APLICAÇÃO DE ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA TÉRMICA DE EDIFICAÇÃO EM CONDIÇÃO DE SOBREAQUECIMENTO

Raquel Moussalem Apolônio (1); Ivan Julio Apolonio Callejas (2); Filipa Roseta (3)
(1) Arquiteta, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura na Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, Rua Sá Nogueira, Polo Universitário, Alto da Ajuda, 1649-004 Lisboa, Portugal, raquelmoussalemapolonio@gmail.com;
(2) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, Boa Esperança, Cuiabá 78060-900, Brasil;
(3) PhD, Professora na Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, Rua Sá Nogueira, Polo Universitário, Alto da Ajuda, 1649-004 Lisboa, Portugal, ver.filipa.roseta@cm-lisboa.pt

RESUMO
A resiliência térmica se refere à capacidade de um edifício de se adaptar às variações térmicas extremas, minimizando o impacto dessas variações no ambiente interior, e de manter um ambiente saudável e seguro para seus ocupantes. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é aplicar diferentes índices para avaliar a resiliência térmica de uma edificação residencial de baixa renda, naturalmente ventilada, em situação de sobreaquecimento, localizada em região climática tropical de savana. Os índices de conforto térmico adaptativo, *Heat Index*, *Humidex* e SET foram calculados a partir de simulação computacional por meio do programa *Energy Plus* para a edificação padrão (HISp) e para a edificação com a incorporação de estratégias bioclimáticas (HISe). Verificou-se que estratégias de inércia térmica, isolamento e baixa absorção podem contribuir significativamente para a qualidade ambiental interior em face a condições de sobreaquecimento. Porém, apesar das reduções nas horas de desconforto e nas condições críticas de estresse térmico, as estratégias não conseguiram promover condições adequadas de salubridade aos seus ocupantes, apresentando temperaturas *Heat Index* e *Humidex* nas categorias "Perigo" e "Perigoso". A temperatura *Heat Index e os graus SET-horas* simulados não atendem às exigências da certificação LEED para a segurança térmica e sobrevivência passiva, uma vez que foram encontradas temperaturas HI acima do limite de 32,2°C e graus-hora superiores ao limite de 120°C SET-horas para temperaturas acima de 30°C SET, limites estes que se mostraram muito rígidos para o clima tropical de savana.

Palavras-chave: Resiliência térmica, Simulação computacional, Clima Tropical de Savana, Estratégias bioclimáticas.

ABSTRACT
Thermal resilience refers to the ability of a building to adapt to extreme thermal variations, minimizing the impact of these variations on the indoor environment, and to maintain a healthy and safe environment for the occupants. In this context, the objective of this study is to apply different indexes to evaluate the thermal resilience of a naturally ventilated low-income residential building in an overheating situation, located in a region of savana tropical climate. The adaptive thermal comfort, *Heat Index*, *Humidex* and SET indexes were calculated by computer simulation using the Energy Plus software for the standard building (HISp) and for the building with the incorporation of biclimatic strategies (HISe). It was found that thermal inertia, insulation, and low absorption strategies can contribute significantly to the indoor environmental quality face of overheating conditions. However, despite reductions in the hours of discomfort and critical thermal stress conditions, the strategies are not able to promote adequate salubrious conditions for their occupants, presenting HI and Humidex temperatures in "Danger" and "Hazardous" categories. The HI temperatures and SET-hours did not meet the LEED certification requirements for thermal safety and passive survivability, as HI temperatures above 32,2°C and SET-hours above the limit of 120° SET-hours for temperatures higher than 30°C-SET, thresholds that proved to be very rigid for the tropical savanna climate.

Keywords: Thermal resilience, Building simulation, Tropical Savana Climate, Bioclimatic strategies.

1. INTRODUÇÃO

O termo resiliência é utilizado em diferentes campos, como na psicologia, ecologia, economia e ainda na engenharia, apresentando significados e interpretações distintas ao longo do tempo, conforme abordado de forma extensiva por vários autores (ATTIA *et al*., 2021; TAVAKOLI *et al*., 2022). A resiliência permite que as pessoas, comunidades e sistemas mantenham a sua estabilidade e continuem a funcionar mesmo diante de mudanças, desafios e perturbações, estando dessa forma relacionada tanto à vulnerabilidade perante perturbações quanto à capacidade de adaptação e recuperação diante dos choques e eventos. Vários estudos têm se preocupado com o impacto que as altas temperaturas e o sobreaquecimento decorrente de eventos extremos podem causar na saúde humana e no ambiente construído nas últimas décadas, uma vez que representam uma ameaça à população em geral, com efeitos negativos associados o aumento no índice de mortalidade, relacionado a doenças cardiovasculares, cerebrovasculares e respiratórias. Por sua vez, o efeito da temperatura elevada afeta mais a população urbana uma vez que esta é agravada por vários fatores, que estão principalmente relacionados com o nível de desigualdade socioeconómica nas cidades, associados à idade, rendimento, classe social, nível de educação, condições de saúde e até mesmo pelo tipo de moradia, enfoque desta pesquisa (ARSAD *et al.*, 2022).

Constata-se que entre as características relacionadas ao ambiente construído, algumas se apresentam como maior indicativo de risco ou de agravamento para a saúde da população, entre as quais se pode destacar aquelas relacionadas a maior densidade habitacional, forma e densidade construída, supressão de vegetação, tipos de uso e ocupação do solo urbano e também aqueles relacionados as tipologias da habitação e moradia. Quanto ao último, fatores como número de ambientes na habitação, falta de isolamento térmico adequado, ventilação inadequada na habitação (Arsad *et al*., 2022), ou ainda menor acesso a equipamentos como ventiladores e condicionadores de ar são fatores responsáveis por trazer maior vulnerabilidade ao desempenho térmico das habitações (ARSAD *et al*., 2022; GARCIA-HERRERA *et al*., 2010; NAYAK *et al*., 2018). Sendo assim, observa-se que o ambiente construído pode impactar de forma positiva, amenizando as altas temperaturas no interior da edificação, ou de forma negativa, contribuindo para intensificar os seus efeitos na escala urbana e do edifício.

Ao abordar a relação entre resiliência e vulnerabilidade na perspectiva da edificação, Attia *et al*. (2021) afirmam que um edifício resiliente deve ser concebido baseado na análise da vulnerabilidade que considera os cenários climáticos presentes e futuros previstos, preparando os sistemas do edifício, incluindo os ocupantes, para se adaptarem mediante futuras falhas. A resiliência térmica refere-se à capacidade de um edifício ou sistema de se preparar, resistir, recuperar rapidamente e adaptar-se a grandes perturbações devido a condições meteorológicas extremas tais eventos de ondas de calor, por exemplo. A medida que as temperaturas em todo o mundo continuam a aumentar, assim como a frequência e a intensidade das ondas de calor, esta temática se torna bastante relevante principalmente quando o enfoque se volta para os usuários.

Sobre a resiliência térmica em edificações, Lomas e Ji (2009) afirmam que a resiliência às alterações climáticas, a suscetibilidade aos ganhos internos de calor e o impacto das futuras ondas de calor, devem ser parte integrante do projeto de qualquer edifício novo ou em processo de reforma. De acordo com Burman *et al*., (2014), a manifestação do conceito de resiliência no ambiente construído está diretamente relacionada ao sobreaquecimento.

Recentemente, Attia *et al*. (2021) apresentaram o conceito de arrefecimento resiliente, no qual um edifício é resiliente no que se refere ao arrefecimento quando o sistema permite resistir ou recuperar de perturbações devidas a desastres, incluindo ondas de calor e falhas de energia, e adotar as estratégias apropriadas após a falha para mitigar a degradação do edifício, a deterioração da qualidade ambiental interior e/ou maior necessidade de energia de arrefecimento do espaço. Esta definição foi discutida e desenvolvida como parte do programa IEA-EBC (*Energy in Buildings and Communities Programme*) da Agência Internacional de Energia (IEA), conforme IEA EBC Anexo 80 - Arrefecimento resiliente de edifícios (IEA-EBC, 2023), cujo principal objetivo é apoiar a transição rápida do ambiente construído para um ambiente no qual os sistemas resilientes de arrefecimento de baixo consumo de energia e baixa incorporação de carbono sejam as soluções preferenciais e correntes para o arrefecimento de edifícios em condições de sobreaquecimento térmico.

Muitos trabalhos buscaram mensurar e quantificar a resiliência térmica nas edificações, utilizando-se dos mais variados métodos e indicadores relacionados ao conforto térmico, sobreaquecimento e estresse térmico (TAVAKOLI *et al*., 2022; ATTIA *et al*., 2021). Na literatura foram identificadas algumas pesquisas cujo enfoque é avaliar a vulnerabilidade, que corresponde a possibilidade de risco de sobreaquecimento, assim como a resistência, que corresponde ao potencial de utilização de medidas de intervenção passivas para melhorar o conforto térmico contra o risco de sobreaquecimento.

Nesse contexto, evitar as temperaturas elevadas no ambiente construído que podem levar ao desconforto térmico, sobreaquecimento e consequentemente elevados níveis de estresse térmico no interior das edificações é um dos grandes desafios enfrentados hoje na arquitetura, uma vez que a previsão é de que, devido as alterações climáticas, o efeito ilha de calor e as ondas de calor sejam intensificados e mais frequentes. O conforto térmico, em contraste ao estresse térmico, refere-se ao estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico e é caracterizado pela ausência de desconforto ou estresse térmico. Já o estresse térmico pode ser definido como o estado fisiológico a que está submetida uma pessoa, quando exposta a situações ambientais extremas de frio ou calor, ou seja, corresponde ao estresse fisiológico experimentado pelos indivíduos devido à exposição a condições térmicas extremas, sendo o estresse por calor, quando expostos a ambientes quentes enquanto o estresse por frio, quando expostos a ambientes frios.

O clima Tropical de Savana (Aw) cobre 11,5% da área terrestre do mundo. Encontra-se em 25,8% do território brasileiro e, no estado de Mato Grosso, representa 52,8% da sua área (ÁLVARES *et al*., 2013). Este clima é caracterizado por altas temperaturas do ar durante todo o ano, induzindo elevadas horas de desconforto térmico no interior dos edifícios (CALLEJAS *et al*., 2019). Devido à sua localização geográfica, às projeções dos cenários de alterações climáticas futuros e de desenvolvimento socioeconómico mundial indicam o aumento da frequência dos dias quentes nos trópicos, prejudicando as condições de conforto térmico. Assim, os edifícios existentes nessas regiões podem ser altamente afetados pelas alterações climáticas no futuro. Nesse sentido, a adoção de estratégias bioclimáticas adequadas pode contribuir para a adaptação dos edifícios ao aquecimento global, sendo uma questão importante, especialmente para a população de baixa renda, uma vez que ela não dispõe de recursos financeiros para suportar o aumento do consumo de energia, o que pode levar à pobreza energética, especialmente nos países em desenvolvimento.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é aplicar diferentes índices para avaliar a resiliência térmica de uma edificação residencial unifamiliar de baixa renda, naturalmente ventilada, localizada em região de clima tropical de savana, a partir de simulação computacional. Busca-se verificar o impacto de estratégias projetuais no desempenho térmico da edificação para as condições de clima atuais, identificando assim de que maneira o ambiente construído pode contribuir positivamente para a qualidade ambiental interior em face a condições de sobreaquecimento.

3. MÉTODO

3.1. Localização da edificação e Arquivo climático adotado

A edificação unifamiliar de baixa renda selecionada para este estudo está localizada na cidade de Cuiabá, Mato Grosso, situada na região Centro-Oeste do Brasil (Latitude 15°36′56″ S e Longitude 56°06′01″ W), que apresenta clima Tropical de Savana (Aw), caracterizada pela alta temperatura do ar durante todo o ano, grandes variações higrotérmicas, e estação de Inverno indefinida ou ausente (CALLEJAS *et al*., 2019) (Figura 1). Classificações climáticas semelhantes podem ser encontradas em vários locais em todo o mundo, especialmente em regiões localizadas entre o Equador e os trópicos de Capricórnio.

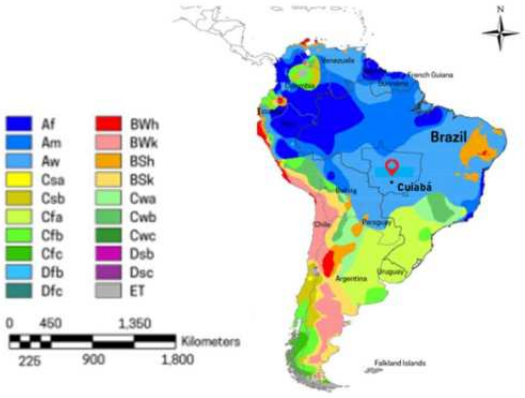


Figura 1 – Localização da residência. Fonte: Adaptado de Peel *et al*., (2007).

Para a simulação foi adotado o arquivo climático de formato EPW (SWERA) atualizado para o ano de 2005 (BRA_Cuiaba-Marechal.Ron.833620_SWERA) com o objetivo de verificar o sobreaquecimento da edificação em meio aos eventos de temperaturas extremas.

3.2. Elaboração dos modelos computacionais

A edificação avaliada neste estudo corresponde a uma residência unifamiliar de baixa renda. Esta tipologia foi escolhida por ser amplamente replicada em todas as regiões do Brasil pelo governo brasileiro no âmbito do programa de habitação social denominado "Minha casa minha vida" (BRASIL, 2023) e pelo fato desta

população ser a mais vulnerável ao impacto das altas temperaturas e mudanças climáticas. A tipologia é distribuída aos ocupantes sem qualquer preocupação em relação à adaptação climática à região de implantação, com fraco desempenho térmico, conforme abordado por Invidiata e Ghisi (2016) e Triana *et al*. (2018), comprometendo as suas condições de conforto térmico interior, bem como aumentando o consumo de energia para arrefecimento (GUARDA *et al*., 2019).

O modelo computacional foi elaborado conforme projeto arquitetônico (Figura 2) no *software Design Builder* v. 7.0.1.6, seguindo as mesmas dimensões, geometria e distribuição dos espaços apresentadas no projeto. A Figura 3 mostra um corte do projeto da edificação, enquanto a Figura 4 mostra a imagem exterior da edificação residencial construída. A edificação apresenta área de 39,18 m², sendo 34,54 m² de área de piso interno, distribuídos em quatro ambientes: sala/cozinha (17,44 m²), dormitório 1 (7,78 m²), dormitório 2 (7,57 m²) e banheiro (1,75 m²) (Figura 2). O telhado é composto por duas águas com beiral de 0,30 m de profundidade. A altura do forro dos ambientes é de 3,00 m (Figura 3). Em relação às aberturas, os espaços da sala e do quarto apresentam janelas de correr metálicas com dimensões de 1,50 × 1,00 m e 1,20 × 1,00 m, respectivamente, compostas por quatro painéis, sendo dois deles painéis fixos de vidro simples e os outros dois painéis de correr metálicos venezianos. A janela de cozinha é do tipo basculante metálica com 1,00 × 1,00 m de dimensão.

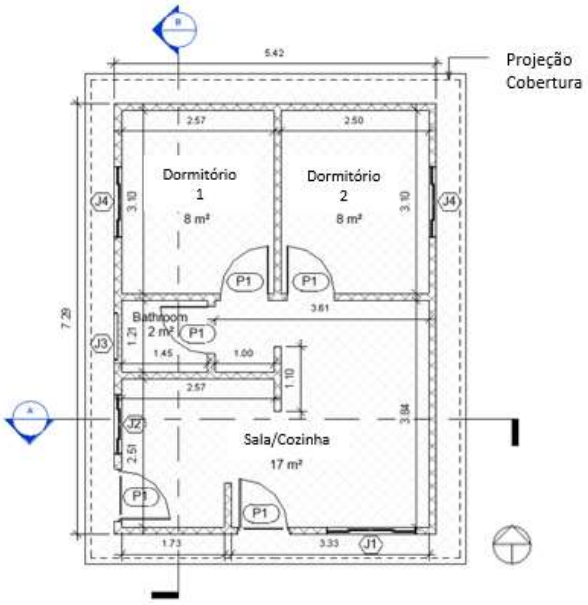


Figura 2 – Planta baixa da edificação.

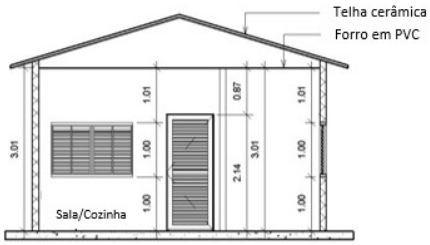


Figura 3 – Corte da edificação.



Figura 4 – Imagem exterior da edificação.

3.2.1. Caracterização do envelope dos modelos computacionais

Neste estudo foram elaborados dois modelos de simulação, cujas características encontram-se descritas na Tabela 1. O primeiro modelo corresponde à habitação padrão, chamado de HISp, no qual os materiais construtivos adotados na simulação correspondem aos materiais de projeto e construção existentes, tendo sido utilizadas as propriedades estimadas pela NBR 15220 (ABNT, 2005).

O segundo modelo, chamado de HISe, teve como base a habitação padrão, porém, foram incorporadas estratégias projetuais, visando a melhoria do desempenho térmico, tais como o isolamento térmico das paredes externas (EPS) e da cobertura (Manta térmica de alumínio), cujas propriedades adotadas foram fornecidas pela NBR 15220 (2005) e NBR 15575 (ABNT, 2021) (Tabelas 1 e 2). Além do isolamento térmico, a absortância das paredes externas e da cobertura foi alterada, passando a corresponder à cor branca. As modificações propostas para o envelope da edificação se configuram estratégias de inércia térmica, isolamento e baixa absorção, conforme recomendação e orientações construtivas estabelecidas para a zona bioclimática Z07, região de clima tropical. Com exceção destes itens relacionados aos materiais da envoltória, todas as demais características dos dois modelos são iguais.

A incorporação destas estratégias ao projeto da edificação conduziu a um significativo melhoramento no desempenho térmico, fazendo com que a envoltória da edificação alcance o nível ‘A’ da Etiqueta Energética Brasileira para edificações residenciais (CALLEJAS *et al*., 2023). Imagens do modelo de simulação e sua geometria podem ser vistas na Figura 5 (planta) e na Figura 6 (perspectiva).

Tabela 1 – Materiais utilizados na simulação computacional dos modelos HISp e HISe e suas propriedades térmicas.

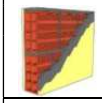
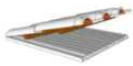
Modelo	Elemento envoltória	Camadas dos materiais	Espessura [m]	Condutividade [W/m.K]	Calor específico [J/kg.K]	Densidade [kg/m3]	Transmitância térmica [W/m²K]	Absortância (α)
Habitação padrão (HISp)	Paredes externas 	Argamassa exterior	0,025	1,15	1000	2000	2,49	0,60
		Tijolo cerâmico	0,09	0,90	920	1600		
		Argamassa interior	0,025	1,15	1000	2000		
	Piso	Concreto	0.10	1.75	1000	2200	4,40	0,40
	Cobertura 	Telha cerâmica	0,01	1.05	920	2000	2,02	0,85
		Ático	>0,05	-	-	-		
		Forro em PVC	0,01	0,20	1340	1300		
Habitação estratégias (HISe)	Paredes externas 	Argamassa exterior	0,025	1,15	1000	2000	0,886	0,15
		EPS	0,03	0,04	1400	15		
		Tijolo cerâmico	0,09	0,90	920	1600		
		Argamassa interior	0,025	1,15	1000	2000		
	Piso	Concreto	0.10	1.75	1000	2200	4,40	0,40
	Cobertura 	Telha cerâmica	0,01	0,65	840	1700	1,18	0,15
		Manta alumínio	-	-	-	-		
		Ático	>0,05	-	-	-		
		Forro em PVC	0,01	0,20	1340	1300		

Tabela 2 - Características dos materiais utilizados na simulação computacional.

Material	Resistência térmica [m².K/W]
Manta alumínio	0,67
Câmara de ar com superfície de alta emissividade, espessura >5,0 cm - fluxo descendente	0,21
Câmara de ar com superfície de alta emissividade, espessura >5,0 cm - fluxo ascendente	0,14

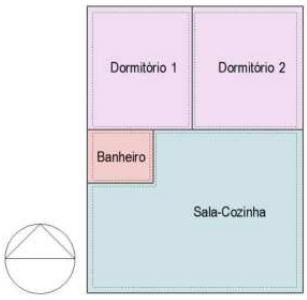


Figura 5 – Planta baixa do modelo de simulação.

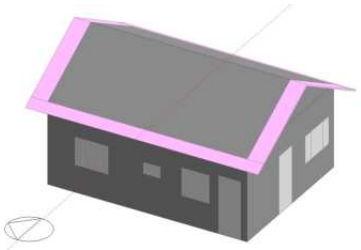


Figura 6 – Perspectiva do modelo de simulação.

3.2.3. Ocupação, Iluminação e Equipamentos

Os padrões de ocupação e ganhos internos foram tomados da NBR 15575 (ABNT, 2021), sendo 2 pessoas nos quartos e 4 pessoas na sala, com atividade metabólica de 81W/pessoa nos quartos e de 108W/pessoa na sala/cozinha. A densidade de potência de iluminação é de 5,0W/m² para todos os ambientes. Os horários de ocupação nos quartos e salas são das 00h às 08h e das 14h às 22h, respectivamente, tanto para dias de semana quanto para os finais de semana. Na sala/cozinha foi considerada a densidade de potência de equipamentos de 6,0W/m² em operação, conforme horário de ocupação. A edificação foi considerada naturalmente ventilada, seguindo os parâmetros de simulação apresentados pela NBR15575 (ABNT, 2021).

3.2. Índices de resiliência térmica para edifícios

Observa-se que vários são os índices sugeridos na literatura, sob o aspecto do conforto térmico e estresse térmico, utilizados para mensurar a resiliência de edificações. Os índices de conforto e sobreaquecimento atualmente sugeridos pelos pesquisadores para avaliar o conforto e o estresse térmico ao calor são aqueles estabelecidos em referências normativas como a CIBSE (*Chartered Institution of Building Services Engineers*) *Guide* A (ZUNE *et al*., 2020), CIBSE TM52 e CIBSE TM59 (WRIGHT e VENSKUNAS, 2022) e ASHRAE 55. Observa-se que os índices *Heat Index*, Humidex e SET estão sendo amplamente adotados

como parâmetro para se avaliar os níveis de estresse térmico, com enfoque voltado para a vulnerabilidade ao sobreaquecimento nas edificações (BORGHERO *et al*., 2023; FLORES-LARSEN e FILIPPÍN, 2021; JI *et al*., 2023; LAOUADI *et al*., 2020; SHENG *et al*., 2023; SUN *et al*., 2020). O *software Energy Plus v.*9.4, que incorpora os índices *Heat Index*, *Humidex* e SET no relatório intitulado resiliência térmica, foi adotado para o cálculo dos índices que serão utilizados na avaliação das condições de conforto térmico, sobreaquecimento e estresse térmico no interior da edificação pesquisada.

3.2.1. ASHRAE 55:2013

A metodologia do conforto térmico adaptativo é aplicada para representar as condições de conforto térmico dentro de edifícios ventilados naturalmente. Os níveis de conforto térmico são definidos pela temperatura operativa interior ideal ou pela temperatura mensal neutra (T_n, em °C) relacionada com as médias mensais da temperatura do ar exterior (T_{Emed}, em °C), seguindo a Equação (1), válida para T_{Emed} entre 10,0 °C e 33,5 °C. Cabe aqui destacar que a norma ASHRAE 55 é amplamente aplicada na literatura para a avaliação do sobreaquecimento. No entanto, sua aplicação está limitada a faixa limite de temperatura média externa (33,5 °C) para a qual a metodologia foi desenvolvida, que muitas vezes é superada em condições de sobreaquecimento térmico. Em relação ao clima de Cuiabá/MT, a média da T_{Emed} do cenário atual é de 26,73°C, calculada através do arquivo climático SWERA.

$$T_n = 17,8 + 0,31 \times T_{Emed} \quad (1)$$

Os intervalos de conforto térmico são determinados a partir da definição da temperatura mensal neutra (T_n) seguindo os procedimentos estabelecidos pela ASHRAE 55. Os limites mensais superior e inferior para 90% dos ocupantes satisfeitos são calculados através da Equação (2), na qual a temperatura operativa (T_{op}) representa a temperatura horária operativa interior. Nesta pesquisa, a aceitabilidade de 90% foi adotada por ser mais restritiva, considerando apenas 10% de ocupantes insatisfeitos.

$$(T_n - 2,5) \leq T_{op} \leq (T_n + 2,5) \quad (2)$$

3.2.2. Heat Index (HI)

O *Heat Index* (HI), proposto por Steadman (1979), corresponde a sensação de temperatura para o corpo humano quando combinadas a temperatura do ar e a umidade relativa. A temperatura HI e seus efeitos sobre a saúde humana estão categorizadas em cinco níveis: Seguro, Cuidado, Cuidado extremo, Perigo e Perigo extremo (Tabela 3). De acordo com Sun *et al*. (2020), o índice é adequado para ser aplicado à análise quantitativa de eventos extremos. A adoção do índice para avaliar a resiliência térmica de ambientes interiores pode ser vista em Flores-Larsen e Filippín (2021).

O código de certificação LEED (*Leadership in Energy & Environmental Design*), elaborado pelo USGBC (*United States Green Building Council*), apresenta o crédito Sobrevivência Passiva e Energia de Apoio Durante as Perturbações (USGBC, 2023), no qual faz uso de índices de stress térmico, tais como *Heat Index* e SET como metodologia para avaliação da segurança térmica e sobrevivência passiva, recomendando que edifícios residenciais apresentem um grau máximo de 32,2°C de temperatura de HI, correspondente ao limiar de "Cuidado Extremo", referência adota para avaliação.

Tabela 3 – Temperaturas *Heat Index* (HI) e seus níveis/efeitos na saúde humana

***Heat Index* (HI) [°C]**	**Níveis do HI e efeitos na saúde humana**
< 26,7 °C	Seguro: sem risco
26,7 – 32,2 °C	Cuidado: a fadiga é possível com exposição e atividade prolongada.
32,2 – 39,4 °C	Cuidado extremo: cãibras e exaustão de calor são possíveis.
39,4 – 51,7 °C	Perigo: cãibras e exaustão de calor são prováveis; provável golpe de calor com a atividade prolongada.
> 51,7 °C	Perigo extremo: o golpe de calor é iminente.

Fonte: Adaptada e traduzida pela autora, baseada em Tavakoli et al. (2022).

3.2.3. Humidex

O índice *Humidex*, proposto por Masterton & Richardson (1979), descreve como o tempo é quente e úmido para um indivíduo. Ao combinar a temperatura e a umidade num só número para refletir a temperatura percebida (ou temperatura equivalente *Humidex*), o índice leva em conta os dois fatores mais importantes que afetam o conforto no verão, apresentando a medida sobre “quão sufocante o ar está”. A Tabela 4

apresenta as categorias das temperaturas equivalentes *Humidex* e os efeitos no conforto térmico, divididos nos seguintes níveis: pouco ou nenhum desconforto, algum desconforto, grande desconforto, perigoso e golpe de calor iminente.

Tabela 4 – Níveis do índice *Humidex* e efeitos no conforto

Humidex (°C)	Grau de conforto
H ≤ 29	Pouco ou nenhum desconforto
29 < H < 39	Algum desconforto
39 ≤ H ≤ 45	Grande desconforto
45 < H < 55	Perigoso
H ≥ 55	Golpe de calor iminente

Fonte: Adaptado pela autora com base em USDE (2022).

3.2.4. SET-horas

O índice SET (*Standard Effective Temperature*), desenvolvido por GAGGE *et al*. (1986), é considerado tanto um índice de conforto quanto um índice que avalia o estresse térmico. De acordo com a ASHRAE 55 (2013), o SET corresponde a temperatura de um ambiente imaginário com 50% de umidade relativa, velocidade média do ar inferior a 0,1 m/s e temperatura radiante média igual a temperatura média do ar, em que a perda total de calor pela pele de um ocupante imaginário, considerando um metabolismo de 1,0 met e vestimenta de 0,6 clo, é a mesmo que a de uma pessoa no ambiente real com vestuário e nível de atividade reais. O selo LEED v4.1 estabelece o intervalo entre 12°C e 30°C como seguro para habitabilidade, estabelecendo o limite de 120 °C SET-horas acima de 30 °C SET em edifícios residenciais, considerando 24 horas de ocupação durante o período de calor extremo indicado pelo arquivo climático (STAT) (USDE, 2022), referência adotada para a avaliação das condições de segurança térmica e sobrevivência passiva da edificação. O valor acumulado de SET-Horas será calculado a partir do programa *Energy Plus* por meio dos resultados apresentados no relatório "Resumo Anual da Resiliência Térmica".

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos por meio das simulações computacionais para um ano de operação no modo naturalmente ventilado. As simulações foram realizadas para os dois modelos, habitação padrão (HISp) e habitação com a incorporação das estratégias projetuais (HISe), que considera o isolamento térmico da envoltória, bem como menores valores de absortância térmica para as paredes externas e cobertura, conforme descrito na Tabela 1. Os resultados da simulação foram calculados e compilados em função dos índices conforto térmico adaptativo (ASHRAE 55:2013), *Heat Index* (HI), Humidex e SET.

4.1. Método adaptativo da ASHRAE 55:2013

As Figuras 7 e 8 ilustram as horas de conforto e desconforto por frio e calor nos ambientes das habitações HISp e HISe, considerando 90% dos usuários satisfeitos. É possível verificar que, na habitação padrão (HISp), os dormitórios 1 e 2, ocupados no período das 00h às 8h, apresentam 58% e 59% das horas do ano em conforto térmico. Já a sala/cozinha, ocupada durante das 14h às 22h, apresenta apenas 15% das horas em conforto, estando 82% das horas anuais em desconforto por calor. Com as melhorias implementadas (HISe), os dormitórios 1 e 2 passaram a apresentar 85% das horas em conforto térmico, redução de 27% e 25% nas horas de desconforto por calor. A sala/cozinha passou a apresentar 40% das horas em conforto, estando 57% das horas anuais em desconforto por calor, o que corresponde a uma redução de 25%. Portanto, as medidas passivas de projeto propostas na residência HISe são adequadas para reduzir a vulnerabilidade ao sobreaquecimento e melhorar a habitabilidade da edificação para o local pesquisado nas condições de cenário atual, apresentando maior capacidade para se adaptar às temperaturas externas.

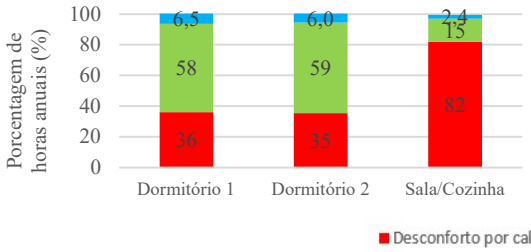


Figura 7 – Resultados para a habitação padrão (HISp).

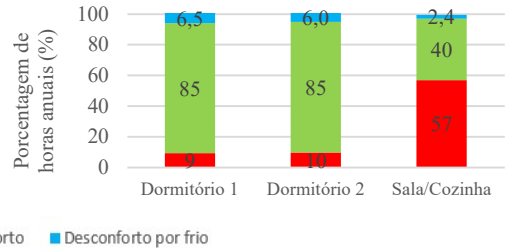
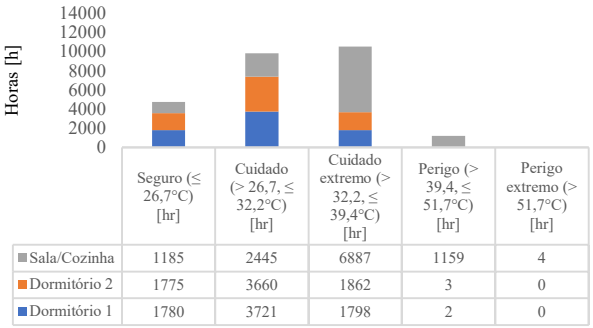


Figura 8 – Resultados para a habitação (HISe).



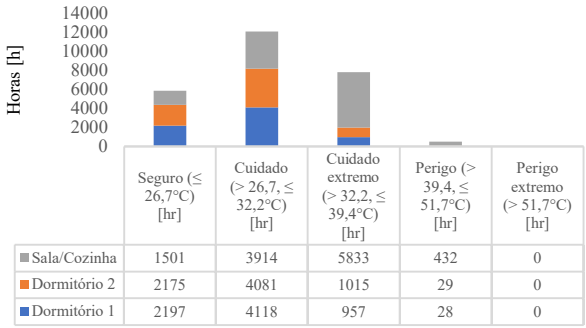
4.2. *Heat Index* (HI)

As temperaturas *Heat Index* (HI) foram calculadas para cada ambiente individualmente. As Figuras 9 e 10 apresentam a distribuição da ocorrência das temperaturas HI nos ambientes da habitação padrão (HISp) e da habitação (HISe). Na habitação padrão (HISp) é possível verificar que a sala/cozinha apresenta 6.887 horas com temperaturas HI entre 32,2°C e 39,4°C, classificação "Cuidado extremo" e 1.159 horas na classificação "Perigo" (39,4 e 51,7°C). Já na habitação (HISe), essas horas passaram para 5.833 horas em "Cuidado extremo" e 432 horas em "Perigo". Consequentemente, observa-se o aumento da ocorrência das temperaturas HI na classificação "Seguro" de 310 horas na sala/cozinha e de 418 e 400 horas nos dormitórios 1 e 2, respectivamente. Portanto, conclui-se que as edificações implantadas em região de savana brasileira estão sujeitas a elevada frequência de horas em situação de desconforto caso medidas de projeto de adaptação ao clima não sejam incorporadas ao envelope do edifício. Apesar da elevada redução na ocorrência das temperaturas HI nas categorias "Cuidado extremo", "Perigo" e "Perigo extremo", melhorando a qualidade ambiental interna, verifica-se que os valores obtidos na HISe não atendem aos requisitos da certificação LEED que exige que edifícios residenciais mantenham a temperatura HI no grau máximo de 32,2°C (limite superior do nível "Cuidado"), visto que foram encontradas temperaturas de HI nas categorias "Cuidado Extremo" e "Perigo", superiores ao grau máximo recomendado, nos três ambientes avaliados. Dessa forma, observa-se que nenhuma das residências promove condições adequadas de conforto térmico, estresse térmico e de salubridade aos seus ocupantes.



	Seguro (≤ 26,7°C) [hr]	Cuidado (> 26,7, ≤ 32,2°C) [hr]	Cuidado extremo (> 32,2, ≤ 39,4°C) [hr]	Perigo (> 39,4, ≤ 51,7°C) [hr]	Perigo extremo (> 51,7°C) [hr]
Sala/Cozinha	1185	2445	6887	1159	4
Dormitório 2	1775	3660	1862	3	0
Dormitório 1	1780	3721	1798	2	0

Figura 9 – Distribuição da ocorrência das temperaturas HI em cada ambiente da habitação padrão HISp.

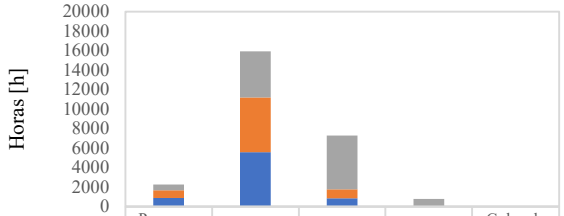


	Seguro (≤ 26,7°C) [hr]	Cuidado (> 26,7, ≤ 32,2°C) [hr]	Cuidado extremo (> 32,2, ≤ 39,4°C) [hr]	Perigo (> 39,4, ≤ 51,7°C) [hr]	Perigo extremo (> 51,7°C) [hr]
Sala/Cozinha	1501	3914	5833	432	0
Dormitório 2	2175	4081	1015	29	0
Dormitório 1	2197	4118	957	28	0

Figura 10 – Distribuição da ocorrência das temperaturas HI em cada ambiente da habitação HISe.

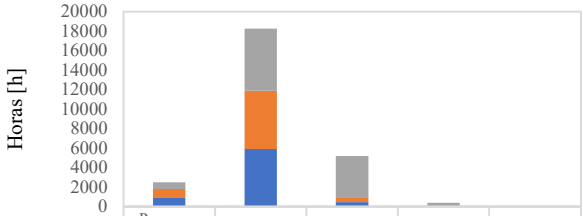
4.3. *Humidex* (°C)

Os índices *Humidex* foram calculados para cada ambiente individualmente. As Figuras 11 e 12 apresentam a distribuição da ocorrência do índice *Humidex* nos ambientes das habitações (HISp) e (HISe).



	Pouco ou nenhum desconforto (≤ 29) [hr]	Algum desconforto (> 29, ≤ 40) [hr]	Grande desconforto (> 40, ≤ 45) [hr]	Perigoso (> 45, ≤ 50) [hr]	Golpe de calor iminente (> 50) [hr]
Sala/Cozinha	617	4733	5507	777	46
Dormitório 2	773	5619	906	2	0
Dormitório 1	872	5577	850	1	0

Figura 11 – Distribuição da ocorrência do índice *Humidex* nos ambientes da habitação padrão HISp.



	Pouco ou nenhum desconforto (≤ 29) [hr]	Algum desconforto (> 29, ≤ 40) [hr]	Grande desconforto (> 40, ≤ 45) [hr]	Perigoso (> 45, ≤ 50) [hr]	Golpe de calor iminente (> 50) [hr]
Sala/Cozinha	693	6364	4288	335	0
Dormitório 2	850	5981	442	27	0
Dormitório 1	941	5906	427	26	0

Figura 12 – Distribuição da ocorrência do índice *Humidex* e nos ambientes da habitação HISe.

Na habitação padrão (HISp) é possível verificar que a sala/cozinha apresenta 46 horas com temperatura equivalente Humidex (C°) > 50°C, efeito "Golpe de calor iminente", e 777 horas com temperatura equivalente Humidex (C°) entre 45 e 50°C, apresentando efeito "Perigoso". Já na habitação (HISe), essas horas passaram para 0 horas em "Golpe de calor iminente" e 335 horas em "Perigoso". Porém, nos dormitórios 1 e 2, observa-se o aumento da ocorrência no efeito "Perigoso", que passou de 1 e 2 (HISp) horas para 26 e 27 °C na (HISe). Destaca-se o aumento da ocorrência dos índices *Humidex* na classificação

"Pouco ou nenhum desconforto" em cerca de 76 horas na sala/cozinha e em cerca de 77 e 69 horas nos dormitórios 1 e 2, respectivamente, e na classificação "Algum desconforto" em cerca de 1.631 horas na sala/cozinha e em cerca de 329 e 362 horas nos dormitórios 1 e 2, respectivamente. Dessa forma, é válido destacar que as estratégias incorporadas na habitação (HISe) possibilitaram a redução da ocorrência de 438 horas classificadas como efeito "Perigoso" e "Golpe de Calor", melhorando os níveis de estresse térmico.

4.4. Resultados SET-horas

Como não foram encontradas horas com SET < 12°C e demanda de aquecimento, a Figura 13 apresenta apenas as horas com demanda de arrefecimento (SET > 30°C). A habitação padrão (HISp) apresenta no total 1465°C SET-horas acima de 30°C SET, distribuídas em 525°C SET-horas na Sala/Cozinha, 472°C SET-horas no Dormitório 2 e 468°C SET-horas no Dormitório 1. Já a habitação HISe apresenta no total 1281°C SET-horas acima de 30°C SET, distribuídas em 478°C SET-horas na Sala/Cozinha, 405°C SET-horas no Dormitório 2 e 398°C SET-horas no Dormitório 1.

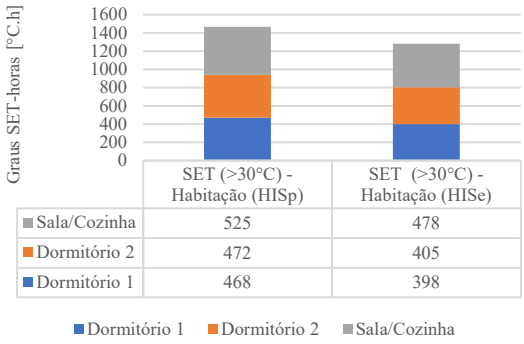


Figura 13 – Graus SET-horas acima de 30°C SET.

Observa-se a redução na ocorrência dos °C SET-horas acima de 30°C SET em todos os ambientes da HISe quando comparada a HISp. As estratégias implementadas promoveram a redução de 47°C SET-horas na Sala/Cozinha (9%), 67°C SET-horas no dormitório 2 (14%) e 70°C SET-horas no dormitório 1 (15%) durante o período de calor extremo que corresponde aos dias 10 e 16 de outubro. Apesar da redução significativa nos °C SET-horas, proporcionando menos horas de desconforto e estresse térmico aos ocupantes, os valores na HISe não atendem à certificação LEED, pois excedem os 120 °C SET-horas com temperaturas acima de 30 °C SET, estabelecido como limite para o período de calor extremo, o que indica que nenhuma das residências possibilita condições de segurança térmica e sobrevivência passiva para o clima tropical de savana, segundo a metodologia do LEED. No dormitório 1, que apresentou a melhor condição avaliada, os graus-hora excederam o limite em 232%. É válido ressaltar que o limite proposto parece não ser adequado para a região de clima tropical de savana, muito provavelmente por ter sido definido com base em outros tipos de clima menos severos ao calor, devendo ser utilizado com cautela e explorado em novos estudos de caso em clima tropical.

5. CONCLUSÕES

Este trabalhou avaliou a resiliência térmica de duas edificações residenciais de baixa renda, naturalmente ventiladas, em situação de sobreaquecimento, localizadas em região de clima tropical de savana. A residência padrão, conforme construída (HISp), e a residência com a incorporação de estratégias bioclimáticas (HISe) de inércia térmica, isolamento e baixa absorção foram simuladas com o programa *Energy Plus*, considerando o cenário presente e avaliadas por meio dos índices conforto térmico adaptativo, *Heat Index* (HI), Humidex e SET.

Verificou-se que a residência padrão (HISp) não promove condições adequadas de conforto térmico e de salubridade aos seus ocupantes, uma vez que os ambientes apresentam níveis elevados de desconforto por calor quando se considera o conforto adaptativo para 90% dos usuários satisfeitos, temperaturas *Heat Index* (HI) nas categorias "Cuidado Extremo" e "Perigo" em todos os ambientes e temperaturas equivalentes *Humidex* (°C) dentro das categorias "Grande Desconforto" e "Perigo". Apesar da incorporação de estratégias projetuais bioclimáticas de adaptação para o clima da região na residência HISe, que possibilitou a redução das horas em desconforto, sobreaquecimento e em estresse térmico, ainda são encontradas temperaturas HI superiores ao nível "Cuidado" e valores muito superiores aos 120°C SET-horas com temperaturas acima de 30°C SET estabelecidos como limite pela certificação LEED, o que se mostrou ser muito rígido para o clima tropical de savana.

Ao comparar as residências avaliadas, levando-se em consideração os índices utilizados, conclui-se que a habitação HISe é mais resiliente que a habitação padrão HISp, porque apresenta maior capacidade para se adaptar às temperaturas externas elevadas, proporcionando menos horas de sobreaquecimento, desconforto e estresse térmico, o que corresponde a um ambiente mais saudável e seguro aos ocupantes no

clima tropical de savana. Porém, mesmo com a redução da vulnerabilidade ao sobreaquecimento na residência HISe, verifica-se que nenhuma das tipologias apresenta condições de segurança térmica e sobrevivência passiva para a região de clima tropical de savana, visto que as temperaturas encontradas são elevadas durante todo o ano, o que se traduz em elevada ocorrência de estresse térmico até mesmo na HISe, classificada como nível A em eficiência energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220.** Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2021.

ASHRAE AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55 - Thermal environmental conditions for human occupancy**, Atlanta, 2013.

ATTIA, S.; LEVINSON, R.; NDONGO, E.; HOLZER, P.; KAZANCI, O; HOMAEI, S.; ZHANG, C. Resilient cooling of buildings to protect against heat waves and power outages: Key concepts and definition. Energy and Buildings, v. 239, 2021.

ARSAD, F.; HOD, R.; AHMAD. N; ISMAIL, R.; MOHAMED, N.; BAHAROM, M. The Impact of Heatwaves on Mortality and Morbidity and the Associated Vulnerability Factors: A Systematic Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. 2022.

BORGHERO, L; CLÈRIES, E., PÉAN, T., ORTIZ, J. Comparing cooling strategies to assess thermal comfort resilience of residential buildings in Barcelona for present and future heatwaves. **Building and Environment**, v. 231, 2023.

BURMAN, E.; KIMPIAN, J.; MUMOVIC, D. Reconciling Resilience and Sustainability in Overheating and Energy Performance Assessment of Non-Domestic Buildings. **Proceedings** of the 2nd International Conference on Urban Sustainability and Resilience. Anais...UCL (University College London): London, UK.: 2014.

BRASIL. Ministério das Cidades (Org.). **Resultados do Programa Minha Casa, Minha Vida. 2016.** Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/materias/programa-minha-casa-minha-vida>. Acesso em 19 de Abril de 2023.

CALLEJAS, I.J.A.; BIUDES, M.S.; MACHADO, N.; DURANTE, L.C.; LOBO, F. Patterns of Energy Exchange for Tropical. Urban and Rural Ecosystems Located in Brazil Central. **Journal of Urban and Environmental Engineering**. v.13, p. 69-79, 2019.

CALLEJAS, I.J.A.; GUARDA, E.L.A.d.; DURANTE, L.C. Constructive Measures to Counterbalance Climate Change Impacts on Low-Income Housing in the Brazilian Savannah Climate. In: Marín-Restrepo, L., Pérez-Fargallo, A., Piderit-Moreno, M.B., Trebilcock-Kelly, M., Wegertseder-Martínez, P. (eds) **Removing Barriers to Environmental Comfort in the Global South**, Green Energy and Tecnology. Springer, Cham. 1ª edição. 2023.

DOE. DEPARTMENT OF ENERGY. **Energy Plus.** Disponível em: <http://energyplus.net>. Acesso em: 24 de Fevereiro 2023.

FLORES-LARSEN, S.; FILIPPÍN, C. Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. **Energy and Buildings**, v. 231, p. 110576, 2021.

GAGGE, A.; FOBELETS, A.; BERGLUND, A. **A Standard Predictive Index of Human Response**, 1986.

GARCIA-HERRERA, R.; DÍAZ, J.; TRIGO, R.M.; LUTERBACHER, J.; FISCHER, M. A review of the european summer heat wave of 2003. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v.40, p. 267–306, 2010.

GUARDA, E. L. A. *et al*. Adaptive comfort assessment for different thermal insulations for building envelope against the effects of global warming in the mid-western Brazil. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, v. 329, n. 1, 2019.

IEA-EBC. IEA EBC Annex 80 - **Resilient Cooling of Buildings.** Disponível em: <https://annex80.iea-ebc.org/>. Acesso em: 01 de Março de 2023.

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brasil. **Energy and Buildings,** v. 130, n.1, p. 20–32, 2016.

JI, L.; SHU, C.; LAOUADI, A.; LACASSE, M.; WANG, L. Quantifying improvement of building and zone level thermal resilience by cooling retrofits against summertime heat events. **Building and Environment**, v. 229, p. 1–2, 2023.

LAOUADI, A.; BARTKO, M.; LACASSE, G. A. Climate Resilience Buildings: Guideline for management of overheating risk in residential buildings. **Energy & Buildings**, v. 226, p.16, 2020.

LOMAS, K.; JI, Y. Resilience of naturally ventilated buildings to climate change: Advanced natural ventilation and hospital wards. **Energy and Buildings**, v.41, p. 629-653, 2009.

NAYAK, S. G., SHRESTHA, S.; KINNEY, P.L.; ROSS, Z.; SCHERIDAN, S.C.; PANTEA, C.I.; HSU, W.; MUSCATIELLO, N.; HWANG, S. Development of a heat vulnerability index for New York State. **Public Health**, v. 161, p. 127–137, 2018.

PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated world map pf the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

SHENG, M.; REINER, M.; SUN, K.; HONG, T. Assessing thermal resilience of an assisted living facility during heat waves and cold snaps with power outages. **Building and Environment**, v. 230, p. 2–4, 2023.

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.

TAVAKOLI, E.; O`DONOVAN, A.; KOLOKOTRONI, M.; O`SULLIVANM, P. Evaluating the indoor thermal resilience of ventilative cooling in non-residential low energy buildings: A review. **Building and Environment**, v. 222, 2022.

TRIANA, M.A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1379–1392, 2018.

USDE. **Engineering Reference: EnergyPlusTM Version 22.1.0 Documentation**. [s.l: s.n.].

USGBC. Design for Enhanced Resilience. Disponível em: <https://www.usgbc.org/credits>. Acesso em: 8 de Março de 2023.

WRIGHT, A.; VENSKUNAS, E. Effects of Future Climate Change and Adaptation Measures on Summer Comfort of Modern Homes across the Regions of the UK. **Energies**, v. 15, n. 2, p. 26, 2022.

ZUNE, M.; RODRIGUES, L.; GILLOTT, M. The vulnerability of homes to overheating in Myanmar today and in the future: A heat index analysis of measured and simulated data. **Energy and Buildings**, v. 223, p. 110201, 2020.