DESEMPENHO TÉRMICO DE ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL

Thermal performance of bioclimatic strategies in social housing

Karina Marcele Marques
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | karina.marques@aluno.ufop.edu.br

Marialaura Herrera Rosas
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | marialaura.rosas@aluno.ufop.edu.br

Lívia Dias Januário Mendes
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | livia.januario@aluno.ufop.edu.br

Ricardo André Fiorotti Peixoto
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | ricardofiorotti@ufop.edu.br

Resumo

A crescente demanda por habitações sustentáveis e eficientes energicamente tem impulsionado o interesse em estratégias bioclimáticas, especialmente em Habitações de Interesse Social (HIS). Este estudo avalia, por meio de simulações computacionais, a eficácia dos telhados verdes, a incorporação de escória de aciaria nos blocos de concreto da alvenaria e a otimização da ventilação natural no desempenho térmico de HIS. Utilizando um modelo previamente validado com dados climáticos locais, foram realizadas simulações conforme a NBR 15.575-1 (2024), abrangendo as doze zonas bioclimáticas brasileiras. Os resultados demonstram que essas estratégias proporcionaram uma redução significativa da demanda de energia em todas as regiões simuladas. Esses achados reforçam o potencial dessas estratégias para promover habitações termicamente mais eficientes e sustentáveis, sem comprometer o conforto dos ocupantes.

Palavras-chave: Simulação energética; Telhado verde; Escória de aciaria; Ventilação natural; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The mounting demand for sustainable and energy-efficient housing has given rise to an increased in bioclimatic strategies, particularly in the context of Social Housing (SH). This study utilizes computational simulations to assess the efficacy of bioclimatic strategies in enhancing the thermal performance of SH. The strategies evaluated encompass the implementation of green roofs, the incorporation of steel slag into masonry concrete blocks, and optimization of natural ventilation. To this end, a previously validated model with local climate data was employed, and simulations were conducted in accordance with NBR 15.575-1 (2024), encompassing all twelve Brazilian bioclimatic zones. The findings of this study demonstrate that implementation of these strategies results in a substantial reduction in energy demand across all the simulated regions. These findings underscore the potential of such approaches to promote thermally efficient and sustainable housing without compromising occupant comfort.

Keywords: Energy simulation; Green roof, Steel slag; Natural ventilation; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das principais responsáveis pelo consumo de energia e emissões de CO_2, contribuindo significativamente para o efeito estufa e o aquecimento global (EPE/MME, 2022; Souza, 2020). Esse impacto ambiental decorre, principalmente, da demanda energética para climatização de edificações, especialmente em regiões de climas extremos, onde o uso de sistemas artificiais de aquecimento e resfriamento é intensificado. Diante do exposto, a busca por estratégias que promovam o conforto térmico minimizando o consumo energético torna-se essencial para o desenvolvimento sustentável (Wced, 1987; Souza, 2020; Franco *et al.,* 2019).

As estratégias bioclimáticas são alternativas viáveis para reduzir a dependência de sistemas convencionais de climatização, promovendo edificações mais eficientes e sustentáveis (Franco *et al.,* 2019; Elaouzy, Fadar, 2022). Dentre as soluções passivas, destaca-se a orientação adequada dos edifícios, a ventilação natural, o uso de materiais com propriedades térmicas favoráveis e a presença de coberturas vegetadas (Mendes, 2019). No contexto das Habitações de Interesse Social (HIS), a implementação dessas medidas é ainda mais relevante ao permitir a melhoria do desempenho térmico das edificações sem o aumento dos custos operacionais para os moradores em situação de vulnerabilidade econômica (Eletrobras, 2019)

Diversos estudos destacam a eficácia das estratégias bioclimáticas na melhoria do conforto térmico e na redução do consumo energético em HIS (Liaw *et al.,* 2023). Entre as soluções passivas, a incorporação de resíduos industriais, como a escória de aciaria, tem se mostrado promissora na redução da troca de calor entre o ambiente interno e externo, devido a sua baixa condutividade térmica ou alta inércia térmica (Franco *et al.,* 2019). O telhado verde, por sua vez, contribui para a umidificação do ar e mitiga oscilações térmicas, enquanto a ventilação natural auxilia na dissipação do calor acumulado no interior das edificações (Leite, Antunes, 2023). A fim de mensurar a efetividade dessas estratégias, a simulação computacional tem sido extensivamente utilizada na fase de projeto, possibilitando prever o desempenho térmico das edificações e evitar soluções inadequadas que resultem em consumo excessivo de energia (Balvedi, Giglio, 2023; Omar *et al.,* 2020).

Neste estudo, avaliou-se a eficácia da aplicação de três estratégias bioclimáticas — telhados verdes, incorporação de rejeitos de siderurgia (escórias de aciaria) e ventilação natural (efeito chaminé) — aplicadas a HIS sob diferentes condições climáticas. Por meio de simulações computacionais no software EnergyPlus, investiga-se a capacidade dessas estratégias de reduzir a carga térmica de uma edificação (HIS1*) e minimizar a necessidade de climatização artificial. O objetivo é determinar se a adoção dessas soluções pode proporcionar conforto térmico com menor consumo energético, contribuindo para a construção de habitações mais sustentáveis e acessíveis.

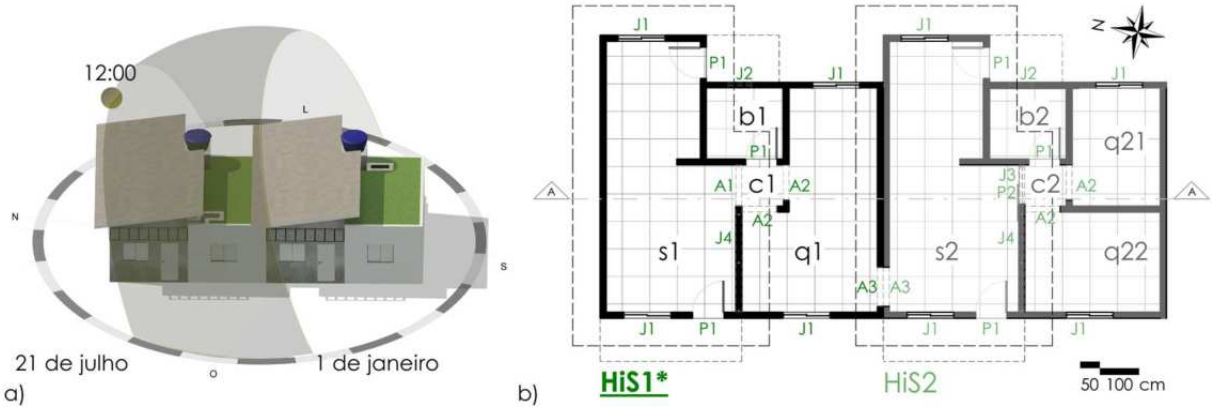
2 METODOLOGIA

Foram realizadas simulações computacionais no software EnergyPlus para avaliar o impacto de três estratégias bioclimáticas em HIS: escória de aciaria (ESC), telhado verde (TV) e efeito chaminé (CHA). Além dessas estratégias isoladas, também foi analisada a combinação das três (CET) e uma edificação de referência (REF) sem estratégias, totalizando cinco cenários. O modelo simulado foi baseado em uma edificação construída na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). A Figura 1 apresenta o projeto adaptado para uso educacional na Vila Reciclos. A tipologia da HIS1*, avaliada neste estudo, conta com um quarto e uma sala conjugada com a cozinha.

Essa edificação possui fundação de radier de concreto, paredes de alvenaria de blocos de concreto com incorporação de escória de aciaria, e cobertura de laje de concreto com poliestireno expandido, coberta com telhado verde nas lajes retas. As propriedades desses materiais estão apresentadas na Tabela 1.

Embora a edificação estudada tenha sido projetada para a zona 2M/Cwb, a avaliação foi expandida para as zonas bioclimáticas do Brasil, conforme definidas pela NBR 15220-3 (ABNT, 2024) (Figura 2). Para isso, foram realizadas simulações em 12 cidades representativas, abrangendo os principais tipos climáticos do país segundo a classificação de Köppen (Alvares, Stape, *et al.,* 2013). Esse procedimento permitiu analisar a adaptabilidade das estratégias bioclimáticas em diferentes condições climáticas.

Figura 1: Destaque da HIS1* construída na Vila Reciclos a) carta solar e b) planta baixa



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 1: Propriedades termofísicas dos materiais opacos do modelo real

Propriedades		Argamassa			Bloco estrutural	Concreto		Piso cerâmico
		Piso	Laje	Parede		Piso	Laje	
Espessura [m]		[1]	0,025	0,005	0,14	0,15	0,1	0,01
Condutividade [W/mK]		0,48	0,48	0,48	0,59	0,42	0,42	0,9
Densidade [kg/m³]		2126	2126	2126	2723	2521	2521	1600
Calor específico [J/kgK]		1000	1000	1000	1000	1000	1000	920
Absortividade	Térmica	0,90	0,90	[2]	0,90	0,90	0,90	0,90
	Solar	0,90	0,70	[2]	0,73	0,70	0,70	0,653
	Visível	0,90	0,70	[2]	0,73	0,70	0,70	0,653

Observações: [1] A espessura da argamassa do piso do banheiro é igual a 0,03 m e dos demais ambientes é igual a 0,04 m.
[2] A absortividade das paredes brancas é igual a 0,11 e das paredes cinzas, 0,70.

Fonte: Adaptado de Franco et al. (2019) e Baêta e Souza (1997).

Figura 2: Zonas bioclimáticas do Brasil e cidades representativas



Fonte: Adaptado de Alvares et al. (2013), ZBBR (2004) e NBR 15220-3 (2024).

A simulação computacional do modelo validado foi realizada conforme a NBR 15575-1 (2024), considerando os ganhos internos de calor para uso domiciliar. As características das cidades simuladas estão detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características das cidades representativas

Cidade	Zona bioclimática/ Tipo climático	Altitude [m]	Média anual da temperatura de bulbo seco [°C]	Média anual da umidade relativa [%]	Tarifa [R$/kWh]
Canela-RS	1R/Cfa	837	16,12	81,97	0,67
Curitiba-PR	1M/Cfb	934	17,48	84,39	0,63
Porto Alegre-RS	2R/Cfa	3	20,11	79,81	0,67
Ouro Branco-MG	2M/Cwb	1052	19,63	74,77	0,8
Florianópolis-SC	3A/Cfa	3	21,00	81,59	0,62
Belo Horizonte-MG	3B/Cwb	858	21,29	69,75	0,8
Rio de Janeiro-RJ	4A/Am	2	24,19	78,66	0,84
Goiânia-GO	4B/Cwa	749	23,60	66,54	0,75
Natal-RN	5A/As	30	26,10	80,59	0,74
Cuiabá-MT	5B/Aw	176	26,09	73,80	0,85
Manaus-AM	6A/Af	92	26,71	84,31	0,86
Petrolina-PE	6B/BSh	376	26,90	59,07	0,74

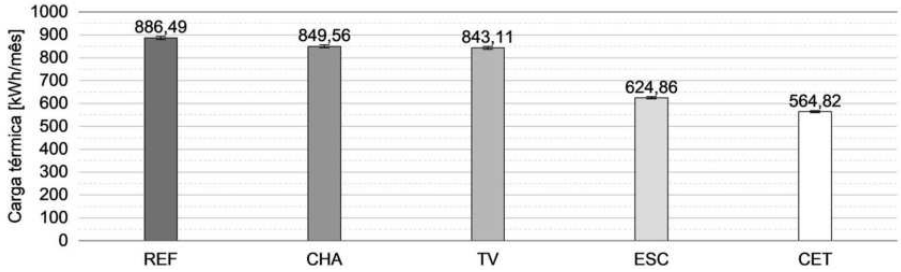
Fonte: Adaptado de ZBBR (2004), Climate OneBuilding (2024) e ANEEL (2024).

Para implementar o efeito chaminé no modelo com ventilação natural, as janelas altas permanecem abertas das 18h até as 10h do dia seguinte durante o verão e a primavera, e permanecem fechadas entre 10h e 18h, e durante todo o inverno e outono. O desempenho térmico foi avaliado por meio das cargas térmicas de refrigeração (CgTR), de aquecimento (CgTA) e as cargas térmicas totais (CgTT). A faixa de temperatura operativa considerada na análise das cargas térmicas foi a mesma para todas as cidades, considerando o intervalo entre 18 e 26 °C.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A Figura 3 apresenta as cargas térmicas totais mensais para os diferentes cenários avaliados, incluindo a edificação de REF, cada estratégia bioclimática aplicada isoladamente e a CET. Os resultados evidenciam que a CET apresentou a menor carga térmica média (564,82 kWh/mês), representando uma redução de aproximadamente 36,29% em relação a REF (886,49 kWh/mês), evidenciando sinergia entre ESC (massa térmica), TV (resfriamento evaporativo) e CHA (ventilação natural). Dentre as estratégias individuais, a ESC foi mais eficaz, reduzindo as cargas térmicas em 29,51%, enquanto o CHA e o TV tiveram impactos menos expressivos, com reduções de 4,17% e 4,89%, respectivamente. Além disso, os intervalos de confiança (95%) indicam baixa variabilidade nos resultados, reforçando a confiabilidade das diferenças observadas.

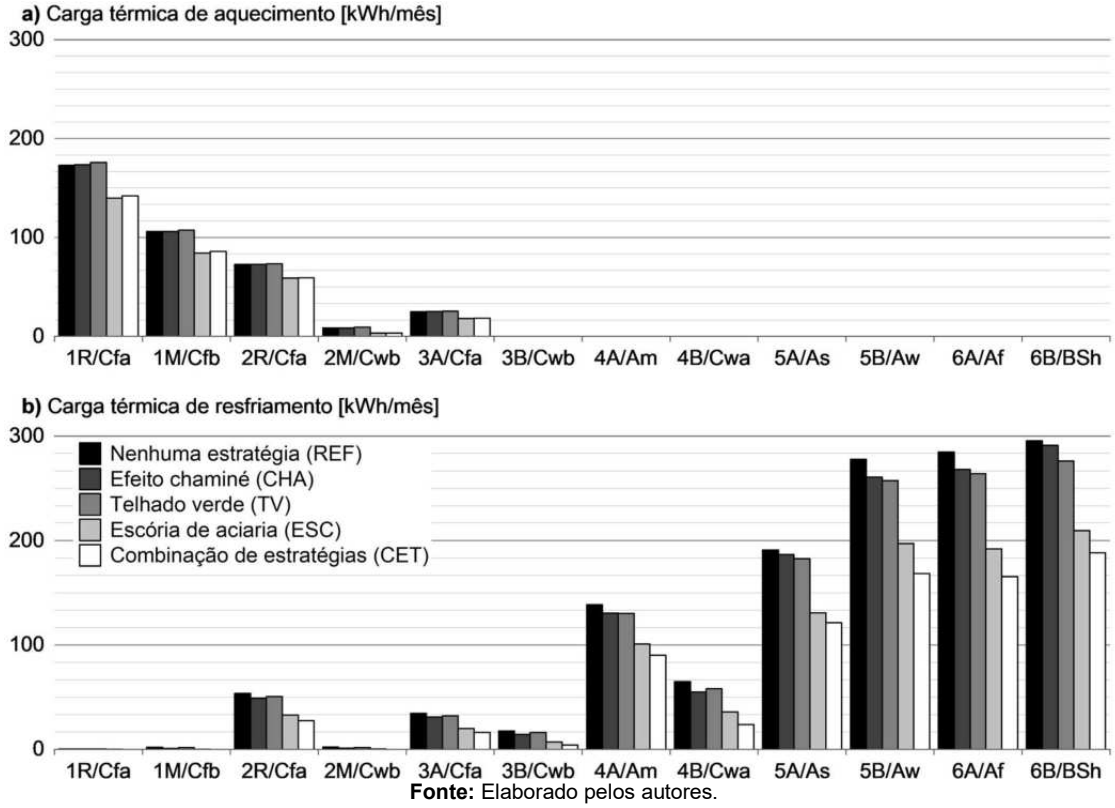
Figura 3: Cargas térmicas médias mensais por estratégia bioclimática



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 4 apresenta a eficácia das estratégias bioclimáticas na redução das CgTA e CgTR, complementando a análise das CgTT que já indicava a superioridade da CET. Dentre as estratégias isoladas, a ESC apresentou o melhor desempenho, especialmente em climas quentes e secos, ao reduzir a demanda de resfriamento.

Figura 4: Eficácia das estratégias bioclimáticas na redução da média de cargas térmicas mensais a) CgTA b) CgTR

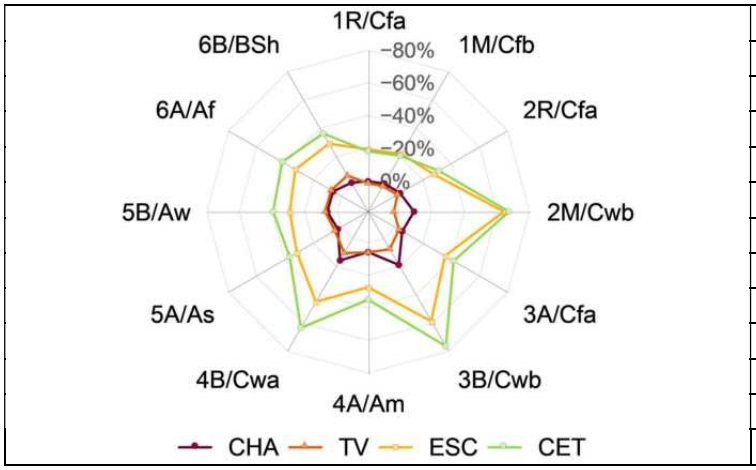


Fonte: Elaborado pelos autores.

O CHA mostrou-se eficaz na dissipação do calor em regiões de alta temperatura, enquanto o TV teve impacto positivo em climas mistos e secos. A CET, resultou na maior redução das cargas térmicas, evidenciando o efeito sinérgico entre elas e reforçando a importância de uma abordagem integrada no projeto bioclimático.

A Figura 5 ilustra a redução dos custos associados às CgTT. Observa-se que todas as estratégias contribuíram para a redução dos custos energéticos, destacando a ESC, que se mostrou a opção isolada mais eficaz, especialmente em climas mais frios. Nos demais climas, a CET demonstrou maior eficiência, alcançando reduções de custo de até 76% (3B/Cwb) em relação à REF. As estratégias CHA e TV apresentaram impacto limitado, com potencial para reduzir a carga térmica em até 19% (3B/Cwb) e 10% (4B/Cwa) respectivamente, mas é contraproducente em climas frios. Em temperaturas mais elevadas, a combinação da inércia térmica (ESC) com a retirada desse calor pela ventilação (CHA), aliada a redução de calor interno (TV), promove eficiência de moderada a alta. Já em temperaturas intermediárias, essa combinação apresenta sua maior eficácia, evidenciando uma sinergia mais acentuada entre as estratégias. Nos climas quentes e úmidos, a redução é mais uniforme (32% a 42%), com uma relação proporcional entre o aumento de temperatura e a eficiência das estratégias. Por outro lado, os climas quentes e secos apresentam desempenho médio superior (36% a 76%); no entanto, a eficiência tende a diminuir à medida que a temperatura aumenta.

Figura 5: Redução dos custos associados em relação à referência para cada cenário

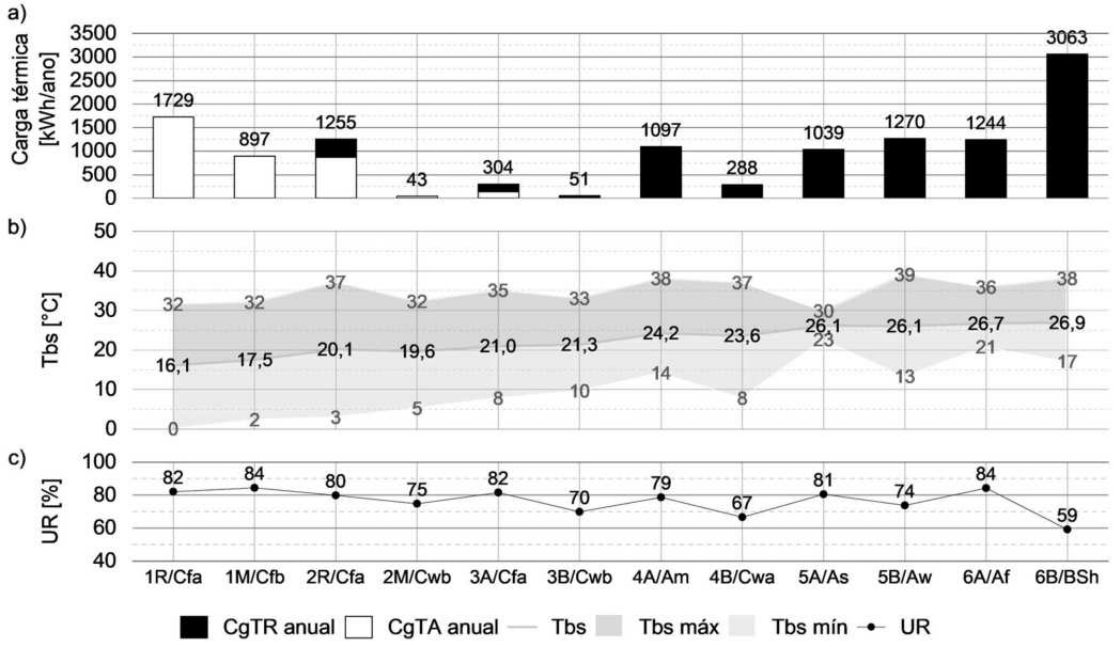


	CHA	TV	ESC	CET
1R/Cfa	+0,3%	+2%	-19%	-18%
1M/Cfb	-0,9%	+1%	-22%	-21%
2R/Cfa	-4%	-2%	-27%	-31%
2M/Cbw	-9%	+3%	-64%	-68%
3A/Cfa	-5%	-3%	-36%	-41%
3B/Cbw	-19%	-8%	-59%	-76%
4A/Am	-6%	-6%	-27%	-35%
4B/Cwa	-16%	-10%	-45%	-64%
5A/As	-2%	-5%	-31%	-37%
5B/Aw	-6%	-7%	-29%	-39%
6A/Af	-6%	-7%	-32%	-42%
6B/BSh	-1%	-7%	-29%	-36%

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 6 demonstra a correlação entre CgTT e as características climáticas das cidades avaliadas.

Figura 6: Relação entre a) Cargas térmicas totais (CET), b) Temperatura de bulbo seco (Tbs) e c) Umidade Relativa (UR)



Fonte: Elaborado pelos autores.

Constata-se que os maiores valores de carga térmica ocorrem em climas quentes e secos, como os de 6B/BSh e 5B/Aw, onde as temperaturas (Tbs) elevadas e a baixa umidade relativa (UR) intensificam a demanda térmica. Em contrapartida, cidades de clima frio e úmido, como 2M/Cwb, apresentam as menores cargas térmicas, devido às temperaturas mais amenas e a maior umidade. Regiões de clima misto, como 3B/Cwb apresentam valores intermediários, indicando uma influência significativa de variação sazonal. De modo geral, verifica-se uma correlação mais evidente entre a carga térmica e a temperatura de bulbo seco, enquanto a umidade relativa exerce um papel secundário. Dentre as duas variáveis, a que apresenta maior correlação com a carga térmica é a temperatura.

4 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a eficácia de diferentes estratégias bioclimáticas (telhados verdes, incorporação de escória de aciaria e ventilação natural) no desempenho térmico de HIS, por meio da análise de simulações computacionais em diferentes condições climáticas. Os resultados indicam que essas estratégias contribuem para o conforto térmico, reduzindo a demanda energética. CHA e o TV tem sua eficácia limitada em climas frios quando aplicadas isoladamente. A ESC isolada reduz as cargas térmicas (29,51%), confirmando sua eficácia como estratégia prioritária. Sua inércia térmica atua tanto em climas frios (reduzindo CgTA), mostrando desempenho superior até mesmo a CET, quanto quentes (mitigando CgTR).

A combinação das estratégias apresentou bom desempenho em todas as zonas analisadas, demonstrando que a integração de parâmetros climáticos locais pode reduzir custos energéticos em até 76%. Os resultados reforçam a viabilidade dessas estratégias para o desenvolvimento de habitações sociais mais sustentáveis e economicamente acessíveis, contribuindo para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas sobre populações vulneráveis.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da UFOP e do PROPEC, aos quais agradecemos pela infraestrutura e suporte institucional disponibilizados. Também expressamos nossa gratidão à CAPES, à FAPEMIG e ao CNPq pelo financiamento fundamental para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15220-3 - Desempenho térmico de edificações - Parte 3:** Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2024.

ABNT. **NBR 15575-1 - Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1:** Requisitos gerais. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2024.

ALVARES, Clayton A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, Dezembro 2013. Disponível em: <https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil>.

ANEEL. Ranking de Tarifas. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2024. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/rankingtarifas>. Acesso em: 29 jul. 2024.

BAÊTA, Fernando C.; SOUZA, Cecília F. **Ambiência em edificações rurais - conforto animal**. 2ª. ed.

BALVEDI, Nadia; GIGLIO, Thalita. Influence of green roof systems on the energy performance of buildings and their surroundings. **Journal of Building Engineering**, Londrina, v. 70, 2023. ISSN 2352-7102. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223006095>.

CLIMATE.ONEBUILDING. **Climate One Building**, 2024. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

ELAOUZY, Y.; FADAR, A. E. Impact of key bioclimatic design strategies on buildings' performance in dominant climates worldwide. **Energy for Sustainable Development**, v. 68, p. 532-549, 2022.

ELETROBRAS. Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial 2019. **Eletrobras**, 2019. Disponível em: <https://q.eletrobras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>. Acesso em: 1 Fevereiro 2024.

EPE/MME. Iniciativas nas cidades para o uso inteligente da energia, Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-519/topico-626/IT2%20-%20Iniciativas%20na%20cidades%20para%20o%20uso%20inteligente%20da%20energia.pdf>.

FRANCO, Luiza Carvalho et al. Design and thermal evaluation of a social housing model conceived with. **Sustainable Cities and Society**, Ouro Preto, 2019.

FRANCO, Luiza Carvalho et al. Design and thermal evaluation of a social housing model conceived with bioclimatic principles and recycled aggregates. **Sustainable Cities and Society**, Ouro Preto, v. 51, Novembro 2019. ISSN 2210-6707. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670719309564>.

LABEEE. Zoneamento Bioclimático do Brasil - UFSCar. **Laboratório de eficiência energética em edificações**, 2004. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/softwares/zbbr>. Acesso em: 26 Setembro 2023.

LEITE, Florence R.; ANTUNES, Maria L. P. Green roof recent designs to runoff control: A review of building materials and plant species used in studies. **Ecological Engineering**, v. 189, 2023.

LIAW, Cylon et al. Sustainability. **Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 15, n. 7, 2023.

MENDES, Júlia C. **Thermal Properties of Cement-based Composites**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 110. 2019.

OMAR, Abdou I. et al. A new set of indicators to evaluate the bioclimatic performance of air conditioned buildings in a hot and humid climate. **Journal of Building Engineering**, v. 31, 2020.

SOUZA, Luana R. D. **Análise do desempenho térmico de habitações multifamiliares de interesse social com paredes verdes**. UFOP. Ouro Preto, p. 164. 2020.

WCED. **Our common future**. Brundtland Report. World Commission on Environment and Development. [S.l.], p. 400. 1987.