mathbf{M_{SI0,35}}$ apresentou apenas 12,9% de crescimento em relação ao M_{REF}.

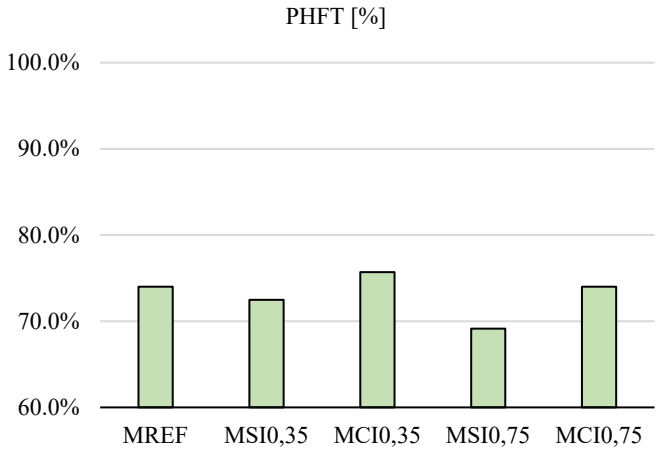

Figura 2 - Resultados do PHFT na ZB 01

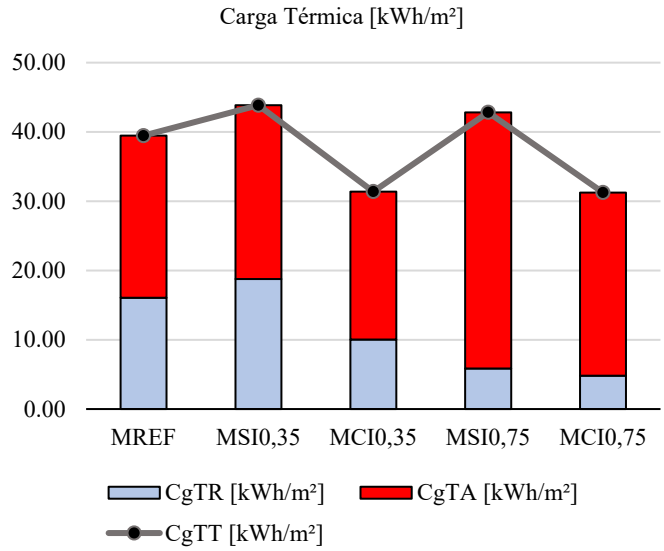

Figura 3 - Resultados das cargas térmicas na ZB 01

Observou-se que, no mês de dezembro, ocorreram os maiores ganhos e perdas de energia térmica pela cobertura. Nos modelos com o uso da telha de baixa refletância solar ($M_{SI0,35}$ e $M_{SI0,35}$), o fluxo de calor cedido foi de 135,9W/m², conforme a Figura 4. Nas coberturas frias, esse valor foi reduzido de forma que os modelos com e sem isolamento térmico ($M_{CI0,75}$ e $M_{SI0,75}$) atingiram, respectivamente, 53,9W/m² e 55,2W/m², observou-se que nesses modelos o ganho de calor por meio da radiação de ondas curtas foi predominante, entretanto, uma pequena parcela de calor foi obtida por condução. As temperaturas superficiais externas mais elevadas foram registradas no mês de dezembro, pelos modelos que utilizaram telhas de baixa refletância solar, de modo que atingiram valores iguais a 27,4°C, 27,3°C e 27,5°C pelos modelos $M_{SI0,35}$, $M_{CI0,35}$ e M_{REF}, respectivamente. Os modelos de cobertura fria obtiveram as temperaturas mais elevadas no mês de fevereiro, com 21,9°C para o modelo $M_{SI0,75}$ e 21,5 °C para o modelo $M_{CI0,75}$. O mês de junho foi o que apresentou temperaturas mais baixas na superfície externa da cobertura e menores valores de transferência de calor, de modo que, o modelo de referência (M_{REF}) apresentou temperatura de superfície máxima, igual a 16,2°C e perda de calor de 48,68W/m² dos quais, 17% foram por convecção e 83% por emissão de radiação de ondas longas. O modelo $M_{CI0,75}$ mostrou-se mais eficiente, reduzindo 3,1°C de temperatura de superfície quando comparado com o modelo de referência e emitindo 24,7W/m² através da radiação de ondas longas.

Adotando o modelo com isolamento e baixa refletância solar ($M_{CI0,35}$), foi possível elevar o PHFT em 6,5% e reduzir aproximadamente 29% da CgTT, quando comparado com o modelo sem isolamento e cobertura fria ($M_{SI0,75}$) que apresentou o pior desempenho. Em contrapartida, a utilização das telhas de alta refletância solar permitiu uma redução de até 6°C na temperatura de superfície do telhado e diminuiu as emissões de calor por radiação de ondas longas em até 47%.

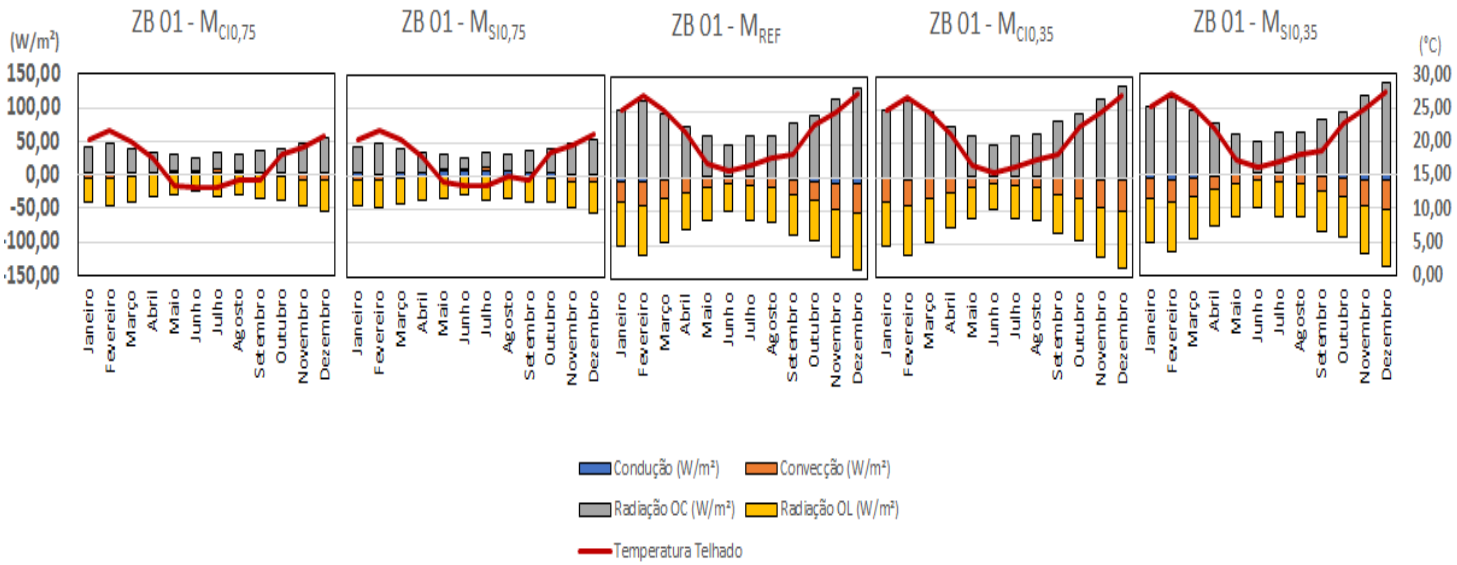

Figura 4 - Fluxo de calor e temperatura de superfície na ZB 01

4.2 Zona bioclimática 08 - Recife

De acordo com a Figura 5 e Figura 6, percebe-se que, na zona bioclimática 08, os cenários que adotaram a telha fria alcançaram os melhores resultados de PHFT e carga térmica. O $M_{SI0,75}$ atingiu o maior valor de PHFT com 46,1%, enquanto o $M_{REF-ZB08}$ obteve apenas 31,4%. O modelo que adotou a telha de baixa refletância solar e sem isolamento térmico ($M_{SI0,35}$) representou o pior desempenho, com 27,1% de PHFT.

Nota-se que o modelo $M_{SI0,75}$ chegou a reduzir 24,2% da carga térmica de resfriamento, enquanto no modelo $M_{SI0,35}$ ocorreu uma elevação de 12,3%, quando comparado com o modelo de referência ($M_{REF-ZB08}$).

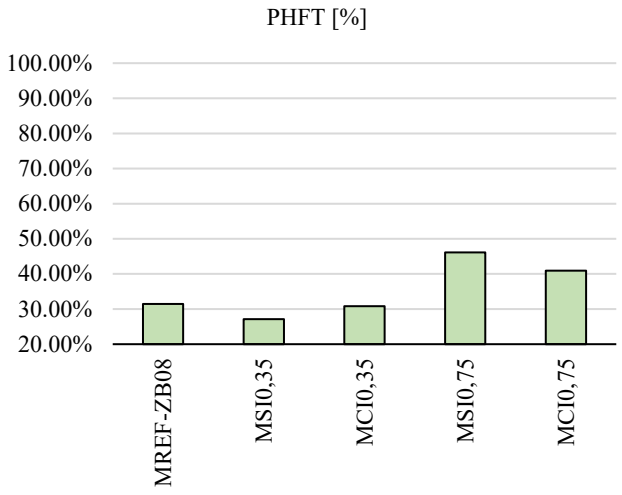

Figura 5 - Resultados do PHFT na ZB 08

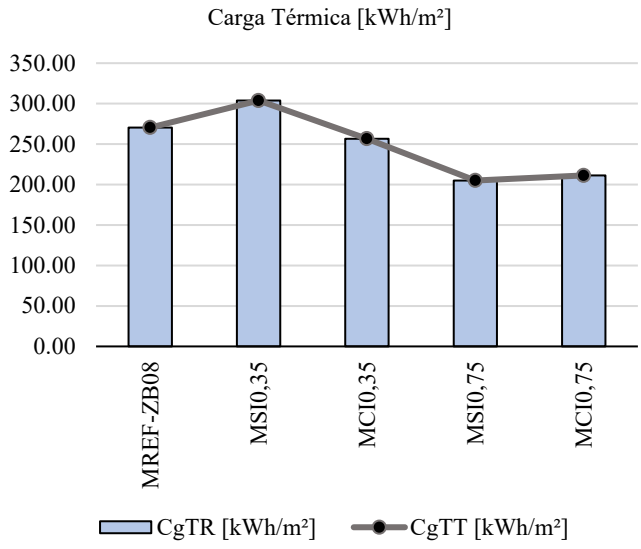

Figura 6 - Resultados das cargas térmicas na ZB 08

O mês de outubro apresentou o maior ganho de calor pela cobertura. Nos modelos que adotaram telha de baixa refletância solar ($M_{REF-ZB08}$, $M_{SI0,35}$ e $M_{CI0,35}$), esse valor foi igual a 166,7W/m² que foi transferido através da radiação de ondas curtas, por outro lado, os modelos que adotaram coberturas frias, conseguiram

reduzir bastante a transferência de calor por ondas curtas, com transferência de 65,7W/m², dos quais apenas 2% foi transferido por condução no modelo com isolamento térmico ($M_{CI0,35}$) e 4% no modelo sem isolamento térmico ($M_{SI0,35}$).

Ainda no mês de outubro observou-se a maior ocorrência de perdas de calor, de modo que, nos modelos $M_{REF-ZB08}$ e $M_{CI0,35}$, 62% da energia emitida para o meio externo foi através da radiação de ondas longas, 35% foi por meio de convecção e apenas 3% por condução. Já no modelo $M_{SI0,35}$, ocorre uma elevação na parcela transferida por condução, que atinge 7%, e as parcelas de convecção e radiação de ondas longas são de 31% e 61%, respectivamente.

Fevereiro registrou as maiores temperaturas de superfície nas coberturas, com 36,4°C para o modelo $M_{CI0,35}$ e 36,2°C para o $M_{REF-ZB08}$ e $M_{CI0,35}$. Nos modelos de cobertura fria, essa temperatura foi reduzida para 29,5°C no modelo $M_{SI0,75}$ e 29,0°C no modelo $M_{CI0,75}$.

Em junho, foi relatado o menor valor de ganho e emissão de calor, com apenas 93,6W/m², para os modelos que utilizaram telhas de baixa refletância solar, além disso, foi o mês que apresentou menor temperatura de superfície, com 29,9°C para os modelos $M_{REF-ZB08}$ e $M_{CI0,35}$ e 30,2°C para o modelo $M_{SI0,35}$. Nos modelos com telhas de alta refletância solar, o fluxo de calor perdido pela cobertura por meio da radiação de ondas longas foi de 35,7W/m² pelo modelo sem isolamento ($M_{SI0,75}$) e de 33,8W/m² para o modelo com isolamento térmico ($M_{CI0,75}$). A Figura 7 mostra os resultados encontrados de temperatura de superfície e fluxo de calor nas coberturas.

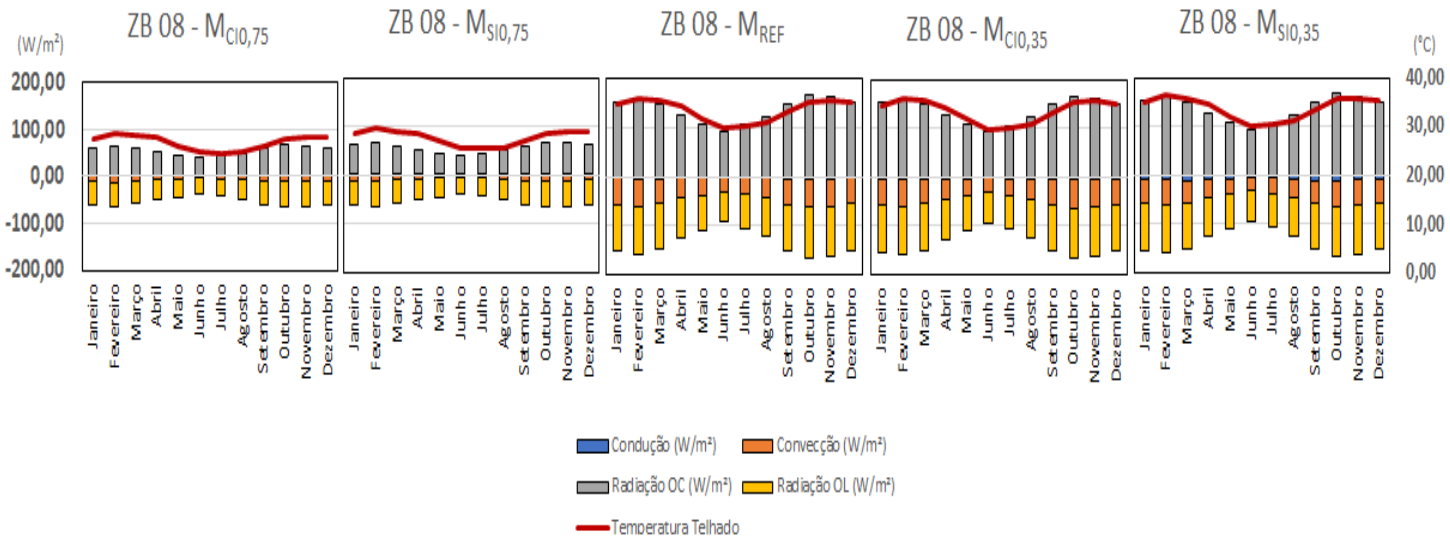

Figura 7 - Fluxo de calor e temperatura de superfície na ZB 08

Portanto, apenas substituindo as telhas naturais (baixa refletância solar) pelas frias (alta refletância solar) foi possível alcançar reduções de até 33% na CgTT, 49% nas emissões de calor por radiação de ondas longas e até 6,5 nas temperaturas da superfície externa do telhado, além de elevar o PHFT, que chegou a crescer até 19%.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo avaliar e comparar o comportamento termoenergético de coberturas com e sem isolamento térmico, de alta e baixa refletância solar, nas zonas bioclimáticas brasileiras 01 e 08, a fim de identificar a solução mais adequada para cada clima. Para tanto, foram realizadas simulações computacionais e através dos dados obtidos foi possível identificar, para cada zona bioclimática, qual tipologia de cobertura proporcionou melhores condições de conforto térmico (PHFT), menores gastos de energia para os sistemas de condicionamento de ar, além de exibir qual tipo de cobertura favorece a redução nas emissões de calor para o ambiente.

Em Curitiba, de clima frio (ZB 01), se observou que a presença de isolamento térmico causou maior impacto e foi responsável por proporcionar melhores índices de desempenho térmico e redução das cargas térmicas. Na zona bioclimática 01, onde as cidades apresentam invernos mais longos e verões curtos, a associação das telhas de baixa refletância solar com isolamento térmico ($M_{CI0,35}$) proporcionou a melhor condição de desempenho e redução das cargas térmicas, visto que a cobertura absorve mais calor durante o dia e o isolamento térmico resistivo dificulta a ocorrência de fuga de calor pela cobertura no período noturno.

Para Recife, de clima quente (ZB 08), a utilização de coberturas de alta refletância solar com baixo isolamento térmico ($M_{SI0,75}$) apresentou-se como a melhor opção estudada, pois torna possível que, durante o dia, a cobertura da edificação absorva menos calor em decorrência da alta refletância solar e, por apresentar menor isolamento térmico resistivo, facilita a ocorrência de fuga de calor pela cobertura no período noturno. Desse modo, foi possível observar que, para esse contexto climático, esta tipologia de cobertura auxilia na redução das cargas térmicas de resfriamento e elevação do PHFT.

Tanto em climas frios quanto nos quentes, as coberturas de alta refletância solar foram as principais responsáveis pela diminuição da temperatura superficial do telhado e redução na emissão de calor para o meio externo, que foram, em média, de 6°C e 47%, respectivamente.

Por fim, foi possível analisar interferência do isolamento térmico e das propriedades térmicas e ópticas de coberturas para diferentes cenários climáticos brasileiro, de modo a evidenciar a solução passiva que forneça as melhores condições de conforto térmico para os usuários da edificação, reduza o consumo de energia para os sistemas de condicionamento de ar e auxilie na mitigação de emissões de calor para o meio externo. Destaca-se, porém, que este artigo não realizou análise financeira para avaliar as economias financeiras em detrimento da redução de consumo de energia elétrica, bem como não foram analisados os efeitos de ofuscamento visual gerado pelas coberturas frias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANH, L. D. H.; PÁSZTORY, Z. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. Journal of Building Engineering. V. 44. 2021. ISSN 2352-7102. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102604>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 30 p.

_____. ABNT NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 98 p.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2001.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Ministério de Minas e Energia (org.). Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas). Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica. Acesso em: 25 set. 2022.

_____. Ministério de Minas e Energia (org.). Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020. Rio de Janeiro, 2021. 292 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021. Acesso em: 30 jul. 2022.

KUMAR, D.; ALAM, M.; ZOU, P. X. W.; SANJAYAN, J. G.; MEMON, R. A. Comparative analysis of building insulation material properties and performance. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 131. 2020. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>.

MAESTRI, Alexandre. AVALIAÇÃO DA REFLETÂNCIA SOLAR EM COBERTURAS NO CAMPUS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Florianópolis, 2017. 212 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

OLIVEIRA, Roberta Bastos de. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO DO SISTEMA DE VEDAÇÃO VERTICAL DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL PARA ATENDIMENTO DA ABNT NBR 15575:2013. Uberlândia, 2017. 71p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

PEREIRA, Cláudia Donald. INFLUÊNCIA DA REFLETÂNCIA E DA EMITÂNCIA DE SUPERFÍCIES EXTERNAS NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES. Florinópolis, 2014. 185 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florinópolis, 2014.

PISELLI, Cristina et al. Optimization of roof solar reflectance under different climate conditions, occupancy, building configuration and energy systems. Energy and Buildings, v. 151, p. 81–97, 2017.

ROLIM, Cristiane Sonego. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE CUSTOS RELACIONADA AO DESEMPENHO TÉRMICO DE DIFERENTES ALVENARIAS EM FACE DA NORMA BRASILEIRA 15.575. Ijuí, 2015. 84 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2015.

SOARES, Renan Gustavo Pacheco, et al. Comparison of methodologies for determining the thermal performance of houses with a concrete wall-type structural system. Research, Society And Development, v. 10, p. 01-16, 2021.

TESTA, Jenna; KRARTI, Moncef. A review of benefits and limitations of static and switchable cool roof systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 77, p. 451–460, 2017.