XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Habitações multifamiliares em clima quente e úmido: influência da infiltração de ar e da absortância na demanda de resfriamento em clima futuro

Vivienda multifamiliar en climas cálidos y húmedos: influencia de la infiltración y absorción del aire en la demanda de enfriamiento en clima futuro

Multifamily housing in hot and humid climates: influence of air infiltration and absorptance on cooling demand in future climate

Desempenho térmico do ambiente construído / *Rendimiento térmico del entorno construido/*

Thermal performance of the built environment

Amaro, Giovana;
graduanda, Instituto de Arquitetura e Urbanismo-USP, São Carlos-SP, Brasil, giovana.amaro@usp.br;

Amaro, Isabela;
graduanda, Instituto de Arquitetura e Urbanismo-USP, São Carlos-SP, Brasil, isabela.o.amaro@usp.br;

Grassi, Camila;
pós-doutoranda, Instituto de Arquitetura e Urbanismo-USP, São Carlos-SP, Brasil, anchietac@gmail.com;

Chvatal, Karin Maria Soares
docente, Instituto de Arquitetura e Urbanismo-USP, São Carlos-SP, Brasil, karin@sc.usp.br.

Resumo

Em vista dos estudos sobre as mudanças climáticas que preveem o aumento das temperaturas da Terra, este trabalho teve como objetivo analisar quais seriam as melhores soluções construtivas, considerando a infiltração de ar nos ambientes internos e a absortância dos materiais, a fim de proporcionar uma maior eficiência energética no processo de resfriamento. Para isso, utilizou-se simulação computacional em softwares especializados em conforto ambiental, variando-se as taxas de renovação de ar por infiltração e a absorção solar, tanto para o clima atual, quanto para o clima futuro. Com isso, observou-se que as mudanças nesses dois parâmetros seriam soluções eficientes para reduzir o consumo de energia. Pretende-se assim, futuramente, otimizar os espaços construídos, proporcionando uma melhora para com as questões ambientais e climáticas.

Palavras-chave: Infiltração de ar. Demanda energética. Resfriamento. Mudanças climáticas. Simulação.

Resumen

A la luz de los estudios sobre el cambio climático que prevén el aumento de las temperaturas de la Tierra, este trabajo tuvo como objetivo analizar cuáles serían las mejores soluciones constructivas, considerando la infiltración de aire en los ambientes internos y la absorbancia de los materiales, con el fin de proporcionar una mayor eficiencia energética en el proceso de enfriamiento. Para ello, se utilizó simulación computacional en programas especializados en confort ambiental, variando las tasas de renovación de aire por infiltración y la absorción solar, tanto para el clima actual como para el clima futuro. Se observó que los cambios en estos dos parámetros serían soluciones eficientes para reducir el consumo de energía. Se pretende, así, en el futuro, optimizar los espacios construidos, mejorando las cuestiones ambientales y climáticas.

Palabras clave: Infiltración de aire. Demanda energética. Enfriamiento. Cambios climáticos. Simulación.

Abstract

In light of studies on climate change that predict an increase in Earth's temperatures, this work aimed to analyze the best construction solutions, considering air infiltration in indoor environments and materials' absorptance, in order to provide greater energy efficiency in the cooling process. To achieve this, computational simulation was used in a software specialized in building physics, varying air change rates through infiltration and solar absorption, both for the current and future climates. It was observed that changes in these two parameters would be efficient solutions to reduce energy consumption. The aim is to, in the future, optimize built spaces, improving environmental and climate-related issues.

Keywords: Air infiltration. Energy demand. Cooling. Climate change. Simulation.

1. Introdução

Ao longo das últimas décadas a temperatura da Terra vem aumentando, com os registros mais altos sendo na última década (2013-2022) (NOAA, 2021). Essas mudanças climáticas acarretam em períodos mais frequentes de calor, causando também o aumento da quantidade e intensidade de ondas de calor (TAYLOR et al., 2023).

No entanto, a magnitude dessas mudanças depende muito do sucesso dos esforços de mitigação colocados em prática (TAYLOR et al., 2023). As temperaturas elevadas apresentam riscos não apenas para a saúde e bem-estar dos ocupantes, mas também implicarão no aumento da demanda energética para resfriamento dos ambientes (EBI et al., 2021).

Neste âmbito, estudos têm analisado o impacto de diferentes elementos construtivos e estratégias passivas de resfriamento, considerando climas futuros, a fim de avaliar se tais elementos e estratégias serão adequados frente às mudanças climáticas previstas (MURTYAS et al., 2024). Elementos projetuais, como o posicionamento de aberturas, são importantes estratégias para garantir a remoção do ar quente dos ambientes, assim como o emprego de elementos de sombreamento como beirais, toldos e persianas para o bloqueio do ganho de calor direto (TONG et al., 2021). Materiais reflexivos nas coberturas e isolamento térmico nas coberturas e paredes contribuem para manter o ambiente interno mais fresco por reduzir a transferência de calor. A eficácia de materiais de mudança de fase, ou *Phase Change Materials* (PCM), tem sido estudada, com resultados positivos para a diminuição do desconforto térmico, emissões de CO_2 e consumo energético (ELSAYAD et al., 2022). Materiais, ou revestimentos frios, por terem uma alta refletância, diminuem o ganho de calor das superfícies, especialmente no verão, resultando em menor consumo energético por resfriamento (XU et al., 2024).

A ventilação natural também tem sido avaliada pensando em sua eficácia em climas futuros, e Yao (2012) apresenta estudo demonstrando que uma taxa de renovação do ar por hora (*air change rate per hour* (ACH)) de 0.5–15 tem um bom custo-benefício, e é aplicável para se obter conforto térmico e reduzir o consumo energético em edifícios naturalmente ventilados. Considerar a ventilação natural é crucial no desenvolvimento de projetos, especialmente em climas quentes como é na maior parte do território brasileiro. É importante garantir a taxa de renovação do ar por hora, tanto para remoção de poluentes como também para garantir o conforto térmico e redução do consumo energético. No entanto, sabendo das projeções de temperaturas mais elevadas nos climas futuros, é importante considerar se uma taxa de infiltração do ar menor não será mais adequada, ou seja, uma estanqueidade maior nas janelas. Com a temperatura externa mais elevada, o ar quente infiltrando no ambiente interno pode ocasionar em um maior consumo energético para o resfriamento, conforme estudos da área indicam (HAN; SREBRIC; ENACHE-POMMER, 2015; HU et al., 2023).

Tendo em vista a relevância da combinação de estratégias passivas para uma maior eficácia (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018), este estudo teve como objetivo analisar o impacto da redução da infiltração de ar pelas janelas de uma habitação multifamiliar na cidade de Manaus, AM, no seu consumo energético, considerando clima atual e futuro (2080). Esta alteração foi combinada com a redução da absortância da envoltória, tendo em vista que estratégias passivas combinadas entre si apresentam maior eficiência, especialmente num contexto futuro de elevado aquecimento.

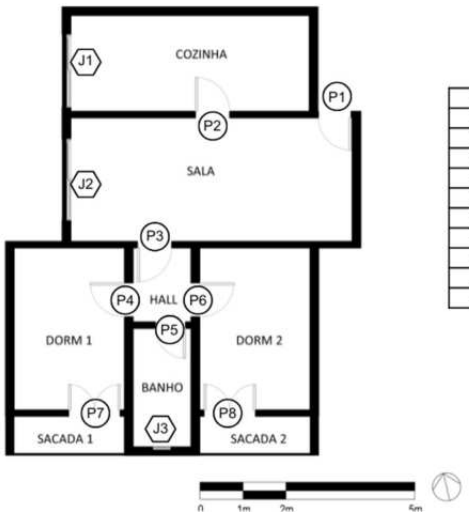
2. Método

Este estudo visa comparar a demanda de resfriamento de uma unidade habitacional considerando clima atual (2009-2023) e futuro (2080) na cidade de Manaus, AM, sujeita a alterações na sua taxa de infiltração e na absortância das paredes. As comparações foram realizadas no software de simulação de desempenho termoenergético EnergyPlus (EERE, 2021). Este é um programa amplamente utilizado, gratuito, robusto e confiável para previsões detalhadas do desempenho térmico e energético de edificações, além de ser validado pela ASHRAE-140 (ASHRAE, 2023). Os itens a seguir detalham as etapas 2.1) levantamento e modelagem; 2.2 e 2.3) dados de entrada fixos e variáveis.

2.1 - Levantamento e Modelagem

Foi realizado levantamento *in-loco* da residência localizada em edificação multifamiliar, que possui dois dormitórios, sendo cada um deles com uma sacada individual — cujos guarda corpo e cobertura foram modelados como elementos externos de sombreamento — banheiro, cozinha e sala (Figura 1). O pé direito é de 2,70 metros e a unidade em questão é um apartamento localizado no primeiro pavimento, entre outras duas unidades habitacionais, simulado como uma unidade isolada neste estudo, com parede, teto e paredes laterais adiabáticas (em contato com outros apartamentos).

Figura 1: Planta do apartamento e tabela de medidas.



	LARGURA	ALTURA	PEITORIL
P1	0,8	2,1	-
P2	0,8	2,1	-
P3	0,8	2,1	-
P4	0,8	2,1	-
P5	0,8	2,1	-
P6	0,8	2,1	-
P7	1,17	2,1	-
P8	1,17	2,1	-
J1	1,73	1,2	1,17
J2	1,93	1,2	1,13
J3	0,385	0,8	1,5

Fonte: Autoras (2025)

Foi realizada também uma modelagem 3D no software Rhinoceros versão 8 SR11. A fim de tornar mais prático o processo de construção de geometria no EnergyPlus, utilizou-se o plugin Pollination 1.0.0 para exportar o arquivo Rhino diretamente como idf — a extensão de arquivo lida e suportada pelo programa de simulação. O uso desse software possui algumas vantagens como, por exemplo, a rapidez, a economia e a precisão durante os processos de desenho, proporcionando juntamente com a plataforma de programação, Grasshopper, a chamada arquitetura paramétrica. É possível também realizar com eles as simulações energéticas e de conforto ambiental com os plugins do Ladybug Tools e do Pollination. No entanto, apesar deste

último ter sido usado no processo de modelagem, a simulação em si foi feita no EnergyPlus versão 24.2 (EERE, 2021).

2.2 - Dados de entrada fixos

A cidade considerada para o estudo foi Manaus, AM, inserida na zona bioclimática 6A conforme a NBR 15220-3 (ABNT, 2024). A baixa velocidade do vento e altas temperaturas e umidade relativa do ar já no clima atual serão ainda mais agravadas nos cenários futuros. Os anos dos climas atuais foram de 2009-2023 e o ano futuro de 2080. Os arquivos climáticos em formato epw para o clima atual estão disponíveis no site do Laboratório de Eficiência Energética (LABEEE), onde ocorre um redirecionamento ao site Climate One Building (CRAWLEY; LAWRIE, 2022). Já o referente ao clima futuro foi gerado pelo software Future Weather Generator v2.2.1 (RODRIGUES; CARVALHO; FERNANDES, 2022) usando o epw do clima atual como base. O clima futuro foi gerado considerando um cenário intermediário de aquecimento (SSP2 – 4.5) de acordo com o IPCC (IPCC, 2021).

Os padrões de ocupação e ganhos internos foram inseridos de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2024), com modificações nos finais de semana e no horário de ocupação da sala, onde a ocupação no período das 8h às 14h foi acrescentada, para que esta fique ocupada durante o dia todo por pelo menos um usuário. O padrão de uso das janelas e ar-condicionado foi estabelecido como modo híbrido, somente durante o período ocupado, e modelado com limites de temperatura, onde as janelas são fechadas e o ar-condicionado ativado quando a temperatura interna é igual ou superior a 25 ˚C, e a ventilação natural ocorre quando a temperatura interna se encontra abaixo desse limite e é maior que a externa. A taxa de ventilação adotada foi de 6 renovações de ar por hora para as janelas abertas. Para as janelas fechadas, a infiltração foi variada, conforme informado na seção seguinte. O ar-condicionado foi modelado como ideal.

O sistema construtivo adotado é usual para essa tipologia. Para alvenaria de vedação foi considerado tijolo cerâmico com 14 cm de espessura e reboco de argamassa de 2,5 cm. O valor da transmitância da parede é de 1,98 W/m^2K e capacidade térmica de 156 KJ/m^2K. As janelas, por sua vez, são compostas por vidro incolor simples de 4 mm e fator solar de 5,7.

2.3 - Dados de entrada variáveis

A absortância das paredes externas e a taxa de infiltração de ar pelas janelas fechadas foram os parâmetros variados. As taxas de infiltração adotadas foram 1 e 0,3 renovações de ar por hora, caracterizando as janelas usuais, e soluções com maior estanqueidade ao ar. A absortância foi de 0,7, caracterizando um valor alto, mas também representativo de muitas edificações atuais, e 0,1, caracterizando revestimento frio. A partir disso, foram definidos três casos: o caso A, unidade habitacional sem alterações; o caso B, com infiltração reduzida e o caso C, com infiltração e absortância externa reduzidas.

3. Resultados

Todos os casos foram simulados em clima atual e futuro, considerando um cenário intermediário (SSP2 – 4.5) de emissão de GEE, conforme as previsões fornecidas pelo relatório do IPCC (IPCC, 2021). As temperaturas da cidade de Manaus passaram de uma média anual de 27,8 ˚C para 30,5 ˚C em 2080. A maior demanda energética, oriunda desse cenário, é clara na figura 2, onde todos os casos apresentam valores maiores em 2080 (aumento de 44.5%, 43.5% e 98.5%, para os casos A, B e C, respectivamente).

Com relação às estratégias passivas estudadas, nota-se que a redução da infiltração possui um impacto positivo nos climas atual e futuro, mas quando combinada à redução da absortância, a demanda energética é significativamente inferior. Nota-se também que a demanda de resfriamento do caso C, que possui as duas estratégias combinadas, em 2080, é 39.5% e 23.9% menor que a dos casos A e B, ainda no clima atual. A redução da absortância das paredes é uma estratégia razoavelmente simples de ser implementada, e seus efeitos podem ser intensificados com a possível disponibilidade futura de revestimentos frios no mercado, com absortâncias muito baixas, equivalentes ao valor estudado, de 0,1.

Os efeitos benéficos da redução da absortância já foram exemplificados em uma série de trabalhos anteriores (SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H, 2007). Com relação à infiltração, os resultados desta pesquisa não foram de encontro a um estudo anterior, que identificou este parâmetro como de alto impacto em cenário futuro, em clima quente e úmido (HU et al., 2023).

Figura 2: Demanda energética de resfriamento para os diferentes casos.



Fonte: Autoras (2025)

No clima estudado, o ar-condicionado precisou ser acionado na quase totalidade do horário ocupado na sala e nos quartos (Figura 3). Somente no clima atual, foi possível a abertura das janelas dos quartos, ocupados no período noturno, e pouquíssimas ocasiões de abertura durante o dia na sala no caso C, todos em uma pequena porcentagem do tempo.

Figura 3: Porcentagem de horas ocupadas por ano de acordo com a operação das janelas e do equipamento de resfriamento.



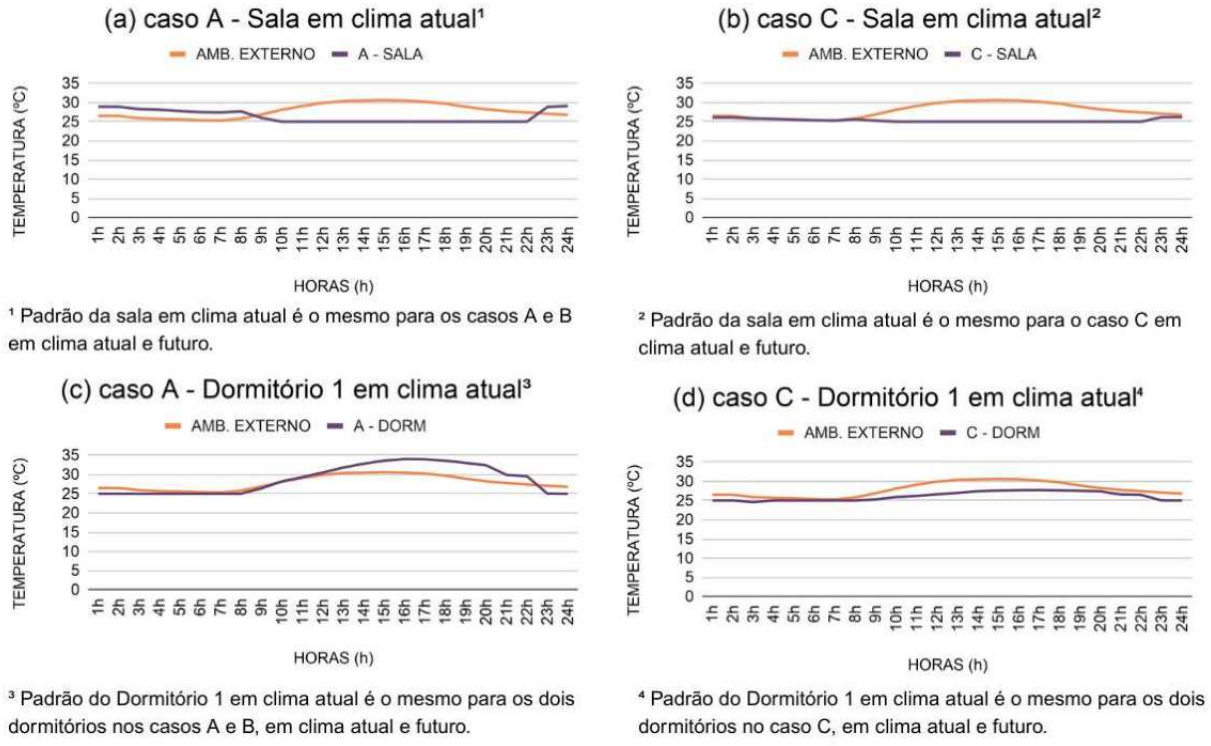
Fonte: Autoras (2025)

Na figura 4, tem-se 4 padrões de temperatura do ar interior e exterior ao longo do dia, observados nos resultados. São apresentados os valores médios horários anuais devido a uniformidade do clima ao longo dos meses. Na sala, para qualquer caso e ano climático (figuras 4a e 4b), a temperatura exterior é sempre maior que a interior durante o dia, período em que ela é ocupada e o ar-condicionado é acionado. Portanto, menores taxas de infiltração são benéficas, resultando num menor ganho de calor devido a entrada de ar exterior. À noite, somente no caso com absortância e infiltração reduzidas (figura 4b), a temperatura é próxima a exterior, caso contrário, a temperatura interior é significativamente maior que a externa. Para esses casos (A e B), seria

interessante considerar a ventilação noturna na sala, que, mesmo desocupada nesse período, poderia obter alguma redução na sua demanda de resfriamento devido a remoção do calor do ambiente, conforme indica a literatura (GRATIA; DE HERDE, 2004).

Nos quartos, à noite, período em que eles são maioritariamente ocupados, a temperatura interior é menor que a exterior (figuras 4c e 4d) em todas as situações analisadas, indicando novamente que a redução da infiltração pode diminuir o ganho de calor pelas janelas. Durante o dia, a temperatura interior do caso com absortância e infiltração alteradas é menor que a externa, independentemente do ano climático. Já os outros casos (A e B), poderiam ter as janelas abertas durante o dia, para a redução da temperatura interior, que é superior à exterior.

Figura 4: Padrões observados na comparação entre temperatura exterior e interior.



¹ Padrão da sala em clima atual é o mesmo para os casos A e B em clima atual e futuro.

² Padrão da sala em clima atual é o mesmo para o caso C em clima atual e futuro.

³ Padrão do Dormitório 1 em clima atual é o mesmo para os dois dormitórios nos casos A e B, em clima atual e futuro.

⁴ Padrão do Dormitório 1 em clima atual é o mesmo para os dois dormitórios no caso C, em clima atual e futuro.

Fonte: Autoras (2025)

4. Conclusões

Demonstrou-se que a redução da demanda de resfriamento de uma unidade habitacional localizada em edifício multifamiliar em cenário futuro de mudanças climáticas, em clima quente e úmido, é possível por meio das estratégias passivas estudadas, que foram a redução da infiltração de ar e da absortância das paredes. A absortância apresentou maior impacto, e quando combinada a redução da infiltração, levou a habitação a apresentar um desempenho superior, em 2080, ao clima atual, sem alterações nesses parâmetros.

[PARÁGRAFO REMOVIDO]

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Auxílio à Pesquisa Processo nº 23/02387-1 e n° 2024/04892-8 da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), do Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), bem como do Programa Unificado de Bolsas da USP (PUB).

Referências

ABNT. NBR 15220 Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–21, 2024.

ABNT. NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. Rio de Janeiro, 2024.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.** Atlanta, 2020.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 140: Method of Test for Evaluating Building Performance Simulation Software**. Atlanta, 2023

Arquivos climáticos INMET 2018 | Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>. Acesso em: 5 fev. 2025.

CRAWLEY, D.; LAWRIE, L. **Climate.OneBuilding.org**. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org/default.html>. Acesso em: 5 fev. 2025.

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Input-Output Reference: the encyclopedic reference to EnergyPlus input and output**. Version 8.6.0. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2021. Disponível em: <https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.6.0/InputOutputReference.pdf>. Acesso 10 de jan. de 2025.

EBI, K. L. et al. Hot weather and heat extremes: health risks. **The Lancet**, v. 398, n. 10301, p. 698–708, 21 ago. 2021.

ELSAYAD, M. M. ; A. ; et al. Impact of Phase Change Materials on Cooling Demand of an Educational Facility in Cairo, Egypt. **Sustainability 2022, Vol. 14, Page 15956**, v. 14, n. 23, p. 15956, 30 nov. 2022.

GRATIA, E.; DE HERDE, A. Natural cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin façade. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 11, p. 1139–1152, 1 nov. 2004.

HAN, G.; SREBRIC, J.; ENACHE-POMMER, E. Different modeling strategies of infiltration rates for an office building to improve accuracy of building energy simulations. **Energy and Buildings**, v. 86, p. 288–295, 1 jan. 2015.

HU, J. et al. Air infiltration and related building energy consumption: A case study of office buildings in Changsha, China. **Journal of Building Engineering**, v. 74, p. 106859, 1 set. 2023.

IHARA, T.; GUSTAVSEN, A.; JELLE, B. P. Effect of facade components on energy efficiency in office buildings. **Applied Energy**, v. 158, p. 422–432, 15 nov. 2015.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate ChangeMasson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)**. [s.l.] Cambridge University Press, 2021.

MURTYAS, S. et al. Thermal comfort in a two-storey malaysian terrace house: Are passive cooling methods sufficient in present and future climates? **Journal of Building Engineering**, v. 96, p. 110412, 1 nov. 2024.

NOAA. **2021 was world's 6th-warmest year on record | National Oceanic and Atmospheric Administration**. Disponível em: <TAYLOR ET AL. 2023>. Acesso em: 23 jan. 2025.

O'NEILL, B. C. et al. A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. **Climatic Change**, v. 122, n. 3, p. 387–400, 15 out. 2014.

O'NEILL, B. C. et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 169–180, 1 jan. 2017.

RODRIGUES, E.; CARVALHO, D.; FERNANDES, M. S. **Future Weather Generator – Morphs current weather for performance simulation of buildings in the future,** 2022. Disponível em: <https://future-weather-generator.adai.pt/>. Acesso em: 16 fev. 2025.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 11, p. 1167–1174, 1 nov. 2007.

TAYLOR, J. et al. Ten questions concerning residential overheating in Central and Northern Europe. **Building and Environment**, v. 234, n. February, 2023.

TONG, S. et al. Impact of façade design on indoor air temperatures and cooling loads in residential buildings in the tropical climate. **Energy and Buildings**, v. 243, p. 110972, 15 jul. 2021.

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.

XU, F. et al. Factors affecting the daytime cooling effect of cool materials: A case study combining experiment and simulation. **Building and Environment**, v. 250, p. 111213, 15 fev. 2024.

YAO, J. Effect of variable ventilation modes on indoor thermal comfort and building energy consumption. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 7, n. 3, p. 187–191, 1 set. 2012.