ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Comportamento termoenergético de edificação unifamiliar com uso de tetos frios: Estudo de caso na cidade de Recife/PE

Thermoenergetic behavior of single-family building with the use of cool roofs: Case study in the city of Recife/PE

Matheus Mendonça Barbosa
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | matheusmendonca.b@gmail.com
Deivis Luis Marinoski
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | deivis.marinoski@ufsc.br

Resumo

Este artigo tem como objetivo analisar os impactos termoenergéticos gerados pelo uso de tetos frios em cobertura de edificação unifamiliar de baixa renda em Recife/PE. Os modelos computacionais abrangem cenários que envolvem o uso do teto frio (absortância solar de 0,25), teto frio degradado (absortância solar de 0,42) e teto padrão (absortância solar de 0,65) e contemplam variações no perfil de ocupação, comportamento do usuário e isolamento do sistema de cobertura. Os resultados apontaram que os tetos frios com baixo isolamento apresentam indicadores mais eficientes quanto ao comportamento termoenergético, impactando no aprimoramento do desempenho térmico da unidade habitacional, bem como reduções fluxo de calor liberado por radiação de ondas longas e do consumo energético. Conclui-se que os tetos frios são alternativas eficazes para edificações unifamiliares situadas no contexto climático de Recife/PE.

Palavras-chave: Tetos frios. Desempenho termoenergético. Edificações residenciais.

Abstract

This article aims to analyze the thermoenergetic impacts generated by the use of cold roofs in low-income single-family buildings in Recife/PE, Brazil. Computational models encompass scenarios involving the use of cold roofs (solar absorptance of 0.25), degraded cold roofs (solar absorptance of 0.42) and standard roofs (solar absorptance of 0.65), and consider variations in occupancy profile, user behavior, and roof system insulation. The results indicated that cold roofs with low insulation exhibit more efficient indicators regarding thermoenergetic behavior, impacting the improvement of thermal performance of the housing unit, as well as reductions in the flow of heat released by long-wave radiation and energy consumption. It is concluded that cold roofs are effective alternatives for single-family buildings situated in the climatic context of Recife/PE, Brazil.

Keywords: Cool roofs. Thermoenergetic performance. Residential buildings.

Como citar:
BARBOSA, M. M; MARINOSKI, D. L. Comportamento termoenergético de edificação unifamiliar com uso de tetos frios: Estudo de caso na cidade de Recife/PE. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, o setor de edificações demanda uma parcela significativa no consumo de energia. Em 2020, o setor de edificações foi responsável por cerca de 30% do consumo energético mundial [1]. Esse dado evidencia o potencial considerável para a mitigação no consumo de energia neste setor. A análise de envoltória, por sua vez, permite investigar o ambiente térmico das edificações e identificar soluções mitigadoras para o consumo de energia destinado à refrigeração e aquecimento [2].

Em regiões de climas quentes com alta incidência de radiação solar ao longo do ano, os tetos frios surgem como uma solução passiva, de baixo custo de manutenção e implementação [3]. Os tetos frios são superfícies que dispõem de alta refletância solar e emitância térmica [4 e 5]. Essas superfícies proporcionam benefícios que estão associados à redução da temperatura superficial em comparação com os telhados convencionais, resultando em menor transferência de calor na edificação e menor transferência de calor por ondas longas ao ambiente externo [6].

Especialmente em unidades nas quais as coberturas exercem influência significativa nas trocas de calor, os tetos frios podem ser utilizados como estratégias passivas para otimizar o ambiente térmico [4, 5 e 7]. Nesse contexto, pessoas em condições de vulnerabilidade econômica podem se beneficiar desse sistema, pois ajudam a manter temperaturas mais baixas na superfície da cobertura, resultando em melhores condições de conforto térmico, desempenho térmico e redução da necessidade de refrigeração. Além das implicações financeiras relacionadas à redução da demanda de energia para refrigeração, a adoção dos tetos frios também promove a sustentabilidade ambiental [4, 5, 8, 9 e 10].

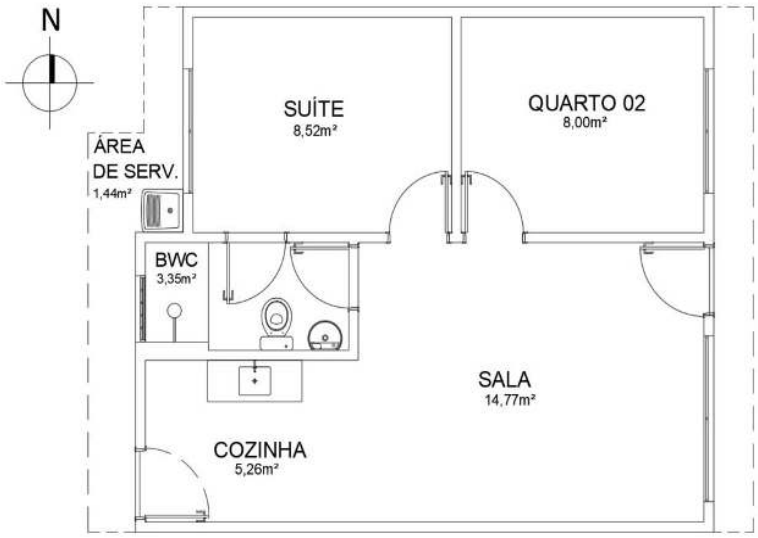
A literatura reconhece os tetos frios como uma solução eficaz para coberturas em diversos contextos climáticos [4, 6, 11, 12, 13 e 14], no entanto há uma carência de estudos específicos para a região nordeste do Brasil. Isto posto, este artigo tem como objetivo analisar, através de simulação computacional, os impactos termoenergéticos proporcionados pelo uso de tetos frios em cobertura de edificação unifamiliar situada na cidade de Recife, Pernambuco, Brasil.

MÉTODO

ASPECTOS DA EDIFICAÇÃO E PADRÃO DE MODELAGEM

O projeto adotado integra o Programa Nacional de Habitação de Interesse Social (Minha Casa, Minha Vida - MCMV). A edificação escolhida é do tipo unifamiliar térrea, com área de 46,3m². O modelo computacional foi concebido conforme o projeto arquitetônico, bem como norte geográfico correspondente, representado pela Figura 1.

Figura 1 – Representação do projeto arquitetônico da unidade unifamiliar e modelagem



Fonte: o autor.

A simulação computacional foi realizada utilizando o EnergyPlus (versão 22.2.0) [15], amplamente utilizado em pesquisas brasileiras [16]. Segundo New *et al.* [17], o modelo de cálculo do EnergyPlus é adequado para análise de tetos frios.

O padrão utilizado de arquivo climático para a cidade de Recife/PE segue preconização da NBR 15575-1-1/2021 [18], empregando dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para os anos de 2001 a 2010, processados por Maurício Roriz.

As configurações de modelagem assumidas como parâmetros de entrada no EnergyPlus estão em conformidade com o método computacional de avaliação de desempenho térmico de edificações residenciais, segundo a NBR 15575-1/2024 [19]. Dessa forma, o padrão de modelagem utilizado na composição dos sistemas construtivos, exceto o sistema de cobertura, admitiu os sistemas indicados no modelo de referência (MREF), conforme Figura 2. Além disso, as cargas internas, padrões de uso e ocupação, condicionamento de ar e disposições sobre ventilação natural também seguiram o método preconizado pela da NBR 15575-1/2024 [19]. A modelagem do solo no EnergyPlus foi estabelecida usando o objeto Site:GroundDomain:Slab por meio do método Finite Difference [20].

Tabela 1 - Taxa metabólica e fração radiante dos ocupantes

Ambiente	**Atividade Realizada**	**Calor produzido por área de superfície corporal** W/m²	**Calor produzido por uma pessoa com 1,80m² de área de superfície corporal** W	**Fração radiante**
Dormitório	Dormindo ou descansando	45	81	0,3
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,3

Fonte: adaptado de NBR 15575-1/2024 [19].

Tabela 2 - Densidade de potência instalada (DPI), fração radiante e visível para o sistema de iluminação

Ambiente	DPI W/m²	Fração radiante	Fração visível
Dormitório	5,00	0,32	0,23
Sala	5,00	0,32	0,23

Fonte: adaptado de NBR 15575-1/2024 [19].

Tabela 3 - Potência e fração radiante dos equipamentos

Ambiente	Potência W	Fração radiante
Sala	120	0,30

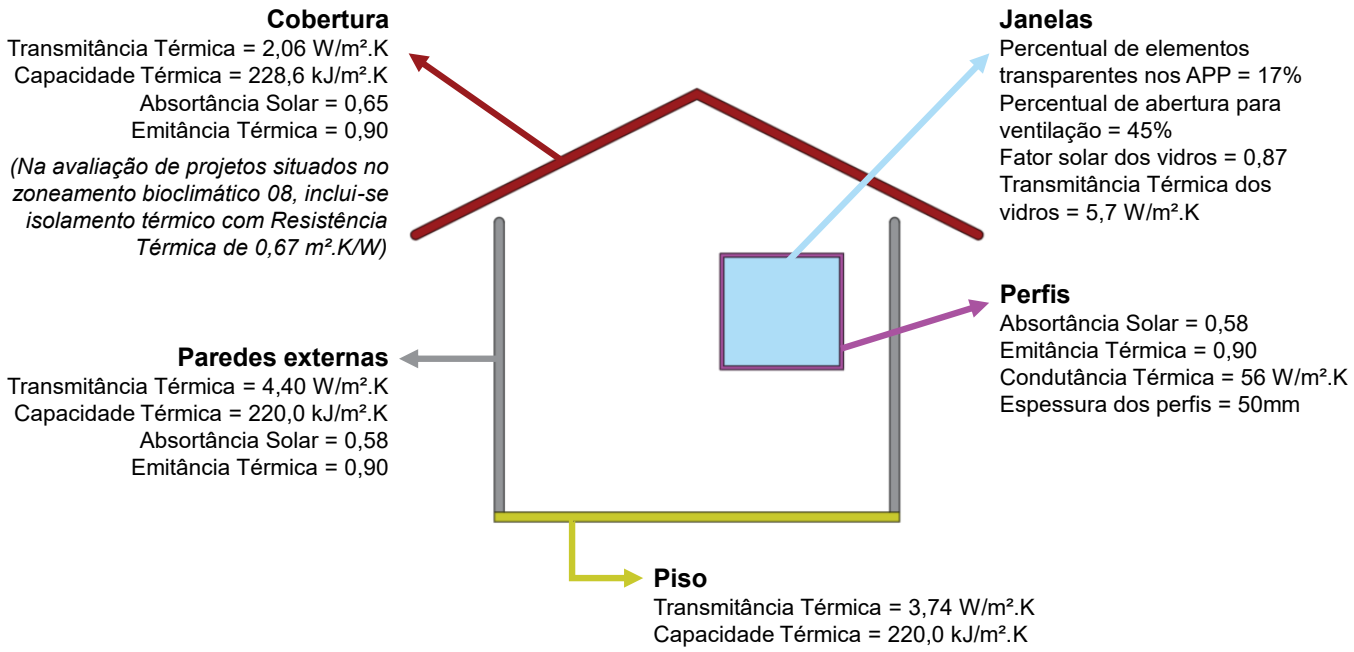
Fonte: adaptado de NBR 15575-1/2024 [19].

Tabela 4 - Parâmetros de entrada adotados no objeto Ground Domain

Profundidade [m]	10,0
Razão dimensional	1,0
Offset do perímetro [m]	5,0
Condutividade térmica do solo [W/m.K]	1,0
Densidade do solo [kg/m³]	1250,0
Calor específico do solo [J/kg.K]	1200,0
Teor de umidade do solo por fração de volume [%]	30,0
Teor de umidade do solo por fração de volume saturado [%]	50,0
Evapotranspiração da cobertura do solo	0,4
Coeficiente da malha geométrica	1,6
Densidade da malha	6,0

Fonte: o autor.

Figura 2 – Características do modelo computacional de referência (MREF)



Fonte: o autor.

CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, serão descritos os cenários com alterações aplicadas no modelo padrão de modelagem.

1. COBERTURA

Foram estabelecidos seis cenários de análise do sistema de cobertura (Tabela 6) que se distinguem pela magnitude das propriedades de absortância solar, transmitância térmica e resistência térmica. As abreviaturas utilizadas para intepretação do sistema de cobertura avaliado indicam a especificação do tipo de telhado estudado, sendo teto frio ($TF_{\alpha=0,25}$), teto frio degradado ($TD_{\alpha=0,42}$) ou teto padrão ($TP_{\alpha=0,65}$), acompanhando da resistência térmica (RT) e sua magnitude respectiva. Os valores de capacidade térmica permaneceram inalterados.

A absortância solar do teto frio foi definida como 0,25, tal escolha está em conformidade com as referências encontradas na literatura [3, 5, 6 e 11]. Em contrapartida, a absortância solar do teto padrão corresponde à absortância solar indicada no modelo de referência (Figura 2) para a avaliação do desempenho térmico no método da NBR 15575-1/2024 [19], que equivale a 0,65.

Para a determinação da absortância solar do teto frio degradado, foram consideradas as diretrizes da norma NBR 15575-1/2024 [19]. Portanto, o valor adotado de absortância solar para o teto frio degradado foi de 0,42 (Tabela 5).

Tabela 5 – Estimativa de degradação da absortância solar e Índice de Refletância Solar (SRI) para o teto frio

Material	Absortância solar (α)	Índice de Refletância Solar (SRI)		
		h_c=5 W/m².K	h_c=12 W/m².K	h_c=30 W/m².K
Teto Frio	0,25	92,3	92,5	92,6
Teto Frio Degradado (NBR 15575-1/2024)	0,42	68,9	69,2	69,5

Fonte: o autor.

Tabela 6 – Cenários e propriedades térmicas das diferentes coberturas analisadas (continua)

Cobertura	Composição	Transmitância Térmica W/m².K	Resistência Térmica m².K/W	Capacidade Térmica kJ/m².K	Emitância Térmica	Absortância solar (α)
$TF_{\alpha=0,25}$_RT_0,5	Telha de fibrocimento (0,006m) Câmara de ar (>0,05m) Laje maciça (0,10m)	2,06	0,49	228,6	0,90	0,25
$TD_{\alpha=0,42}$_RT-0,5						0,42
$TP_{\alpha=0,65}$_RT-0,5						0,65
$TF_{\alpha=0,25}$_RT_1	Telha de fibrocimento (0,006m) Câmara de ar (>0,05m) Isolamento Térmico (0,51m².K/W) Laje maciça (0,10m)	1,00	1,00	228,6	0,90	0,25
$TD_{\alpha=0,42}$_RT-1						0,42
$TP_{\alpha=0,65}$_RT-1						0,65

Fonte: o autor.

Tabela 6 (conclusão)

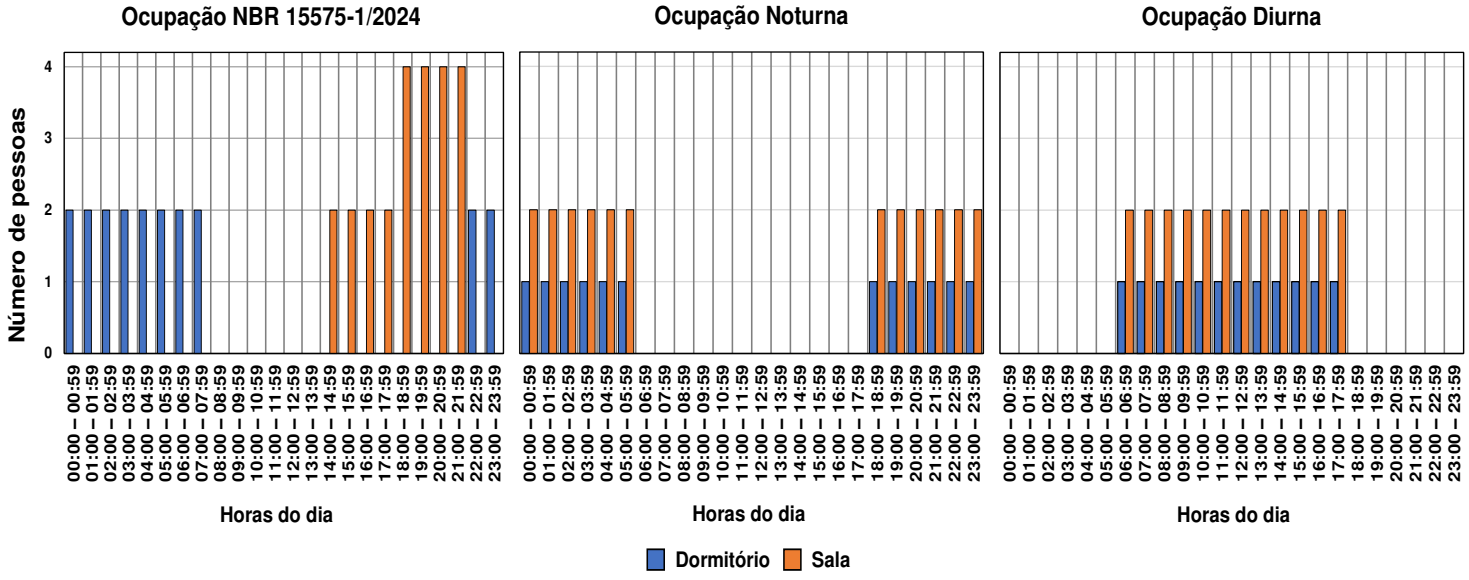
Cobertura	Composição	Transmitância Térmica W/m².K	Resistência Térmica m².K/W	Capacidade Térmica kJ/m².K	Emitância Térmica	Absortância solar (α)
$TF_{\alpha=0,25}$_RT_3	Telha de fibrocimento (0,006m)	0,33	3,00	228,6	0,90	0,25
$TD_{\alpha=0,42}$_RT-3	Câmara de ar (>0,05m) Isolamento Térmico (2,51m².K/W) Laje maciça (0,10m)					0,42
$TP_{\alpha=0,65}$_RT-3						0,65
$TF_{\alpha=0,25}$_RT_6	Telha de fibrocimento (0,006m)	0,17	6,00	228,6	0,90	0,25
$TD_{\alpha=0,42}$_RT-6	Câmara de ar (>0,05m) Isolamento Térmico (5,51m².K/W) Laje maciça (0,10m)					0,42
$TP_{\alpha=0,65}$_RT-6						0,65

Fonte: o autor.

2. *USO E OCUPAÇÃO*

Com o intuito de analisar o desempenho energético dos tetos frios em diferentes perfis de ocupação, admitiu-se três condições de ocupação: a primeira, conforme a 15575-1/2024 [19], tem dois ocupantes por dormitório das 22h00 às 07h59, e a sala com duas pessoas das 14h00 às 17h59 e quatro pessoas das 18h00 às 21h59. Na segunda condição, noturna, dois ocupantes estão presentes das 18h00 às 05h59. Na terceira, diurna, a ocupação ocorre das 06h00 às 17h59. Nas duas últimas, a sala tem dois ocupantes e cada dormitório, um. A Figura 3 ilustra os diferentes cenários de ocupação analisados.

Figura 3 – Perfis de ocupação adotados nas simulações.



Fonte: o autor.

3. *CARGAS INTERNAS*

Os horários de atividade das cargas internas foram programados para coincidir com os períodos de ocupação nos ambientes, conforme estabelecido na Figura 3. Contudo,

ressalta-se que os períodos de acionamento da iluminação apresentaram variações em relação ao padrão de ocupação estabelecido na Figura 3, conforme detalhado a seguir:

- Ocupação conforme NBR 15575-1/2024 [19]: iluminação dos dormitórios acionada das 06h00 às 07h59 e das 22h00 às 23h59; iluminação das salas foi ativada das 16h00 às 21h59;
- Período noturno de simulação: iluminação acionada das 18h00 às 23h59;
- Período diurno de simulação: iluminação acionada das 06h00 às 07h59 e das 16h00 às 17h59.

4. *VENTILAÇÃO NATURAL E CONDICIONAMENTO DE AR*

Considerou-se três condições de simulação: com ventilação natural (1), condicionamento de ar em regime híbrido (2) e contínuo (3). Em todas as condições, os sistemas foram acionados durante os períodos de ocupação nos ambientes de permanência prolongada (APP). A modelagem da ventilação natural e do condicionamento de ar em regime híbrido seguiu o estabelecido na NBR 15575-1/2024 [19], incluindo o somatório anual dos valores de carga térmica para os horários em que a temperatura operativa do APP, no modelo com ventilação natural, fosse igual ou superior a 28°C.

As simulações no cenário com atividade contínua do sistema de condicionamento de ar nos APP seguiram as diretrizes da NBR 15575-1/2024 [19]. No entanto, o acionamento do sistema perdura por todo o período de ocupação, sem considerar uma contribuição do modelo ventilado naturalmente na carga térmica.

Tabela 7 - Descrição dos parâmetros da ventilação natural para portas e janelas nos APP e nos ambientes de permanência transitória

Parâmetros	Portas	Janelas
Coeficiente de fluxo de ar por frestas, quando a abertura está fechada [kg/s.m]	0,0024	0,00063
Expoente de fluxo de ar por frestas quando a abertura está fechada [adimensional]	0,59	0,63
Coeficiente de descarga da abertura [adimensional]	0,60	0,60

Fonte: adaptado de NBR 15575-1/2024 [19].

PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

Os parâmetros adotados para avaliar os resultados englobaram três aspectos: análise do desempenho térmico, análise energética e análise do fluxo de calor.

A análise do desempenho térmico seguiu o procedimento computacional de avaliação estabelecido na NBR 15575-1/2024 [19]. Este procedimento requer a consideração de dois modos de operação distintos: com e sem ventilação natural. Os modelos com ventilação natural possibilitam uma análise do impacto de estratégias passivas nas unidades habitacionais. Os modelos de simulação sem ventilação natural são simulados com o intuito de determinar a carga térmica anual integrada da unidade habitacional. Nesse sentido, foram utilizados três parâmetros de avaliação: as

temperaturas operativas máximas anuais da unidade habitacional, o $PHFT_{UH}$ (percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa para a unidade habitacional) e a carga térmica anual integrada da unidade habitacional.

A análise energética baseou-se na carga térmica da unidade habitacional. Os valores de carga térmica ideal foram convertidos em consumo de energia elétrica segundo a INI-R [21], através da divisão da carga térmica (de aquecimento ou resfriamento) pelo respectivo Coeficiente de Eficiência Energética (CEE). Os CEE's foram determinados com base nos valores de referência da INI-R [21] e no CSPF (Cooling Seasonal Performance Factor), adaptado para Recife/PE, utilizando dados do INMET. O CSPF foi calculado com base no índice PET (Physiological Equivalent Temperature) de um ar-condicionado split inverter, disponibilizado pelo INMETRO [22]. De acordo com a NBR 15575-1/2024 [19], a determinação de carga térmica de aquecimento para a cidade de Recife/PE não é aplicável. Portanto, para o cálculo do consumo, utilizou-se apenas o CEE_R (Coeficiente de Eficiência Energética de Resfriamento). A Tabela 8 e Tabela 9 informam, respectivamente, os dados relativos ao equipamento de ar-condicionado utilizado para o cálculo do CSPF e o coeficiente CEE_R admitido para o cálculo do consumo energético de refrigeração.

Tabela 8 – Dados PET

Carga Total (100%) em 35°C W		**Carga Parcial (50%) em 35°C** W		**Carga Parcial (50%) em 29°C** W		**Carga Total (100%) em 29°C** W		**IDRS** Wh/Wh
Capacidade Total	**Consumo Total**	**Capacidade Parcial**	**Consumo Parcial**	**Capacidade Parcial**	**Consumo Parcial**	**Capacidade Parcial**	**Consumo Parcial**	
3.517	1.340	1.758	400	1.758	284	-	-	6,00

Fonte: INMETRO [22].

Tabela 9 – Coeficiente CEE_R

Cidade	$\mathbf{CEE_R}$				
	Referência INI-R	**CSPF**			
		NBR Dormitório	**NBR Sala**	**Diurno**	**Noturno**
Recife/PE	3,50	7,76	6,41	6,38	7,88

Fonte: o autor.

A análise do fluxo de calor foi realizada na face externa do sistema de cobertura com ênfase nos fluxos radiativos de ondas longas. O output adotado é listado no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetro de saída para determinação do fluxo de calor

Output	**Descrição**
Surface Outside Face Net Thermal Radiation Heat Gain Rate per Area	Descreve o balanço de **ondas longas** entre as trocas de calor por unidade de área [W/m²] entre a superfície e o ambiente externo

Fonte: o autor.

ANÁLISE DE RESULTADOS

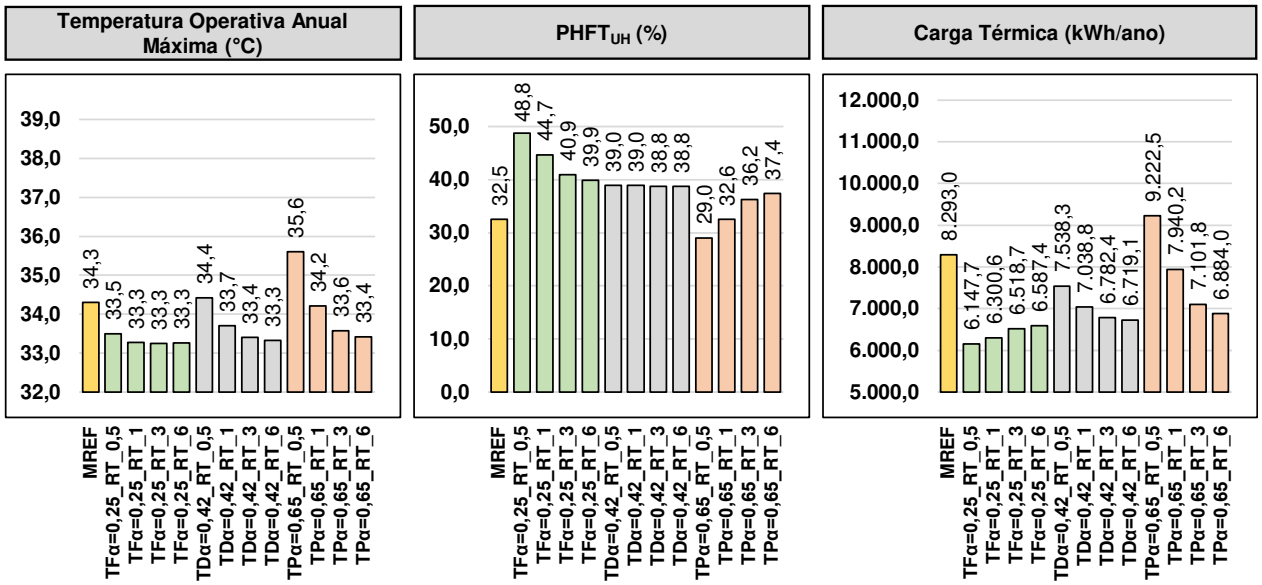
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

Os resultados de temperatura máxima anual, $PHFT_{UH}$ e carga térmica de refrigeração estão representados na Figura 4. Devido ao zoneamento bioclimático da cidade de Recife/PE, não foram avaliadas as temperaturas mínimas anuais.

As maiores influências na temperatura operativa anual máxima foram encontradas quando comparado a cobertura de baixa absortância ($TF_{\alpha=0,25}$_RT_0,5) com a cobertura de absortância padrão ($TP_{\alpha=0,65}$_RT_0,5), chegando a variações de 2,1°C. Considerando o teto frio degradado, identifica-se aumento de 0,9°C na temperatura operativa anual máxima. Quanto ao $PHFT_{UH}$, identifica-se o padrão de que os tetos com maiores absortâncias solares implicam em menores valores do $PHFT_{UH}$. O maior $PHFT_{UH}$ foi encontrado na simulação que adotou o sistema de tetos frios ($TF_{\alpha=0,25}$_RT_0,5), atingindo 48,8%. A configuração dos tetos com menores absortâncias solares apresentou uma influência direta e valores mais baixos de cargas térmicas.

Embora sejam evidentes os impactos da absortância solar nos indicadores de desempenho térmico, percebe-se que a influência da absortância solar na otimização de tais indicadores decai à medida que a resistência térmica do sistema aumenta. Em todos os cenários, é possível identificar uma tendência de aproximação dos resultados entre os diferentes tipos de tetos quando há aumento da resistência térmica, especialmente nos sistemas com resistência térmica de 6,0m².K/W.

Figura 4 – Resultados obtidos para os parâmetros de avaliação do desempenho térmico



Fonte: o autor.

A investigação do nível de desempenho térmico foi realizada para todos os tetos propostos (Quadro 2). Exceto a proposição do teto padrão ($TP_{\alpha=0,65}$_RT_0,5) cujo parâmetro de $PHFT_{UH}$ foi inferior a 90% do modelo de referência, os demais cenários atenderam ao nível mínimo de desempenho térmico.

Quadro 2 - Atendimento à norma de desempenho térmico

Cidade	Teto Frio ($TF_{\alpha=0,25}$) α=0,25				Teto Frio Degradado ($TD_{\alpha=0,42}$) α=0,42				Teto Padrão ($TP_{\alpha=0,65}$) α=0,65			
	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6	RT_0,5	RT_1	RT_3	RT_6
Recife/PE	M	M	M	M	M	M	M	M	NA	M	M	M

Notas:
M significa que a unidade habitacional atende ao nível mínimo de desempenho térmico;
NA significa que a unidade habitacional não atende ao nível mínimo de desempenho térmico.

Fonte: o autor.

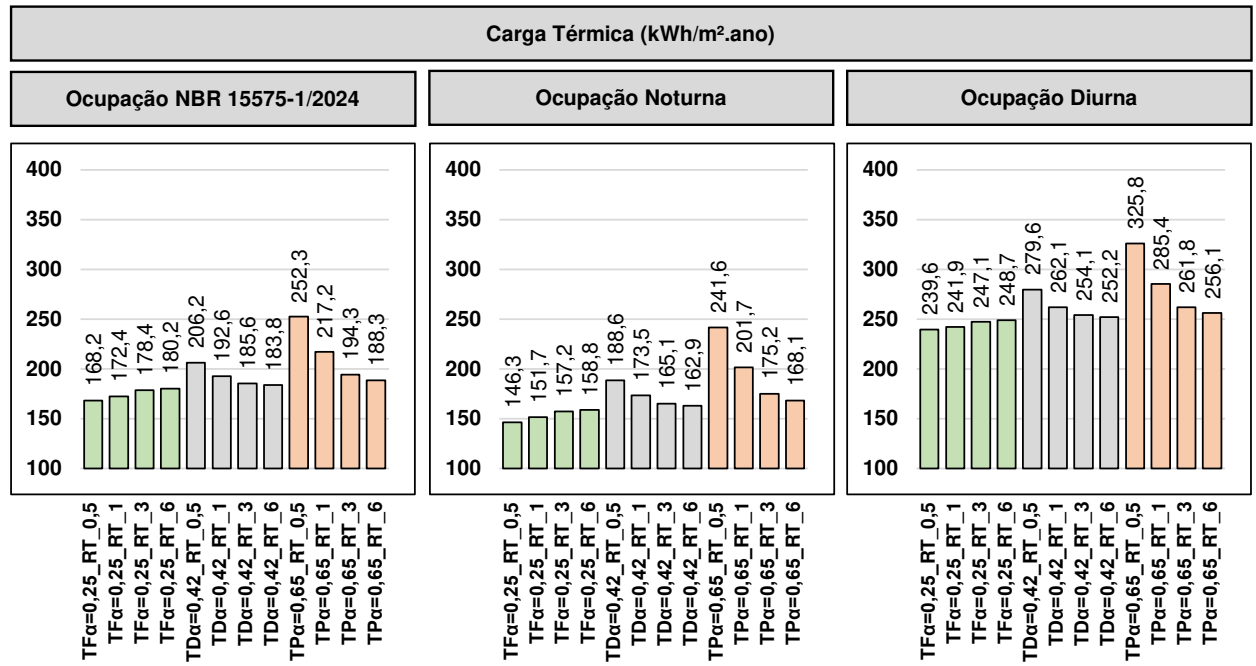
Nenhum cenário atendeu em nível intermediário, bem como nível superior. O cenário mais eficiente adotou o uso tetos frios ($TF_{\alpha=0,25}$_RT_0,5) e representou redução de carga térmica total de 25,9% em relação ao MREF.

Em contrapartida aos tetos frios, os cenários mais eficientes que adotaram o uso do teto frio degradado e teto padrão foram encontrados nos sistemas com resistência térmica de 6,0m².K/W. Destaca-se que os cenários menos eficientes foram encontrados nas simulações do teto padrão com resistência térmica do sistema de 0,49m².K/W ($TP_{\alpha=0,65}$_RT_0,5), sendo observado aumento na carga térmica total de 11,2% em relação ao MREF.

AVALIAÇÃO DA OCUPAÇÃO NO INCREMENTO DA CARGA TÉRMICA

A partir da Figura 5, expõe-se os resultados da análise da ocupação na quantidade de carga térmica frente aos perfis de uso e ocupação, conforme o padrão da NBR 15575-1/2024 [19], padrão noturno e padrão diurno. Nesta seção, não é abordada uma análise de desempenho térmico; por essa razão, os resultados apresentados na Figura 5 não incluem dados relativos ao modelo de referência (MREF).

Figura 5 - Resultados obtidos de carga térmica para cada perfil de ocupação adotado



Fonte: o autor.

Verifica-se que os padrões de uso atuam de maneira relevante no incremento de carga térmica. Como esperado, as simulações que consideram o período diurno indicaram as maiores magnitudes de carga térmica, enquanto os cenários de simulações conforme a ocupação NBR 15575-1/2024 [19] e ocupação noturna indicaram menores incrementos na carga térmica. Percebe-se que os tetos frios apresentaram a melhor performance energética para os três cenários de ocupação.

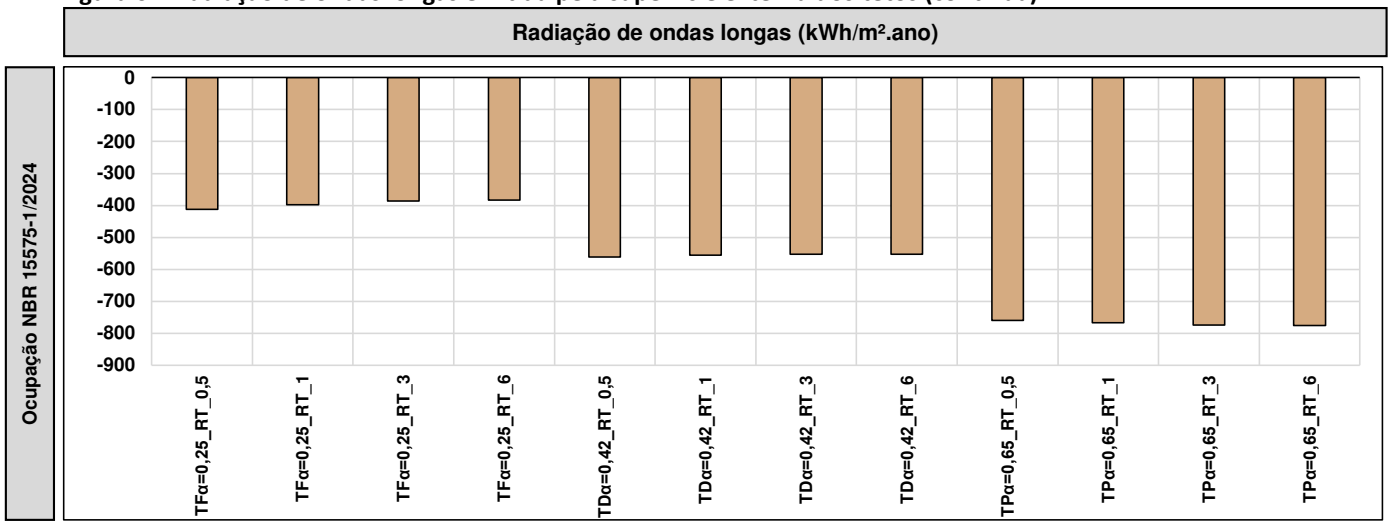
As ampliações da carga térmica oscilaram de acordo com a absortância solar e resistência térmica dos tetos. Comparando os perfis diurnos e noturnos da NBR 15575-1/2024 [19], os incrementos percentuais nas simulações diurnas variam de 29,1% a 42,4%. Entre os perfis diurnos e noturnos, os incrementos percentuais nas simulações diurnas variam de 34,9% a 63,8%. Os maiores aumentos ocorrem nas proposições de tetos frios (α=0,25), enquanto os menores ocorrem nos cenários que consideram teto padrão (α=0,65).

FLUXO DE CALOR

A análise do fluxo de calor levou em consideração todos os ambientes da edificação, nas condições do modelo naturalmente ventilado.

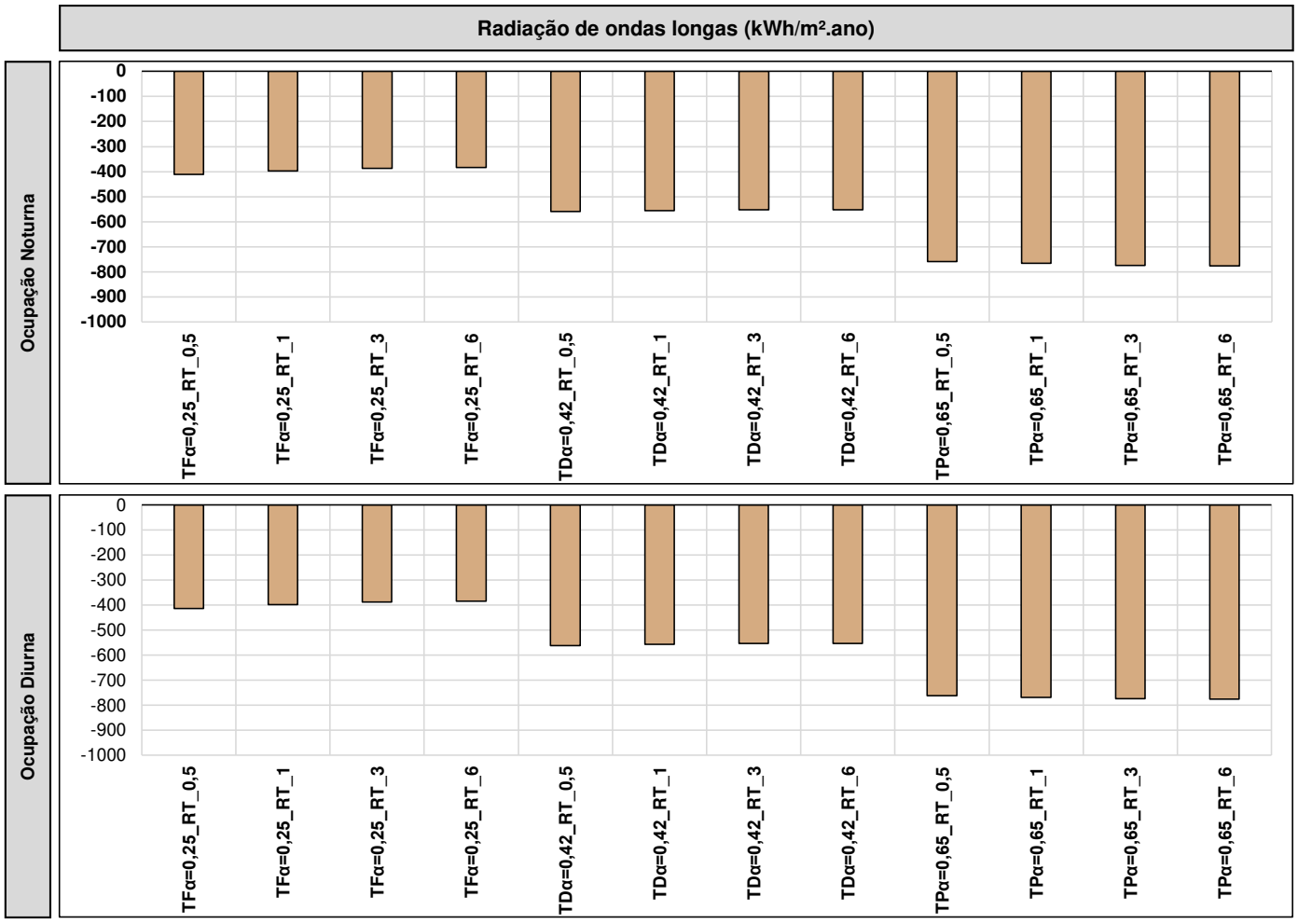
A Figura 6 indica os fluxos radiativos de ondas longas relativos à face externa do sistema de cobertura. Valores positivos apontam que o sentido do fluxo de calor está em direção à superfície avaliada enquanto os valores negativos indicam que a transferência de calor ocorre da superfície para o meio. Conforme observado, os modelos que adotam os tetos frios (α=0,25) implicam em menor liberação de calor proveniente de ondas longas. Dada a homogeneidade do tipo de telha e a emitância térmica constante, percebe-se que a absortância solar exerce uma influência significativa na temperatura superficial das telhas. Com o aumento da absortância solar, a temperatura superficial das telhas também aumenta e, por consequência, resulta em um aumento das taxas de emissões por radiação de ondas longas.

Figura 6 – Radiação de ondas longas emitida pela superfície externa dos tetos (continua)



Fonte: o autor.

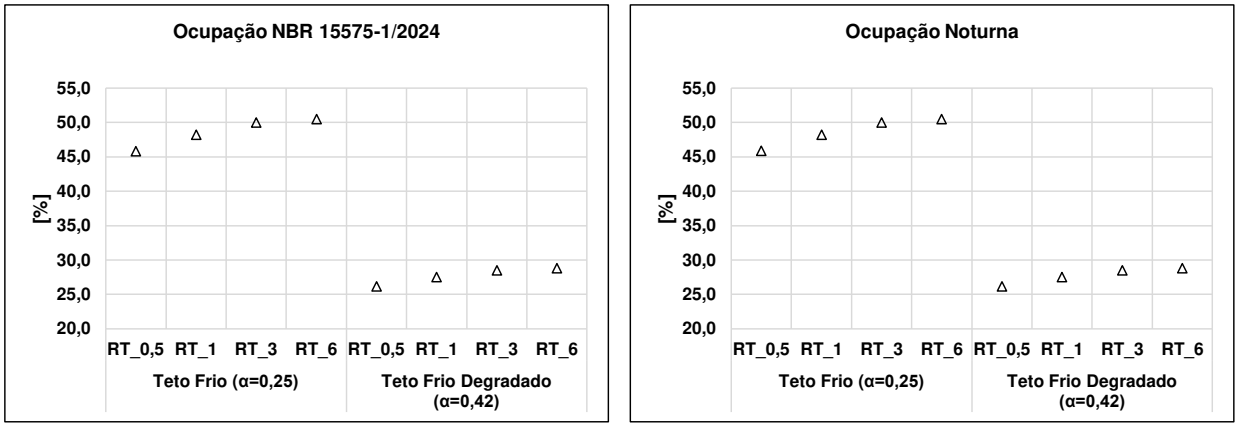
Figura 6 (conclusão)



Fonte: o autor.

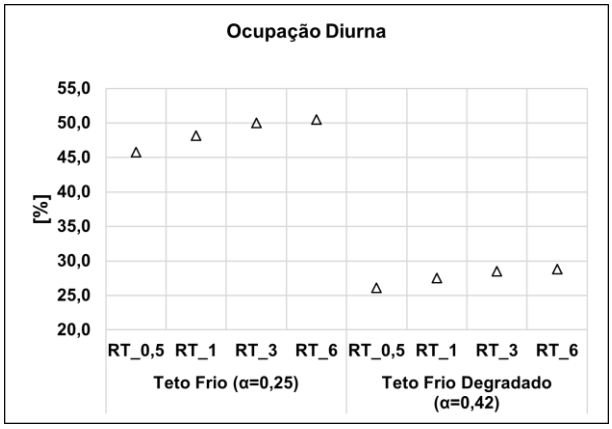
A Figura 7 evidencia as reduções obtidas na emissão de radiação de ondas longas ao comparar tetos frios (α=0,25) e degradados (α=0,42) com o teto padrão (α=0,65). Essa comparação foi realizada para proposições de tetos com mesma resistência térmica.

Figura 7 – Redução na liberação de calor por radiação de ondas longas (continua)



Fonte: o autor.

Figura 7 (conclusão)



Fonte: o autor.

Assim sendo, por interferência da absortância solar, em todos os cenários de ocupação avaliados, verifica-se que os tetos frios (α=0,25) podem auxiliar na redução percentual da emissão de radiação de ondas longas entre 43,0% e 46,0%. Neste mesmo sentido, os tetos frios degradados (α=0,42) também levam à menor emissão de radiação de ondas longas, variando entre 26,0% e 29,0%. Também são observadas pequenas variações ao aumentar a resistência térmica (RT_1, RT_3 e RT_6), as quais acarretam reduções na liberação de calor.

CONCLUSÕES

Os dados apresentados neste artigo permitiram identificar a influência exercida pela taxa de absortância solar das telhas nos parâmetros de desempenho térmico, nos valores de carga térmica, bem como nas taxas de fluxo de calor por ondas longas.

Em todos os resultados, não foram identificados cenários nos quais o desempenho do teto frio fosse inferior ao do teto padrão. Para tanto, a eficácia dos tetos frios está associada a sistemas de coberturas com baixo isolamento térmico.

Na avaliação do desempenho térmico, os resultados indicaram que o uso de tetos frios melhora o ambiente térmico da unidade habitacional.

Os diferentes perfis de ocupação evidenciaram a relevância que a especificação de um perfil típico detém no que se refere ao incremento de carga térmica. As proposições de tetos frios, independentemente do perfil de uso e ocupação, representaram os cenários de menor demanda de carga térmica.

Comparado ao sistema de teto padrão, a implementação de tetos frios tem a capacidade de reduzir os fluxos de calor liberados por radiação de ondas longas entre 45% e 50%, sendo estes valores sujeitos ao perfil de uso e ocupação e resistência térmica.

Em contrapartida, é importante destacar que manter baixas taxas de absortância solar é um desafio, pois requer uma manutenção mais intensiva, acarretando uma maior

demanda por limpezas mais frequentes ou na necessidade de desenvolver materiais que possam manter essas taxas por períodos mais longos e com menos necessidade de manutenção. No entanto, os resultados obtidos para os tetos frios degradados demonstraram que, mesmo em condições de degradação, esses tetos ainda apresentam resultados mais eficientes quando comparados ao sistema de teto padrão.

Por fim, esta pesquisa demonstra que os tetos frios otimizam a eficiência termoenergética e mitigam impactos ambientais em habitações unifamiliares, especialmente em regiões quentes como Recife/PE. Em contextos em que a demanda por aquecimento e isolamento térmico da cobertura é mínima, apresentam-se como uma alternativa eficaz para melhorar o desempenho térmico de moradias unifamiliares.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelos recursos financeiros aplicados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Balances, 2022. Disponível em: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances. Acesso em 05 jan. 2023.

[2] LEI, J.; YANG, J.; YANG, E. Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore. Applied Energy. v. 162, p. 207-217, 2016. ISSN 0306-2619. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.031.

[3] SPROUL, J.; WAN, M. P.; MANDEL, B. H.; ROSENFELD, A. H. Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. Energy and Buildings. v. 71, p. 20-27. 2014. ISSN 0378-7788. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.058.

[4] RAWAT, M.; SINGH, R. N. A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions. Energy and Built Environment. v. 3, p. 327-347. 2022. ISSN 2666-1233. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.03.001.

[5] TESTA, J.; KRARTI, M. A review of benefits and limitations of static and switchable cool roof systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 77, p. 451-460. 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.030.

[6] COSTANZO, V.; EVOLA, G.; MARLETTA, L. Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. Energy and Buildings. v. 114, p. 247-255, 2016. ISSN 0378-7788. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.053.

[7] SEIFHASHEMI, M.; CAPRA, B. R.; MILLLER, W.; BELL J. The potential for cool roofs to improve the energy efficiency of single storey warehouse-type retail buildings in Australia: A simulation case study. Energy and Buildings. v. 158, p. 1393-1403, 2018. ISSN 0378-7788. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.034.

[8] AKBARI, H.; MATTHEWS, H.D. Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. Energy and Buildings. v. 55, p. 2-6, 2012. ISSN 0378-7788. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.055.

[9] KOLOKOTRONI, M.; SHITTU, E.; SANTOS, T.; RAMOWSKI, L.; MOLLARD, A.; ROWE, K.; WILSON, E.; BRITO FILHO, J. P.; NOVIETO, D. Cool roofs: High tech low cost solution for energy efficiency and thermal comfort in low rise low income houses in high solar radiation countries. Energy and Buildings. v. 176, p. 58-70. 2018. ISSN 0378-7788. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.005.

[10] STAVRAKAKIS, G.M.; ANDROUTSOPOULOS, A.V.; VYÖRYKKÄ, J. Experimental and numerical assessment of cool-roof impact on thermal and energy performance of a school building in Greece. Energy and Buildings. v. 130, p. 64-84. 2016. ISSN 0378-7788. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.047.

[11] PISELLI, C.; SAFFARI, M.; GRACIA, A.; PISELLO, A. L.; COTANA, F.; CABEZA L. F. Optimization of roof solar reflectance under different climate conditions, occupancy, building configuration and energy systems. Energy and Buildings. v. 151, p. 81-97, 2017. ISSN 0378-7788. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.045.

[12] SILVA, M. P.; MARINOSKI, D. L.; GÜTHS, S. Avaliação de telhados cerâmicos de alta refletância solar através de simulação termoenergética e análise econômica em uma residência unifamiliar. In: Anais do XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, Brasil, 2020.

[13] SILVA, M.P.; MARINOSKI, D.L.; GÜTHS, S. Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de fibrocimento de alta refletância solar em uma residência unifamiliar. In: Anais do XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, Brasil, 2020.

[14] TZEMPELIKOS, A.; LEE, S. Cool Roofs in the US: The Impact of Roof Reflectivity, Insulation and Attachment Method on Annual Energy Cost. Energies. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en14227656.

[15] DOE – UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. EnergyPlus: Version 22.2.0. Disponível em: https://energyplus.net/. Acesso em: 11 jan. 2023.

[16] SANTOS, A.C.; LIMA, J.V.S.; J.R.G.; M.S.G.C. Uso do EnergyPlus em pesquisas brasileiras. XVII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENTAC 2018. Foz do Iguaçu, 2018.

[17] NEW, J.; MILLER, W. A.; HUANG, YU (JOE); LEVINSON, R. Comparison of software models for energy savings from cool roofs. Energy and Buildings. v. 114, p. 130-135, 2016. ISSN 0378-7788. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.020.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.575: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1-1: Base-padrão de arquivos climáticos para a avaliação do desempenho térmico por meio do procedimento de simulação computacional. NBR 15575-1-1. Rio de Janeiro, 2021.

[19] _____. NBR 15.575: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. NBR 15575-1. Rio de Janeiro, 2024.

[20] XING, L. Estimations of undisturbed ground temperatures using numerical and analytical modeling. 2014. Tese (Doutorado), Oklahoma State University, Stillwater, 2014.

[21] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Portaria Nº 309, de 6 de setembro de 2022. Aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais – Consolidado. 2022. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/LEGISLACAO/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=2989. Acesso em 25 mar. 2023.

[22] _____. Condicionadores de ar: condicionadores-de-ar-indices-novos-IDRS_2023-08-02 v2. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/condicionadores-de-ar. Acesso em 09 set. 2023.

[23] KAMIMURA, A.M.; RUPP, R.F.; FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações. CB3E, 2020. Disponível em: http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/Relatorio-atualizado-fatores_energia-primaria_CO2_28_11_2020.pdf. Acesso em 24 mar. 2023.