ANÁLISE DA SEVERIDADE, INTENSIDADE E VULNERABILIDADE DOS OCUPANTES DE UMA HABITAÇÃO EM CUIABÁ FRENTE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Emeli Lalesca Aparecida da Guarda (1); Martin Gabriel Ordenes Mizgier (2); Alberto Hernandez Neto (3)

(1) Doutoranda em Arquitetura, Arquiteta e Urbanista, emeliguarda@gmail.com, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Trindade, 88040-900, Florianópolis-SC

(2) Doutor em Engenharia Civil, Professor Adjunto da Universidade Federal de Santa Catarina, Engenheiro Civil, martin.ordenes@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Trindade, 88040-900, Florianópolis-SC

(3) Doutor em Engenharia Mecânica, Professor Adjunto da Universidade de São Paulo, Engenheiro Mecânico, ahneto@usp.br, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 05508-030, São Paulo-SP

RESUMO

As habitações têm como papel garantir condições de conforto térmico a seus ocupantes. No entanto, mortes relacionadas ao calor no interior das habitações têm sido causadas por projetos não adequados às condições climáticas. Neste contexto, este artigo tem como objetivo avaliar por simulação computacional as condições térmicas internas de um edifício multifamiliar na cidade de Cuiabá diante dos cenários climáticos futuros do Sexto Relatório do IPCC. Essa avaliação será realizada considerando a Temperatura Efetiva Padrão como indicador, visando identificar situações de vulnerabilidade dos ocupantes. O processo metodológico consiste na caracterização do objeto de estudo e da região de implantação, elaboração dos arquivos climáticos futuros, modelagem térmica e avaliação das condições internas da habitação. Os resultados obtidos apontam que as condições internas da habitação sofrerão impactos das mudanças climáticas, com intensidade de até 9,9°C no período diurno no dormitório 1 em 2080, resultando em temperaturas efetivas padrão superiores a 35,0°C. Isso significa que, em 80% das horas diurnas, os ocupantes desse ambiente estarão em situações de emergência e vulnerabilidade ao calor. Por fim, observa-se que o indicador utilizado se apresenta como adequado para quantificar as condições internas das habitações e, principalmente, apontar os riscos de vulnerabilidade dos ocupantes no interior dos ambientes por meio da simulação computacional.

Palavras-chave: Temperatura Efetiva Padrão (SET), superaquecimento interno, simulação computacional.

ABSTRACT

Dwellings have the role of ensuring internal conditions at acceptable levels of comfort for their occupants. Due to buildings' incapacity, heat-related deaths are caused within dwellings. In this context, this article aims to assess the internal thermal conditions of a multifamily building in the face of future climate scenarios outlined in the Sixth Report of the IPCC. The Standard Effective Temperature is used as an indicator in this assessment, aiming to identify situations of occupant vulnerability. The methodological process involves the characterization of the object of study and the implementation region, the development of future climate files, thermal modeling, and evaluation of the internal housing conditions. In this context, the internal conditions of the dwellings will be impacted by climate change, with an intensity of up to 9.9°C during the daytime in Dormitory 1 by 2080, resulting in standard effective temperatures exceeding 35.0°C. This means that occupants of this environment will be in emergency situations and vulnerable to heat for 80% of the daytime hours. Finally, it is observed that the used indicator has a good potential to quantify the internal conditions of dwellings and, primarily, to identify the risks of occupant vulnerability within these environments through computational simulation.

Keywords: Standard Effective Temperature (SET), internal overheating, computational simulation.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas induzidas pelo homem têm causado alterações sem precedentes no sistema terrestre (IPCC, 2021). Caso não sejam adotadas medidas para reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), é provável que ocorra um aumento global de temperatura superior a 2,0°C em relação aos níveis pré-industriais (WANG et al., 2022). Dessa forma, eventos climáticos extremos, como ondas de calor serão mais frequentes e intensos, representando um desafio para a sociedade no contexto das mudanças climáticas.

Eventos climáticos extremos têm se tornado mais frequentes e severos, resultando no comprometimento da saúde humana devido ao superaquecimento de edificações. Um episódio notável ocorreu em 2003, com o registro do verão mais quente dos últimos 500 anos na Europa, no qual mais de 35.000 pessoas perderam a vida devido ao calor extremo, destacando a vulnerabilidade da população idosa principalmente. Na Holanda, uma temperatura máxima externa de 35°C foi registrada, resultando na morte de 2.200 pessoas devido ao calor (HAMDY et al., 2017). Além disso, estima-se que o número de mortes relacionadas a ondas de calor e altas temperaturas possa aumentar significativamente em algumas regiões até 2080, em comparação com o ano de 2020 (ZOU et al., 2022). Nesse contexto, relatórios do IPCC, da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas e protocolos como o Protocolo de Kyoto têm desempenhado um papel importante no aumento da conscientização do público sobre o superaquecimento de edifícios e cidades, o uso de energia e suas implicações ambientais diante dos impactos das alterações climáticas (UNEP, 2020).

Em 2022, o IPCC divulgou seu Sexto Relatório (AR6), o qual apresenta que as mudanças climáticas têm sido atribuídas às influências antrópicas, com impactos no meio ambiente e na sociedade (IPCC, 2022). Os principais cenários de emissões considerados são denominados de "Shared Socioeconomic Pathways" (SSPs), os quais resultam da combinação de trajetórias de desenvolvimento socioeconômico com medidas de mitigação das mudanças climáticas, diferenciando-se dos cenários utilizados nos relatórios anteriores do IPCC. Os SSPs são divididos em cinco cenários ilustrativos: sustentabilidade (SSP1-1.9), intermediário (SSP1-2.6), rivalidade regional (SSP2-4.5), desigualdade (SSP3-7.0) e uso intensivo de combustíveis fósseis (SSP5-8.5). Para o período até 2100, as projeções de aquecimento provável variam de 1,0°C a 1,8°C para o SSP1-1.9 e de 3,3°C a 5,7°C para o SSP5-8.5 (IPCC, 2022).

Considerando a vida útil das edificações residenciais entre 50 e 75 anos (ABNT, 2021), destaca-se que o desempenho dos edifícios atuais está sendo e será afetado pelas mudanças climáticas previstas para as próximas décadas. Além disso, os edifícios recentes foram projetados para responder às condições climáticas passadas, utilizando arquivos climáticos históricos nas simulações, os quais não consideram os extremos de temperatura nem os cenários de mudanças climáticas. Entretanto, as edificações devem garantir a qualidade de vida dos usuários contra as altas temperaturas. No entanto, muitas vezes, as mortes relacionadas ao calor foram causadas pela incapacidade dos edifícios de manter as temperaturas internas em níveis aceitáveis (ZOU et al., 2022). Assim, a pressão e os desafios impostos sobre os edifícios aumentam, uma vez que representam potenciais perigos para o bem-estar dos ocupantes, podendo resultar em estresse térmico por calor e até mesmo morte.

Nesse contexto, os edifícios residenciais são a tipologia mais suscetível aos riscos de superaquecimento interno (ZOU et al., 2022). Há evidências de que os edifícios que utilizam ventilação natural estão mais propensos a serem superaquecidos em cenários de mudanças climáticas, enquanto aqueles que são condicionados artificialmente enfrentam o risco de falhas no fornecimento de energia elétrica, o que pode resultar no aumento da temperatura interna do edifício (OZARISOY, 2022).

Além disso, ocupantes expostos a temperaturas internas acima de 30°C e 50% de umidade relativa do ar podem apresentar alterações na frequência cardíaca (ABUSHARHA; PEARCE; FAGEHI, 2016). Segundo Fan, Liu e Wargocki (2019), ocupantes expostos a temperaturas internas acima de 37°C e 70% de umidade relativa podem experimentar dificuldades de raciocínio, falta de concentração, fadiga e aumento da pressão arterial. Diante disso, o superaquecimento dos edifícios pode tornar os ocupantes vulneráveis a situações de estresse térmico, especialmente em edificações com baixo desempenho térmico e que não possuem sistemas de resfriamento ativo, pois estarão expostos a altas temperaturas internas.

Nesse contexto, o IPCC (2022) define vulnerabilidade como a "propensão ou predisposição a ser adversamente afetada". A NOAA (2022) define como "as características e circunstâncias de uma comunidade ou sistema que o tornam suscetível aos efeitos danosos de um perigo". Assim, as edificações que apresentam altas temperaturas internas tornam seus ocupantes propensos a situações de vulnerabilidade ao calor. Sun, Specian e Hong (2020) destacam que a ausência de infraestrutura, recursos financeiros e edificações adaptadas ao clima pode levar a impactos irreversíveis do calor, principalmente relacionados à saúde, expondo a população ao risco de vulnerabilidade. Dessa forma, torna-se importante abordar as edificações sob a ótica da vulnerabilidade dos ocupantes diante das altas temperaturas internas das habitações.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é realizar uma avaliação das condições térmicas internas de um apartamento por meio de simulação computacional. Serão considerados os cenários climáticos futuros apresentados no Sexto Relatório do IPCC (AR6), utilizando a Temperatura Efetiva Padrão (SET) como indicador, com o intuito de identificar potenciais situações de vulnerabilidade dos ocupantes.

3. MÉTODO

3.1. Objeto de estudo e caracterização da região de implantação

O objeto de estudo desta pesquisa refere-se a um recorte das habitações de interesse social do Programa Minha Casa Minha Vida, que tem como objetivo suprir o déficit habitacional brasileiro. Portanto, esta pesquisa concentra-se no nível de renda 1 e no tipo de moradia multifamiliar, mais especificamente no apartamento com planta H (HIS). A habitação possui uma área total de 42,55m², com os seguintes ambientes: Quarto 1 (8,70m²), Quarto 2 (8,28m²), Banheiro (3,13m²), Cozinha (6,84m²), Sala (12,81m²) e Circulação (2,97m²) (Figura 1). O pé-direito da habitação é de 2,60 metros e a orientação solar da fachada principal é Norte (0°).

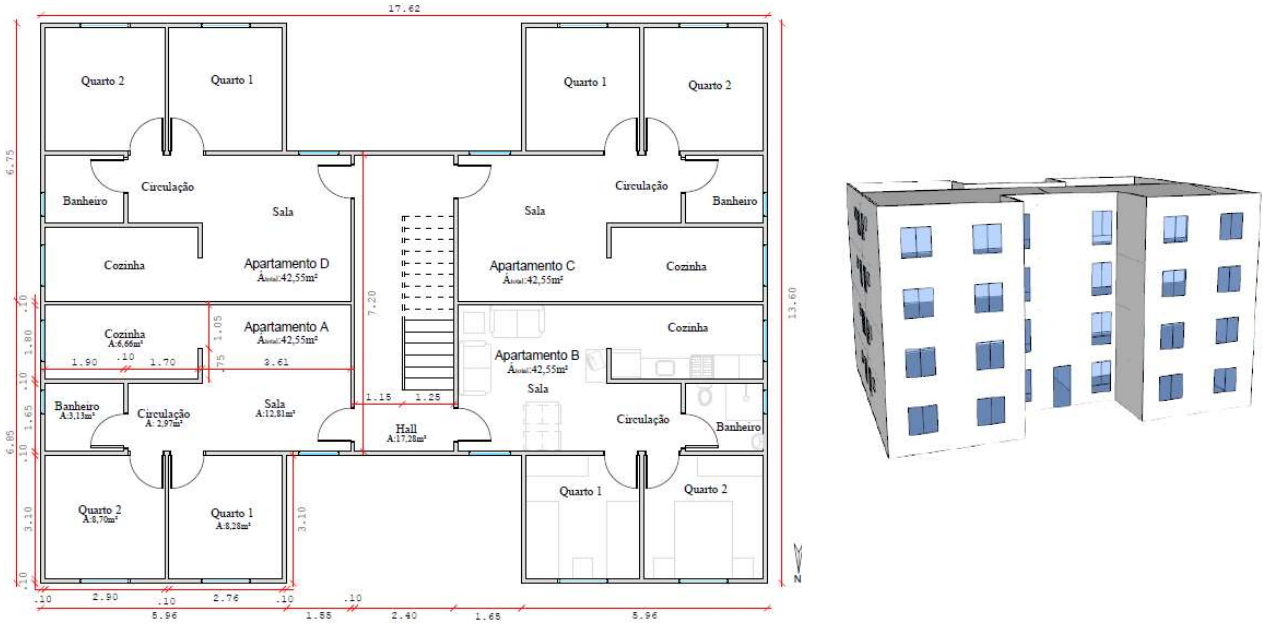

Figura 1: Planta baixa do pavimento da habitação de interresse social multifamiliar (à esquerda) e perspectiva (à direita)

As esquadrias originais são compostas por metal com vidro (4mm), sendo de duas folhas deslizantes (uma fixa e uma móvel) nos quartos 1 e 2, sala e cozinha. As portas são de madeira, com dimensões de 0,80x2,10m. No entanto, verificou-se que o Percentual de Abertura para Ventilação (PV,APP) atende ao critério de ≥7,0% da área do piso, conforme estabelecido pela NBR 15.575 (ABNT, 2021). Observa-se que apenas a cozinha, quarto 1 e quarto 2 atendem ao critério, sendo necessário ajustar a abertura da sala para 1,60x1,30m (Tabela 1).

Tabela 1: Dimensões das aberturas e ajuste da abertura da sala da HIS

	Esquadrias	**Sala**	**Cozinha**	**Quarto 1**	**Quarto 2**
Originais (HIS)	Dimensões (m)	1,60x1,00	1,20x1,00	1,20x1,20	1,20x1,20
	Área (m²)	1,60	1,20	1,44	1,44
	Área efetiva de ventilação (m²)	0,70	0,54	0,65	0,65
	Fator ventilação (%)	0,45	0,45	0,45	0,45
Critérios	**$P_{V,APP}$ (%)**	**7,34**	**7,31**	**7,31**	**7,31**
	Atende (ZB7)?	**Não**	**Sim**	**Sim**	**Sim**
Ajustadas (HIS)	Dimensões (m)	1,60x1,30	-	-	-
	Área (m²)	2,08	-	-	-
	Área efetiva de ventilação (m²)	0,94	-	-	-
	Fator ventilação (%)	0,45	-	-	-

Os fechamentos verticais da habitação são constituídos por painéis de concreto (10cm) e o fechamento horizontal é composto por telhas de fibrocimento (1cm), ático e laje de concreto (10cm). O piso é revestido com cerâmica (1cm). Para determinar as propriedades térmicas dos materiais construtivos, foram utilizadas as diretrizes estabelecidas pela norma NBR15.220 (ABNT, 2003), que expressa as propriedades de Absortância (α), Calor Específico (c), Condutividade Térmica (γ) e Densidade (ρ), bem como a Transmitância Térmica (U)

e Capacidade Térmica (CT) (Tabela 2). A câmara de ar possui uma resistência térmica de 0,21m²K/W, alta emissividade e espessura superior a 5cm.

Tabela 2: Propriedades termofísica do sistema construtivo da HIS

	Envoltória	Composição	Esp. (cm)	α	c (J/KgK)	γ (W/m²K)	ρ (Kg/m³)	U (W/m².K)	CT (KJ/m².k)
HIS	Parede externa/interna	Painel de concreto	10,00	0,30	1,00	1,75	2200	4,40	240
	Cobertura	Telha Fibrocimento	1,00	0,65	0,84	0,65	1400	2,06	233
		Laje de concreto	10,00	0,30	960	1,20	1300		

Para a análise da HIS, escolheu-se a cidade de Cuiabá como local de implantação, que está localizada no estado de Mato Grosso, na região Centro-Oeste do Brasil. A maior parte do estado é representada pelo tipo climático Aw (tropical com chuvas de verão), abrangendo cerca de 90% de seu território, enquanto aproximadamente 10% é classificado como clima do tipo Am (tropical com clima de monção). Essa classificação climática é comumente encontrada em várias regiões do mundo, situadas entre os Trópicos de Câncer e Capricórnio, sendo o segundo tipo climático mais prevalente, abrangendo cerca de 11,5% da área terrestre (PEEL, FINLAYSON e MCMAHON, 2007). Conforme Callejas (2012), o município de Cuiabá está situado em três importantes ecossistemas brasileiros: o Pantanal ao sul, a floresta Amazônica ao norte e o Cerrado em seus arredores.

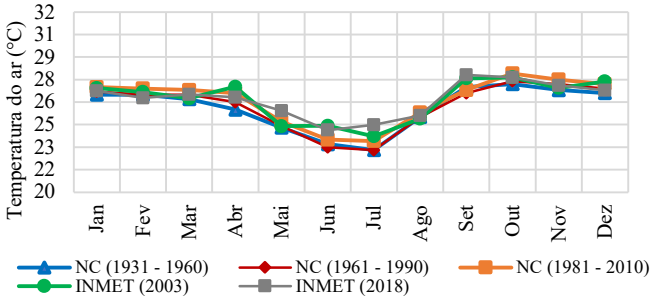

Figura 2: Dados históricos de temperatura do ar da cidade de Cuiabá-MT

Para fins de análise preliminar da evolução climática, foram investigadas as três Normais Climatológicas (NC) disponíveis para os períodos de 1931-1960, 1961-1990 e 1981-2010, conforme fornecido pelo INMET. Os arquivos climáticos do INMET foram obtidos do banco de dados do BDMET para o período de 2003 a 2018. Ao comparar os dados históricos com os atuais, observa-se um aumento de aproximadamente +0,50°C pela NC ao longo de 50 anos (1960 a 2010) e de +0,32°C em 15 anos em relação aos arquivos do INMET, ou seja, um aumento de ±0,10°C por década (Figura 2). Esse fato está em consonância com as projeções apresentadas pelo IPCC, as quais indicam um aumento da temperatura média global de 0,15°C a 0,30°C por década (IPCC, 2022). Por fim, utilizando a carta bioclimática de Givoni para Cuiabá, as horas em conforto são de 23,7% das horas anuais e desconforto térmico por calor e frio são de 70,44% e de 5,7% das horas anuais, respectivamente. Nesse contexto, torna-se importante investigar os impactos desse tipo climático nas edificações, principalmente levando em consideração as condições climáticas futuras.

3.2. Elaboração dos arquivos climáticos futuros

O método *Morphing* tem sido utilizado para transformar matematicamente o clima atual em climas futuros, levando em consideração cenários de mudanças climáticas. Esse método é baseado em modelos numéricos que representam os processos físicos na atmosfera, oceanos, criosfera e superfície terrestre, sendo conhecidos como Modelos de Circulação Geral (GCM) e os Modelos Climáticos Regional (RCM) (BELCHER, et al., 2005).

Atualmente, existem quatro ferramentas de geração de arquivos climáticos futuros disponíveis: *CCWorldWeatherGen* (JENTSCH, et al., 2013), *Weather Morph* (JIANG, et al., 2019), *WeatherShift* (DICKISON e BRANNON, 2016) e a *Future Weather Generator* (RODRIGUES, FERNANDES e CARVALHO, 2023). Todas essas ferramentas utilizam a metodologia denominada *Morphing* para a projeção climática. No entanto, cada uma delas apresenta algumas particularidades em relação ao tratamento dos dados climáticos utilizados, parâmetros dos relatórios do IPCC que servem como base para os modelos de previsão de climas futuros, evolução dos cenários e períodos de tempo considerados.

Dessa maneira, é possível observar que as ferramentas mencionadas utilizam os primeiros relatórios do IPCC como base, o que as torna defasadas, como é o caso da *CCWorldWeatherGen* e a *Weather Morph*. Além disso, a ferramenta *WeatherShift* não está disponível gratuitamente, o que dificulta sua utilização para pesquisas acadêmicas. Neste sentindo, a ferramenta *Future Weather Generator*, por sua vez, utiliza código aberto e está disponível para o uso de pesquisadores e da sociedade em geral. Além disso, utiliza os cenários mais recentes publicados pelo AR6 do IPCC (2022). A ferramenta *Future Weather Generator* altera as variáveis ambientais com Temperatura de Bulbo Seco (°C), Temperatura Ponto de Orvalho (°C), Umidade

Relativa do Ar (%), Pressão Atmosférica (Pa); Radiação Global Horizontal (W) e Velocidade (m/s) e Direção dos ventos (°). Essas variáveis são utilizadas em simulações de desempenho térmico e energético de edificações. Portanto, nesta pesquisa, optou-se por utilizar a ferramenta *Future Weather Generator*, considerando o cenário mais pessimista (SSP5-8.5), para os três períodos de tempo, e o arquivo climático base *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), por apresentar maior proximidade com o período base indicado na documentação da ferramenta.

3.3. Modelagem térmica da habitação

A simulação computacional permite analisar o desempenho térmico e energético de edifícios, levando em consideração a sua tipologia, geometria, sistemas construtivos, clima de implantação e o comportamento dos usuários no interior das edificações. Nesse sentindo, optou-se pela utilização do software EnergyPlus versão 9.0, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. O processo de simulação incluiu as seguintes etapas: modelagem da geometria do edifício, inserção das propriedades termofísicas dos materiais, inserção dos padrões de uso dos ambientes e equipamentos, e determinação da temperatura do solo. Além disso, ressalta-se que os dados de entrada da envoltória e ocupação do HIS foram baseados nos procedimentos de simulação descritos na NBR 15.575 (ABNT, 2021).

Para a modelagem da geometria da edificação, foi utilizado o *Plugin OpenStudio*. Os ambientes sala/cozinha, dormitório 1 e dormitório 2 foram considerados como áreas de permanência prolongada (APP) e modelados como zonas térmicas separadas. Os apartamentos foram considerados como Unidades Habitacionais (UH) e divididos em térreo, pavimentos intermediários e cobertura, de acordo com a NBR 15.575 (ABNT, 2021). Assim, foram considerados na modelagem os quatro pavimentos, com quatro UH (Figura 3). No entanto, para avaliar as condições internas, foi considerado apenas o apartamento A (Figura 1) da cobertura (destacado em vermelho na Figura 3), devido à sua exposição direta à radiação ao longo do ano, tanto da cobertura como das aberturas, considerada uma condição mais severa em relação as demais APPs.

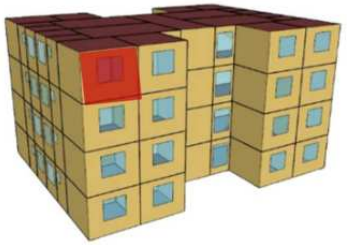

Figura 3: Perspectiva da modelagem da HIS no OpenStudio

Os padrões de ocupação e ganhos internos foram baseados na NBR15.575 (ABNT, 2021). Essa normativa estabelece os padrões de ocupação, dissipação de calor por ocupante e a sua fração radiante para os dias da semana e finais de semana, além do uso de iluminação artificial e de equipamentos (Figura 4). Para isso, considerou-se duas pessoas por dormitório (50%) e quatro pessoas na sala (100%), com atividades metabólicas de dormindo ou descansado (45W/m²) e sentado ou assistindo de TV (60W/m²), respectivamente, e uma fração radiante de 0,30. Os equipamentos foram considerados apenas na sala, com o período de utilização das 14:00 às 21:59hrs, potência de 120W e fração radiante de 0,30.

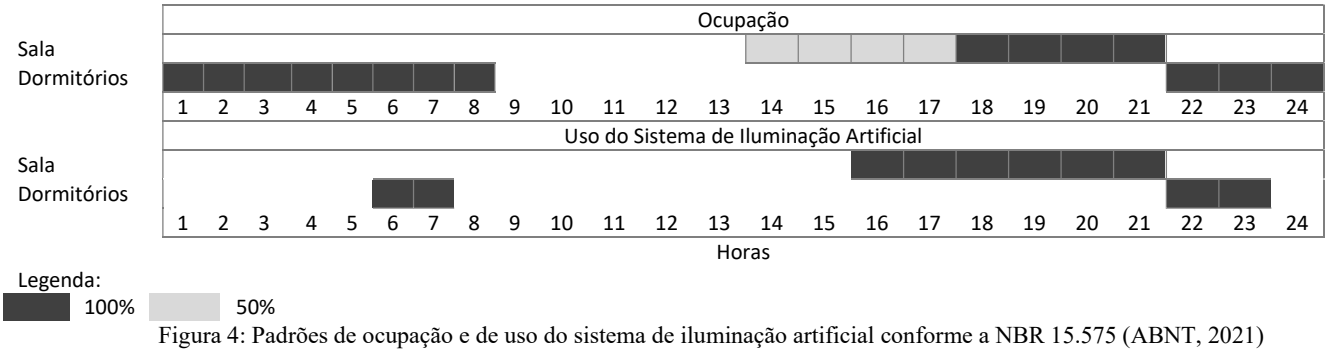

Figura 4: Padrões de ocupação e de uso do sistema de iluminação artificial conforme a NBR 15.575 (ABNT, 2021)

Além disso, considerou-se o edifício na condição naturalmente ventilada, com janelas abertas nos horários em que os ambientes estão ocupados e a temperatura interna for igual ou superior a 19°C e superior à temperatura de bulbo seco externa, conforme os procedimentos de simulação descritos na NBR 15.575 (ABNT, 2021). Foram consideradas também as infiltrações através das frestas, com coeficiente de fluxo de 0,0024kg/(s.m) para a portas e 0,00063kg/(s.m) para as janelas, e o coeficiente de descarga (Cd) das aberturas foi estabelecido como 0,60 para portas e janelas.

3.4. Avaliação das condições internas com o uso da Temperatura Efetiva Padrão (SET) como indicador da vulnerabilidade dos ocupantes

Em cenários de ondas de calor e/ou temperaturas elevadas, como os de mudanças climáticas, podem ocorrer eventos de superaquecimento interno nas edificações, com diferente intensidades e severidades,

principalmente nos ambientes ventilados naturalmente (LAOUADI, BARTKO e LACASSE, 2020). Neste sentido, para avaliar a vulnerabilidade dos ocupantes no interior das edificações diante desses impactos, é necessário que a métrica de análise inclua as variáveis ambientais, como a Temperatura do Ar (°C), Umidade Relativa do Ar (%), Velocidade do Vento (m/s), associadas às variáveis humanas, como a Taxa Metabólica (Met) e as Vestimentas (clo). Além disso, os limites para quantificação das horas em vulnerabilidades devem levar em consideração o estado fisiológico e a sensação térmica do ocupante.

A Temperatura Efetiva Padrão (SET) consiste em um índice que leva em consideração quatro variáveis ambientais (temperatura do ar e radiante média, umidade relativa do ar e velocidade do vento) e duas variáveis humanas (taxa metabólica e vestimentas). Este indicador permite avaliar as condições térmicas enfrentadas pelos ocupantes em um determinado ambiente, podendo ser utilizado como um indicador de vulnerabilidade.

O modelo utilizado para desenvolver o índice é baseado em um modelo dinâmico de dois nós proposto por Gagge et al. (1971), que considera dois sistemas: o sistema passivo, que trata dos diferentes mecanismos de troca de calor entre o corpo humano e o ambiente, e o sistema termorregulador, que lida com os mecanismos fisiológicos, como sudorese, vasodilatação, vasoconstrição e tremores (JI, et al., 2021). Em outras palavras, o modelo prevê a resposta fisiológica dinâmica do corpo humano quando exposto a condições térmicas estressantes, cujo cálculo da temperatura efetiva está descrito na ASHRAE 1976 e em Du e Yang (2020). Este cálculo foi realizado utilizando-se as rotinas disponíveis no pacote *Pythermalcomfort*, elaborado em linguagem Phyton (TARTARINI, SCHIAVON e MACKEY, 2019).

Neste contexto, utilizou-se SET para quantificar a intensidade e a severidade do evento de calor no interior da edificação (Equações 1 a 3), analisando esse impacto em dois períodos: diurno (06 às 16:59hrs) e noturno (17hrs às 05:59hrs) (Equação 2). Os ocupantes foram considerados com vestimentas de calça e camisa manga curta no período diurno e de pijamas (grosso) no período noturno (0,57clo) e a atividade metabólica foi considerada como sentado (1,0Met – 60W/m²) e deitado (0,8Met – 45W/m²), respectivamente, conforme NBR16.401 (ABNT, 2021). O limiar adotado para a análise da severidade e intensidade foi de 26°C, o qual representa a resposta fisiológica neutra dos ocupantes, conforme Parson (2014). Além disso, a vulnerabilidade dos ocupantes foi quantificada por meio da resposta fisiológica e sensação térmica ao calor, expressas como a porcentagem de horas excedentes aos limiares estabelecidos. A escala de avaliação varia de neutro a emergência, conforme descritor por Parson (2014) (Tabela 3).

$$SEV_{total} = \sum s\,(SET_N + SET_D) \qquad \text{Equação 1}$$

$$SEV_{N\ ou\ D} = \sum n\,(SET_t + SET_{Ln\ ou\ Ld}) \qquad \text{Equação 2}$$

$$I_{N\ ou\ D} = \frac{SET_s}{P_t} \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:
SEV_{total}: Severidade total de um evento de superaquecimento interno (°C.h)
$SEV_{N\ ou\ D}$: Severidade de um evento de superaquecimento interno durante a exposição noturno e/ou diurna (°C.h)
$SET_{Ln\ ou\ Ld}$: Temperatura de SET limite para um ocupante durante exposição noturna e/ou diurna (°C)
SET_t: Valor horário de SET durante a exposição diurna e noturna (°C)
$I_{N\ ou\ D}$: Intensidade de um evento de superaquecimento interno durante a exposição noturno e/ou diurna (°C)
P_t: Período de exposição diurna e noturna (horas)

Tabela 3: Limiares de resposta fisiológica e sensação térmica ao calor dos ocupantes em diferentes faixas de SET. Fonte: Adaptado de Parson (2014)

Faixas	Sensação térmica
Neutro ≤ 26°C	Neutro
≥ 26°C Ligeiramente quente <30,0°C	Sudorese leve
≥ 30°C Alerta <35,0°C	Sudorese média
Emergência ≥35,0°	Sudorese profunda, risco de falha na termorregulação

4. RESULTADOS

4.2. Análise das condições climáticas futuras

A partir do arquivo climático histórico, foram gerados os arquivos climáticos futuros, dos quais foram obtidos os valores médios mensais da Temperatura de Bulbo Seco (°C) e Umidade Relativa do Ar (%) para os períodos de 2050 (2036-2065) e 2080 (2066-2095). Observou-se que a temperatura média anual no período histórico é de 26,7°C, aumentando para 29,1°C em 2050 e para 31,5°C em 2080, representando um acréscimo de +4,8°C

(Figura 5-a). Em decorrência desse aumento da temperatura, a umidade relativa do ar diminuiu em 7,34% desde o período histórico até 2080 (Figura 5-b).

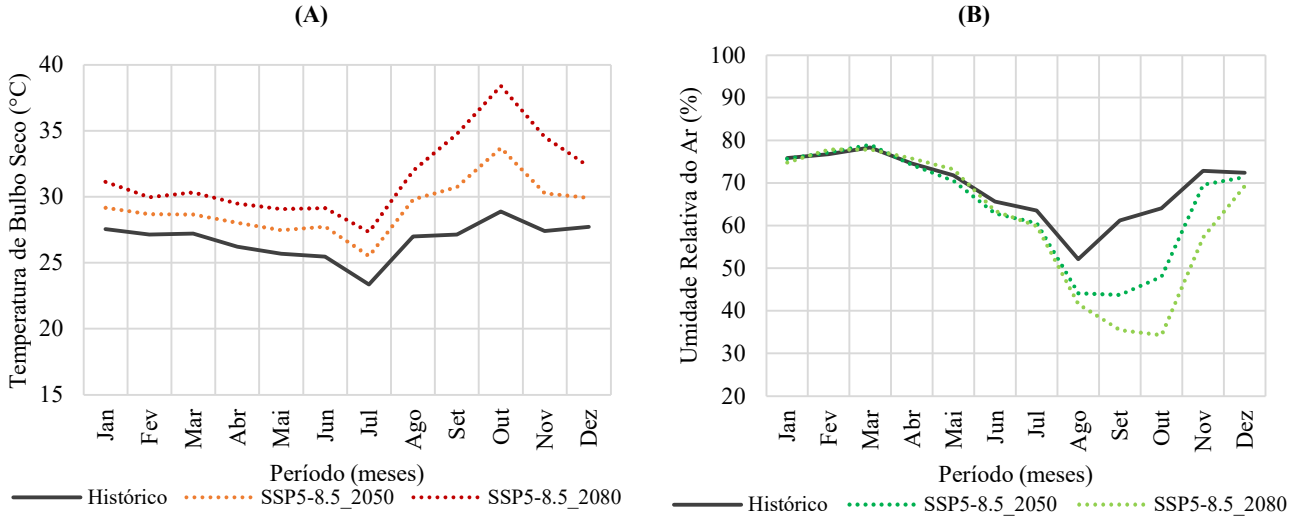

Figura 5: Temperatura do Ar e Umidade Relativa do Ar no período histórico e cenários climáticos futuros

Os meses mais quentes no período histórico são de outubro a janeiro, com temperaturas médias mensais acima de 27,5°C, destacando-se outubro com uma temperatura de 28,8°C. Em 2050, esse padrão é semelhante, porém com temperaturas acima de 30,0°C. Já em 2080, observa-se um prolongamento dos meses mais quentes, abrangendo agosto a janeiro, com temperaturas superiores a 31,5°C, destacando-se outubro com uma temperatura média mensal de 38,4°C (Figura 5-a).

Diante desse cenário, a umidade relativa do ar diminui em -29% no mês mais quente, passando de 64,0% no período histórico para 34,3% em 2080 (Figura 5-b). Esse comportamento é similar nos meses de agosto, setembro e novembro, porém com reduções em torno de -10,0%, -25,0% e -15,5%, respectivamente. Neste contexto, diante do aumento das temperaturas externas e da redução da umidade relativa do ar, torna-se importante investigar as condições internas das habitações, principalmente considerando o potencial risco de vulnerabilidade dos ocupantes diante desses impactos.

4.2. Análise da severidade e intensidade do evento de superaquecimento no interior dos ambientes da HIS

O método proposto acima baseia-se em vincular a severidade e a intensidade das altas temperaturas internas à condição térmica interna da habitação, sendo avaliadas em média anual, e a intensidade é considerada em dois períodos anuais, o diurno (I_D) e o noturno (I_N), com o objetivo de analisar em qual período os ocupantes enfrentarão temperaturas internas elevadas. Ressalta-se que o limiar adotado para esta análise é na condição neutra, ou seja, SET ≤ 26,0°C. Dessa forma, o dormitório 1 apresentou maiores valores de severidade em todos os períodos analisados, sendo de 47.021°C.h no histórico, aumentando para 84.559°C.h em 2080, representando um aumento de aproximadamente 80%. Esse padrão também é observado no dormitório 2 e na sala/cozinha (Figura 6). Portanto, esse aumento está relacionado ao aumento da temperatura externa, impactando diretamente na temperatura interna dos ambientes da habitação.

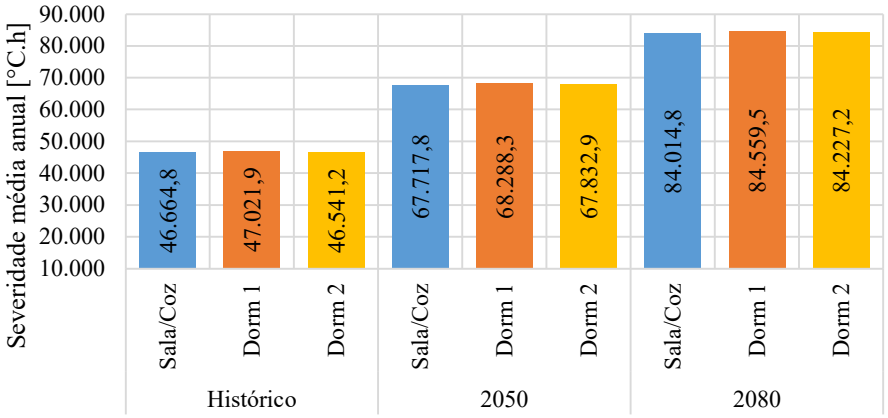

Figura 6: Severidade média anual dos APP da Unidade Habitacional no periodo histórico e futuros

Neste contexto, observa-se o impacto do aumento das temperaturas externas na intensidade, ou seja, o quanto o SET se afasta do limiar de 26,0°C por período e ambiente. Nesse sentindo, o dormitório 1 apresenta, no período diurno, uma intensidade de superaquecimento interno de 5,7°C e, no período noturno, de 5,2°C no cenário histórico. Esses valores aumentam para 9,9°C e 9,7°C, respectivamente, representando um aumento de cerca de +4,3°C. Isso significa que a temperatura efetiva padrão no dormitório 1 estará acima de 35,9°C durante o período diurno em 2080, tornando os ocupantes suscetíveis a um estado de alerta no período histórico, em 2050, e a uma situação de emergência em 2080 (Figura 7).

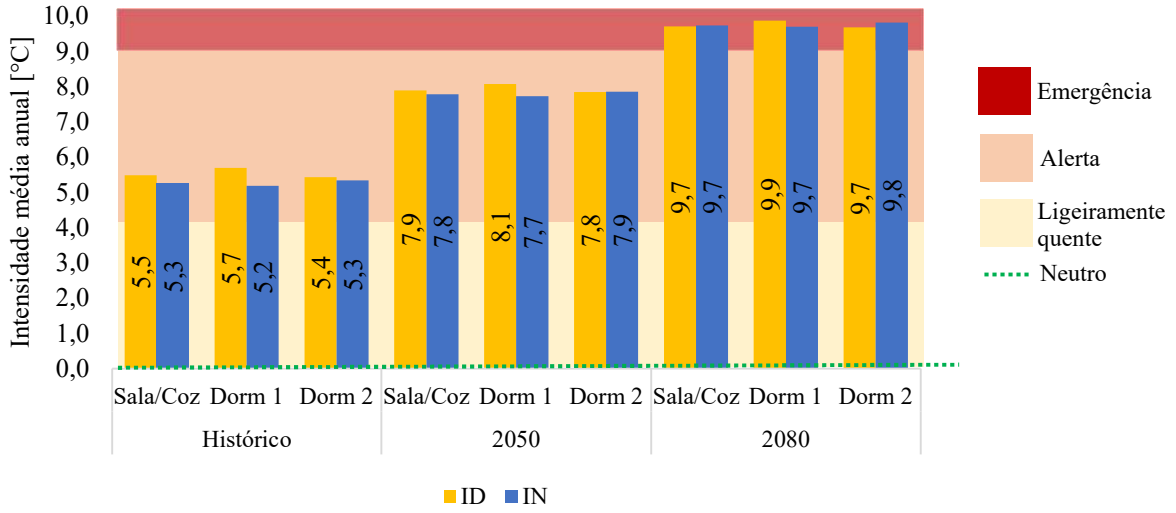

Figura 7: Intensidade média anual dos APP da Unidade Habitacional no periodo histórico e futuros

Todos os ambientes apresentaram maiores valores de intensidade durante o período diurno, ou seja, este o período apresenta as maiores temperaturas efetivas padrão. O periodo noturno tem um comportamento semelhante, havendo apenas uma diferença de aproximadamente 0,1°C no dormitório 2 em 2080 (Figura 7). Portanto, verifica-se que, para Cuiabá, os ocupantes estarão sujeitos a um estado de alerta em todos os ambientes e períodos analisados, com SETs superiores a 30°C. Isso demostra que, mesmo durante o período noturno, a habitação estará superaquecida, representando um risco de vulnerabilidade para os ocupantes.

4.3. Análise da vulnerabilidade dos ocupantes no interior dos ambientes da HIS

Para quantificar a vulnerabilidade dos ocupantes, o método proposto baseia-se em relacionar a resposta fisiológica e a sensação térmica ao calor, considerando a porcentagem de horas anuais que excedem os limiares mencionados no item 3.4. Essa avaliação é realizada tanto para o período diurno quanto para o noturno.

Neste contexto, as horas em que os ocupantes se encontram em situações neutras diminuem nos períodos futuros, chegando a cerca de 9% em ambos os períodos e ambientes, e reduzindo para 2% em 2080 (Figura 8). No entanto, é observado que, mesmo no período histórico, a cidade de Cuiabá apresenta altas temperaturas externas, resultando em temperaturas elevadas internamente e, consequentemente, levando a situações de alerta para ocupantes em cerca de 62% das horas no período diurno e 64% no noturno. É importante ressaltar que, no período histórico, situações de emergência (SET superior a 35,0°C) representam aproximadamente 10% das horas durante o dia e 6% durante a noite.

Em 2050, as horas em situação de alerta são reduzidas para uma média de 44% no período diurno e 47% no noturno nos ambientes. Observa-se que os ocupantes também estarão sujeitos a situações de emergência, com médias semelhantes às situações de alerta (Figura 8) no futuro próximo. No cenário de 2080, as horas em situação de emergência ultrapassam 60% do total anual, tanto no período diurno quanto no noturno. Isso significa que o SET estará acima de 35,0°C, resultando em ambientes com altas temperaturas internas e tornando os ocupantes propensos a estresse térmico, vulnerabilidade ao calor, sudorese profunda e risco de falha na termorregulação.

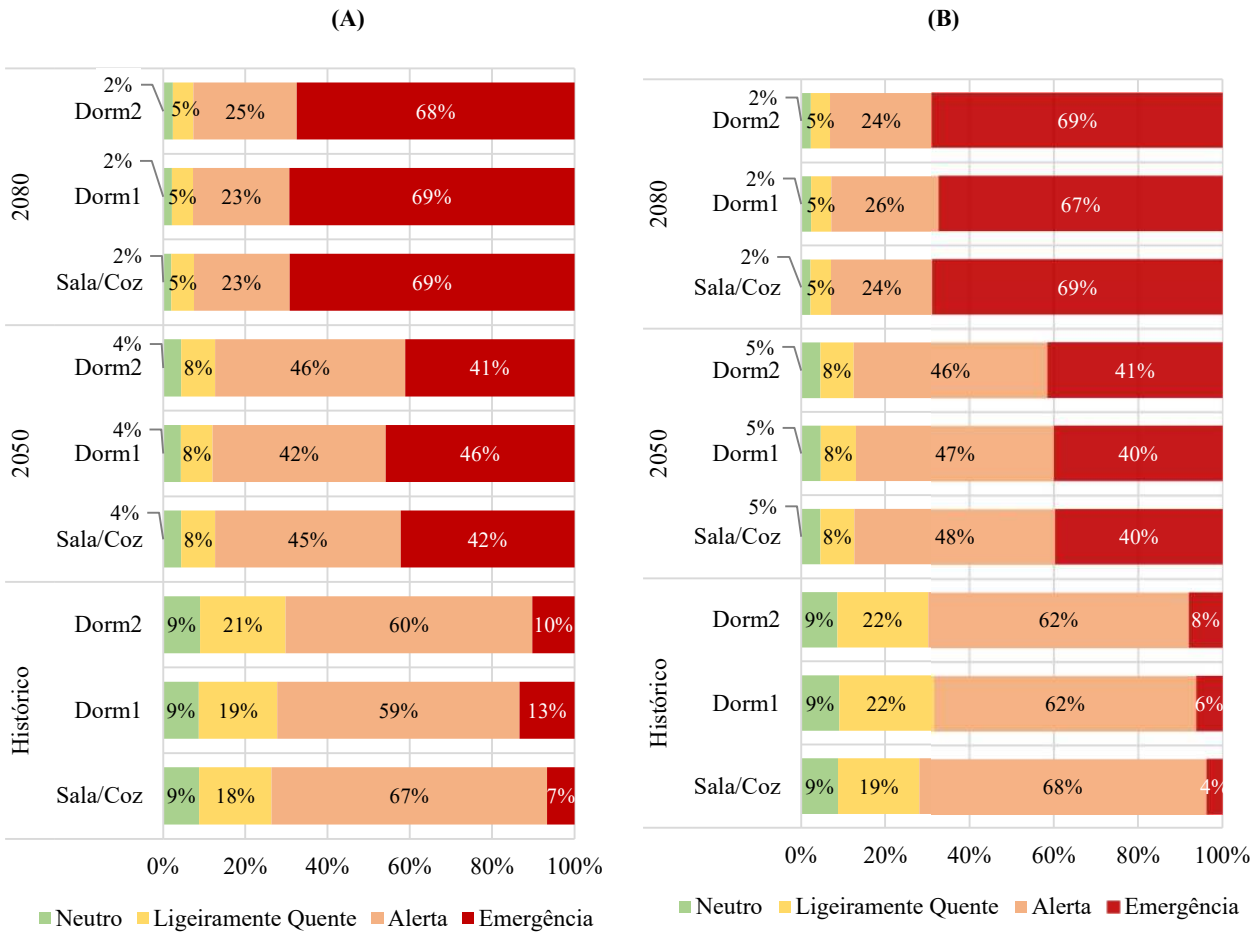

Figura 8: Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes no periodo histórico e futuros

Neste sentindo, verifica-se que as condições internas dos ambientes habitacionais podem ser consideradas alarmantes, principalmente nos cenários climáticos futuros, devido aos impactos das mudanças climáticas. Assim, a avaliação do desempenho térmico das edificações, utilizado do SET, mostra-se importante para possibilitar a elaboração de estratégias de adaptação climática a serem implementadas nas habitações existentes, de modo a torná-las resilientes aos efeitos do aquecimento global que podem ocorrer no futuro.

5. CONCLUSÕES

Diante do aumento das temperaturas externas e da redução da umidade relativa do ar, é possível observar que as condições térmicas no interior da habitação serão afetadas por esses impactos, com uma intensidade de até 9,9°C no período diurno no dormitório 1 em 2080, ou seja, apresentando temperaturas efetivas padrão superiores a 35,0°C. Isso significa que em 80% das horas diurnas os ocupantes desse ambiente estarão sujeitos a situações de emergência e vulnerabilidade ao calor. Nesse sentido, nota-se que o indicador utilizado possui o potencial de quantificar as condições internas das habitações e, principalmente, identificar os riscos de vulnerabilidade dos ocupantes dentro desses ambientes por meio de simulação computacional. Dessa forma, torna-se possível avaliar o impacto de estratégias projetuais para que as habitações sejam resilientes no futuro e mantenham condições aceitáveis para seus ocupantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.575. **Edificações Habitacionais**. 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220. **Desempenho térmico de edificações**. 2003.

ABUSHARHA, A.; PEARCE, E.; FAGEHI, R. Effect of Ambient Temperature on the Human Tear Film. **Eye and Contact Lens**, v.42, 2016. DOI: https://doi.org/10.1097/ICL.0000000000000210

APARECIDA, V. Modeling of slab-on-grade heat transfer in EnergyPlus simulation program. **Ambiente Construído**, v. 17, 2017. DOI: https://doi.org/10.1590/S1678-86212017000300166

BELCHER, S. E.; HACKER, J. N.; POWELL, D. S. Constructing design weather data for future climates. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 26, 2005. DOI: https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa

CALLEJAS, I.; J.; A. Avaliação temporal do balanço de energia em ambientes urbanos na cidade de Cuiabá-MT. Tese (Doutorado). **Universidade Federal do Mato Grosso** (UFMT), 2012.

DICKINSON, R.; BRANNON, B. Generating future weather files for resilience. **36th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA)**, 2016. Disponível em: https://www.weathershift.com/Generating%20Future%20Weather%20Files.pdf. Acesso em: 24 abr de 2023.

DU, H.; YANG, C. Re-visitation of the thermal environment evaluation index standard effective temperature (SET*) based on the two-node model. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101899

FAN, X.; LIU, W.; WARGOCKI, P. Physiological and psychological reactions of sub-tropically acclimatized subjects exposed to different indoor temperatures at a relative humidity of 70%. **Indoor Air**, v. 29, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/ 10.1111/INA.12523

GAGGE, A. P.; STOLWIJK, J. A. J.; NISHI, Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. **ASHRAE Transactions**, v. 77, 1971. Disponível em: https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/37901/1/13Suppl_21-36.pdf. Acesso em: 24 abr de 2023.

HAMDY, M.; CARLUCCI, S.; HOES, P.; HENSEN, J. The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study. **Building and Environment**, v.122, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031

IPCC – Intergorvenamental Painel Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/. Acesso em: 24 abr de 2023.

IPCC – Intergorvenamental Painel Climate Change. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II constribuition to the Sicth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/. Acesso em: 24 abr de 2023.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil. Período de 1961-1990; 1981-2010 e 1991-2020. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/normais. Acesso em: 02 Jun de 2023.

JENTSCH, M. F.; JAMES, P. A. B.; BOURIKAS, L.; BAHAJ, A. S. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. **Renewable Energy**, v. 55, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049

JI, L.; LAOUADI, A.; SHU, C.; WANG, L.; LACASSE, M. A. Evaluation and improvement of the thermoregulatory system for the two-node bioheat model. **Energy and Buildings**, v.249, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111235

JIANG, A.; LIU, X.; CZARNECKI, E.; ZHANG, C. Hourly weather data projection due to climate change for impact assessment on building and infrastructure. **Sustainable Cities and Society**, v. 50, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101688

LAOUADI, A.; BARTKO, M.; LACASSE, M. A. A new methodology of evaluation of overheating in buildings. **Energy and Buildings**, v. 226, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110360

MAZZAFERRO, L.; SORGATO, M.; VERSAGE, R.; MELO, A.; LAMBERTS, R. Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do pré-processador SLAB no programa EnergyPlus. 2013. Disponível em: https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/manual%20slab.pdf. Acesso em: 24 abr de 2023.

NOAA - National Centers for Environmental Information. **Heat Index Equation**. Disponível em: https://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex_equation.shtml. Acesso em: 24 abr de 2023.

OZARISOY, B. Energy effectiveness of passive cooling design strategies to reduce the impact of long-term heatwaves on occupants' thermal comfort in Europe: Climate change and mitigation. **Journal of Cleaner Production**, v. 330, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129675

PARSONS, Ken. Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance. Book CRC press, 2014.

PEEL, M.; FINLAYSON, B.; McMAHON, T. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, 2007. DOI: https://doi.org/ 10.5194/HESS-11-1633-2007

RODRIGUES, E.; FERNANDES, M.; S.; CARVALHO, D. Future weather generator for building performance research: An open-source morphing tool and an application. **Building and Environment**, v. 233, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110104

SUN, K.; SPECIAN, M.; HONG, T. Nexus of thermal resilience and energy efficiency in buildings: A case study of a nursing home. Building and Environment, v. 177, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106842

TARTARINI, F.; SCHIAVON, S.; HOYT, T.; MACKEY, C. **Pythermalcomfort**. Disponível em: https://pythermalcomfort.readthedocs.io/en/latest/reference/pythermalcomfort.html#standard-effective-temperature-set. Acesso em: 24 abr de 2023.

UNEP - UN Environment Programme. **2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102213

WANG, M.; LI, L.; HOU, C.; GUO, X.; FU, X. Building and Health: Mapping the Knowledge Development of Sick Building Syndrome. **Buildings**, v. 287, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings12030287

ZOU, J.; GAUR, A.; WANG, L.; LAOUADI, A.; LACASSE, M. Assessment of future overheating conditions in Canadian cities using a reference year selection method. **Building and Environment**, v. 218, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109102