



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Letícia Gabriela Eli

Aplicação do Balanço Térmico para Análise de Desempenho Térmico de Edificações

Florianópolis

2024

Letícia Gabriela Eli

Aplicação do Balanço Térmico para Análise de Desempenho Térmico de Edificações

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil – Construção Civil.

Orientadora: Profa. Ana Paula Melo, Dra.
Coorientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Florianópolis

2024

Eli, Leticia Gabriela

Aplicação do Balanço Térmico para Análise de Desempenho Térmico de Edificações / Leticia Gabriela Eli ; orientadora, Ana Paula Melo, coorientador, Roberto Lamberts, 2024.

150 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Balanço Térmico. 3. Simulação Computacional. 4. Desempenho Térmico. I. Melo, Ana Paula. II. Lamberts, Roberto. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Letícia Gabriela Eli

Aplicação do Balanço Térmico para Análise de Desempenho Térmico de Edificações

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 01 de agosto de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Aldomar Pedrini, Dr.

Instituição Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Profa. Juliana Oliveira Batista, Dra.

Instituição Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Profa. Ana Paula Melo, Dra.

Orientadora

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, sem Ele nada seria possível.

Agradeço ao meu marido, Nardel Cassaniga, por estar ao meu lado em todos esses anos de estudo. Por toda a paciência e pelas palavras de incentivo, sem esse apoio, o caminho ao doutorado teria sido muito mais árduo.

Aos meus pais e irmãos, por todo o apoio no desenvolvimento deste trabalho, sem a minha família como base eu não teria chegado até aqui.

Aos meus queridos professores, Ana Paula Melo e Roberto Lamberts. Sou muito grata por todo o aprendizado que me proporcionaram ao longo de todos esses anos. Obrigada por todas as oportunidades de crescimento profissional, pela dedicação em orientar o meu trabalho e por sempre acreditarem em mim.

Aos meus colegas de laboratório, LabEEE/UFSC, agradeço por me acompanharem, pela amizade e pela troca de experiências. Vocês, mesmo em tempo de pandemia e de troca de cidade e de país (!!), sempre se fizeram presentes. Obrigada!

Por fim, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma estiveram presentes em minha vida ao longo deste curso de doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

As análises de desempenho térmico são utilizadas em diversos estudos para reduzir as temperaturas internas e, conseqüentemente, a demanda por ar-condicionado. Contudo, definir estratégias para melhorar o desempenho térmico e energético das edificações, normalmente exige técnicas com alto custo computacional, como os métodos de otimização. Assim, métodos com baixo custo computacional são úteis para designers e pesquisadores aplicarem em seus projetos. O desempenho térmico de um edifício é resultado de todas as trocas de calor que ocorrem em todos os ambientes, sendo possível utilizar o balanço térmico como uma solução de baixo custo para análise de desempenho térmico. Assim, este estudo aplicou o balanço térmico como um método para compreender o desempenho térmico de edificações e propor um novo *framework* para esta análise. Este trabalho foi dividido em duas etapas: Na primeira etapa foi realizada uma análise de desempenho térmico e o balanço térmico do ar foi aplicado como estudo complementar. Posteriormente, foi realizado um segundo estudo, onde foi investigado o balanço térmico no ar e na superfície, sendo desenvolvido o novo *framework* para auxiliar na definição de estratégias de desempenho térmico. A cada etapa foi publicado um artigo em periódico internacional. O *framework* proposto foi baseado em simulações de desempenho de edifícios e a partir de seus resultados foi calculado o *Heat Exchange Index* (Índice de Troca de Calor), índice desenvolvido neste trabalho. O *Heat Exchange Index* define a importância de cada troca de calor em cada balanço térmico e auxilia na definição dos principais pontos de ganho ou perda de calor em um ambiente. Uma casa unifamiliar foi utilizada para demonstrar a aplicação do *framework*. Foram considerados três diferentes comportamentos de usuários: usuário com ventilação natural, ar-condicionado e híbrido. Para as condições climáticas, adotou-se um clima quente e um ameno. Em relação aos resultados do caso ilustrativo, o *framework* foi considerado viável para determinar estratégias de desempenho térmico, uma vez que o caso melhorado obteve melhor desempenho térmico que o caso base. Por exemplo, a *Thermal Autonomy* (traduzindo para o português: percentual de horas ocupadas dentro de uma faixa de temperatura operativa – PHFT) da sala para o caso base foi de 30%, enquanto o caso melhorado foi de 84,5%. A *Cooling Load* (traduzindo para o português: carga térmica de refrigeração - CgTR) também diminuiu consideravelmente. O caso melhorado obteve reduções de 28,4% até 99,7%. Os resultados demonstram que é viável a adoção do *framework* proposto nos estudos voltados à análise de desempenho térmico de edificações.

Palavras-chave: desempenho térmico; balanço térmico; simulação de desempenho; heat exchange index.

ABSTRACT

Thermal performance analyses are used in diverse studies to reduce internal temperatures and, consequently, the demand for air conditioners. However, defining strategies for improving the thermal and energy performance of buildings usually demands techniques with high computational costs, such as optimization methods. Thus, methods with low computational costs are helpful for designers and researchers to apply to their projects. The thermal performance of a building results from all the heat exchanges that occur in every room, so it is possible to use thermal balance as a low-cost solution for thermal performance analysis. Thus, this study applied thermal balance as a method to understand thermal performance and proposed a novel framework for this analysis. This work was divided into two steps: In the first step, a thermal performance analysis was carried out, and the air thermal balance was applied as a complementary study. Afterwards, a second study was conducted, when the air and surface thermal balance was investigated, and a novel framework for assisting thermal performance strategies definition was developed. From each step, a journal paper was published. The proposed framework was based on building performance simulations, and from its results, the Heat Exchange Index, an index developed in this work, was calculated. The Heat Exchange defines the importance of each heat exchange in every thermal balance and assists in defining the main points of heat gain or loss in a room. A single-family house was used to demonstrate the framework application. Three different user behaviors were considered: naturally ventilated user, air-conditioner and hybrid. For climate conditions, a hot and a mild climate were adopted. Regarding illustrative case results, the framework was considered feasible for determining thermal performance strategies since the improved case achieved better thermal performance than the base case. For instance, the Thermal Autonomy for the living room for the base case was 30%, while the improved case was 84.5%. The Cooling Load was also decreased considerably. The improved case achieved reductions from 28,4% to 99,7%. The results show that the application of the proposed framework on building thermal performance analysis is feasible.

Keywords: thermal performance; thermal balance; building performance simulation; heat exchange index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas para o desenvolvimento do trabalho.....	19
Figura 2 – Resumo gráfico do artigo (<i>graphical abstract</i>).....	34
Figura 3 – Etapa 1: Tipologia residencial adotada.	36
Figura 4 – Etapa 1: Variação no padrão de ocupação e acionamento do sistema de iluminação e/ou dos equipamentos.	38
Figura 5 – Etapa 1: Resultados para PHFT e CgTT.	41
Figura 6 – Etapa 1: Balanço térmico em 20/05 com a combinação: clima do Rio de Janeiro, Envoltória 3, padrão de ocupação “dia inteiro”.....	43
Figura 7 – Etapa 1: Balanço térmico em 21/10 com a combinação: clima de São Paulo, padrão de ocupação “tarde e noite”, estratégia “híbrida”. Variações na envoltória da residência.....	44
Figura 8 – Heat Exchange Index (HEI) framework.	46
Figura 9 – Residência unifamiliar adotada no estudo.....	47
Figura 10 – Estratégias definidas.	52
Figura 11 – Balanço térmico anual do ar do ambiente. AC: Ar-Condicionado; HY: Híbrido; NV: Ventilação Natural.	54
Figura 12 – Balanço térmico anual na superfície.	56
Figura 13 – Principais ganhos e perdas e estratégias adotadas para aprimorar o desempenho térmico da edificação.....	57
Figura 14 – Calculadora <i>desktop</i> : Tela inicial da ferramenta.....	72
Figura 15 – Calculadora <i>desktop</i> : Escolha de quais ambientes serão analisados.....	72
Figura 16 – Calculadora <i>desktop</i> : Escolha de qual o período que será analisado.	72
Figura 17 – Calculadora <i>web</i> : Página “ <i>Calculator</i> ” da calculadora.....	73
Figura 18 – Calculadora <i>web</i> : resultado em formato .csv.	74
Figura 19 – Calculadora <i>web</i> : página “ <i>Plotter</i> ” para obtenção de gráficos.	74
Figura 20 – Calculadora <i>web</i> : página “ <i>Plotter</i> ” mostrando uma grade de gráficos.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Etapa 1: Variação na composição das coberturas.....	37
Tabela 2 – Etapa 1: Variação na composição das paredes.	37
Tabela 3 – Etapa 1: Variação na composição das envoltórias.....	37
Tabela 4 – Resultados de desempenho térmico sala em Belém	57
Tabela 5 – Resultados de desempenho térmico dormitório 1 em Belém	57
Tabela 6 – Resultados de desempenho térmico sala em São Paulo.....	58
Tabela 7 – Resultados de desempenho térmico dormitório 1 em São Paulo.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS.....	20
2.2	BALANÇO TÉRMICO	30
3	DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS COM ESTRATÉGIAS DE RESFRIAMENTO MISTO E PASSIVO: O CONTEXTO BRASILEIRO (ARTIGO 1)	34
3.1	MÉTODO	34
3.1.1	Indicadores de Desempenho Térmico.....	35
3.1.2	A Edificação Residencial.....	35
3.1.3	Variações nos Parâmetros Construtivos.....	36
3.1.4	Parâmetros comportamentais	37
3.1.4.1	<i>Variação nos padrões de ocupação.....</i>	38
3.1.4.2	<i>Variações nos padrões de comportamento: estratégias de resfriamento e aquecimento.....</i>	39
3.1.5	Parâmetros climáticos	39
3.1.6	Balanço térmico no ar do ambiente	39
3.2	RESULTADOS	40
3.3	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	44
4	COMO MELHORAR O DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES COM UMA ÚNICA SIMULAÇÃO? O <i>HEAT EXCHANGE INDEX</i> APLICADO A CLIMAS QUENTES	46
4.1	<i>FRAMEWORK</i> PROPOSTO	46
4.1.1	O balanço térmico no ar do ambiente.....	48
4.1.1.1	<i>Heat Exchanges Index</i>	49
4.1.2	O balanço térmico na superfície.....	50
4.1.2.1	<i>Heat Exchanges Index</i>	50

4.1.3	Definição de estratégias e aplicação	51
4.1.4	A avaliação de desempenho térmico	52
4.2	RESULTADOS	53
4.3	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	59
5	CONCLUSÃO	61
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTUROS .	63
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A – THERMAL BALANCE CALCULATOR	71
	APÊNDICE B – ARTIGO 1	76
	APÊNDICE C - ARTIGO 2	120
	APÊNDICE D - CONTRATO DE AUTORIA COMPARTILHADA	150

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Pesquisas voltadas a edificações residenciais naturalmente ventiladas ou híbridas vêm ganhando destaque no mundo. Recentemente, com a abertura do Anexo 80 – *Resilient Cooling for Residential and Small Non-Residential Buildings*, da *International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities Program* (IEA EBC), mais contribuições relacionadas ao resfriamento passivo de edificações foram e estão sendo lançadas (IEA-EBC, 2024). A busca por estratégias passivas de resfriamento vem sobretudo da necessidade de aumentar a resiliência da edificação frente aos eventos climáticos extremos. A resiliência, quando relacionada ao resfriamento, busca quantificar a capacidade da edificação em resistir ou se recuperar às condições térmicas anteriores aos eventos extremos, como ondas de calor ou a interrupção no abastecimento de energia (Zhang *et al.*, 2021). Assim, por mais que edificações com o uso de condicionamento artificial sejam capazes de atender às necessidades de resfriamento, o sistema precisa do fornecimento de energia para funcionar. Dessa forma, entender o desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas e híbridas é fundamental para determinar as estratégias construtivas que reduzem a necessidade de condicionamento artificial, promovendo o uso da ventilação natural e adequando-se sobretudo às condições climáticas e ao comportamento dos usuários.

Dentre as ferramentas de análise do desempenho térmico de edificações, a simulação computacional é amplamente utilizada para o estudo de residências, sejam elas naturalmente ventiladas (Rodrigues *et al.*, 2019) e/ou híbridas (Eli, L. G. et al., 2021b; Sorgato, M. J.; Melo; Lamberts, 2016). Programas de simulação computacional, como o *EnergyPlus*, são capazes de modelar de maneira detalhada as interações que ocorrem dentro dos ambientes. Para a ventilação natural, por exemplo, o programa é capaz de modelar as trocas de ar que ocorrem nos ambientes devido tanto aos fatores externos, como à ação dos ventos, à rugosidade do terreno, quanto aos fatores internos, como à distribuição dos ambientes e das janelas (EnergyPlus, 2022b, 2022a). Aspectos relacionados ao usuário e à forma como a residência é operada também podem e devem ser considerados na simulação computacional (Hong *et al.*, 2017; Hong; Langevin; Sun, 2018). Considerar esses fatores torna a simulação mais próxima da realidade e as definições projetuais mais assertivas.

Em análise de projetos, definir as estratégias construtivas a serem adotadas muitas vezes requer um grande volume de simulações e, conseqüentemente, alto custo computacional.

Como forma de reduzir o número de casos a serem simulados, é necessário entender quais os pontos a serem modificados na edificação, a fim de aprimorar o seu desempenho térmico. Para isso, alguns estudos indicam a análise de sensibilidade como um importante ponto de partida na definição dos pontos a serem alterados (Chen; Yang; Sun, 2017a; Hopfe; Hensen, 2011; Tubelo et al., 2018; Yildiz; Arsan, 2011). Após a aplicação da análise de sensibilidade, é possível otimizar o projeto buscando o objetivo requerido. Chen, Yang e Zhang (2018), por exemplo, aplicaram a análise de sensibilidade para identificar quais pontos deveriam ser alterados, no projeto de uma residência naturalmente ventilada localizada em clima quente e úmido, e um algoritmo de otimização por fronteira de Pareto para a definição das soluções ótimas a serem adotadas.

Buscando desenvolver métodos mais rápidos e de menor custo computacional para a análise de desempenho térmico e energético de edificações, Gaetani, Hoes e Hensen (2018) utilizaram resultados de simulação computacional para desenvolver o índice chamado *Impact Index* (índice de impacto, em tradução livre) como ferramenta de auxílio na verificação da influência do comportamento do usuário no consumo de ar-condicionado de edificações comerciais. O índice desenvolvido pelos autores considera as trocas de calor que ocorrem na edificação e estão relacionadas à convecção, condução e radiação solar. Os autores compararam os resultados obtidos pelo *Impact Index* com a análise de sensibilidade da edificação e concluíram que os resultados foram similares, validando o balanço térmico e o *Impact Index* como um método de auxílio na análise do desempenho térmico e energético de edificações comerciais. Este mesmo índice foi utilizado também por Zambrano et al. (2023), que confirmou mais uma vez a sua aplicabilidade. Como o balanço térmico é o resultado das trocas de calor que ocorrem nos ambientes da edificação, é possível utilizar esse método para a identificação dos pontos responsáveis por transferir calor entre o meio externo e o ambiente interno. Essas trocas de calor podem ocorrer por três formas: convecção, condução e radiação. O somatório dessas três transferências de calor leva ao equilíbrio térmico do ambiente. Com essa análise é possível determinar quais os pontos da edificação que ganham e perdem mais calor para o ar do ambiente e, conseqüentemente, contribuem para as variações da temperatura do ar. Ferramentas computacionais como o *EnergyPlus* utilizam o balanço térmico como método de cálculo para a determinação das temperaturas internas do ambiente e da carga térmica de refrigeração e aquecimento. Assim, é possível extrair essas informações a partir da simulação computacional e realizar a análise do balanço térmico.

Com base nas informações expostas nessa introdução, é possível verificar que há a necessidade do desenvolvimento de métodos rápidos e de menor custo computacional para a

análise do desempenho térmico de edificações. Para isso, o balanço térmico pode ser aplicado, uma vez que detalha quais as fontes de ganho e perda de calor que ocorrem nas superfícies dos ambientes da edificação. Dessa forma, esse trabalho desenvolveu um método de análise, baseado no balanço térmico da edificação obtido via simulação computacional, a fim de verificar quais as principais transferências de calor que ocorrem nos ambientes e propor melhorias visando o desempenho térmico. Para isso, foi utilizado o conceito de *framework*, que é o de criar um conjunto de técnicas, ferramentas e método para a resolução de um determinado problema. Neste trabalho foi utilizado o programa *EnergyPlus* para a simulação de desempenho térmico e energético das edificações.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é o desenvolvimento de um *framework* para auxiliar nas análises de desempenho térmico de edificações com base no balanço térmico no ar (convecção) e na superfície (convecção, condução e radiação) dos ambientes.

1.2.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Identificar as variáveis de saída do programa *EnergyPlus*, relacionadas ao balanço térmico no ar, com base na transferência de calor por convecção;
- Identificar as variáveis de saída do programa *EnergyPlus*, relacionadas ao balanço térmico na superfície, este com base nas três formas de transferência do calor: convecção, condução e radiação;
- Através do balanço térmico, verificar os pontos da edificação mais suscetíveis à transferência do calor.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro é a introdução, na qual é apresentada a justificativa do trabalho e os objetivos. O segundo capítulo é o referencial teórico onde é dado o embasamento da pesquisa. Os capítulos três e quatro trazem as duas etapas de desenvolvimento do trabalho, sendo o resumo dos artigos produto dessa tese e publicados nas revistas *Energy and Buildings* e *Building and Environment*, respectivamente. Por fim, o capítulo cinco traz as conclusões do estudo.

Sobre as etapas deste trabalho, com base na simulação computacional de edificações, através do programa *EnergyPlus*, este trabalho foi desenvolvido em duas etapas, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Etapas para o desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

A primeira etapa deste estudo mostra a importância de serem aprofundadas as análises de desempenho térmico a partir do balanço das trocas de calor que ocorrem nos ambientes. Para a realização desta etapa, foi desenvolvido um estudo que teve como base a análise da influência do indicador no desempenho térmico de uma residência unifamiliar. Este trabalho foi a continuação da pesquisa de mestrado de Eli (2020). A partir da primeira etapa, foi observado como o balanço térmico no ar do ambiente, que utiliza a convecção como base, pode auxiliar no entendimento do desempenho térmico da edificação. Ao aplicar o balanço térmico por convecção, foi verificada a necessidade de entender também como a condução e a radiação influenciam no desempenho térmico. Por isso, a Etapa 2 teve como foco desenvolver um método de baixo custo computacional e de rápida utilização, através do balanço térmico dos ambientes, a fim de aprimorar as análises de desempenho térmico de edificações e auxiliar na definição de estratégias construtivas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esse referencial teórico traz uma contextualização do desempenho térmico de edificações residenciais, com o foco em ambientes naturalmente ventilados e híbridos. Após a contextualização e verificação da necessidade de analisar em detalhes as trocas de calor que ocorrem nos ambientes, é apresentada uma revisão sobre as análises de balanço térmico em edificações residenciais.

2.1 DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS

O desempenho térmico de qualquer edificação é resultado das interações que ocorrem entre a envoltória, os sistemas instalados, os usuários e o meio externo (Hensen; Lamberts, 2019a). Quando é analisado o desempenho térmico de edificações residenciais, essas interações são ainda mais significativas, uma vez que cada pessoa possui sua própria rotina e hábitos, que influenciam diretamente no resultado obtido na análise. Entretanto, determinar o comportamento das pessoas dentro de suas residências não é algo trivial, uma vez que pode ser visto como invasão de privacidade ou ainda algo incômodo (Sorgato, 2015). Ramos et al. (2020c) aplicou questionários em diversas regiões brasileiras a fim de mapear o comportamento dos usuários residenciais. A sua base de dados conta com centenas de respostas das mais diversas classes econômicas e níveis de formação acadêmica. Analisando o banco de dados é possível verificar que o comportamento dos usuários varia significativamente mesmo dentro de um mesmo nicho econômico ou intelectual e que a mudança mais perceptível é entre regiões, onde há a variação climática. Quanto a questão de hábitos relacionados à climatização das residenciais, é possível verificar que a ventilação natural ainda é a opção mais utilizada.

O resfriamento passivo dos ambientes pela ventilação natural é um padrão de uso que influencia diretamente no desempenho térmico da edificação (Eli, L. G. et al., 2021b; Pacheco; Lamberts, 2013; Ramos et al., 2020a; Sorgato, M. J.; Melo; Lamberts, 2016). Em suas residências, é hábito do brasileiro abrir as janelas para permitir a renovação de ar ou para evitar o surgimento de mofo, mesmo que esse ato aumente a temperatura do ambiente interno. Entretanto, com o aumento das temperaturas globais e do poder aquisitivo da população, cada vez mais a ventilação natural vem perdendo espaço para ambientes condicionados artificialmente (PROCEL, 2019). Este fato auxilia no aumento da demanda de energia elétrica voltada à climatização das edificações residenciais brasileiras (EPE, 2019). Esse aumento no consumo de energia elétrica associado ao aumento das temperaturas globais e aos períodos de

seca cada vez mais frequentes, pode ocasionar o colapso do sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro, uma vez que a principal fonte de eletricidade no Brasil são as hidrelétricas. Dessa forma, são necessários estudos que busquem analisar o desempenho térmico das edificações e incentivem a adoção de estratégias construtivas que potencializem o resfriamento dos ambientes através do uso da ventilação natural.

Na literatura, a ventilação natural é uma estratégia passiva de resfriamento dos ambientes que pode ser utilizada de diversas formas, como por exemplo, através da chaminé solar, da torre de vento, da cobertura ventilada, da ventilação cruzada (Sakiyama *et al.*, 2020). De maneira simplificada, o resfriamento que a ventilação natural proporciona está relacionado ao fluxo de ar que passa pelas aberturas da edificação. Este fluxo de ar varia conforme o tamanho das aberturas, a orientação das fachadas e outros fatores relacionados tanto ao clima, quanto à geometria da edificação e o modo como os ambientes são ocupados e utilizados. Para analisar o desempenho térmico de ambientes naturalmente ventilados é necessário o entendimento dos fenômenos físicos e das variáveis climáticas, sobretudo os parâmetros relacionados aos ventos. Para essas análises, a simulação computacional é uma das ferramentas que pode ser utilizada para prever o potencial de resfriamento que a ventilação natural pode proporcionar aos ambientes. Entretanto, incluir os efeitos da ventilação natural nas simulações computacionais exige o conhecimento do cálculo que a ferramenta utiliza para modelar as trocas de ar. Diversos estudos focados na análise de desempenho térmico de edificações residenciais modelam a ventilação natural como uma taxa fixa de renovação por hora, simplificando os dados de entrada necessários na simulação (Bozonnet; Doya; Allard, 2011; Felmer; Yannas, 2020). Porém essa modelagem não considera os efeitos da velocidade do vento, pressão, rugosidade do terreno e, sobretudo, como os ambientes são ocupados e suas janelas operadas (Schünemann; Schiela; Ortlepp, 2021). No Brasil, o antigo procedimento de simulação computacional para análise do desempenho térmico de edificações residenciais, presente no capítulo 1 da normativa NBR 15575 (ABNT, 2013), considerava a ventilação natural através de taxas fixas de infiltração. Essa infiltração era determinada como “taxa de ventilação” e deveria ser adotada como 1 renovação por hora e, caso a edificação não atingisse o nível mínimo de desempenho térmico, poderia ser adotada 5 renovações por hora além da consideração de sombreamento nas aberturas. Utilizar essa taxa de ventilação estipula que o ambiente terá essa renovação, independentemente do clima e da forma como ele é utilizado. Este tipo de modelagem da ventilação natural não condiz com a real renovação de ar que ocorre nas residências, como mostra Rodrigues *et al.* (2020). Os autores mediram a infiltração que ocorre pelas janelas em diferentes residências localizadas em São Paulo (SP) e os resultados

mostraram que os valores alcançados para a infiltração são até 80% superiores quando comparados com os resultados da NBR 15575-1 de 2013 (ABNT, 2013).

Por conta desse e outros pontos que necessitavam de atualização, no ano de 2021 foi publicada a revisão do procedimento de simulação computacional para avaliação do desempenho térmico da NBR 15575-1 (ABNT, 2021b). Dentre as atualizações está a consideração da ventilação natural com a abertura efetiva das janelas. Para que as janelas sejam consideradas abertas o ambiente deve estar com a temperatura do ar maior que 19 °C e maior do que a temperatura do ar externo, além disso, o ambiente deve estar no período considerado ocupado. Por período ocupado, a NBR 15575-1:2021 determina que seja entre 14h00 e 21h59 nas salas e entre 22h00 e 07h59 nos dormitórios. A determinação de horários de ocupação foi outro ponto de mudança entre a versão de 2013 do procedimento de simulação computacional (ABNT, 2013) para a versão de 2021 (ABNT, 2021b). Na versão de 2013 os ambientes não eram considerados ocupados, ou seja, sem carga interna. Não considerar a ocupação dos ambientes de permanência prolongada, dormitórios e salas, é uma das lacunas entre o desempenho térmico da edificação simulada e o da edificação durante a fase de ocupação (Hong *et al.*, 2017; Hong; Langevin; Sun, 2018).

A definição de um padrão de operação para janelas é uma das formas de tornar o procedimento de simulação computacional presente em normativas e certificações mais próximo da maneira como as edificações são operadas. Mas é importante destacar que as pessoas possuem diferentes necessidades, rotinas, comportamentos, e essa variação tem grande peso no desempenho térmico da edificação, gerando diferença entre o resultado simulado e o real (Hong *et al.*, 2017). O'Brien *et al.* (2020) indicam que em alguns casos o ideal é considerar mais de um cenário de uso e ocupação, buscando compreender as variações do país ou região em que a normativa ou certificação é adotada. Entretanto, definir o padrão de uso dos ambientes e da abertura das janelas das residências está relacionado a fatores comportamentais aleatórios, psicológicos, físicos e/ou econômicos (Balvedi; Ghisi; Lamberts, 2018a). Segundo Ramos *et al.* (2020a) no Brasil dentre as razões para a abertura das janelas as principais são a necessidade de ventilar os ambientes, obter luz natural e evitar mofo. Esse resultado mostra que é comum abrir as janelas sem critério térmico, ou seja, permitir a abertura das janelas mesmo que a temperatura do ambiente externo seja superior a temperatura do ambiente interno. Esse tipo de uso interfere diretamente no desempenho térmico da edificação e na satisfação do usuário com o seu ambiente, uma vez que pode ocorrer o aumento da temperatura interna da edificação pela entrada de ar quente (Borong *et al.*, 2004).

Rodrigues et al. (2019) analisaram como a ventilação natural pode melhorar o desempenho térmico de uma residência localizada na cidade de Lisboa – Portugal, clima mediterrâneo, e como pode reduzir o consumo de energia voltado à climatização. A edificação residencial analisada foi uma casa geminada, com as paredes externas laterais em contato com outras unidades habitacionais. Os autores consideraram diferentes cenários de uso das janelas para promoção da ventilação natural. No verão, foi simulada a unidade habitacional considerando três cenários. O primeiro cenário, considerou a possibilidade de abrir as janelas durante as 24 horas do dia, o segundo, abertura era possível entre 18h00 e 23h00 e, por fim, o terceiro cenário permitiu a abertura durante 23h00 e 07h00. Para todos esses horários, a abertura foi permitida caso a temperatura externa fosse maior do que 25 °C e a temperatura interna da edificação fosse maior do que a externa. Nesses três casos, as janelas foram chamadas de convencionais e abriam até 30% de sua área envidraçada para ventilação. Além desses três cenários, foi considerado um outro cenário, que além das aberturas convencionais, foi adotada uma abertura permanente para ventilação nos ambientes de permanência prolongada, sala e dormitórios. Essas aberturas permanentes foram consideradas com 0,0055 m² e buscaram potencializar a ventilação natural, uma vez que não é possível fechá-las em nenhum momento. Para os casos com aberturas permanentes, foram considerados os controles de abertura já descritos para as janelas convencionais, além de outro controle onde as janelas convencionais não podem ser abertas durante nenhum período. Como indicadores, os autores utilizaram para o verão a média de trocas de ar por hora (ACH), a porcentagem de horas com ACH abaixo do valor padrão (PHAD) e o graus-hora de desconforto (DHD) para sobreaquecimento. Para o PHAD, o valor padrão estabelecido foi de 1 troca de ar por hora nos ambientes de permanência prolongada e de 4 trocas de ar por hora nos ambientes de serviço, conforme legislação portuguesa. Para o DHD foi determinado como temperatura externa limite o valor de 25 °C. Como resultados, os autores mostraram que, para o verão, a combinação entre janelas permanentemente abertas e janelas com critérios de operação, mas com a possibilidade de abrir durante as 24 horas do dia, potencializou as trocas de ar e reduziu o DHD. Como exemplo, para a sala, quando há janelas permanentes e janelas convencionais com possibilidade de abertura durante todo o dia, o valor do DHD foi de aproximadamente 700 °C.h. Para esse mesmo caso, mas considerando a possibilidade de abrir as janelas convencionais entre 23h00 e 07h00, o DHD aumenta para 1300 °C.h e para o horário de 18h00 até 23h00 o DHD encontrado foi de aproximadamente 1050 °C.h. Para os mesmos casos, retirando a janela permanente, os valores de DHD foram aproximadamente 750 °C.h para a possibilidade de abertura das janelas convencionais durante 24 horas por dia, 2000 °C.h durante o período entre 18h00 e 23h00 e

2700 °C.h para o período entre 23h00 e 07h00. Embora os autores tenham indicado que considerar janelas permanentemente abertas para o uso da ventilação natural melhore o desempenho e conforto térmico da edificação, é necessário ponderar alguns aspectos climáticos do local e de projeto da edificação analisada. Quanto ao clima, o arquivo climático utilizado é da cidade de Lisboa, Portugal, onde a temperatura externa média no mês de agosto, o mais quente do ano, é de aproximadamente 22,6 °C, enquanto a máxima é 36,0 °C e a mínima é de aproximadamente 12,0 °C. Isso representa grande amplitude térmica e clima ameno, o que favorece a ventilação natural. Se as mesmas janelas permanentes fossem adotadas em um clima mais quente, com baixa amplitude térmica, o ganho de calor pelo fluxo de ar seria elevado e poderia não favorecer esse tipo de estratégia construtiva se aplicada isoladamente.

Sorgato, Melo e Lamberts (2016) analisaram a alteração no consumo de energia para refrigeração e aquecimento dos ambientes de permanência prolongada de uma residência unifamiliar térrea, localizada em Florianópolis. Os autores simularam a unidade habitacional considerando diferentes sistemas construtivos e padrões de uso da ventilação natural. A edificação também foi simulada operando em modo híbrido, ou seja, nos períodos ocupados em que a ventilação natural não foi suficiente para manter a temperatura abaixo do limite da ASHRAE 55 e acima de 19 °C, foi acionado o sistema de condicionamento de ar. Para a ventilação natural, foram considerados três controles relacionados ao comportamento do usuário quanto a abertura das janelas. O primeiro controle, chamado de manhã até a noite, considerou a abertura das janelas entre o período de 7h00 e 24h00 sempre que a temperatura externa for maior do que 21 °C. No segundo controle, chamado de controle automatizado de ventilação, foram considerados dois critérios de temperatura para abertura das janelas para ventilação natural: quando a temperatura interna estiver maior ou igual a 21 °C e a temperatura interna for igual ou maior que a temperatura externa. O terceiro, e último critério, é o da ventilação noturna, permitindo a abertura das janelas no período das 18h00 até às 24h00 e quando a temperatura externa for maior ou igual a 21 °C. Como resultados, os autores apresentaram que para uma mesma envoltória, a redução no consumo de energia voltado à refrigeração dos ambientes foi de 32% no controle de operação de janelas manhã até a noite, de 66% para o controle automatizado de ventilação e de 43% para o controle chamado de ventilação noturna. Esses resultados demonstram que a variação no comportamento do usuário reflete diretamente no desempenho térmico da edificação.

Wong e Li (2007) analisaram estratégias construtivas a fim de reduzir a carga térmica de refrigeração de apartamentos naturalmente ventilados localizados em Cingapura. Para a análise, foi executado o levantamento das características construtivas dos apartamentos e

posteriormente feita a simulação computacional do caso base e de diferentes estratégias. As estratégias consideradas foram a alteração do sistema construtivo das paredes externas e da cobertura, mudança de orientação da fachada da sala e aplicação de sombreamento nas janelas. As simulações consideraram o cálculo da carga térmica para refrigeração, com temperatura de termostato igual a 24 °C nos ambientes. Dentre os resultados obtidos, os autores comentam que as estratégias que visam reduzir o ganho de radiação solar, como a aplicação de sombreamento nas aberturas, foram as que obtiveram as maiores reduções na carga térmica de refrigeração. Embora os autores tenham analisado edificações naturalmente ventiladas, no método não é mencionado se a simulação da edificação considera a operação das janelas para ventilação natural, somente comentado sobre o cálculo da carga térmica de refrigeração. É importante destacar que determinar estratégias construtivas para uma edificação naturalmente ventilada modelando a unidade habitacional de forma condicionada artificialmente não condiz com a realidade de uso da residência e pode indicar estratégias construtivas equivocadas (Eli, L. G. *et al.*, 2021b).

A problemática relacionada à maneira como o desempenho térmico é mensurado ainda é pouco explorada, principalmente quando o foco são edificações naturalmente ventiladas ou híbridas. Dentre os estudos voltados à análise do desempenho térmico, há variação significativa sobre quais os indicadores utilizados para analisar o resultado da simulação computacional. Há pesquisadores que utilizaram como base a redução no consumo de energia voltado à refrigeração dos ambientes ou a redução na carga térmica de refrigeração (Mirrahimi *et al.*, 2016; Pérez-Andreu *et al.*, 2021; Sorgato, M. J.; Melo; Lamberts, 2016; Vettorazzi *et al.*, 2021), outros estudos utilizaram como indicador o graus hora de resfriamento (Dabaieh, Marwa *et al.*, 2015; Rodrigues *et al.*, 2019) ou ainda outros indicadores relacionados a índices específicos de normativas ou variáveis ambientais (Su; Aynsley, 2006; Vázquez-Torres; Gómez-Amador, 2021). Quando analisadas edificações naturalmente ventiladas, é comum também utilizar indicadores relacionados ao conforto térmico para mensurar o desempenho térmico (Dabaieh, Marwa *et al.*, 2015; dos Santos Dolce Uzum; Soares Gonçalves, 2021; Sorgato, M. J.; Melo; Lamberts, 2016; Vázquez-Torres; Gómez-Amador, 2021). Por mais que o conforto esteja relacionado ao desempenho térmico é importante diferenciar as duas análises. O conforto térmico da edificação é relacionado à percepção do usuário com o ambiente no qual ele está inserido (Brager; De Dear, 1998; Cândido *et al.*, 2011; De Vecchi *et al.*, 2015), enquanto o desempenho térmico é relacionado à edificação e aos seus componentes. Dessa forma, há a necessidade de tratar de forma separada esses dois conceitos, de maneira que o desempenho

térmico da edificação seja mensurado e que com o seu resultado o usuário final tenha as condições térmicas favoráveis para atingir o nível de conforto assim desejado.

O desenvolvimento de indicadores de desempenho térmico depende do objetivo da análise e das características da população que se quer analisar. Por população, indica-se tanto as características da edificação, do clima e das pessoas. Buscando aprimorar os indicadores de desempenho térmico de edificações residenciais naturalmente ventiladas, Pisello, Goretti e Cotana (2012), desenvolveram dois indicadores. Para o estudo, os autores consideraram climas italianos. O primeiro indicador analisa o desempenho térmico da edificação e tem como sigla TDI_b (*Thermal Deviation Index – Building*). O segundo indicador busca entender o contexto climático do local em que a edificação está inserida e tem como sigla $TDI_{b,site}$ (*Thermal Deviation Index – Building in relation to the climate*). Para a obtenção do valor do TDI_b é realizada a divisão entre a integral dos períodos em que o ambiente esteve com temperatura operativa fora de um determinado intervalo e um índice que representa o caso base, ou seja, as horas do ano analisadas multiplicadas pela constante 3. Os limites de temperatura considerados foram diferentes entre verão e inverno, sendo para o verão a temperatura de 26 °C para o limite superior e 23 °C para o limite inferior. Para o inverno os valores de temperatura limite foram de 25 °C para o superior e 20 °C para o inferior. Valores de TDI_b iguais a zero indicam que as temperaturas operativas dos ambientes sempre ficaram dentro da faixa desejável, enquanto valores de TDI_b altos indicam que as temperaturas estiveram na maior parte do tempo fora da faixa desejável. Para o indicador $TDI_{b,site}$ a lógica utilizada é similar, porém as temperaturas utilizadas na análise são a temperatura sol-ar do local e o intervalo de temperatura durante o verão é de 26 °C para o limite superior e de 20 °C para o limite inferior e para o inverno o intervalo é de 25 °C para o limite superior e de 17 °C para o limite inferior. Valores baixos de $TDI_{b,site}$ refere-se a climas mais propícios para a ventilação natural. Quanto mais distante do zero, mas difícil será para a edificação obter temperaturas operativas dentro da faixa desejável. Segundo os autores, analisar o desempenho de edificações naturalmente ventiladas sem incluir o contexto climático pode ser equivocado, uma vez que uma mesma edificação pode ter desempenho térmico distinto de um clima para outro. Dessa forma, utilizar o TDI_b em conjunto com o $TDI_{b,site}$ permite indicar se o projeto da edificação realmente atingiu o máximo potencial de desempenho térmico naturalmente ventilada ou não. Para validar a utilização destes indicadores, os autores simularam três diferentes tipologias residenciais com variação no tipo de vidro, sombreamento e sistema construtivo. Os autores concluem que os indicadores são sensíveis às variações e podem ser utilizados em diferentes contextos.

Seguindo a mesma tendência de analisar o clima local em conjunto com o desempenho da edificação, Yoon et al. (2020) também utilizaram simulação computacional para desenvolver métricas que fossem capazes de mensurar o potencial de resfriamento de residências através da ventilação natural. Após revisão de literatura, os autores focaram o estudo na análise de duas métricas, a primeira sendo o Potencial Climático para Ventilação Natural (*Climate Potential of Natural Ventilation – CPNV*) e a segunda Resfriamento Efetivo por Ventilação Natural (*Natural Ventilation Cooling Effectiveness – NVCE*). O CPNV indica o potencial de resfriamento por ventilação natural do local em que a edificação está inserida. Com base nas temperaturas do ar e na umidade relativa obtidas do arquivo climático, o valor do CPNV é determinado considerando 8760 horas do ano dividido pela quantidade de horas no ano em que a umidade relativa ficou em 30% e 70% e as temperaturas do ar ficaram dentro do limite estabelecido pelo conforto adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017). Para o NVCE a determinação considera a divisão entre a quantidade de calor que a ventilação natural consegue retirar do ambiente e o calor a ser retirado do ambiente para que seja atingida temperaturas desejáveis. As duas métricas se complementam, uma vez que o CPNV analisa o potencial de ventilação do local em que a edificação está inserida, enquanto o NVCE analisa o potencial do projeto. Dessa maneira foi proposta também a métrica Taxa de Utilização do Potencial do Clima (*Climate Potential Utilization Ratio – CPUR*) que é a divisão entre o NVCE e o CPNV. O valor do CPUR representa o quanto que o projeto se beneficiou do potencial de ventilação natural do clima. Para a validação do NVCE, os autores simularam uma edificação residencial em três diferentes climas dos Estados Unidos com variações nos ganhos internos (iluminação e pessoas), na área de ventilação das janelas e na massa térmica dos componentes construtivos. Os autores analisaram se o indicador NVCE respondia às mudanças aplicadas no modelo, para isso compararam o valor do NVCE com o aumento do fluxo de ar, com o aumento da capacidade de estoque de calor da envoltória e com o aumento dos ganhos internos. Dentre os resultados, o estudo mostrou que janelas com grande percentual de abertura e alta capacidade térmica foram os casos em que o CPUR ficou mais próximo de 1, ou seja, apresentaram os melhores resultados. Para os autores, a massa térmica é uma das estratégias que auxiliam na redução dos picos de temperatura durante o dia nas residências operadas somente com ventilação natural, entretanto, nos casos em que há a utilização de ar-condicionado e ventilação natural não é aconselhável o uso de componentes construtivos com elevada massa térmica. Com os resultados obtidos, os autores consideraram o NVCE validado e que o indicador CPUR, que inclui a análise do potencial de resfriar os ambientes por ventilação da edificação e do clima, responde satisfatoriamente, sendo uma ferramenta importante a ser utilizada na fase de projeto.

É importante mencionar que, enquanto o indicador TDI_b, proposto por Pisello, Goretti e Cotana (2012), considera diferenças de temperatura ao longo de um período, o indicador NVCE proposto por Yoon et al. (2020) considera de maneira mais detalhada essa variação na temperatura do ambiente. O indicador NVCE, em suas equações, considera os ganhos de calor devido à radiação solar incidente nas superfícies do ambiente, os ganhos de calor devido aos equipamentos instalados, a variação na temperatura externa e interna do ambiente analisado, as características térmicas dos componentes construtivos, dentre outras variáveis que impactam na quantidade de calor a ser retirado do ambiente pela ventilação natural.

Por mais que os indicadores apresentados busquem descrever o ambiente e quantificar o desempenho térmico, ainda há a lacuna na questão de como identificar as estratégias a serem adotadas a fim de aprimorar o desempenho térmico da edificação. Para essa identificação, alguns estudos utilizam a simulação computacional de maneira paramétrica, ou seja, são determinados os parâmetros de entrada a serem utilizados e a partir da combinação de todas as variáveis, é realizada a simulação dos casos para a identificação dos melhores resultados perante um ou mais indicadores (Marshall et al., 2016; Sorgato, M. J.; Melo; Lamberts, 2016; Triana; Lamberts; Sassi, 2018a). De maneira a tornar mais ágil essa análise das melhores soluções de projeto, podem ser aplicados métodos de otimização (Machairas; Tsangrassoulis; Axarli, 2014).

Na análise de projeto de edificações, a simulação computacional torna possível analisar diversos casos e seus resultados, entretanto, existem estudos em que há a necessidade da utilização de um processo de cálculo que seja capaz de varrer um maior grupo de possibilidades, com o menor custo operacional possível, a fim de determinar o projeto ótimo (Machairas; Tsangrassoulis; Axarli, 2014). Dentre os métodos de otimização mais aplicados nas análises de edificações estão os algoritmos de otimização multiobjetiva que utilizam a fronteira de Pareto como base (Costa-Carrapiço; Raslan; González, 2020; Evins, 2013). A fronteira de Pareto é o conjunto de soluções que apresentam o *trade-off* dos objetivos estabelecidos, sendo definida com base na dominância entre os casos. A utilização da fronteira de Pareto nos processos de otimização multiobjetiva se faz através de algoritmos que utilizam diferentes processos de iteração. Esses processos de iteração em geral consideram uma população inicial, que é determinada com base nos parâmetros a serem variados, e a partir de cada rodada de simulação é executado um processo iterativo que determina a próxima população a ser analisada. Esse processo é executado até ser alcançado um número ótimo de soluções na fronteira de Pareto.

Embora os métodos de otimização sejam uma alternativa para o estudo de múltiplas soluções e seus resultados, há o limitador do custo computacional envolvido. Por gerar a

simulação de milhares de combinações, há a necessidade de computadores de alto desempenho para a execução da otimização. Dentre as alternativas que podem reduzir o custo computacional, pode-se citar a análise de sensibilidade. Chen, Yang e Zhang (2018) utilizaram em conjunto a análise de sensibilidade com a otimização multiobjetiva a fim de determinar o projeto ótimo para uma edificação residencial. Os autores adotaram a análise de sensibilidade para verificar quais os parâmetros de entrada relacionados à envoltória e ao entorno da edificação não alteram significativamente o consumo de energia para iluminação e refrigeração. A partir da determinação dos parâmetros mais influentes, esses foram variados a fim de chegar no caso ótimo tendo como objetivo otimizar tanto o consumo de energia para a iluminação e quanto o consumo de energia para a refrigeração. Para essa etapa de otimização foi utilizado o algoritmo genético de ordenação não-dominada II (*non-dominated sorting genetic algorithm II – NSGA-II*). O NSGA-II é um algoritmo de otimização multiobjetiva que faz o cruzamento entre os melhores resultados obtidos a cada iteração até chegar na fronteira de Pareto.

A análise de sensibilidade é um ponto de partida importante de ser adotado nos estudos de otimização de projeto (Hopfe; Hensen, 2011), uma vez que é possível determinar quais os pontos mais sensíveis da edificação frente a um determinado indicador de desempenho (Chen; Yang, 2017a; Tubelo et al., 2018; Yildiz; Arsan, 2011). A análise de sensibilidade é um método de determinação dos parâmetros de entrada mais ou menos significantes para o indicador adotado (Gassar *et al.*, 2021). De maneira simplificada, para estudos do desempenho térmico de edificações por simulação computacional, a análise de sensibilidade é construída a partir da determinação dos parâmetros de entrada a serem estudados, das variações para cada parâmetro de entrada e do indicador de desempenho térmico. A partir dos resultados obtidos para cada caso simulado, o algoritmo de análise de sensibilidade adotado verificará qual parâmetro de entrada é mais ou menos sensível no indicador de desempenho térmico adotado. Com esse resultado é possível determinar quais os pontos a serem alterados na edificação a fim de aprimorar o desempenho térmico. Entretanto, a sensibilidade do parâmetro de entrada está condicionada ao indicador de desempenho térmico que está sendo utilizado. Além disso, embora reduza o número de simulações requeridas na fase de otimização, ainda é um processo que necessita de centenas ou milhares de simulações e, conseqüentemente ainda tem um alto custo computacional. Como alternativa à análise de sensibilidade, os estudos com o foco em desempenho térmico poderiam adotar o balanço térmico da edificação (Ballarini; Corrado, 2012a). Através da análise das trocas de calor de uma única simulação do caso base é possível determinar quais os pontos de maior perda ou ganho de calor e iniciar a modificação na edificação a partir desses pontos. Gaetani, Hoes, and Hensen (2018) desenvolveram um índice

chamado de *Impact Index* para demonstrar a influência do comportamento do usuário na carga térmica de refrigeração e aquecimento de edificações comerciais. O índice desenvolvido é calculado com base nas trocas de calor convectivas relacionadas aos ganhos internos (equipamentos, pessoas, iluminação), trocas por ventilação e sistema de condicionamento de ar, a troca por condução que ocorre nas superfícies e a radiação solar que entra no ambiente e é absorvida. Ao comparar o *Impact Index* desenvolvido com a análise de sensibilidade, os autores verificaram que o índice apresentou resultados similares à análise de sensibilidade, validando a metodologia como uma forma mais rápida de análise da influência do usuário na carga térmica de edificações comerciais. Posteriormente, Zambrano et al. (2023) publicaram um estudo aplicando o *Impact Index* em novas análises e confirmando que o balanço térmico pode ser uma ferramenta de auxílio nas análises de desempenho térmico e energético de edificações.

2.2 BALANÇO TÉRMICO

O desempenho térmico de uma edificação é resultado das trocas de calor que ocorrem entre os componentes construtivos, o ar do ambiente, e o calor emitido pelos usuários e sistemas instalados (Spitler, 2019). O balanço térmico é o somatório de todas as trocas de calor que ocorrem em determinado ponto em um determinado espaço de tempo. Em edificações, podemos utilizar a análise do balanço térmico para contabilizar essas trocas e entender quais as superfícies, equipamentos ou demais variáveis são responsáveis por aquecer ou resfriar o ambiente. Se todas as parcelas forem contabilizadas corretamente, o somatório do balanço térmico deverá ser zero ou muito próximo de zero.

Existem três formas de trocas de calor que ocorrem simultaneamente nas edificações: condução, convecção e radiação. A condução ocorre exclusivamente por meios sólidos, como paredes, piso e cobertura. A convecção está relacionada aos fluidos e nas edificações é caracterizada principalmente pela troca de calor entre as superfícies e o ar. Temos também a radiação que ocorre pela propagação de ondas eletromagnéticas entre os corpos. Nas edificações as três formas de transferência do calor ocorrem simultaneamente. Por exemplo, para a face interna de uma parede, em um único ponto temos o fluxo de calor que atravessa a parede por condução, temos a absorção de radiação solar que entra pelas janelas, a radiação absorvida advinda de outras superfícies e sistemas instalados, a parcela de radiação emitida para as demais superfícies, a troca por convecção entre a face interna da parede e o ar e, por fim, a troca convectiva entre os equipamentos instalados e as pessoas com o ar (Eli, L. G. et al., 2021a; LabEEE; Eli, 2021). Todas essas interações interferem diretamente na temperatura interna dos

ambientes e, conseqüentemente, na necessidade de resfriar os ambientes de forma passiva ou por condicionamento artificial. Dessa forma, é possível analisar a relação entre cada parcela de transferência de calor e o desempenho térmico relacionado à climatização dos ambientes. Ustaoglu, Kurtoglu, and Yaras (2020), por exemplo, analisaram a relação entre a demanda por aquecimento do ambiente e as trocas de calor por condução e convecção que ocorriam por uma parede externa frente a diferentes espessuras de isolamento térmico. Luo, Hong e Tang (2020a), utilizaram o *EnergyPlus* para analisar como a radiação de onda longa emitida pelo entorno e absorvida pelas superfícies externas influenciava no desempenho térmico da edificação.

É possível quantificar as trocas de calor que ocorrem em um ambiente através de equações de transferência de calor (Hensen; Lamberts, 2019b). Dessa forma, algumas metodologias adotam o balanço térmico de maneira simplificada, como é o caso da ISO 52016-1:2017 (ISO, 2017a), para a estimativa das temperaturas internas dos ambientes e da carga térmica de refrigeração e aquecimento. O usuário da ferramenta informa determinados dados de entrada da edificação e a plataforma, online ou através de planilhas do Excel, calcula os resultados. Nos cálculos são considerados os efeitos da radiação, convecção e da condução. Na ISO 52016-1 o cálculo horário utiliza o princípio do modelo Resistência-Capacitância equivalente, onde é feita uma analogia entre problemas térmicos e elétricos para o cálculo do balanço térmico do ambiente da edificação. Embora seja uma alternativa viável de ser utilizada, quando comparada com métodos detalhados, como o existente no programa de simulação de edificações *EnergyPlus*, há variação nos resultados. As principais simplificações são relacionadas à maneira como é calculada a massa dos componentes construtivos, ao valor do coeficiente de convecção e de radiação de onda longa, considerados invariáveis, e, por fim, com relação ao cálculo da radiação solar que entra pelas janelas, que é considerada somente a parcela direta que entra no ambiente e transmitida em onda curta (Ballarini et al., 2020a). Para a condução, o *EnergyPlus* utiliza o método de Funções de Transferência por Condução (CTF) que considera a condução no espaço e tempo, sendo indicado para casos em que há carga térmica de refrigeração e/ou inércia térmica no componente construtivo. Para a convecção e radiação, além de considerar diferentes parcelas de radiação, o programa adota coeficientes variáveis ao longo do tempo. Quanto a radiação solar transmitida pelas janelas, o *EnergyPlus* contabiliza também o que é absorvido pela esquadria e pelo vidro. Verificando essas variações na modelagem do balanço térmico da ISO 52016-1 e do programa *EnergyPlus*, Ballarini et al. (2020a) e De Luca et al. (2021a) validaram e identificaram pontos de melhoria a serem adotados na ISO 52016-1. Os estudos definiram alguns casos base e aplicaram ambas as modelagens, a fim de analisar a variação no resultado de carga térmica, de temperatura operativa e em cada

parcela de troca de calor. Os estudos mostraram que em geral a ISO apresenta resultados próximos ao EnergyPlus, que utiliza cálculos mais detalhados. Porém há uma variação significativa na carga térmica, principalmente nos períodos de pico de calor ou frio. Os autores indicam que essa variação tem relação principalmente com a adoção de coeficientes invariáveis para a convecção e sugerem como melhoria variar esse valor ao longo do ano. Além das simplificações citadas, a ISO 52016-1 considera que os ambientes não são ventilados naturalmente, o que para o Brasil não é aplicável, uma vez que as residências são predominantemente ventiladas naturalmente. Para casos naturalmente ventilados, outra normativa deveria ser aplicada juntamente com a ISO 52016-1 (EPB Center, 2021), mas com o *EnergyPlus* considera as trocas de calor de maneira detalhada, este pode ser considerada como a ferramenta mais recomendada para a análise do balanço e desempenho térmico dos ambientes.

O programa *EnergyPlus* é uma ferramenta de simulação computacional de desempenho térmico e energético de edificações e tem como base de cálculo o balanço térmico (EnergyPlus, 2022b, 2022a). A partir dos dados de saída da simulação é possível obter todas as parcelas de transferências de calor, podendo ser divididas de duas perspectivas: o balanço térmico no ar (convecção) e na superfície (convecção, condução e radiação). O balanço térmico no ar tem como foco analisar as trocas entre todos os componentes do ambiente e o ar, logo a análise da transferência de calor ocorre em um ponto central localizado no ar do ambiente. Enquanto no balanço térmico na superfície (convecção, condução e radiação) é analisado um ponto em cada superfície da envoltória do ambiente. Com o cálculo do balanço térmico no ar do ambiente, é possível verificar, por exemplo, qual superfície está transferindo mais calor ao ar ou ainda se a ventilação natural é suficiente para baixar as temperaturas internas ou se há a necessidade de acionamento do ar-condicionado. Para os casos em que há sistema mecânico de refrigeração e/ou aquecimento, pode ser analisada a carga térmica a ser retirada do ambiente para que o espaço se mantenha em uma determinada temperatura, como também a quantidade de carga térmica a ser adicionada. Para as edificações híbridas, é possível identificar, por exemplo, quais os períodos em que o sistema de condicionamento de ar não precisa ser acionado, uma vez que a ventilação natural pode manter temperaturas agradáveis dentro da residência. Alguns estudos utilizaram a simulação computacional via *EnergyPlus* para analisar o balanço térmico por convecção e obter mais detalhes do desempenho térmico das edificações objeto de estudo. Por exemplo, Ballarini e Corrado (2012a) e Melo et al. (2015a) utilizaram as trocas de calor por convecção para analisar o impacto da adoção de isolamento térmico em edificações localizadas em climas quentes. Com a adoção do balanço térmico por convecção, os autores puderam verificar se a superfície na qual seria aplicado o isolamento térmico

realmente representava uma parcela significativa de ganho de calor entre a superfície e o ar do ambiente. Entretanto, por ser analisado um ponto no ar do ambiente, alguns efeitos de outras transferências de calor não são notados no balanço térmico no ar, como por exemplo a radiação solar que entra pelas janelas e atinge as superfícies do ambiente. Nesse caso, não é possível identificar se a superfície está transferindo calor para o ar do ambiente porque houve a transferência significativa de calor por condução ou devido à radiação que foi absorvida. Dessa forma, se faz necessário o entendimento do balanço térmico na superfície em conjunto com o balanço térmico no ar, para a escolha mais assertiva de quais pontos influenciam no ganho e perda de calor dos ambientes.

3 DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS COM ESTRATÉGIAS DE RESFRIAMENTO MISTO E PASSIVO: O CONTEXTO BRASILEIRO (ARTIGO 1)

Este capítulo sintetiza o artigo “*Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context*” publicado no periódico internacional *Energy and Buildings* na edição especial *Building Cooling for Sustainable Societies*. Para melhor compreensão da importância do trabalho no contexto desta tese, o texto foi adaptado e traduzido para o português. O artigo completo encontra-se no Apêndice B deste documento. Abaixo as informações do artigo completo e o resumo gráfico traduzido:

L.G. Eli, A.F. Krelling, M.S. Olinger, A.P. Melo, R. Lamberts,
Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context,
Energy and Buildings, Volume 244, 2021, 111047, ISSN 0378-7788,
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111047>.

Figura 2 – Resumo gráfico do artigo (*graphical abstract*).



É importante destacar que o estudo tem como base uma versão anterior do procedimento de simulação computacional da NBR 15575-1:2021 publicado no início do ano de 2021 (ABNT, 2021b). Dessa forma, algumas das definições adotadas aqui podem divergir do procedimento publicado.

3.1 MÉTODO

Este estudo analisa a variação no resultado de indicadores de desempenho térmico frente a variações construtivas, climáticas e comportamentais. A consideração individual de cada indicador pode levar a conclusões que não representam a realidade da edificação. Uma análise combinada, por outro lado, também deve ser considerada com cautela, levando em

consideração as inter-relações entre os indicadores. Para investigar essas inter-relações, foi utilizada uma residência unifamiliar térrea, com a variação de três grupos de parâmetros:

- Construtivo: relacionado aos sistemas construtivos e materiais utilizados na edificação;
- Comportamental: associado à maneira como os moradores usam a habitação. Esse parâmetro é dividido em padrões de ocupação e estratégias de resfriamento; e
- Climático: dependendo da localização do edifício.

3.1.1 Indicadores de Desempenho Térmico

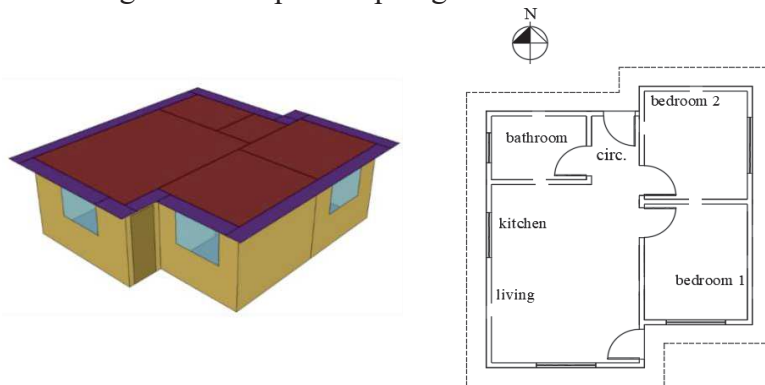
Dois indicadores principais de desempenho térmico foram analisados neste estudo: percentual de horas ocupadas dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) e carga térmica anual (CgTT), dividida entre carga térmica de resfriamento (CgTR) e carga térmica de aquecimento (CgTA). O PHFT é indicado para analisar edificações naturalmente ventiladas ou que utilizam a ventilação natural como estratégia de resfriamento em determinados períodos. O valor do PHFT é adimensional e representa o somatório das horas ao longo do ano em que os ambientes de permanência prolongada (APP), salas e dormitórios, estão ocupados e com temperatura operativa maior que 18 °C e menor que 26 °C dividido pelo somatório das horas ao longo do ano em que os APP estão ocupados. O valor do PHFT é calculado individualmente para cada APP e o valor para a unidade habitacional é a média aritmética dos valores dos APP. O segundo indicador, CgTT, indica o desempenho da residência ao utilizar um sistema de ar-condicionado. A carga térmica anual é dividida entre a carga anual de resfriamento (CgTR) e de aquecimento (CgTA). A partir dos resultados de cada APP da residência, obtém-se o valor do indicador de carga térmica anual da residência somando a carga térmica anual de cada cômodo e dividindo pela soma da área líquida dos ambientes de permanência prolongada.

Cada resultado foi obtido a partir de simulações computacionais realizadas no programa *EnergyPlus* na versão 9.0.1 (EnergyPlus, 2024). A partir das simulações, cada resultado foi analisado com o apoio da linguagem computacional R (CRAN, 2021), versão 3.5.1, dentro do ambiente RStudio (RStudio, 2021), versão 3.6.1.

3.1.2 A Edificação Residencial

A tipologia utilizada neste estudo foi uma edificação unifamiliar térrea com dois quartos, um banheiro e uma sala com cozinha conjugada. Esse projeto foi definido a partir de um levantamento de tipologias representativas brasileiras realizado por Triana, Lamberts e Sassi (Triana; Lamberts; Sassi, 2015). A casa possui área útil de 38,58 m² para os APP e pé-direito de 2,5 m. O único sombreamento presente é um beiral de 0,5 m ao longo do perímetro de toda a casa. O modelo 3D e a planta baixa do edifício podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 – Etapa 1: Tipologia residencial adotada.



Fonte: Adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

As cargas internas foram simuladas considerando pessoas, iluminação e equipamentos. O tipo de resfriamento dos ambientes varia de acordo com a estratégia adotada na análise. Foi considerada a infiltração através de infiltração em janelas e portas, conforme Liddament (1986). Essa infiltração considera que há uma passagem de ar entre as frestas das aberturas, visto que no Brasil as esquadrias não são totalmente estanques. No entanto, a janela do banheiro foi considerada constantemente aberta em todos os casos, e as portas foram consideradas sempre fechadas.

A composição das paredes e cobertura varia, entretanto, absorvância solar das paredes e do telhado, o tipo de vidro e os materiais que compõem o piso foram considerados como valores fixos. Para a absorvância solar das paredes e telhado foi adotado o valor de 0,5. Em relação ao tipo de vidro, foi adotado um vidro simples com espessura de 3 mm, coeficiente de ganho de calor solar de 0,87 e transmitância térmica de 5,7 W/(m².K). O piso foi fixado de forma a representar a situação mais comum no Brasil, correspondendo a um componente com transmitância térmica de 4,40 W/(m².K) e capacidade térmica de 164 kJ/(m².K).

3.1.3 Variações nos Parâmetros Construtivos

Para explorar a influência da envoltória nos resultados dos indicadores de desempenho térmico, foram analisados cinco sistemas construtivos, variando a composição da cobertura, Tabela 1, e das paredes, Tabela 2. É importante destacar que nas tabelas a sequência da composição começa da camada externa para a camada interna do sistema construtivo. A Tabela 3 descreve a composição de cada uma das cinco envoltórias analisadas.

Tabela 1 – Etapa 1: Variação na composição das coberturas.

ID	Composição	U* e CT**
1	Telha de fibrocimento (0,008 m) + Câmara de ar (> 0,050 m) + Concreto (0,100 m)	U: 2,04 CT: 231,42
2	Telha de fibrocimento (0,008 m) + Barreira radiante (alumínio) + Câmara de ar (> 0,050 m) + Lã de vidro (0,080 m) + Placa de gesso (gesso) (0,0125 m)	U: 0,38 CT: 24,29
3	Telha de fibrocimento (0,008 m) + Barreira radiante (alumínio) + Câmara de ar (> 0,050 m) + Lã de vidro (0,080 m) + Concreto (0,100 m)	U: 0,38 CT: 246,52

*U: Transmitância Térmica [W/(m².K)]; **CT: Capacidade Térmica [kJ/(m².K)].

Tabela 2 – Etapa 1: Variação na composição das paredes.

ID	Paredes externas	U* e CT**	Paredes internas	U* e CT**
	Composição		Composição	
1	Concreto (0,100 m)	U: 4,40 CT: 220,00	Igual às paredes externas	
2	Argamassa (0,025 m) + Tijolo furado cerâmico (0,190 m) + Argamassa (0,025 m)	U: 2,39 CT: 151,00	Igual às paredes externas	
3	Placa cimentícia (0,010 m) + Lã de vidro (0,080 m) + Placa de gesso (0,0125 m)	U: 0,50 CT: 37,87	Placa de gesso (0,0125 m) + Lã de vidro (0,08 m) + Placa de gesso (0,0125 m)	U: 0,51 CT: 48,08
4	Lã de vidro (0,050 m) + Concreto (0,100 m)	U: 0,75 CT: 233,08	Concreto (0,100 m)	U: 4,40 CT: 220,00

*U: Transmitância Térmica [W/(m².K)]; **CT: Capacidade Térmica [kJ/(m².K)].

Tabela 3 – Etapa 1: Variação na composição das envoltórias.

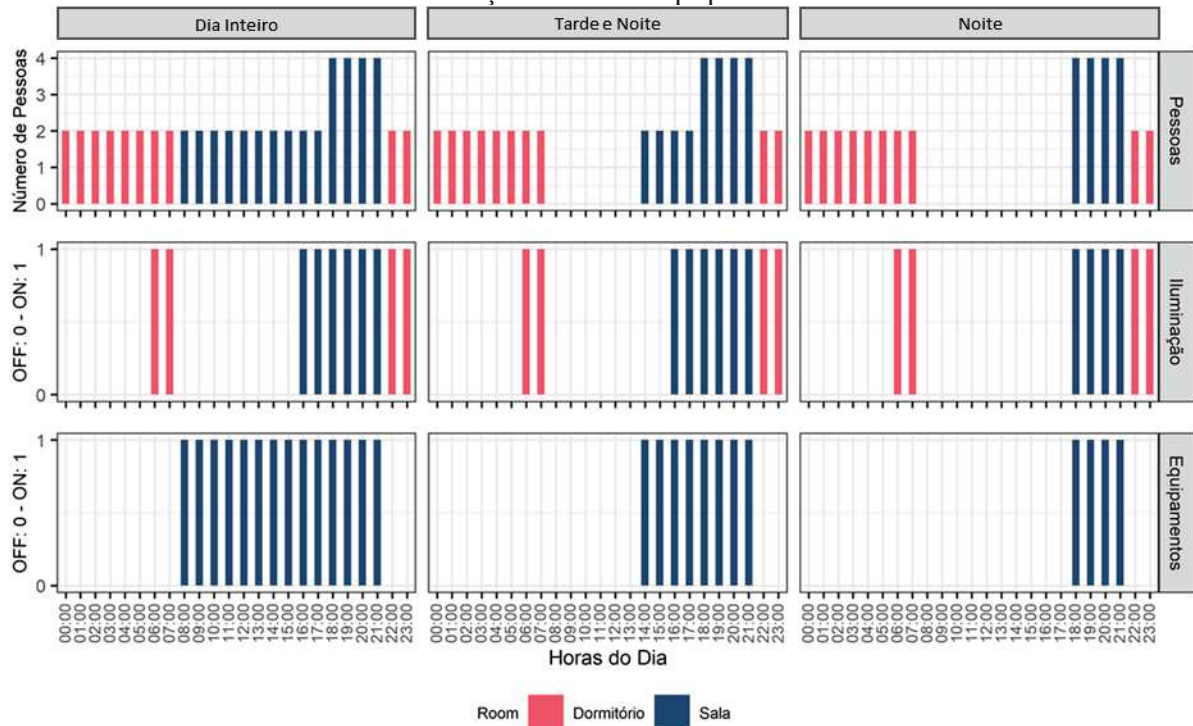
ID	Cobertura + Paredes	Descrição da transmitância e capacidade térmica
1	Cobertura 1 + Parede 1	Parede externa e telhado: alta transmitância e alta capacidade térmica
2	Cobertura 1 + Parede 2	Parede externa: transmitância média e capacidade térmica média Telhado: alta transmitância e alta capacidade térmica
3	Cobertura 2 + Parede 3	Parede externa e telhado: baixa transmitância e baixa capacidade térmica
4	Cobertura 1 + Parede 4	Parede externa: baixa transmitância e alta capacidade térmica Telhado: alta transmitância e alta capacidade térmica
5	Cobertura 3 + Parede 4	Parede externa: baixa transmitância e alta capacidade térmica Telhado: baixa transmitância e alta capacidade térmica

3.1.4 Parâmetros comportamentais

3.1.4.1 Variação nos padrões de ocupação

Na Figura 4 são expostos os períodos de ocupação e número de pessoas considerados, juntamente com o padrão de acionamento do sistema de iluminação e equipamentos.

Figura 4 – Etapa 1: Variação no padrão de ocupação e acionamento do sistema de iluminação e/ou dos equipamentos.



Fonte: Traduzido de Eli et al. (2021b).

As residências brasileiras são ocupadas com maior frequência por pessoas que estão em casa apenas durante a tarde e à noite, pois trabalham e/ou estudam em outros lugares durante o dia (Ramos *et al.*, 2020a). Outro padrão recorrente é o de pessoas que trabalham em casa, neste caso há sempre pelo menos uma pessoa em casa durante o dia. Tomando esses estudos como referência, três variações no padrão de ocupação da sala foram adotadas: 1) “dia inteiro”, onde sempre há pelo menos uma pessoa em casa, representando o padrão de pessoas que trabalham em casa; 2) “tarde e noite”, onde entre 08:00 e 13:59 não há pessoas na residência, representando pessoas que trabalham apenas um período do dia; 3) “noite”, neste perfil entre 08:00 e 17:59 não há ocupação em nenhum ambiente da residência, representando o perfil em que as pessoas trabalham e/ou estudam o dia todo e só voltam para casa à noite. O padrão de ocupação dos dormitórios foi definido como duas pessoas das 22:00 às 07:59. Quanto ao número de pessoas na sala, a variação foi de duas a quatro pessoas. Em relação às cargas

internas, o acionamento da iluminação e dos equipamentos variou de acordo com a presença de pessoas no ambiente.

3.1.4.2 Variações nos padrões de comportamento: estratégias de resfriamento e aquecimento

As variações no comportamento dos usuários consideraram a interação das pessoas com a abertura das janelas para uso da ventilação natural e com o acionamento do sistema de ar-condicionado. Duas estratégias de resfriamento foram consideradas para a análise: Ventilação Natural e Híbrida. A estratégia “ventilação natural” é composta por dois modelos de simulação: um que considera apenas o uso de ventilação natural para o resfriamento dos ambientes, a partir do qual é analisado o indicador PHFT; e um modelo complementar, utilizado para calcular o indicador de carga térmica. Nesse modelo complementar, é utilizado o sistema ideal de cálculo de carga térmica, para calcular a carga térmica de refrigeração e aquecimento durante as horas em que os ambientes são ocupados ao longo do ano. A estratégia “híbrida” combina soluções de refrigeração ativa e passiva no mesmo modelo, representando uma fusão do modelo para a estratégia “ventilação natural” com um modelo complementar.

3.1.5 Parâmetros climáticos

O Brasil é um país com grande diversidade climática, principalmente devido à dimensão continental de seu território, possuindo cidades com clima quente predominante ao longo de todo o ano, enquanto outras cidades há a distinção clara entre verão e inverno. Buscando abranger essa diversidade, os climas adotados para o estudo referem-se às cidades do Rio de Janeiro, Santa Maria e São Paulo. Os arquivos climáticos adotados foram o TMYx (2003-2017) (Crawley; Lawrie, 2020). Embora a NBR 15575-1:2021 define a utilização dos arquivos climáticos INMET (ABNT, 2021a), mas este trabalho foi desenvolvido antes da publicação da normativa e por isso optou-se por utilizar os arquivos TMYx (2003-2017).

3.1.6 Balanço térmico no ar do ambiente

Para demonstrar a influência do fluxo de calor nas superfícies internas da envoltória e as cargas internas nos ambientes de permanência prolongada, foi analisado o balanço térmico

do ar em uma zona, conforme adotado por Melo et al. (Melo *et al.*, 2015). Este método considera as trocas de calor por convecção que ocorrem entre as superfícies da envoltória e as cargas internas do ambiente, os ganhos e perdas de calor que ocorrem devido à ventilação natural e a carga térmica adicionada ou retirada do ambiente pelo ar-condicionado (quando aplicado). Com esta análise detalhada, é possível observar o fluxo de calor que ocorre através de cada superfície.

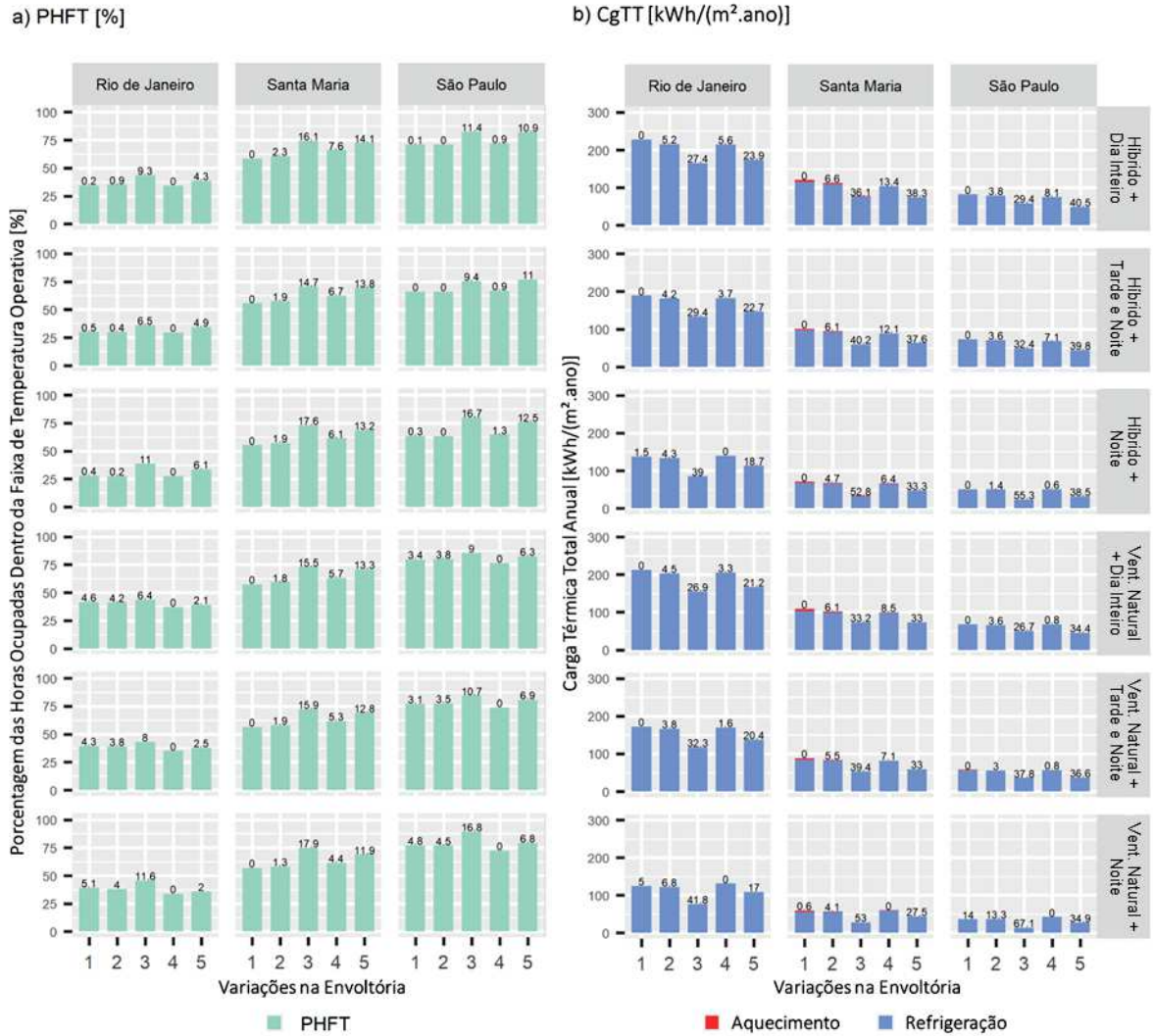
Os dados de saída da simulação foram divididos em quatro categorias: a primeira é o ganho ou perda de calor por convecção nas superfícies da envoltória, a segunda é o ganho de calor proveniente das cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos), a terceira categoria é o ganho ou perda de calor por infiltração (ventilação natural e/ou frestas nas esquadrias) e a quarta é a carga térmica adicionada ou retirada do ambiente (ar-condicionado). Para a primeira categoria, relacionada às superfícies da envoltória, o resultado é obtido a cada período para cada superfície da edificação: paredes internas, paredes externas, piso, cobertura, portas e janelas. As outras três categorias são obtidas para cada ambiente.

É importante destacar que o programa *EnergyPlus* utiliza diferentes algoritmos de cálculo para determinar o balanço térmico das zonas térmicas (EnergyPlus, 2023a). Neste trabalho foram adotados os algoritmos padrão do programa, sendo o TARP para a convecção interna e o DOE-2 para a convecção externa. Para o algoritmo de balanço de calor foi adotado o *Conduction Transfer Function*.

3.2 RESULTADOS

Os valores para a porcentagem de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT) e a carga térmica anual total (CgTT) para cada combinação de parâmetros podem ser vistos na Figura 5. O número zero acima das barras representa o menor valor de PHFT (Figura 5a) e o maior valor de CgTT (Figura 5b), correspondendo ao pior resultado para cada indicador em uma determinada combinação de clima e comportamento dos usuários. Para o indicador PHFT, os demais valores representam o quanto (valor absoluto) o PHFT foi melhorado em relação à envoltória de pior desempenho. Para o indicador CgTT, os demais valores representam o percentual de redução em relação à envoltória de pior desempenho.

Figura 5 – Etapa 1: Resultados para PHFT e CgTT.



Variações na envoltória	
Envoltória 1	Paredes externas: alta transmitância térmica e alta capacidade térmica Cobertura: alta transmitância térmica e alta capacidade térmica
Envoltória 2	Paredes externas: média transmitância térmica e média capacidade térmica Cobertura: alta transmitância térmica e alta capacidade térmica
Envoltória 3	Paredes externas: baixa transmitância térmica e baixa capacidade térmica Cobertura: baixa transmitância térmica e baixa capacidade térmica
Envoltória 4	Paredes externas: baixa transmitância térmica e alta capacidade térmica Cobertura: alta transmitância térmica e alta capacidade térmica
Envoltória 5	Paredes externas: baixa transmitância térmica e alta capacidade térmica Cobertura: baixa transmitância térmica e alta capacidade térmica

Fonte: Traduzido de Eli et al. (2021b).

De acordo com os resultados obtidos, pode-se observar que, além do clima, os parâmetros comportamentais modificam significativamente o desempenho térmico da edificação para ambos os indicadores considerados. Na cidade de São Paulo, por exemplo, a estratégia de resfriamento “ventilação natural” com padrão de comportamento “dia inteiro” apresentou o menor valor de PHFT para a Envoltória 4. Porém, ao mudar a estratégia de

resfriamento para a estratégia “híbrida”, o menor valor de PHFT foi encontrado para a Envoltória 2. Pode-se observar que o desempenho de cada envoltória é fortemente dependente do tipo de estratégia de resfriamento adotada e modo de ocupação dos ambientes.

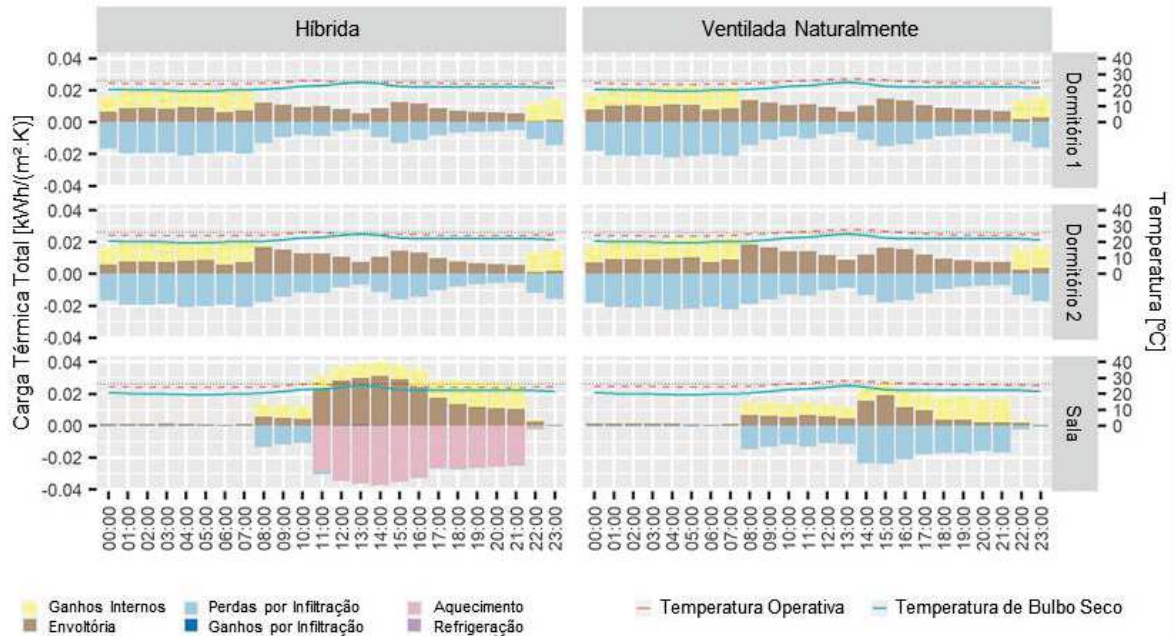
Além disso, o desempenho térmico da edificação pode diferir de acordo com o indicador utilizado, destacando a importância da definição do indicador de análise. Se a normativa considerar apenas as cargas térmicas da edificação, por exemplo, pode não incentivar o uso de estratégias bioclimáticas como a ventilação natural. Por outro lado, se a normativa não considerar as cargas térmicas da edificação na análise, pode reduzir significativamente o desempenho térmico dos ocupantes que utilizam o ar-condicionado artificial. Para exemplificar, ao analisar apenas o indicador PHFT para a cidade do Rio de Janeiro e o padrão de comportamento “ventilação natural”, a Envoltória 1 obteve o segundo melhor desempenho térmico. Assim, poderíamos considerá-lo como um sistema construtivo a ser utilizado neste caso. No entanto, para o indicador de carga térmica, esta envoltória apresentou um dos maiores valores de carga térmica para a maioria dos padrões de comportamento. Assim, se um morador que utiliza apenas a ventilação natural como estratégia de resfriamento passivo investisse em ar-condicionado artificial, o desempenho térmico da residência seria insatisfatório em relação às demais envoltórias, consumindo mais energia elétrica com ar-condicionado.

A fim de complementar a análise do indicador de desempenho térmico o balanço térmico para dois casos pode ser visto na Figura 6, diferindo apenas pelas estratégias de resfriamento e aquecimento adotadas (“ventilação natural” ou “híbrida”). Ambos os casos têm a combinação do clima do Rio de Janeiro, padrão de ocupação “dia inteiro” e Envoltória 3. Na sala com estratégia “híbrida”, o sistema de ar-condicionado foi acionado após as 11h00, permanecendo ligado até o fim da ocupação às 21h:59. No entanto, pode-se observar que no modelo com o comportamento “ventilação natural”, a ventilação natural foi permitida a partir das 17h00 e a temperatura operativa da sala foi inferior a 26 °C (26 °C é a temperatura operativa para ligar o resfriamento pelo ar-condicionado). Esse resultado indica que se os usuários observarem o aumento do potencial de ventilação natural após algumas horas de resfriamento artificial, poderão economizar energia elétrica reduzindo a temperatura dos ambientes por meio do uso da ventilação natural.

Ao comparar o desempenho da edificação em diferentes cidades, a Figura 5 mostra que a cidade do Rio de Janeiro apresentou os maiores valores para CgTT e os menores para PHFT. São Paulo obteve a menor CgTT e os maiores valores de PHFT. Os valores para Santa Maria ficaram entre os obtidos para as outras duas cidades. Esses resultados indicam que São

Paulo foi a cidade com maior potencial para manter temperaturas satisfatórias dentro da residência sem o uso de ar-condicionado.

Figura 6 – Etapa 1: Balanço térmico em 20/05 com a combinação: clima do Rio de Janeiro, Envoltória 3, padrão de ocupação “dia inteiro”.

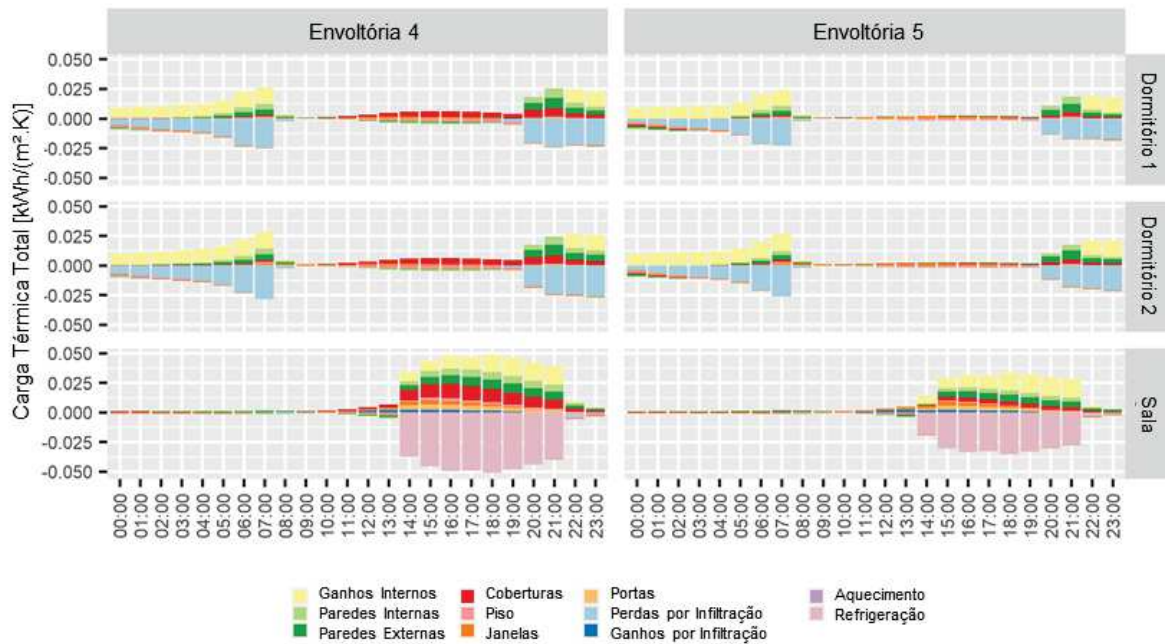


Fonte: Traduzido de Eli et al. (2021b).

Em relação às variações da envoltória da residência, as envoltórias com isolamento térmico nas paredes externas e cobertura apresentaram as menores cargas térmicas. Para os casos com comportamento “híbrida” e padrões de ocupação “dia inteiro” ou “tarde e noite”, a Envoltória 5 (baixa transmitância e alta capacidade térmica) apresentou o maior potencial de redução de CgTT quando comparado aos piores resultados de CgTT para a combinação de clima e comportamento dos usuários. Para os casos com a estratégia “ventilação natural” e ocupação “dia inteiro”, a Envoltória 5 também apresentou o maior potencial de redução de CgTT. Para as demais combinações climáticas e comportamentais, a Envoltória 3 (baixa transmitância e baixa capacidade térmica) foi o que obteve o maior potencial de redução de CgTT. A Envoltória 4, que possui a mesma parede externa da Envoltória 5, mas que possui cobertura com alta transmitância e alta capacidade térmica, ficou entre as envoltórias com pior desempenho térmico segundo o indicador de CgTT. Isso demonstra, para os casos analisados, que os ganhos de calor da cobertura são maiores do que os das paredes externas, como pode ser observado na Figura 7. Nesta figura, o balanço térmico da residência é apresentado

considerando a cidade de São Paulo, com a estratégia “híbrida” e padrão de ocupação “tarde e noite”, considerados as Envoltórias 4 e 5.

Figura 7 – Etapa 1: Balanço térmico em 21/10 com a combinação: clima de São Paulo, padrão de ocupação “tarde e noite”, estratégia “híbrida”. Variações na envoltória da residência.



Fonte: Traduzido de Eli et al. (2021b).

O isolamento térmico nas paredes externas e cobertura é uma medida de eficiência energética que ajuda a melhorar o desempenho térmico da edificação para todos os perfis de usuários e climas adotados neste estudo. Esse resultado é semelhante ao relatado por outros autores que consideraram climas semelhantes (Fosas *et al.*, 2018; Rakhshan; Friess, 2017; Triana; Lamberts; Sassi, 2018; Tubelo *et al.*, 2018). Cabe ressaltar que muitos autores consideraram níveis de isolamento térmico muito superiores ao adotado neste estudo, principalmente em regiões com invernos rigorosos, chegando a valores de transmitância térmica próximos a $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Com relação à inércia térmica, poucos estudos indicam essa característica como medida de eficiência energética (Ghoreishi, 2019; Mantesi *et al.*, 2019), e a maioria das pesquisas limita-se a considerar a transmitância térmica.

3.3 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Este estudo analisou o desempenho térmico de uma edificação residencial frente a variações construtivas, comportamentais e climáticas. Foi adotado o programa *EnergyPlus* para a execução das simulações dos casos e utilizado o balanço térmico no ar dos ambientes como uma ferramenta de auxílio dos resultados obtidos. Dentre as conclusões, os resultados demonstraram que a escolha do indicador de desempenho térmico pode influenciar na definição de estratégias construtivas para a edificação, sendo ideal considerar, para a escolha do indicador, qual o padrão comportamental do usuário. A maneira como as pessoas se comportam dentro das edificações e o indicador a ser levantado na avaliação de desempenho térmico e energético, são questões que devem ser consideradas em políticas públicas.

Sobre a utilização do balanço térmico no ar como ferramenta de auxílio na análise do desempenho térmico, o estudo demonstrou que analisar os ganhos e perdas nos ambientes aprimorou as discussões relacionadas ao tipo de usuário e sistemas construtivos adotados. Para discussões relacionadas aos usuários, foi possível demonstrar que, no caso da climatização híbrida, após um período com o ar-condicionado ligado para resfriar o ambiente, os usuários podem desligar o sistema quando inicia o período noturno e aproveitar o resfriamento passivo da ventilação natural. Na análise dos sistemas construtivos, foi possível confirmar que o principal ganho de calor na cidade de São Paulo é pela cobertura e por isso a mesma edificação resulta em desempenho térmico distinto quando aplicada cobertura com e sem isolamento térmico, sem alterar outros componentes construtivos.

Entretanto, embora o balanço térmico no ar tenha auxiliado nas discussões acerca do desempenho térmico, ainda é preciso explorar em mais detalhes as variáveis que podem ser obtidas a partir da simulação computacional, principalmente relacionadas às demais transferências de calor (condução e radiação). Portanto, o próximo trabalho teve como foco analisar o balanço térmico no ar e em cada superfície dos ambientes, a fim de desenvolver um *framework* que auxilie não somente nas discussões sobre o desempenho térmico, mas também na definição de estratégias que visem melhorar a performance da edificação.

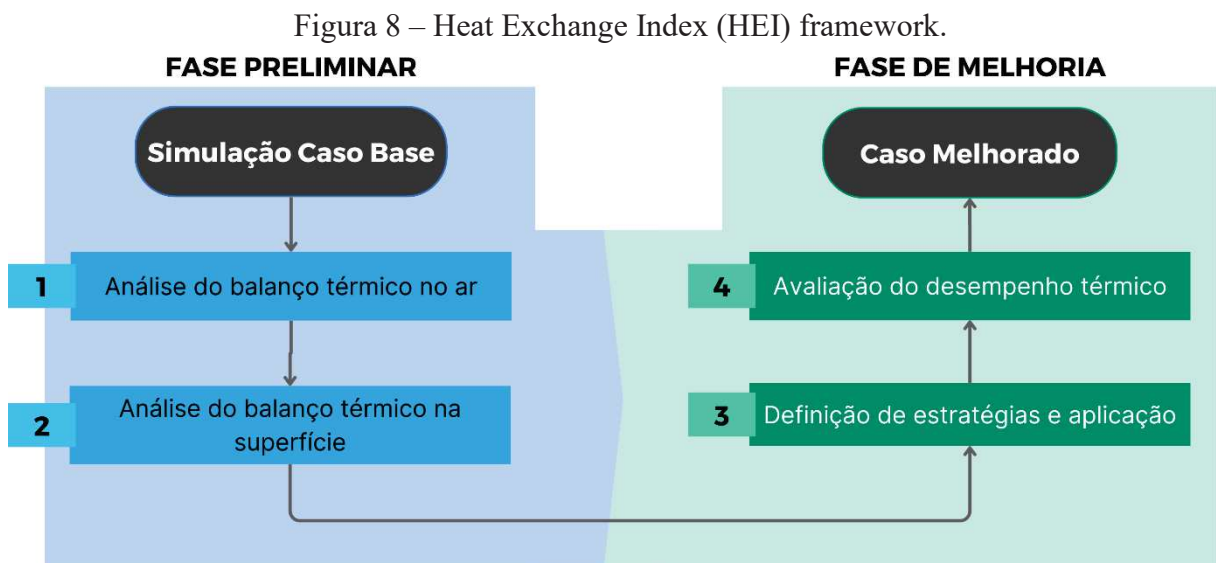
4 COMO MELHORAR O DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES COM UMA ÚNICA SIMULAÇÃO? O *HEAT EXCHANGE INDEX* APLICADO A CLIMAS QUENTES

Este capítulo resume o artigo “*How to improve the thermal performance of buildings with one simulation run? The heat exchange index applied to hot climates*” publicado no periódico internacional *Building and Environment*. Para melhor compreensão da importância do trabalho no contexto desta tese, o texto foi adaptado e traduzido para o português. O artigo completo encontra-se no Apêndice C deste documento. Abaixo as informações do artigo completo:

Letícia G. Eli, Ana Paula Melo, Roberto Lamberts,
How to improve the thermal performance of buildings with one simulation run? The heat exchange index applied to hot climates,
Building and Environment, Volume 258, 2024, 111606, ISSN 1873-684X, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111606>.

4.1 *FRAMEWORK* PROPOSTO

Para a aplicação do balanço térmico como ferramenta de auxílio na melhoria do desempenho térmico de edificações, foi proposto um *framework* dividido em quatro etapas e duas fases, conforme Figura 8.

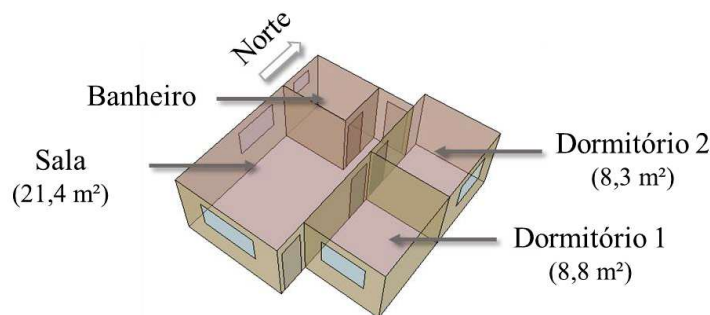


Fonte: Traduzido de Eli, Melo e Lamberts (2024).

A primeira fase do *framework* consiste nas análises do balanço térmico do caso base, a partir da simulação da edificação, sendo primeiro executada a etapa de estudo do balanço térmico no ar e depois na superfície. A segunda fase é a aplicação de estratégias que visem aprimorar o desempenho térmico do caso base, de acordo com as análises obtidas pelos balanços térmicos. Definidas as estratégias e aplicadas na simulação, o desempenho térmico deve ser avaliado considerando um indicador de desempenho, a fim de atestar ou não a melhoria do caso base.

Para a aplicação do *framework*, uma residência unifamiliar térrea foi modelada no programa EnergyPlus versão 22.2 (EnergyPlus, 2024), a fim de ser o caso ilustrativo, de acordo com Figura 9. A residência adotada neste estudo é similar ao do artigo 1 desta tese (ver Figura 3).

Figura 9 – Residência unifamiliar adotada no estudo.



Fonte: Traduzido de Eli, Melo e Lamberts (2024).

As características do caso base foram definidas de acordo com a edificação de referência do procedimento de simulação computacional para análise de desempenho térmico da NBR 15575-1:2021 (ABNT, 2021b; Krelling *et al.*, 2023). Essas características incluem envoltória com alta inércia térmica e média absorvância, vidros simples (incolor 3 mm) nas esquadrias e área envidraçada igual à 17% da área de piso dos ambientes de permanência prolongada (APP) e fator de ventilação de 45% para essas aberturas. Para os ganhos internos, também foram consideradas as definições da NBR 15575-1:2021, sendo adotadas iluminação, equipamentos e pessoas.

Para o comportamento dos usuários, na questão de climatização, foram consideradas três formas de uso: Ventilação Natural (NV), Ar-Condicionado (AC) e Híbrido (HY). O modo Ventilação Natural (NV) considera que as pessoas usam a ventilação natural para reduzir as temperaturas internas e renovar o ar interno dos APP. O Ar-Condicionado (AC) é o

comportamento onde é possível operar um sistema de ar-condicionado para manter as temperaturas internas em um determinado valor durante a ocupação. Já o último comportamento, Híbrido (HY), é o modo de operação em que as pessoas podem escolher entre abrir as janelas para ventilar ou ligar o sistema de ar-condicionado para regular a temperatura interna. Para maiores informações sobre os comportamentos, consultar os fluxogramas presentes no Apêndice C deste trabalho.

Sobre o clima, duas cidades brasileiras com características bem distintas foram consideradas neste estudo: Belém (PA) e São Paulo (SP). A cidade de Belém é caracterizada por ter pouca variação de temperatura ao longo do ano, sem estações definidas quanto à temperatura, sendo a temperatura de bulbo seco média (TBS_m) de 27 °C, enquanto São Paulo possui verão quente e inverno ameno, com TBS_m de 20,4 °C. O arquivo climático adotado foi o TMYx2007-2021 do Climate One Buildings (Crawley; Lawrie, 2024).

4.1.1 O balanço térmico no ar do ambiente

A primeira etapa do *framework* proposto é a análise do balanço térmico no ar dos ambientes. Após essa análise, para um estudo detalhado da envoltória, são determinadas quais superfícies necessitam da análise do balanço térmico na superfície.

A convecção é a troca de calor que rege a temperatura do ar no ambiente interno, dessa forma, afeta diretamente a sensação térmica e, conseqüentemente, a demanda por ar-condicionado. Portanto, neste estudo, a troca de calor sensível por convecção é a transferência explorada no balanço térmico no ar do ambiente. As demais transferências de calor, por exemplo radiação solar e condução, são investigadas no balanço térmico na superfície, próximo passo do *framework* proposto neste trabalho.

O programa *EnergyPlus* usa o balanço térmico para calcular a temperatura do ar e das superfícies, e essas são variáveis que influenciam em todos os resultados da simulação, como por exemplo nos valores de temperatura operativa e carga térmica dos ambientes. Para uma análise aprofundada, é possível obter os dados referentes às trocas de calor do balanço térmico a partir da simulação (EnergyPlus, 2024). O balanço térmico no ar considera que a soma total de calor removido ou adicionado ao ar pelas superfícies, cargas internas, troca de ar e sistemas é igual a zero, como a Equação 1 apresenta. Nesta equação, o sinal positivo (+) é relacionado aos ganhos e o negativo (-) às perdas. Sobre as variáveis: q''_s representa as trocas entre as superfícies e o ar, $q''_{NV,window}$ é a troca de calor que ocorre no ar devido à ventilação natural do ar exterior (abertura de janelas), $q''_{NV,internal}$ é a troca de calor que ocorre no ar devido à

ventilação natural entre as zonas térmicas adjacentes, $q''_{cooling}$ e $q''_{heating}$ é relacionada à carga térmica de refrigeração (-) e de aquecimento (+) advinda de sistemas mecânicos, e q''_{IG} é o calor adicionado ao ar pelos ganhos internos (por exemplo, pessoas, iluminação e equipamentos).

$$\sum (q''_{s,+} + q''_{s,-}) + (q''_{IG,+} + q''_{NV,window,+} + q''_{NV,window,-} + q''_{NV,internal,+} + q''_{NV,internal,-} + q''_{cooling,-} + q''_{heating,+}) = 0 \quad (1)$$

Quanto aos algoritmos de cálculo do balanço térmico das zonas térmicas adotado no *EnergyPlus*, assim como na etapa 1 deste trabalho, foram adotados os algoritmos padrão do programa, sendo o TARP para a convecção interna e o DOE-2 para a convecção externa. Para o algoritmo de balanço de calor foi adotado o Conduction Transfer Function.

4.1.1.1 Heat Exchanges Index

Para entender o impacto de cada troca de calor no balanço térmico total, este estudo desenvolveu o *Heat Exchanges Index* (HEI), com valores entre 0 e 1. No balanço térmico no ar, o HEI com valor próximo a 0 indica que a troca de calor é baixo e não tem impacto no balanço térmico total, mas um valor próximo de 1 indica que a troca de calor tem grande impacto.

O cálculo do HEI para o balanço térmico no ar do ambiente é realizado de acordo com a Equação 2 para ganhos e Equação 3 para perdas. Nas equações, o “x” representa a troca de calor possível, podendo ser entre a superfície da envoltória e o ar do ambiente, os ganhos internos, o ar interno e o sistema de climatização. O $\sum q''$ é a soma de todos os ganhos ou perdas no ar do ambiente durante o período analisado. Todos os valores são considerados em módulo na equação.

$$HEI_{x,+} = |q_{x,+}| / \sum |q''| \quad (2)$$

$$HEI_{x,-} = |q_{x,-}| / \sum |q''| \quad (3)$$

Quanto aos algoritmos de cálculo do balanço térmico das zonas térmicas adotado no *EnergyPlus*, assim como na etapa 1 deste trabalho, foi adotado o algoritmo padrão do programa, sendo o *Conduction Transfer Function* para o balanço de calor.

4.1.2 O balanço térmico na superfície

O balanço térmico no ar do ambiente é um modo de entender qual elemento da edificação é responsável por aumentar ou reduzir as temperaturas internas. Entretanto, alguns detalhes ainda precisam ser analisados. Dessa forma, foi aplicado também o balanço térmico nas superfícies que obtiveram os valores de HEI maiores ou iguais à mediana no balanço térmico no ar de cada ambiente.

O programa *EnergyPlus* fornece cada uma das parcelas de transferência de calor das superfícies opacas (paredes, piso, cobertura e portas) e, assim como no balanço térmico no ar do ambiente, o balanço térmico na superfície é atendido quando a soma de todas as transferências de calor é igual a zero, como a Equação 4 demonstra. O sinal positivo (+) indica que são ganhos de calor e negativo (-) que são perdas. Sobre as variáveis: $q''_{convection}$ é a troca de calor entre as superfícies e o ar do ambiente, $q''_{conduction}$ é a troca de calor por condução entre a superfície interna e o interior do element construtivo, $q''_{solar,rad}$ represente o calor absorvido pela superfície a partir da radiação solar que entra no ambiente pelas janelas externas, $q''_{surfaces,rad}$ é a troca de calor pela radiação de onda longa entre as superfícies do ambiente, e $q''_{other,rad}$ é a soma do ganho pela radiação de onda curta emitida pela iluminação elétrica e de onda longa das cargas internas.

$$q''_{convection,-} + q''_{convection,+} + q''_{conduction,-} + q''_{conduction,+} + q''_{solar,rad,+} + q''_{surfaces,rad,-} + q''_{surfaces,rad,+} + q''_{other,rad,+} = 0 \quad (4)$$

4.1.2.1 Heat Exchanges Index

O *Heat Exchanges Index* (HEI) para o balanço térmico na superfície foi desenvolvido com o mesmo propósito do HEI para o balanço térmico no ar, sendo realizado de acordo com a Equação 5, onde o “y” em HEI_y e q''_y indica uma das possíveis transferências de calor que ocorrem na superfície opaca. Sobre as variáveis: o q''_y é a transferência de calor pela superfície opaca e o $q_{y,transfer}$ é a soma de todas as trocas de calor que ocorrem na superfície opaca analisada. O valor de HEI igual a 0 ou próximos indicam que a transferência de calor tem baixo

impacto no balanço térmico total da superfície, enquanto um valor próximo a 1 indica o contrário. Nessa análise, cada superfície é analisada individualmente e todos os valores são considerados em módulo.

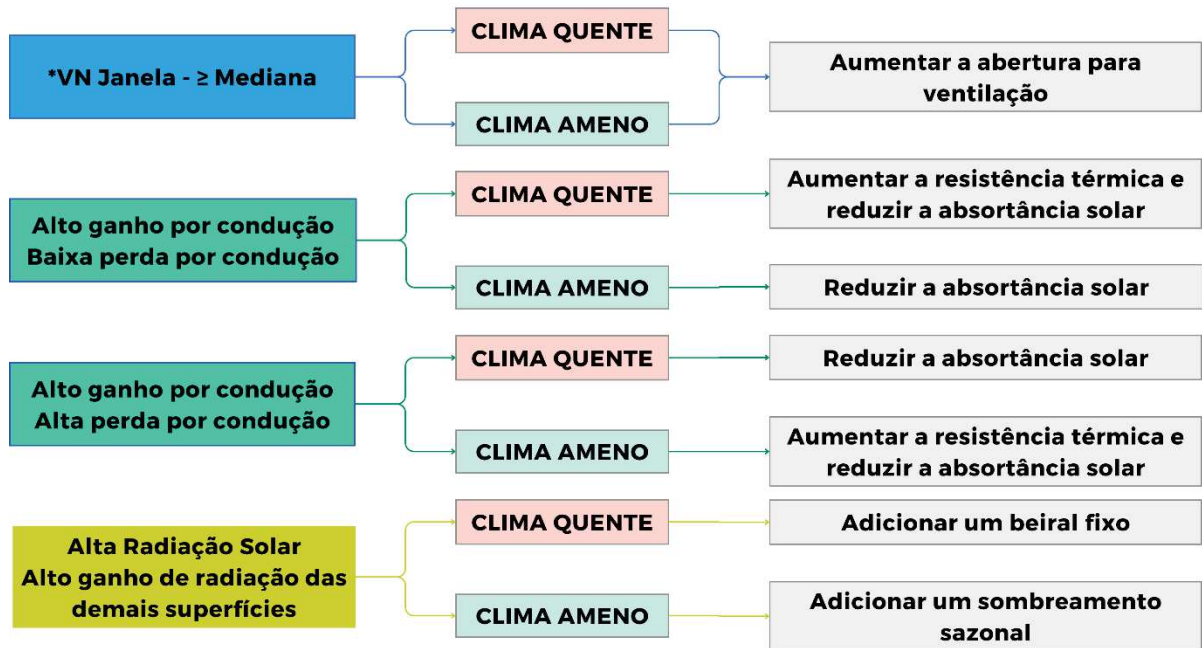
$$HEI_y = \frac{|q_y''|}{\sum |q_{y,transfer}|} \quad (5)$$

4.1.3 Definição de estratégias e aplicação

As estratégias que visam melhorar o desempenho térmico da edificação foram definidas com base nos resultados da mediana dos valores de HEI obtidos no balanço térmico do ar do ambiente e na superfície, para cada ambiente. Valores maiores ou iguais a mediana, foram considerados para a escolha das estratégias.

Para este estudo, as modificações a serem implementadas na edificação estão baseadas na Figura 10. É importante salientar que as estratégias adotadas refletem o clima e os elementos construtivos comumente utilizados nas construções no Brasil. Para outros casos e condições climáticas, outras estratégias podem ser adotadas para melhorar o desempenho térmico da edificação.

Figura 10 – Estratégias definidas.



* "VN Janela -" corresponde ao Heat Exchange Index (HEI) relacionado à perda de calor por ventilação através da abertura das janelas do ambiente

Fonte: Traduzido de Eli, Melo e Lamberts (2024).

4.1.4 A avaliação de desempenho térmico

Para verificar se o caso analisado teve o desempenho térmico aprimorado é necessário aplicar pelo menos um indicador que ateste a sua melhoria. Neste trabalho foram considerados os indicadores de desempenho térmico presentes na ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021b; Krelling *et al.*, 2023): a Temperatura operativa anual máxima ($T_{om\acute{a}x}$) e mínima ($T_{om\acute{m}n}$), o Percentual de Horas ocupadas dentro de uma Faixa de Temperatura operativa (PHFT – no artigo foi chamado de *Thermal Autonomy*) e a Carga Térmica Total de Refrigeração ($CgTR$ – no artigo chamada de *Cooling Load*) e de Aquecimento ($CgTA$ – no artigo chamada de *Heating Load*).

Os indicadores $T_{om\acute{a}x}$ e $T_{om\acute{m}n}$ foram obtidos somente para os casos com comportamento NV, sendo a $T_{om\acute{m}n}$ somente para São Paulo. De acordo com a NBR 15575-1, a faixa de temperatura operativa a ser adotada para a *Thermal Autonomy* (PHFT) inclui uma temperatura limite inferior (T_{inf}) e superior (T_{sup}), variando de acordo com a TBS_m da cidade. Dessa forma, para São Paulo, a T_{inf} foi de 18 °C e a T_{sup} foi 26 °C, já para Belém a T_{sup} adotada foi de 30 °C, sem T_{inf} para esta cidade. Os valores de *Cooling Loads* ($CgTR$) e *Heating Loads* ($CgTA$) são calculados quando a temperatura operativa do ambiente é igual ou acima da T_{sup}

ou é igual abaixo da T_{inf} , respectivamente. Todos os indicadores são calculados somente durante o período de ocupação dos ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios).

4.2 RESULTADOS

Na Figura 11 estão os resultados para o *Heat Exchange Index* (HEI) do balanço térmico anual do ar do ambiente, considerando a sala e o dormitório 1 para São Paulo e Belém. O dormitório 1 e 2 obtiveram resultados similares, portanto, as discussões foram focadas no dormitório 1.

Analisando as trocas de calor para ambas as cidades, Belém e São Paulo, o maior HEI foi a carga térmica para refrigeração nos comportamentos AC e HY, e a perda de calor por ventilação natural pela abertura das janelas (VN Janela -) no comportamento NV. Sobre as superfícies envidraçadas (janelas), é possível notar que o seu impacto é pequeno comparado com as superfícies opacas, próximo a zero em alguns casos. Esse comportamento se dá visto que o material é um vidro simples (incolor 3 mm), e sua contribuição ao balanço térmico no ar é relacionada principalmente ao ganho de radiação solar que entra no ambiente e é absorvida pelas superfícies internas. Entretanto, para confirmar e esclarecer essa relação é importante analisar esses ganhos no balanço térmico na superfície (próxima etapa do *framework*).

O clima quente de Belém resulta em maior ganho de calor vindo da envoltória dos ambientes do que das cargas internas. Na maioria dos casos, as paredes internas são as principais fontes de ganho de calor, seguido do piso, cobertura, e das paredes externas leste e oeste. Entretanto, na sala para o comportamento NV, a troca de ar com os dormitórios, representada por “VN Interna +”, adiciona mais calor ao ar do ambiente que as superfícies da envoltória. Para climas quentes, como Belém, esse ganho de calor significa que a ventilação cruzada remove calor dos dormitórios, reduzindo a sua temperatura interna. Sobre as perdas de calor, a predominância da carga térmica de refrigeração nos comportamentos AC e HY é relacionada à performance da envoltória dos ambientes que dificulta a perda de calor durante o período noturno, período do dia com temperaturas mais baixas.

Figura 11 – Balanço térmico anual do ar do ambiente. AC: Ar-Condicionado; HY: Híbrido; NV: Ventilação Natural.



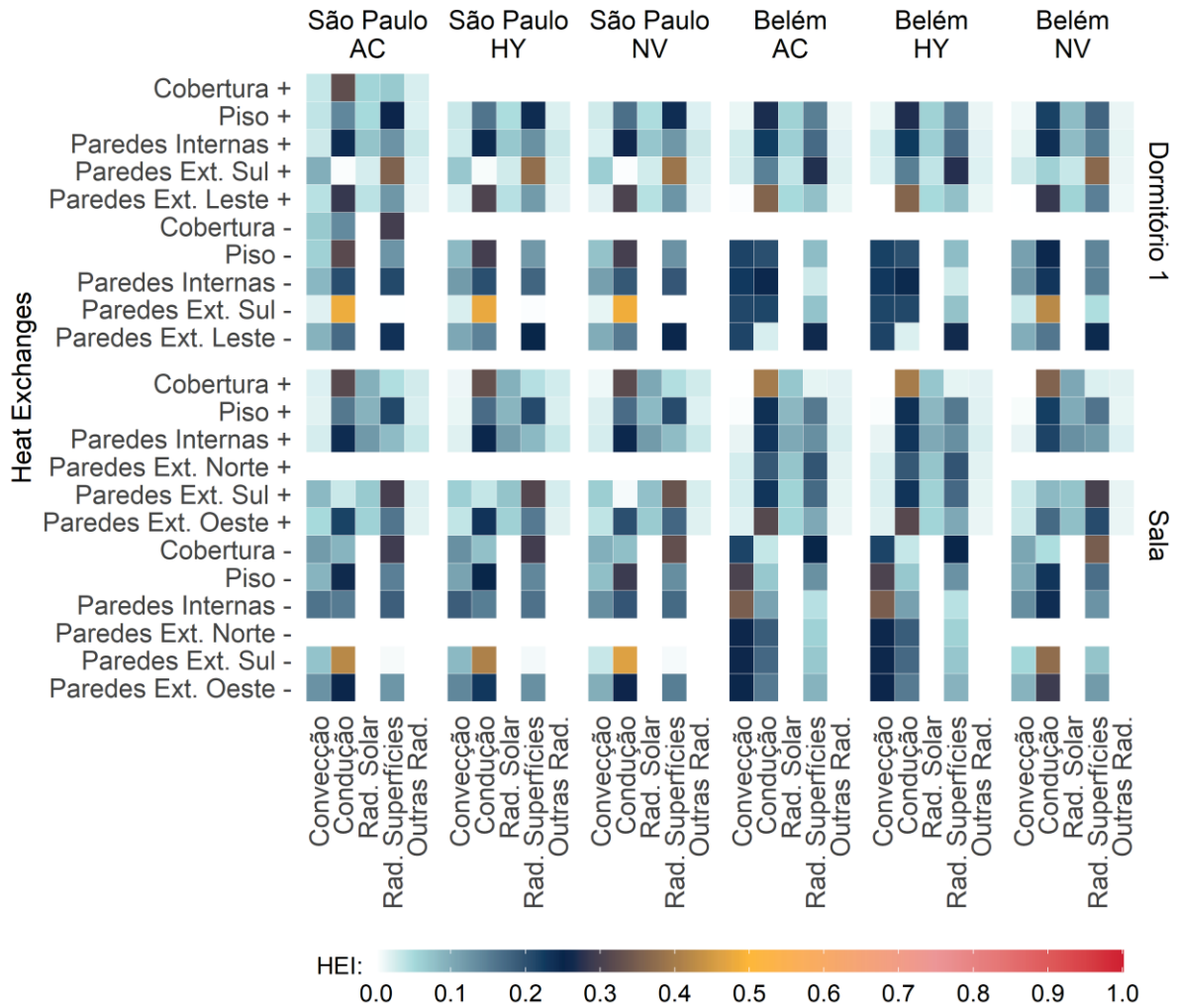
Fonte: Traduzido de Eli, Melo e Lamberts (2024).

Em São Paulo, cidade com clima ameno, o principal ganho de calor foram as cargas internas, seguido das paredes internas, paredes externas leste e oeste e cobertura. Na sala, a cobertura adicionou mais calor ao ar do que as paredes externas, diferentemente dos dormitórios. Quando a sala foi operada com o comportamento NV, a ventilação natural entre os ambientes adicionou mais calor ao ar do que as superfícies da envoltória. Nos dormitórios, houve a necessidade de adicionar carga térmica de aquecimento quando considerados os comportamentos AC e HY. Sobre as perdas, o maior HEI foi a perda por ventilação natural e carga térmica de refrigeração, mas a sequência varia de acordo com o tipo de comportamento e ambiente analisado. A envoltória dos ambientes também perdeu calor, especialmente nos dormitórios. Visto que o clima em São Paulo varia significativamente durante o ano, com períodos com temperaturas externas abaixo de 10 °C e outros acima de 30 °C, para a proposição de estratégias, é importante analisar também o balanço térmico nos períodos quentes e frios.

O resultado para o balanço térmico anual na superfície pode ser visualizado na Figura 12. Neste balanço térmico, valores positivos indicam que o calor foi transferido para a superfície interna e negativo significa que o calor foi removido. Por exemplo, um valor negativo para a convecção indica que o calor foi removido da superfície e adicionado no ar do ambiente, a condução negativa representa o valor transferido da superfície interna do elemento construtivo para o seu interior, e a radiação negativa implica que a superfície interna emitiu radiação. Em alguns casos não há indicação do valor, como por exemplo para a “Cobertura +” somente no caso com o comportamento Ar-Condicionado (AC) em São Paulo há indicação do HEI, nos demais casos não. Isso acontece porque nestes casos o HEI no balanço térmico no ar para a “Cobertura +” ficou abaixo da mediana e as trocas de calor nesta superfície não foi analisada no balanço térmico na superfície.

Os resultados dos comportamentos AC e HY em Belém continuam similares neste balanço térmico, assim como foi no do ar do ambiente. Nesses comportamentos, a principal fonte de ganho de calor nas superfícies internas foi por condução na maioria dos casos, mas para as perdas, a principal foi a convecção. O maior HEI para os ganhos no comportamento NV foram a condução e a radiação de outras superfícies. Para as perdas, os maiores HEI foram o calor transferido por condução para o interior do elemento construtivo e a radiação emitida para outras superfícies. Para São Paulo, as trocas de calor foram similares entre os comportamentos. A parede externa sul perdeu calor por condução, mas para o ganho de calor a principal transferência foi a radiação recebida de outras superfícies. Entretanto, para as demais paredes externas a principal perda de calor foi por condução e o ganho também. Para a cobertura, o maior ganho de calor foi pela condução e a maior perda foi pela radiação emitida para as demais superfícies.

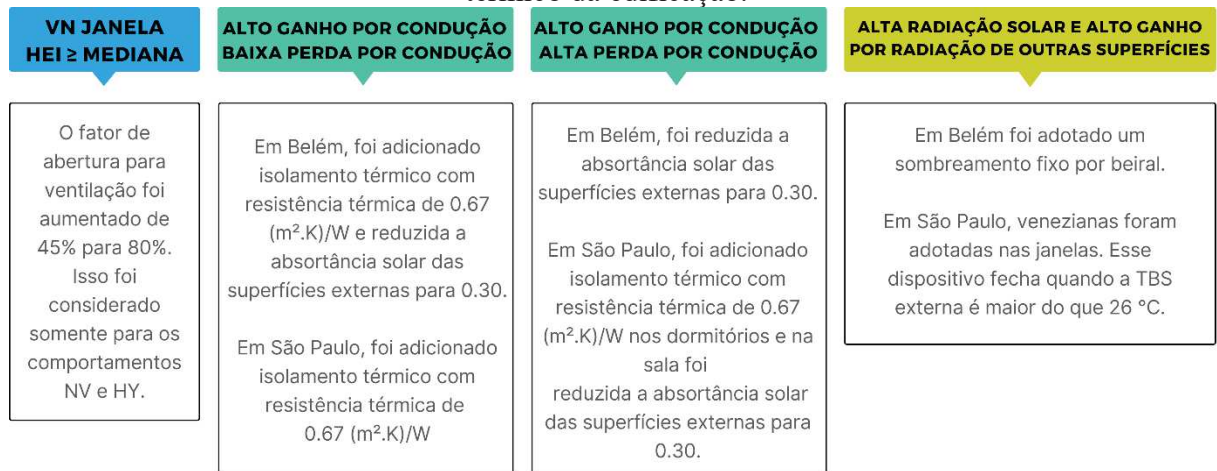
Figura 12 – Balanço térmico anual na superfície.



Fonte: Traduzido de Eli, Melo e Lamberts (2024).

Para a definição das estratégias que melhorem o desempenho térmico da edificação, foram levados em consideração os aspectos sociais e econômicos do caso ilustrativo escolhido para a aplicação do *framework*. Na Figura 13 são expostas as estratégias adotadas em cada caso e cidade, de acordo com os principais ganhos e perdas analisadas no balanço térmico.

Figura 13 – Principais ganhos e perdas e estratégias adotadas para aprimorar o desempenho térmico da edificação.



Fonte: Traduzido de Eli, Melo e Lamberts (2024).

Aplicadas as estratégias, os resultados para os indicadores de desempenho térmico podem ser visualizados na Tabela 4 e Tabela 5, para a sala e dormitório 1 na cidade de Belém, respectivamente e na Tabela 6 e Tabela 7 para a sala e dormitório 1 na cidade de São Paulo, respectivamente. Sobre os comportamentos presentes nas tabelas: NV é o Ventilação Natural, AC é o Ar-Condicionado e HY é o Híbrido. O Δ PHFT corresponde a subtração entre o PHFT do caso base e do caso melhorado.

Tabela 4 – Resultados de desempenho térmico sala em Belém

		Base	Melhorado	Base x Melhorado
NV	Tomax [°C]	38,3	32,5	Reduziu 5,8 °C
	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	2,50	55,00	Δ PHFT de 52,5%
HY	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	1,70	38,70	Δ PHFT de 52,5%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano]	102285,0	43517,9	Reduziu a carga em 57,5%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano,m ²]	4779,7	2033,5	
AC	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	0,5	25,3	Δ PHFT de 24,8%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano]	104518,3	55367,5	Reduziu a carga em 47,0%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano,m ²]	4884,0	2587,3	

Tabela 5 – Resultados de desempenho térmico dormitório 1 em Belém

		Base	Melhorado	Base x Melhorado
NV	Tomax [°C]	34,5	30,7	Reduziu 3,8 °C
	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	30,00	84,50	Δ PHFT de 54,5%
HY	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	11,80	99,70	Δ PHFT de 87,9%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/year]	32587,5	88,6	Reduziu a carga em 99,7%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/year.m ²]	3703,1	10,1	
AC	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	11,8	95,7	Δ PHFT de 83,9%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/year]	32221,3	1356,4	Reduziu a carga em 95,8%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/year.m ²]	3661,5	154,1	

Tabela 6 – Resultados de desempenho térmico sala em São Paulo

		Base	Melhorado	Base x Melhorado
NV	Tomax [°C]	33,5	29,9	Reduziu 3,6 °C
	Tomin [°C]	16,9	17,1	Aumentou 0,2 °C
	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	56,9	80,5	Δ PHFT de 23,6%
HY	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	42,1	66,3	Δ PHFT de 24,2%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano]	27920,3	12303,9	Reduziu a carga em 55,9%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano,m ²]	1304,7	574,9	
	<i>Heating Load</i> [kWh/ano]	89,5	153,4	Aumentou a carga em 41,7%
	<i>Heating Load</i> [kWh/ano,m ²]	4,2	7,2	
AC	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	31,6	54,0	Δ PHFT de 22,4%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano]	31463,8	16624,4	Reduziu a carga em 47,2%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano,m ²]	1470,3	776,8	
	<i>Heating Load</i> [kWh/ano]	84,1	51,5	Reduziu a carga em 38,5%
	<i>Heating Load</i> [kWh/ano,m ²]	3,9	2,4	

Tabela 7 – Resultados de desempenho térmico dormitório 1 em São Paulo

Dormitório 1				
		Base	Melhorado	Base x Melhorado
NV	Tomax [°C]	33,5	29,9	Reduziu 2,2 °C
	Tomin [°C]	16,9	17,1	Aumentou 1,6 °C
	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	56,9	80,5	Δ PHFT de 11,6%
HY	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	42,1	66,3	Δ PHFT de 18,3%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano]	27920,3	12303,9	Reduziu a carga em 45,6%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano,m ²]	1304,7	574,9	
	<i>Heating Load</i> [kWh/ano]	89,5	153,4	Reduziu a carga em 81,0%
	<i>Heating Load</i> [kWh/ano,m ²]	4,2	7,2	
AC	<i>Thermal Autonomy</i> [%]	31,6	54,0	Δ PHFT de 12,7%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano]	31463,8	16624,4	Reduziu a carga em 28,4%
	<i>Cooling Load</i> [kWh/ano,m ²]	1470,3	776,8	
	<i>Heating Load</i> [kWh/ano]	84,1	51,5	Reduziu a carga em 93,6%
	<i>Heating Load</i> [kWh/ano,m ²]	3,9	2,4	

Os resultados mostram que houve melhoria significativa no desempenho térmico de todos os casos, por exemplo, a Tomax reduziu 2,2 °C até 5,8 °C e a Tomin aumentou entre 0,2 °C a 1,6 °C. A *Thermal Autonomy* também aumentou, por exemplo em São Paulo com o comportamento NV a *Thermal Autonomy* da sala aumentou de 56,9% para 80,5%. Em Belém, para o mesmo ambiente e comportamento, a *Thermal Autonomy* aumentou de 2,5% para 55,0% após as modificações na envoltória. Para *Cooling Loads*, houve também melhora significativa entre o caso base e o melhorado, reduzindo a demanda por refrigeração de 45,6% até 99,7%. O único resultado que não demonstrou melhoria foi para a *Heating Loads* na sala em São Paulo, mas comparando com o valor de *Cooling Loads*, é possível determinar que esse resultado não

tem impacto significativo no desempenho do ambiente, visto que representa apenas 1% do valor total da carga térmica total.

4.3 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu um *framework* com o objetivo de auxiliar, de maneira rápida e com baixo custo computacional, na definição de estratégias construtivas que visem aprimorar o desempenho térmico de edificações. Para isso, foi desenvolvido o índice *Heat Exchange Index* (HEI) com base nos resultados de troca de calor observados no balanço térmico no ar e na superfície dos ambientes. O *framework* possui duas fases distintas: a primeira é a simulação única do caso base. A partir dessa simulação é analisado o balanço térmico no ar e, posteriormente, para as superfícies com os maiores valores para o HEI, é analisado o balanço térmico na superfície. A partir da combinação da análise do HEI para o balanço térmico no ar e na superfície dos ambientes, é iniciada a segunda fase que é a de melhoria do caso base. Nesta fase são definidas as estratégias a serem empregadas na simulação, com base no HEI de cada troca de calor e, após a simulação, é realizada a avaliação de desempenho térmico da edificação melhorada, a fim de atestar ou não a efetividade das estratégias utilizadas. Para a demonstração do *framework*, foi utilizada a mesma tipologia residencial empregada no primeiro artigo desta tese.

Como resultados, pode-se atestar que o balanço térmico no ar e na superfície são ferramentas que podem ser empregadas na análise do desempenho térmico de edificações. Entretanto, em casos naturalmente ventilados, é necessário complementar a análise com a avaliação por indicadores de desempenho térmico já consolidados, uma vez que somente as trocas de calor não são capazes de indicar se houve melhoria ou não. As trocas de calor que ocorrem em um ambiente buscam sempre alcançar o equilíbrio térmico entre o ar e as superfícies. No caso de ambientes naturalmente ventilados, esse equilíbrio térmico pode ocorrer a qualquer temperatura, uma vez que não há um sistema mecânico de refrigeração e aquecimento que mantenha a temperatura do ar interno a um determinado valor. Dessa forma, além da definição das estratégias construtivas com base na análise do HEI para cada balanço térmico, é necessário verificar se houve melhoria ou não do desempenho térmico por indicadores.

O caso ilustrativo utilizado para demonstrar a aplicação do método *Heat Exchange Index* (HEI), proposto no artigo 2 desta tese, mostra que com o HEI foi possível verificar os pontos mais suscetíveis aos ganhos e perdas de calor e assim definir estratégias construtivas

para amenizar essas trocas e melhorar o desempenho térmico. Aplicar o método do HEI ao invés de uma análise de sensibilidade, reduziu centenas ou milhares de simulações para uma única. Dentre os resultados obtidos para os indicadores de desempenho térmico, foi possível verificar melhoria nos casos naturalmente ventilados, onde a *Thermal Autonomy* (PHFT) passou de 30,0% para 84,5% considerando o dormitório 1 em Belém. As reduções na carga térmica para refrigeração nos casos híbridos também foram significativas, por exemplo, em São Paulo no dormitório 1 a redução foi de 45,56% e em Belém foi de 99,7%.

Como sugestões de trabalhos futuros, se faz necessária a aplicação a outras tipologias não residenciais, a fim de atestar a efetividade do *framework* proposto para esses casos. Além disso, os resultados obtidos estão condicionados aos climas quente e ameno adotados, sendo importante também expandir a análise para outros climas. Por fim, para a efetiva aplicabilidade do método é necessário o desenvolvimento de uma ferramenta que faça o cálculo do balanço térmico no ar e na superfície, como também a análise do HEI. Dessa forma, em trabalhos futuros, será desenvolvida uma ferramenta que faça a leitura dos resultados da simulação e indique os valores de HEI para cada balanço térmico.

5 CONCLUSÃO

Entender o desempenho térmico das edificações é a base para a definição assertiva das estratégias construtivas que irão auxiliar na manutenção das temperaturas internas em níveis confortáveis e, conseqüentemente, na redução do consumo de sistemas artificiais de climatização. A simulação computacional pode auxiliar na definição das estratégias construtivas a serem empregadas, entretanto, para uma única edificação podem existir diversas alternativas, gerando centenas de casos a serem simulados. Algumas ferramentas podem direcionar o projetista, mas exigem alto custo computacional, pois, podem gerar milhares de simulações, como é o caso dos métodos de otimização e de análise de sensibilidade. Como forma de reduzir o custo computacional, é possível analisar em detalhes as interações térmicas que ocorrem nos ambientes em uma única simulação base e, a partir dessa análise, definir as estratégias que podem ser empregadas para aprimorar o desempenho térmico das edificações, uma vez que essas trocas são as responsáveis pelo aumento ou redução das temperaturas. Na simulação computacional, é possível mensurar as trocas de calor a partir do balanço térmico no ar, baseado na convecção, e do balanço térmico na superfície, baseado na convecção, condução e radiação. A partir dos resultados para o balanço térmico, é possível determinar quais as parcelas responsáveis por ganhar ou perder calor e assim aplicar modificações nesses pontos.

Dessa forma, a partir da análise do balanço térmico no ar e na superfície, este trabalho desenvolveu um método que auxilie na tomada de decisão quanto às estratégias construtivas a serem adotadas, a fim de aprimorar o desempenho térmico das edificações. Para o desenvolvimento do método, este trabalho foi dividido em duas etapas: a primeira etapa foi a análise o balanço térmico no ar a partir da comparação entre simulações de desempenho térmico e a segunda etapa foi a proposta de um *framework*, baseado no balanço térmico no ar e na superfície, para a auxiliar a definição de estratégias construtivas que visem a melhoria no desempenho térmico de edificações. Ambas as etapas tiveram como produto artigos publicados em periódicos internacionais.

Na primeira etapa, a análise principal foi do desempenho térmico de uma residência unifamiliar térrea, variando as características climáticas, comportamentais e construtivas. Com base nos resultados, foi verificada a necessidade de aprofundar no entendimento do balanço térmico como ferramenta de auxílio para análises de desempenho térmico de edificações. No estudo, foi aplicado o balanço térmico no ar dos ambientes que tem como base as trocas de calor convectivas que ocorrem entre o ar e as superfícies, os sistemas instalados, as pessoas, a ventilação natural e o sistema de ar-condicionado. Portanto, foi possível identificar qual a

parcela de calor que cada superfície adicionou ou removeu do ar do ambiente, como também em quais períodos a ventilação natural foi capaz de reduzir a temperatura interna. Entretanto, foram verificadas algumas lacunas na sua aplicação, como por exemplo, no ganho de calor convectivo por uma superfície, não é possível identificar se essa superfície está mais quente que o ar porque absorveu radiação solar que entrou pela janela ou se houve ganho de calor por condução a partir da superfície externa.

A partir das conclusões acerca do balanço térmico obtidas na etapa 1 e como este método pode auxiliar nas análises de desempenho térmico, na etapa 2 deste trabalho foi aprofundada a análise do balanço térmico no ar, que tem como base a convecção, como também explorado o balanço térmico na superfície, baseado na convecção, condução e radiação. Com os dados de balanço térmico, foi desenvolvido um *framework* para auxiliar na definição de estratégias construtivas que visem a melhoria do desempenho térmico de edificações, chamado de método *Heat Exchange Index* (HEI). Este método define, a partir de uma única simulação, quais são as principais trocas de calor que ocorrem no ar e, posteriormente, na superfície. Com base nessas trocas, é possível definir quais os pontos a serem modificados em cada ambiente da edificação, a fim de aprimorar o seu desempenho térmico. Para demonstrar a aplicação do *framework*, foi adotada uma edificação unifamiliar térrea em duas cidades, uma de clima quente e outra ameno, variando também o comportamento dos usuários relacionado à climatização. A partir da simulação do caso base, foi analisado o balanço térmico no ar e calculado o HEI de cada troca de calor. O balanço térmico na superfície foi aplicado nas superfícies com maior valor de HEI no balanço térmico no ar. A partir desses resultados, foram definidas as estratégias a serem aplicadas e avaliado o desempenho térmico do caso aprimorado através dos indicadores de desempenho térmico presentes na NBR 15575-1:2021. Foi possível analisar que em todos os casos, a temperatura operativa anual máxima (Tomáx) reduziu mais do que 2 °C. Por exemplo, em Belém, para a sala, a redução foi de 5,8 °C considerando a residência naturalmente ventilada (NV). Para a *Thermal Autonomy*, que representa o Percentual de Horas Ocupadas dentro de uma Faixa de Temperatura operativa (PHFT), também houve melhoria significativa. Para a sala naturalmente ventilada em Belém, por exemplo, o valor passou de 30,0% para o caso base e chegou em 84,5% para o melhorado, em São Paulo, para este mesmo ambiente e comportamento de usuário o valor da *Thermal Autonomy* foi de 56,9% para o caso base e 80,5% para o caso melhorado. Analisando as cargas térmicas, o *Cooling Load* reduziu entre 47,0% até 99,7%. Esses resultados demonstram que utilizar o *framework* do *Heat Exchange Index* nas análises de desempenho térmico pode auxiliar na definição das estratégias a serem empregadas, a fim de melhorar o desempenho térmico das edificações.

Entretanto, é importante mencionar que novos estudos devem ser conduzidos considerando outras tipologias de edificações e outros climas, a fim de atestar a aplicabilidade do método aos mais variados casos. Além disso, para facilitar a aplicação do método proposto neste trabalho, devem ser desenvolvidas ferramentas que executem o cálculo do *Heat Exchange Index* a partir dos resultados obtidos na simulação computacional.

5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTUROS

Os resultados e conclusões obtidos neste trabalho estão limitados à tipologia residencial adotada, aos comportamentos de usuário, como também aos climas estudados, quente e ameno. Dessa forma, as estratégias definidas neste trabalho, com o objetivo de melhorar o desempenho térmico, estão condicionadas à tipologia, às variações comportamentais e climáticas adotadas. Para outros casos podem existir outras melhorias que não foram abordadas. Dessa forma, como sugestão para trabalhos futuros está a aplicação do *framework* proposto neste trabalho em outras tipologias, desde residenciais (multifamiliar) a não residenciais, além de analisar outros climas, como por exemplo climas frios e climas futuros. Outra sugestão é incluir outros tipos de padrão de usuários, como por exemplo, a ocupação durante todo o dia.

Outra limitação é referente ao programa utilizado e a sua versão. Os dados de saída obtidos para o balanço térmico no ar e na superfície estão condicionados à simulação computacional da edificação no programa *EnergyPlus* nas versões 9.0 e 22.2 (EnergyPlus, 2024). Para outros programas ou versões, podem existir divergências nos resultados obtidos, sendo necessário adaptar o *framework* para essas situações. A obtenção dos dados de balanço térmico no ar e na superfície em outros programa ou versões do *EnergyPlus* é uma sugestão de trabalho futuro.

Por fim, para facilitar a aplicabilidade do *framework* proposto no artigo 2 desta tese, sugere-se o desenvolvimento de uma ferramenta que faça os cálculos do *Heat Exchange Index* (HEI) a partir dos resultados obtidos na simulação. Atualmente essa ferramenta está em desenvolvimento pela autora, com participação do programador Zac Milioli, e mais detalhes podem ser obtidos no Apêndice A deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT TR 15575-1-1:2021 Errata 1:2021 - Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1-1: Base-padrão de arquivos climáticos para a avaliação do desempenho térmico por meio do procedimento de simulação computacional**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2021a.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho. Parte 1 Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, Brasil, 2021b.

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Standard 55-2017 -- Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI/ASHRAE Approved)**. [S. l.: s. n.], 2017.

BALLARINI, Ilaria *et al.* A Methodology to Investigate the Deviations between Simple and Detailed Dynamic Methods for the Building Energy Performance Assessment. **Energies**, 2020, Vol. 13, Page 6217, [s. l.], v. 13, n. 23, p. 6217, 2020.

BALLARINI, Ilaria; CORRADO, Vincenzo. Analysis of the building energy balance to investigate the effect of thermal insulation in summer conditions. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 52, p. 168–180, 2012.

BALVEDI, Bruna Faitão; GHISI, Enedir; LAMBERTS, Roberto. A review of occupant behaviour in residential buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 174, p. 495–505, 2018.

BORONG, Lin *et al.* Study on the thermal performance of the Chinese traditional vernacular dwellings in Summer. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 73–79, 2004.

BOZONNET, E.; DOYA, M.; ALLARD, F. Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 43, n. 11, p. 3006–3012, 2011.

BRAGER, Gail S.; DE DEAR, Richard J. Thermal adaptation in the built environment: A literature review. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 83–96, 1998.

CÂNDIDO, C. *et al.* Towards a Brazilian standard for naturally ventilated buildings: Guidelines for thermal and air movement acceptability. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 39, n. 2, p. 145–153, 2011.

CHEN, Xi; YANG, Hongxing. Sensitivity analysis and optimization of a typical passively designed residential building with hybrid ventilation in hot and humid climates. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 142, p. 1781–1786, 2017.

CHEN, Xi; YANG, Hongxing; SUN, Ke. Developing a meta-model for sensitivity analyses and prediction of building performance for passively designed high-rise residential buildings. **Applied Energy**, [s. l.], v. 194, p. 422–439, 2017.

CHEN, Xi; YANG, Hongxing; ZHANG, Weilong. Simulation-based approach to optimize passively designed buildings: A case study on a typical architectural form in hot and humid climates. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 82, p. 1712–1725, 2018.

COSTA-CARRAPIÇO, Inês; RASLAN, Rokia; GONZÁLEZ, Javier Neila. A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 210, p. 109690, 2020.

CRAN. **R: The R Project for Statistical Computing**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 20 jul. 2021.

CRAWLEY, Dru; LAWRIE, Linda. **Repository of free climate data for building performance simulation: Brazil, Region 3 - South America**. [S. l.], 2024. Disponível em: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html. Acesso em: 27 jun. 2024.

DABAIEH, Marwa *et al.* Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 89, p. 142–152, 2015.

DE LUCA, Giovanna *et al.* Accuracy of Simplified Modelling Assumptions on External and Internal Driving Forces in the Building Energy Performance Simulation. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 20, p. 6841, 2021.

DE VECCHI, Renata *et al.* ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: The Brazilian case. **Architectural Science Review**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 93–101, 2015.

DOS SANTOS DOLCE UZUM, M.; SOARES GONÇALVES, J.C. The thermal performance of compact housing in tall buildings: an analytical examination for the retrofit of façades in the densified city centre of São Paulo. **Architectural Science Review**, [s. l.], v. 64, n. 1–2, p. 56–71, 2021.

ELI, Letícia Gabriela *et al.* Análise da eficiência energética da envoltória de edificações residenciais conforme instrução normativa do inmetro (INI-R). *In:* , 2021a, Palmas, TO. **XVI ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**. Palmas, TO: [s. n.], 2021. p. 1213–1222.

ELI, Letícia Gabriela. **O Impacto do Padrão de Uso no Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares no Brasil**. 2020. 98 f. - Univesidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2020.

ELI, Letícia Gabriela *et al.* Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 244, 2021b.

ELI, Letícia Gabriela; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. How to improve the thermal performance of buildings with one simulation run? The heat exchange index applied to hot climates. **Building and Environment**, [s. l.], v. 258, n. January, p. 111606, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111606>.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 26 jun. 2024.

ENERGYPLUS. **Engineering Reference - EnergyPlus Version 22.2.0 Documentation**. [S. l.: s. n.], 2022a. Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.2.0/EngineeringReference.pdf. Acesso em: 11 jan. 2023.

ENERGYPLUS. **Input Output Reference - EnergyPlus Version 22.2.0 Documentation**. [S. l.: s. n.], 2022b. Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.2.0/InputOutputReference.pdf. Acesso em: 11 jan. 2023.

EPB CENTER. **Report on Case Study to EN 16798-7 Natural Ventilation**. [S. l.: s. n.], 2021.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Energia 2029 - Demanda de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, Brasil: [s. n.], 2019.

EVINS, Ralph. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 22, p. 230–245, 2013.

FELMER, Gabriel; YANNAS, Simos. Designing naturally-conditioned dwellings for warm and cold-temperate regions of Chile. **Architectural Science Review**, [s. l.], 2020.

FOSAS, Daniel *et al.* Mitigation versus adaptation: Does insulating dwellings increase overheating risk?. **Building and Environment**, [s. l.], v. 143, p. 740–759, 2018.

GAETANI, Isabella; HOES, Pieter Jan; HENSEN, Jan L.M. Estimating the influence of occupant behavior on building heating and cooling energy in one simulation run. **Applied Energy**, [s. l.], v. 223, p. 159–171, 2018. Disponível em: Acesso em: 17 abr. 2023.

GASSAR, Abdo Abdullah Ahmed *et al.* Performance Optimization Studies on Heating, Cooling and Lighting Energy Systems of Buildings during the Design Stage: A Review. **Sustainability** **2021**, Vol. **13**, Page **9815**, [s. l.], v. 13, n. 17, p. 9815, 2021.

GHOREISHI, Amir. The Effects of Exterior Thermal Mass (eTM) on Energy Consumption in Residential Buildings. **The Academic Research Community Publication**, [s. l.], p. 14–26, 2019.

HENSEN, Jan L.M.; LAMBERTS, Roberto. **Building Performance Simulation for design and operation**. Seconded. [S. l.]: Routledge, 2019a.

HENSEN, Jan L.M.; LAMBERTS, Roberto. **Building Performance Simulation for design and operation**. Seconded. [S. l.]: Routledge, 2019b.

HONG, Tianzhen *et al.* Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture. **Building and Environment**, [s. l.], v. 114, p. 518–530, 2017.

HONG, Tianzhen; LANGEVIN, Jared; SUN, Kaiyu. Building simulation: Ten challenges. **Building Simulation**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 871–898, 2018.

HOPFE, Christina J.; HENSEN, Jan L.M. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 43, n. 10, p. 2798–2805, 2011.

IEA-EBC, International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities Program. **EBC Annex 80: Resilient Cooling**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://annex80.iea-ebc.org/>. Acesso em: 24 jun. 2024.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 52016-1:2017 - Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Part 1: Calculation procedures**. [S. l.: s. n.], 2017.

KRELLING, A.F. *et al.* A thermal performance standard for residential buildings in warm climates: Lessons learned in Brazil. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 281, p. 112770, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778822009410>.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações; ELI, Leticia Gabriela. **ECV4202 – Análise Térmica de Edificações**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/ensino/pos-graduacao/ecv4202>. Acesso em: 20 dez. 2021.

LIDDAMENT, Martin W. **Air Infiltration Calculation Techiques - An Applications Guide**. Bracknell, UK: [s. n.], 1986.

LUO, Xuan; HONG, Tianzhen; TANG, Yu Hang. Modeling Thermal Interactions between Buildings in an Urban Context. **Energies** **2020**, Vol. **13**, Page **2382**, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 2382, 2020.

MACHAIRAS, Vasileios; TSANGRASSOULIS, Aris; AXARLI, Kleo. Algorithms for optimization of building design: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 31, p. 101–112, 2014.

MANTESI, Eirini *et al.* Empirical and computational evidence for thermal mass assessment: The example of insulating concrete formwork. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 188–189, p. 314–332, 2019.

MARSHALL, Erica *et al.* Combining energy efficiency measure approaches and occupancy patterns in building modelling in the UK residential context. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 111, p. 98–108, 2016.

MELO, Ana Paula *et al.* IS THERMAL INSULATION ALWAYS BENEFICIAL IN HOT CLIMATE?. *In:* , 2015, Hyderabad, India. **Building Simulation Conference**. Hyderabad, India: [s. n.], 2015. p. 1353–1360.

MICROSOFT. **Visual Studio Code - Code Editing. Redefined.** [S. l.], 2024. Disponível em: <https://code.visualstudio.com/>. Acesso em: 25 jun. 2024.

MIRRAHIMI, Seyedehzahra *et al.* The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 53, p. 1508–1519, 2016.

O'BRIEN, William *et al.* An international review of occupant-related aspects of building energy codes and standards. **Building and Environment**, [s. l.], v. 179, n. 106906, p. 1–18, 2020.

PACHECO, Miguel; LAMBERTS, Roberto. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy buildings in brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**, [s. l.], v. 63, p. 716–725, 2013.

PÉREZ-ANDREU, V. *et al.* Experimental data and simulations of performance and thermal comfort in a typical mediterranean house. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 11, 2021.

PISELLO, Anna Laura; GORETTI, Michele; COTANA, Franco. A method for assessing buildings' energy efficiency by dynamic simulation and experimental activity. **Applied Energy**, [s. l.], v. 97, p. 419–429, 2012.

PROCEL. **Pesquisas de Posse e Hábitos de Consumo de Energia (PPHs).** [S. l.], 2019. Disponível em: <http://www.procel.gov.br/main.asp?View=%7B4A5E324F-A3B0-482A-B1CD-F75A2A150480%7D>. Acesso em: 1 nov. 2019.

PYTHON. **Welcome to Python.org.** [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 25 jun. 2024.

RAKSHAN, Kambiz; FRIESS, Wilhelm A. Effectiveness and viability of residential building energy retrofits in Dubai. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 13, n. November 2016, p. 116–126, 2017.

RAMOS, Greici *et al.* Adaptive behaviour and air conditioning use in Brazilian residential buildings. **Building Research & Information**, [s. l.], p. 1–16, 2020a.

RAMOS, Greici *et al.* **Dataset for occupants' adaptive behavior and air conditioning use in Brazilian residential buildings**. [S. l.]: Mendeley, 2020b.

RODRIGUES, A. Moret *et al.* Impact of Natural Ventilation on the Thermal and Energy Performance of Buildings in a Mediterranean Climate. **Buildings 2019, Vol. 9, Page 123**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 123, 2019.

RODRIGUES, Lucelia *et al.* Quantifying airtightness in Brazilian residential buildings with focus on its contribution to thermal comfort. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 49, n. 6, p. 639–660, 2020.

RSTUDIO. **RStudio | Open source & professional software for data science teams - RStudio**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.rstudio.com/>. Acesso em: 20 jul. 2021.

SAKIYAMA, N.R.M. *et al.* Perspectives of naturally ventilated buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 130, n. March, p. 109933, 2020.

SCHÜNEMANN, Christoph; SCHIELA, David; ORTLEPP, Regine. How window ventilation behaviour affects the heat resilience in multi-residential buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 202, p. 107987, 2021.

SORGATO, Marcio José. **A Influência do Comportamento do Usuário no Desempenho Térmico e Energético de Edificações Residenciais**. 2015. 260 f. - Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2015.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 133, p. 1–13, 2016.

SPITLER, Jeffrey D. Thermal load and energy performance prediction. *In*: HENSEN, Jan L.M.; LAMBERTS, Roberto. (org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Second edied. New York: Routledge, 2019. p. 13–75.

SU, Bin; AYNSLEY, Richard. A case study of roof thermal performance in naturally ventilated houses in hot-humid climates under summer conditions. **Architectural Science Review**, [s. l.], v. 49, n. 4, p. 399–407, 2006.

TRIANA, Maria Andrea; LAMBERTS, Roberto; SASSI, Paola. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, [s. l.], v. 87, n. December 2014, p. 524–541, 2015.

TRIANA, Maria Andrea; LAMBERTS, Roberto; SASSI, Paola. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 158, p. 1379–1392, 2018.

TUBELO, Renata *et al.* Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil's moderate climates zones. **Building and Environment**, [s. l.], v. 133, n. January, p. 213–227, 2018.

USTAOGLU, Abid; KURTOGLU, Kubra; YARAS, Ali. A comparative study of thermal and fuel performance of an energy-efficient building in different climate regions of Turkey. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 59, p. 102163, 2020. Disponível em: Acesso em: 29 nov. 2023.

VÁZQUEZ-TORRES, C.E.; GÓMEZ-AMADOR, A. Impact of indoor air volume on thermal performance in social housing with mixed mode ventilation in three different climates. **Energy and Built Environment**, [s. l.], 2021.

VETTORAZZI, E. *et al.* Optimization of the passive house concept for residential buildings in the South-Brazilian region. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 240, 2021.

WONG, N. H.; LI, S. A study of the effectiveness of passive climate control in naturally ventilated residential buildings in Singapore. **Building and Environment**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 1395–1405, 2007.

YILDIZ, Yusuf; ARSAN, Zeynep Durmuş. Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates. **Energy**, [s. l.], v. 36, n. 7, p. 4287–4296, 2011.

YOON, Nari *et al.* Dynamic metrics of natural ventilation cooling effectiveness for interactive modeling. **Building and Environment**, [s. l.], v. 180, p. 1–15, 2020.

ZAMBRANO, Juan Mahecha *et al.* Advancing and demonstrating the Impact Indices method to screen the sensitivity of building energy use to occupant behaviour. **Building Simulation**, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 1257–1272, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s12273-023-1004-6>.

ZHANG, Chen *et al.* Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 251, p. 111312, 2021.

APÊNDICE A – THERMAL BALANCE CALCULATOR

Este apêndice traz algumas capturas de tela referentes à ferramenta *Thermal Balance Calculator*, desenvolvida a partir do método do *Heat Exchange Index* (HEI) desenvolvido no artigo 2 desta tese. A calculadora encontra-se em fase de desenvolvimento, testes e ajustes internos, e no futuro será disponibilizada no repositório do LabEEE/UFSC no GitHub (<https://github.com/labeee>).

Para o desenvolvimento da calculadora foi utilizada programação em *Python*, sendo todos os códigos elaborados pelo programador Zac Milioli, bolsista de iniciação científica do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LabEEE/UFSC).

Para a utilização da ferramenta, o usuário deve simular a sua edificação no programa *EnergyPlus* e solicitar os dados de saída referentes ao balanço térmico no ar e na superfície em um arquivo .csv, além do arquivo .sql com as informações do modelo. As informações sobre as versões compatíveis do *EnergyPlus*, dados de saída a serem solicitados e limitações da ferramenta serão apresentadas em uma documentação complementar. Estão sendo desenvolvidas duas versões da ferramenta, uma em *desktop* e outra *web*.

A.1 VERSÃO DESKTOP

Nesta versão, o usuário deverá baixar o programa Python na versão 3.12 ou superior (Python, 2024) e executar o código diretamente no terminal do seu computador ou via interface, como por exemplo a do *Visual Studio Code* (Microsoft, 2024). Além disso, o usuário deverá baixar do repositório do LabEEE todo o conteúdo do programa *Thermal Balance Calculator*. Ao executar o código, aparecerá a tela presente na Figura 14. Nela há a possibilidade de escolher entre o balanço térmico no ar (*convection*) ou o balanço térmico na superfície (*surface*). Além disso, é possível definir quais ambientes se deseja analisar (Figura 15) e escolher se a análise será anual, mensal ou diária (Figura 16). Para a diária, as trocas de calor e o *Heat Exchange Index* (HEI) são calculadas considerando quatro diferentes dias: os dias com a maior e menor temperatura externa, e com a menor e maior amplitude térmica para a temperatura externa.

Os dados de saída da simulação, nos formatos .csv e .sql, deverão ser incluídos nas pastas *input* do programa e a ferramenta dará como resultados, na pasta *output*, uma planilha .csv com todas as trocas de calor e o HEI, além de gráficos em formato similar aos desenvolvidos no artigo 2 desta tese.

Figura 14 – Calculadora *desktop*: Tela inicial da ferramenta.

```

THERMAL BALANCE CALCULATOR
-----
Zones: All
Dataframe type: annual
What would you like to do?

[1] Generate dataframes for surface
[2] Generate dataframes for convection

[3] Change zones
[4] Change dataframe type
[5] Customize screen separators

[ENTER] End software
-----
...

```

Fonte: Os autores.

Figura 15 – Calculadora *desktop*: Escolha de quais ambientes serão analisados.

```

-----
Current zones: All
Choose and option:

[1] Add items to zones list
[2] Reset zones list to all zones

[ENTER] Exit
-----
...

```

Fonte: Os autores.

Figura 16 – Calculadora *desktop*: Escolha de qual o período que será analisado.

```

-----
Choose your desired type of calculation
Selected: annual

[1] annual
[2] monthly
[3] daily

[ENTER] Exit
-----
...

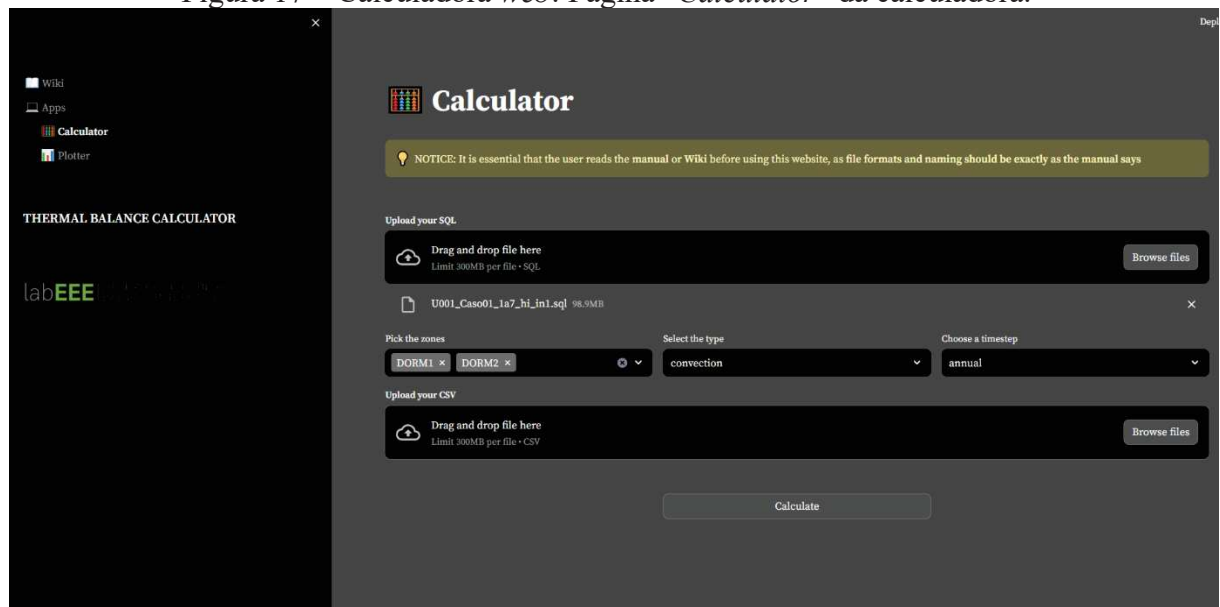
```

Fonte: Os autores.

A.2 VERSÃO WEB

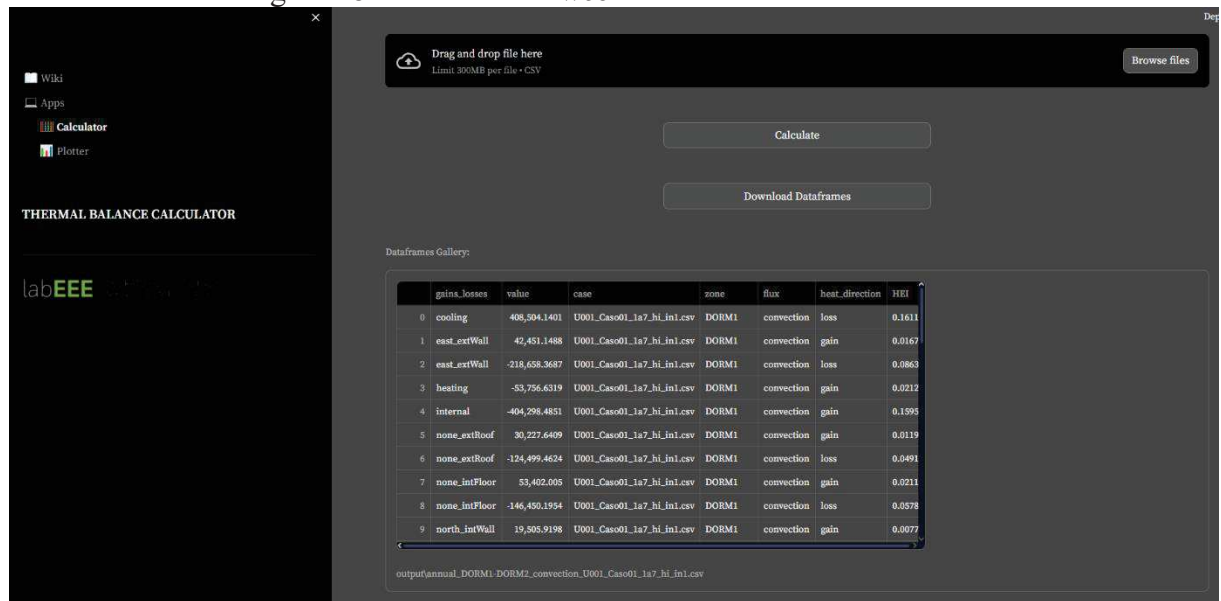
Além da versão *desktop*, está sendo desenvolvida também uma versão *web* da calculadora. Nesta versão, basta que o usuário acesse um endereço *web* que a calculadora estará pronta para ser executada. Inicialmente o usuário deverá inserir o arquivo *.sql* com as informações do modelo. Após a leitura deste arquivo, será aberta a opção de escolha de quais ambientes serão analisados, qual o tipo de balanço térmico e período, além do campo para inserção do arquivo *.csv* com os dados de saída da simulação. Na Figura 17 está a captura de tela da página “*Calculator*” da calculadora já com o arquivo *.sql* inserido e abertas as opções de escolha.

Figura 17 – Calculadora *web*: Página “*Calculator*” da calculadora.



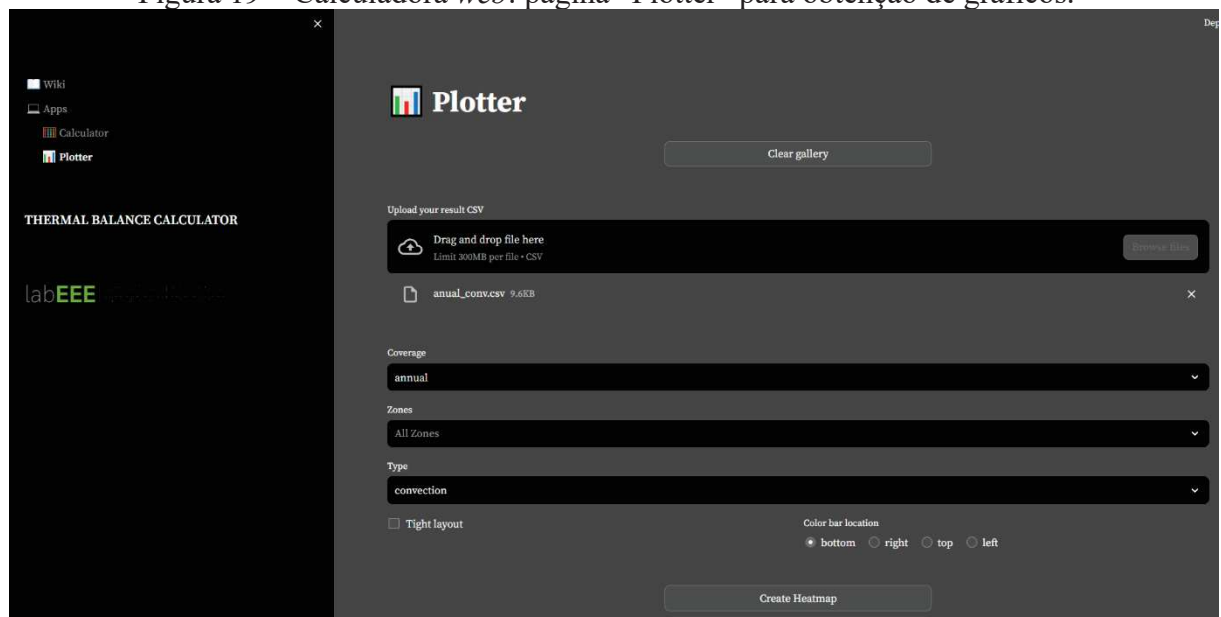
Fonte: Os autores.

Após a inserção do arquivo *.csv* com os resultados da simulação, a ferramenta calcula as trocas de calor dos ambientes, balanço térmico e período escolhidos, além do valor do *Heat Exchange Index* (HEI) de cada troca. Terminado o processamento, é possível visualizar a planilha *.csv* com os resultados e baixá-la, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Calculadora *web*: resultado em formato *.csv*.

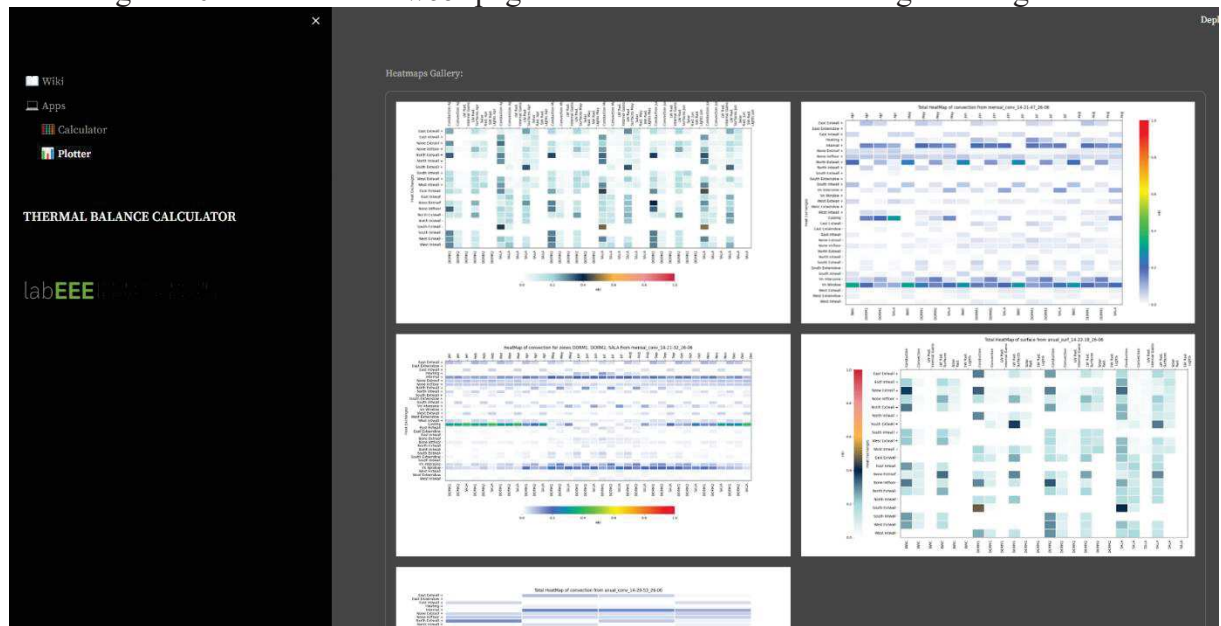
Fonte: Os autores.

Caso o usuário queira obter gráficos com os resultados do HEI, na página “*Plotter*” é possível inserir o arquivo *.csv* resultante da página “*Calculator*” e escolher qual o tipo de gráfico se deseja, conforme Figura 19. Para resultados mensais de balanço térmico, é possível escolher quais meses devem ser incluídos no gráfico. Além disso, é possível unir em uma mesma página diferentes tipos de balanço e períodos, como mostra a Figura 20, desde que seja sempre feito upload de novos arquivos e gerados novos gráficos. Todos os gráficos podem ser baixados da página em formato *.png*.

Figura 19 – Calculadora *web*: página “*Plotter*” para obtenção de gráficos.

Fonte: Os autores.

Figura 20 – Calculadora web: página “Plotter” mostrando uma grade de gráficos.



Fonte: Os autores.

APÊNDICE B – ARTIGO 1

Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: the Brazilian context

[1] L.G. Eli^{a*}, A.F. Krelling^a, M.S. Olinger^a, A.P. Melo^a, R. Lamberts^a

^a *Laboratory for Energy Efficiency in Buildings, Federal University of Santa Catarina*

Abstract

The definition of user behavior in computer simulations for building thermal performance analysis is a challenging and complex task. People behave differently depending on their routine and culture, among many other factors. Thus, in this study, mixed-mode climatization for cooling and heating (air conditioning and natural ventilation) was analyzed considering different thermal performance indicators, construction systems and climates in Brazil. The typology analyzed was a single-family dwelling. The results showed not only how different cooling strategies can change the dwelling thermal performance, but also how this performance may be perceived differently based on the indicator. Depending on the indicator, distinct envelopes would be recommended. Also, the study demonstrated that for public policies, the stakeholders need to understand the behavior and occupancy patterns of residents who are representative of a country in order to identify, with more accuracy, the most appropriate envelope for each case. In the case of the indicators, metrics that are most easily adapted to considerer resilient according to climate changing are recommended for inclusion in standards and regulations.

Keywords: Thermal performance indicators; User behavior; Mixed-mode cooling; Passive cooling.

1 Introduction

Global energy use has been rising considerably in recent years. In 2018, the total electricity use worldwide was 23,031 TWh, which is 57% more than the value for the year 2000 ((IEA), 2018). In this context, residential buildings are of great importance given the increase in energy demand in the sector. In Brazil, the Energy Research Office (EPE) (EPE, 2019a) estimates that in the year 2018, 25.4% of the total electricity demand nationwide came from residential buildings. Moreover, the amount required of energy by this sector is expected to increase by approximately 3.9% by 2029 (EPE, 2019b). Due to factors such as climate change and the increased purchasing power of populations in developing countries (IEA, 2018), there is a greater demand for air conditioning in residential buildings. According to the EPE Decennial Energy Expansion Plan prediction (EPE, 2019b), by the year 2029, the type of electrical equipment consuming most energy will be the air conditioning system, which currently occupies fourth position, behind the refrigerator, television and electric shower.

Research on building thermal performance is important to tackle the increasing use of electricity. Furthermore, public policies aimed at improving the thermal and energy performance of buildings can be helpful in reducing energy demand on a national scale (IEA, 2018). Technical standards and regulations are examples of public policies aimed at measuring the thermal and energy performance of buildings. The first norms to address the thermal and energy performance of buildings appeared in 1970, in developed countries (Liu; Meyer; Hogan, 2010). In developing countries, they appeared only around the 1990s (Fossati *et al.*, 2016). For residential buildings in Brazil, there is the labelling program of energy efficiency in buildings, where the energy efficiency of a building is evaluated and allocated a class from A to E, with A being the most efficient (INMETRO, 2010). In addition, regulations have been published by the Brazilian Association of Technical Norms (ABNT), notably NBR 15220 (ABNT, 2005a) and NBR 15575 (ABNT, 2013a). NBR 15220 provides construction guidelines with a focus on

the thermal performance of buildings (ABNT, 2005a). This standard is divided into five parts and describes concepts related to thermal performance, the calculation and measurement of thermal properties of materials, and the division of the Brazilian territory into eight bioclimatic zones. The division of the country into bioclimatic zones groups cities with similar climatic characteristics. Based on these characteristics, bioclimatic strategies for natural ventilation, solar shading, and the thermal properties of materials used to form the envelope are defined for residential buildings located in each of these zones. In 2008, ABNT released NBR 15575, a norm that covers various aspects of the performance of residential buildings, including thermal performance (ABNT, 2013a). NBR 15575 is divided into six parts and thermal performance is addressed in parts one, four and five. In these parts, the norm establishes the minimum thermal performance standards to be met according to the bioclimatic zone in which the building is located. Adherence to NBR 15575 became mandatory in the year 2013, and this norm is currently undergoing a review process (CBIC, 2020). Public policies have helped to improve the thermal performance of buildings on a national scale. However, assessment procedures must be based on robust methods that consider the construction characteristics and population of the places where they will be implemented, so as not to compromise their effectiveness (Hu *et al.*, 2020) .

Yao (Yao, 2018) compared the user profile of a real residential building located in China with the Chinese normative standard that is mandatory in the country. The results show a reduction of around 85% in the energy consumption for cooling when the simulation considers the real user profile instead of the normative profile. Felmer and Yannas (Felmer; Yannas, 2020) analyzed the possibility of improving the thermal performance of residential buildings in Chile, according to Chilean regulations. However, the authors found that the regulation is based on criteria that differ from those used in daily life, compromising the results.

Modeling the interaction between occupants and buildings is one of the 10 challenges in the computer simulation of buildings presented by Hong, Langevin and Sun (Hong; Langevin; Sun, 2018), as this is one of the most influential parameters regarding the gap between simulations and measurements. Studies conducted for Annex 79 of the International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities Program (IEA EBC) (O'Brien *et al.*, 2020b) demonstrate the need for a correct definition of user behavior in the energy and thermal analysis of buildings. In the modeling of occupant behavior several variables need to be considered in the simulations, (Hong; Yan, 2018) since patterns of occupancy and behavior are dependent on factors that involve random, diverse and complex aspects, as users who reside in the same place may have different habits, perceptions and routines (Fabi *et al.*, 2012; Yan *et al.*, 2017). Due to this high complexity, the behavior of occupants is often simplified in simulations, resulting in significant divergences between simulated thermal performance and that obtained in the post-occupation phase (Hong *et al.*, 2015). To assist the representation of users in computer simulation programs, researchers have sought to develop strategies for modelling occupant behavior, aimed at finding alternatives that indicate the level of complexity for the required user profile based on the aim of the study (Hong *et al.*, 2015; Markovic *et al.*, 2018). Annex 80 (Resilient Cooling for Residential and Small Non-Residential Buildings) has among its objectives the study of strategies that can be applied in buildings in order to reduce the demand for the cooling of environments, that is, to identify efficient and resilient strategies for cooling, with low or zero cost, to later serve as the basis for public policies.

In the literature, many approaches to analyzing the thermal performance of residential buildings involve the use of energy consumption for cooling and/or heating as an indicator (Ghoreishi, 2019; Marshall *et al.*, 2016; Triana; Lamberts; Sassi, 2018a). Furthermore, some authors use indicators related to the internal temperature of the environments, such as air temperature and degree-hours of discomfort (Felmer; Yannas, 2020; Fosas *et al.*, 2018; Mantesi

et al., 2019; Peacock; Jenkins; Kane, 2010; Triana; Lamberts; Sassi, 2018a). In some cases, more than one indicator is considered, as in the study by Triana, Lamberts and Sassi (Triana; Lamberts; Sassi, 2018a). However, assuming that the thermal performance index obtained from an indicator is consistent with any type of dwelling may not be ideal. Thus, the use of only one thermal performance indicator based on HVAC systems may not be appropriate for certain building envelopes. Kordjamshidi *et al.* (Kordjamshidi *et al.*, 2007) have simulated various types of residential buildings with free-running mode (naturally ventilated) and with the Australian standard climatization criteria – air-conditioned mode. They investigated the correlation between degree discomfort hours and energy, both indicators of thermal performance of buildings. They found that the correlation between the indicators is not strong for all cases because the thermal performance of buildings operated in free-running (naturally ventilated) mode differ from those with conditioned mode. Thus, evaluating free-running buildings only by energy ratings might not be appropriated.

In Brazil, homes are still predominantly passively cooled through the use of natural ventilation. This is related to the habit of opening the windows of the dwelling during the day, regardless of the outside temperature, for instance, to avoid mold or to reduce the feeling of claustrophobia (Pacheco; Lamberts, 2013; PROCEL, 2019; Ramos *et al.*, 2020a; Sorgato, M. J.; Melo; Lamberts, 2016). In addition, Brazilian residential buildings are built predominantly with materials such as masonry and concrete (PROCEL, 2019; Triana; Lamberts; Sassi, 2015a), without thermal insulation in the envelope, often favoring habits related to natural ventilation. Considering these behavioral aspects, along with the fact that air conditioning systems are increasingly present in Brazilian homes (PROCEL, 2019; Ramos *et al.*, 2020a), it is important to define thermal performance indicators that consider both types of operation in residential buildings. Thus, in this context, the aim of this study was to analyze the impact of the definition of thermal performance indicators for residential buildings, considering the variability in

patterns of occupation and use of homes, as well as the diverse construction systems considered and the climates to which they will be exposed.

2 Method

Considering each indicator individually can lead to conclusions that are not representative of the reality of the building, this being dependent on the climatic and social context in which it is built. A combined analysis, on the other hand, should also be considered with caution, taking into account the interrelations between the indicators. In order to investigate these interrelations, computer simulation models of a single-family dwelling were conducted, with the variation of three types of parameters:

1. Constructive: related to the construction systems and materials used in the building;
2. Behavioral: associated with the way in which residents use the dwelling. This parameter is divided into occupation patterns and room cooling and heating strategies; and
3. Climatic: depending on the location of the building.

Two main indicators of thermal performance were analyzed in this study: percentage of occupied hours within the operative temperature range (PHFT); and annual thermal load, divided between cooling load and heating load. The first indicator, PHFT, is especially suitable for analyzing homes that are passively cooled through natural ventilation. PHFT is dimensionless, representing the sum of hours with occupation in which the operative temperatures are between 18 °C and 26 °C, divided by the sum of hours in which occupation of the rooms is considered throughout the year, according to Equation 1. The value of PHFT is calculated individually for each room of extended stay (living room and bedrooms), and the PHFT of the dwelling is obtained from the arithmetic mean of the values for these rooms. It's

important to mention that the PHFT is based on adaptive thermal comfort models, as it is intended to evaluate the performance of buildings under natural ventilation use. The adaptive model presented on ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017b) considers only the operative temperatures and has been applied to humid climates in Brazil (De Vecchi *et al.*, 2015).

$$PHFT = \frac{\sum timestep_{occ,18-26}}{\sum timestep_{occ}} \quad (1)$$

where $PHFT$ is the percentage of occupied hours within the operative temperature range, $\sum timestep_{occ,18-26}$ is the sum of hours with occupation in which the operative temperatures are between 18 °C and 26 °C, and $\sum timestep_{occ}$ is the sum of hours in which occupation of the rooms is considered throughout the year.

The second indicator offers an analysis of thermal load, which indicates the performance of the residence when using an air conditioning system. Thermal load is divided between cooling load and heating load, representing the thermal energy added to or removed from a room, to meet pre-established conditions. From the results of each room in the home, the value of the thermal load indicator is obtained by summing the thermal load of each room and dividing by the sum of the net area of the rooms of extended stay (in units of kWh/m².year).

PHFT and thermal load indicators seek to describe the thermal performance of rooms of extended stay in the home. These places are characterized as rooms of continuous occupation by one or more individuals, for example, including living rooms and bedrooms and excluding bathrooms. Thus, in this study, all references to rooms should be understood as rooms of extended stay.

The software EnergyPlus (9.0.1) and the computational language R (Version 3.5.1), within the integrated development environment RStudio (Version 3.6.1), were used for this study. This article describes, in sequence, the residential building adopted and the variation of the

constructive, behavioral, and climatic parameters considered, leading to a combination of 135 thermal performance analysis conditions. Lastly, three additional types of analysis were carried out: 1) an assessment on the correlation between both indicators of thermal performance adopted in this study: percentage of occupied hours within the operative temperature range (PHFT); and annual thermal load, divided between cooling load and heating load; 2) an assessment on all building energy simulation results to understand the influence of constructive, behavioral and climatic parameters on the building thermal performance; and 3) an analysis on the variation in the operative temperature to turn on the air conditioning based on building thermal loads.

2.1 The residential building

In Brazil, a large part of the population resides in single-family housing units. According to the National Household Sample Survey (PNAD) (IBGE, 2015), conducted by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), in 2015, 88.3% of the population lived in houses, while the Survey of Possessions and Consumer Habits (PPHC) conducted by Eletrobrás and PROCEL (PROCEL, 2019) indicated that this portion of the population was 95.9% in 2019, mainly among the low and middle-income population. In order to cover these cases, the typology used in this study was a single-family residential building with two bedrooms, one bathroom and one living room with a combined kitchen, defined based on a survey of representative Brazilian typologies carried out by Triana, Lamberts and Sassi (Triana; Lamberts; Sassi, 2015a). The house consists of a single-story dwelling, with a net area of 38.58 m² for the long-stay rooms, and a ceiling height of 2.5 m. An overhang element of 0.5 m extends along the perimeter of the entire house. The 3D model and floor plan of the building can be seen in Fig. 1.

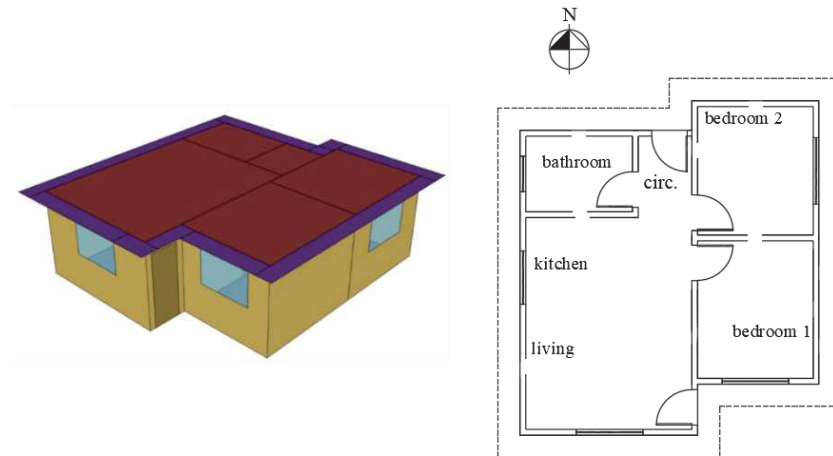


Fig. 1 Typology of single-family residential building (adapted from Triana, Lamberts and Sassi (Triana; Lamberts; Sassi, 2015a)).

The occupation was simulated according to the newly proposed procedure for simulating the thermal performance of residential buildings described in the Brazilian standard NBR 15575 (ABNT, 2020). Internal loads for people, equipment and the lighting system are considered. For people, a value of 60 W/m^2 in the living room and 45 W/m^2 in the bedrooms was adopted (ASHRAE, 2017a). The equipment load was considered only in the living room, with a value of 120 W . The lighting system was considered in the living room and in the bedrooms, with an installed power of 5 W/m^2 . The operating hours of these systems vary according to the occupation pattern adopted in the models described in Section 2.3.1.

The type of cooling (natural ventilation or mechanical cooling) varies according to strategy adopted in the analysis. Infiltration through cracks in windows and doors was considered, as in (Liddament, 1986). However, the bathroom window was considered to be constantly open in all cases, and the door was considered to be always closed.

The composition of the walls and roof varied, as described in section 3.1.3. The solar absorptance of the walls and roof, the type of glazing and the materials that make up the floor were considered to have fixed values. The value of 0.5 was considered for the solar absorptance of the walls and roof. Regarding the type of glazing, standard glass used in popular Brazilian

homes was considered (Triana; Lamberts; Sassi, 2015a), that is, a single pane of glass with a thickness of 3 mm, a solar heat gain coefficient of 0.87 and thermal transmittance of 5.7 W/(m².K). The floor was modeled in order to represent the most common situation in Brazil, corresponding to a component with a thermal transmittance of 4.40 W/(m².K) and a thermal capacity of 164 kJ/(m².K), that allows heat exchange between the indoor environment and the ground. In EnergyPlus, a ground simulation can be performed in different ways, with varying degrees of detail and computational requirements (Eli, *et al.*, 2019; Eli, *et al.*, 2019). In this study, the ground was modeled using the finite difference method of the ground domain object (Eli, *et al.*, 2019).

2.2 Constructive parameters

To explore the influence of the envelope on the thermal performance evaluation method, five building systems were analyzed, varying the composition of the roof (Table 1) and of the walls (Table 2). The construction components adopted seek to meet consolidated construction standards used as references in Brazil (PROCEL, 2019; Triana; Lamberts; Sassi, 2015a), as well as building systems with thermal insulation that are still little used in this country. When thermal insulation is applied in walls with low thermal capacity, the insulation is considered in external and internal walls, mainly because of thermal and acoustic factors. The thermal transmittance and thermal capacity values, given in Tables 1 and 2, were calculated according to the Brazilian standard NBR 15220-2 (ABNT, 2005a). Table 3 describes the composition of each of the five envelopes analyzed and all of them have an attic, between the ceiling and the roof.

Table 1. Variations in the composition of the roofs.

ID	Composition	U* W/(m².K)	TC** kJ/(m².K)
-----------	--------------------	-------------------------------	--------------------------------------

Roof 1	Fiber cement roof tile (0.008 m) + Air gap (> 0.050 m) + Concrete (0.100 m)	2.04	231.42
Roof 2	Fiber cement roof tile (0.008 m) + Radiant barrier (aluminum) + Air gap (> 0.050 m) + Glass wool (0.080 m) + Plasterboard (gypsum) (0.0125 m)	0.38	24.29
Roof 3	Fiber cement roof tile (0.008 m) + Radiant barrier (aluminum) + Air gap (> 0.050 m) + Glass wool (0.080 m) + Concrete (0.100 m)	0.38	246.52

*U: Thermal transmittance; **TC: Thermal capacity.

Table 2. Variations in the composition of the walls.

ID	Composition	U* W/(m ² .K)	TC** kJ/(m ² .K)
Wall 1	External Wall: Concrete (0.100 m)	4.40	220.00
	Internal Wall: Concrete (0.100 m)	4.40	220.00
Wall 2	External Wall: Cement render (0.025 m) + Hollow clay brick (0.190 m) + Cement render (0.025 m)	2.39	151.00
	Internal Wall: Cement render (0.025 m) + Hollow clay brick (0.190 m) + Cement render (0.025 m)	2.39	151.00
Wall 3	External Wall: Cement board (0.010 m) + Glass wool (0.080 m) + Plasterboard (gypsum) (0.0125 m)	0.50	37.87
	Internal Wall: Plasterboard (gypsum) (0.0125 m) + Glass wool (0.08 m) + Plasterboard (gypsum) (0.0125 m)	0.51	48.08
Wall 4	External Wall: Glass wool – external (0.050) + Concrete (0.100 m)	0.75	233.08
	Internal Wall: Concrete (0.100 m)	4.40	220.00

*U: Thermal transmittance; **TC: Thermal capacity.

Table 3. Variations in the composition of the envelopes.

ID Envelope	Composition Walls + Roof	Description of U and TC
--------------------	---------------------------------	--------------------------------

Envelope 1	Wall 1 + Roof 1	External Wall and Roof: high transmittance and high thermal capacity
Envelope 2	Wall 2 + Roof 1	External Wall: medium transmittance and medium thermal capacity Roof: high transmittance and high thermal capacity
Envelope 3	Wall 3 + Roof 2	External Wall and Roof: low transmittance and low thermal capacity
Envelope 4	Wall 4 + Roof 1	External Wall: low transmittance and high thermal capacity Roof: high transmittance and high thermal capacity
Envelope 5	Wall 4 + Roof 3	External Wall: low transmittance and high thermal capacity Roof: low transmittance and high thermal capacity

2.3 Behavioral parameters

2.3.1 Variety of occupancy patterns

Brazilian homes are occupied most frequently by people who are at home only during the evening and at night, as they work and/or study elsewhere during the day (Ramos *et al.*, 2020a). Another recurrent pattern is that of people who work from home and in this case there is always at least one person at home during the day.

Taking these studies as a reference, three variations in the occupancy pattern were adopted for the analysis: 1) All Day, where there is always at least one person in the house, representing the pattern of people who work from home; 2) Afternoon and Night, where between 08:00 and 13:59 there are no people in the house, representing people who work only one period of the day; 3) Night, in this profile between 08:00 and 17:59 there is no occupation of the house, representing the profile in which people work and/or study all day and only return home in the evening. About weekdays and weekends, the Brazilian standard does not consider different days (ABNT, 2020). Thus, in this study the occupancy patterns are the same for weekdays and weekends. The occupancy pattern of the two bedrooms was set as two people from 22:00 to 07:59. For the living room, the variation was from two to four people. Regarding the internal

loads, the activation of lighting and equipment varied according to the presence of people in the rooms. Fig. 2 shows the above-mentioned occupancy profiles graphically.

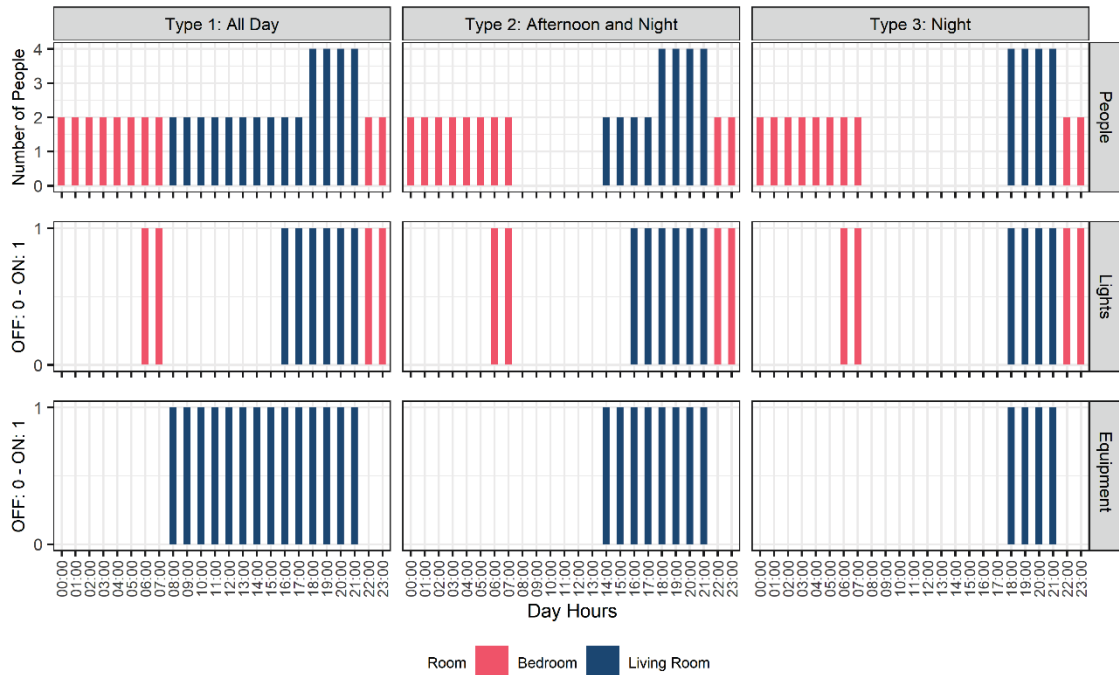


Fig. 2 Variety of occupancy patterns and lighting or equipment activation.

2.3.2 Variety in cooling and heating strategies (passive and mechanical strategies)

The variations in the behavior of users consider the interaction of people with the opening of windows to increase natural ventilation and with the activation of the air conditioning system. In Brazil, for many users, when feeling hot in their homes, their first response is to open the windows for the use of natural ventilation. This is mainly due to cultural aspects. However, it is important to note that the installation of air conditioning systems has been growing in recent years (EPE, 2019b). Thus, two cooling strategies were considered for the analysis: 1) Naturally Ventilated and 2) Hybrid. The Naturally Ventilated strategy is composed of two simulation models: one that considers cooling only through natural ventilation, from which the PHFT indicator is analyzed; and a complementary model, used to calculate a thermal load indicator. The Hybrid strategy combines active and passive cooling solutions in the same model,

representing a merging of the model for the Naturally Ventilated strategy with a complementary model.

In the model for the Naturally Ventilated strategy, windows should open only if the air temperature in the environment is higher than 19 °C (De Vecchi *et al.*, 2015; Sorgato, M. J.; Melo; Lamberts, 2016) and the outside air temperature is lower than the air temperature in the room. In addition to temperature, there are occupation criteria. In the living room, the windows can only be opened if the room is occupied, while in the bedrooms, if there is any occupation in the house, the windows can be opened. In this strategy, the thermal load indicator represents the energy that should be removed or supplied to the room, when natural ventilation does not provide a specified thermal performance. The specified performance was defined as the time periods in which the operative temperature of the rooms was within the limits of 18 °C and 26 °C. The values considered for the calculation of the thermal load of the Naturally Ventilated strategy were obtained from the development of a complementary computer simulation model, which adopts only the use of air conditioning.

In the complementary model to the Naturally Ventilated strategy, if the operative temperature in the room is equal or greater than 26 °C, cooling is activated to reduce the air temperature and keep it at 23 °C, and if the operative temperature in the room is less than or equal to 16 °C, heating is activated to increase the air temperature and keep it at 18 °C. The operative temperatures for activating the air conditioning system are based on the adjustment zone presented by De Vecchi *et al.* (De Vecchi *et al.*, 2015), where it is considered that people adapt to the climate, being able to adjust their clothes, for example, to maintain a comfortable temperature. In this model, there are also occupation criteria. The air conditioning system is only turn on if the room is occupied. In addition, once the air conditioning system is activated, it is only disabled when the occupation becomes null. In the complementary model, with air conditioning, doors and windows always remain closed.

The procedure for obtaining the thermal load in the Naturally Ventilated strategy consists of carrying out simulations, in parallel, using the Naturally Ventilated model and the complementary model, as shown in Fig. 3. The operative temperatures were verified in the Naturally Ventilated model, and when a room was occupied and the Naturally Ventilated strategy was not sufficient to maintain the operative temperature between 18 °C and 26 °C, the thermal load value obtained in the complementary model was considered, in the same time. Thus, the cooling load must be computed if: 1) at time “n” of the simulation of a case with the Naturally Ventilated strategy, the operative temperature in the room is equal to or higher than 26 °C; and 2) the room is occupied. For the thermal heating load: 1) if at time “n” of the simulation of a case using the Naturally Ventilated strategy the operative temperature in the room is equal to or below 18 °C; and 2) the room is occupied.

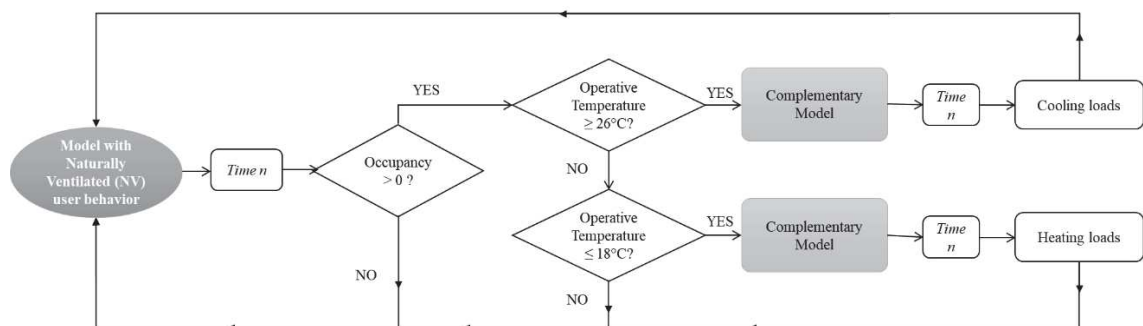


Fig. 3 Flowchart: calculation of cooling and heating loads.

In Hybrid strategy, natural ventilation and air conditioning are considered in the same model. In this strategy, the window opening criteria of the model with the Naturally Ventilated strategy were adopted. When the operative temperature limits of 16 °C and 26 °C were exceeded, the requirements for triggering the artificial conditioning considered in the complementary model were adopted.

Natural ventilation was modeled using the Airflow Network object class in EnergyPlus. For the simulation of air conditioning, the modeling was performed using objects related to the Ideal Loads Air System. This object calculates the ideal amount of thermal load to be added or removed from the room, according to the setpoint temperature defined. In addition to these objects, the Energy Management System (EMS) object class was also used. The EMS makes it possible to change certain trigger criteria. In this study, EMS was used to model the following criteria:

1. Air conditioning activates at operative temperatures of 26 °C and 16 °C, which differ from the air temperature setpoints defined in the system (23 °C and 18 °C);
2. Once activated, the air conditioning system is disabled only when the occupation in the room is null;
3. The air conditioning system cannot be activated in the same timestep where natural ventilation is enabled.

2.3.3 Variation in the activation temperature for the mechanical cooling system

To complement the analysis of the Hybrid strategy, the influence of the operative temperature to activate the mechanical system in relation to the cooling load was investigated. This is because people use the air conditioning systems installed in their homes in different ways (PROCEL, 2019; Ramos *et al.*, 2020a), for example, one person may feel the need to activate the mechanical cooling at a different operative temperature than another. The cooling load obtained with each variation of 1 °C in the standard activation temperature of the air conditioning (26 °C) was determined, considering changes to 27 °C, 28 °C, 29 °C and 30 °C.

2.3.4 Assessment of a mechanical cooling and heating system based on international norms

To complement the mechanical cooling and heating system analysis, it was considered a strategy named “Artificially Conditioned”. Some regulations assume the use of air conditioning 24 hours a day (Felmer; Yannas, 2020), even when the room is unoccupied. However, this type of use is not consistent with that adopted in residential buildings in Brazil, since natural ventilation is the main cooling strategy adopted. In addition, Brazilian buildings are not characterized by airtightness, or mechanical systems that include air renewal. Therefore, an air conditioning strategy was simulated in which air conditioner would operate continuously (i.e., 24 hours a day) was adopted, with setpoint and activation temperatures of 24 °C for cooling and 22 °C for heating. Also, as there is no possibility to open the windows to renew the air in the rooms, an air renewal value of 0.0075 m³/s (Sorgato, M. J.; Melo; Lamberts, 2016) was considered. Thus, it was possible to compare this type of air conditioning strategy with that most commonly adopted in Brazil.

2.4 Climatic parameters

Brazil is a country with a wide climatic diversity, mainly due to the continental dimension of its territory. Mountain regions and the south of the country, for example, have milder temperatures, with well-defined seasons, that is, mild winter and hot summer. In northern regions, on the other hand, temperatures are predominantly high, and in some places, the daily maximum exceeds 30 °C during most of the year (Crawley; Lawrie, 2020). Seeking to cover this diversity, the climates adopted for the study refer to the cities of Rio de Janeiro, Santa Maria and São Paulo. Table 4 shows the climatic classifications of these cities according to Köppen (Sentelhas *et al.*, 2014a), ASHRAE 169 (ASHRAE, 2013a-) and NBR 15220 (ABNT, 2005b). In Fig. 4, the hourly and annual average outdoor air dry-bulb temperature (DBT) and outdoor air relative humidity (RH) are provided for all cities analyzed. These values were obtained from the TMYx (2003-2017) weather files (Crawley; Lawrie, 2020).

Table 4. Climate classifications of cities.

Cidade	Köppen [41]	ASHRAE 169 [42]	NBR 15220 [43]
Rio de Janeiro	Aw – Savanna	1A	8
Santa Maria	Cfa – Humid subtropical	3A	2
São Paulo	Cfb – Temperate oceanic	2A	3

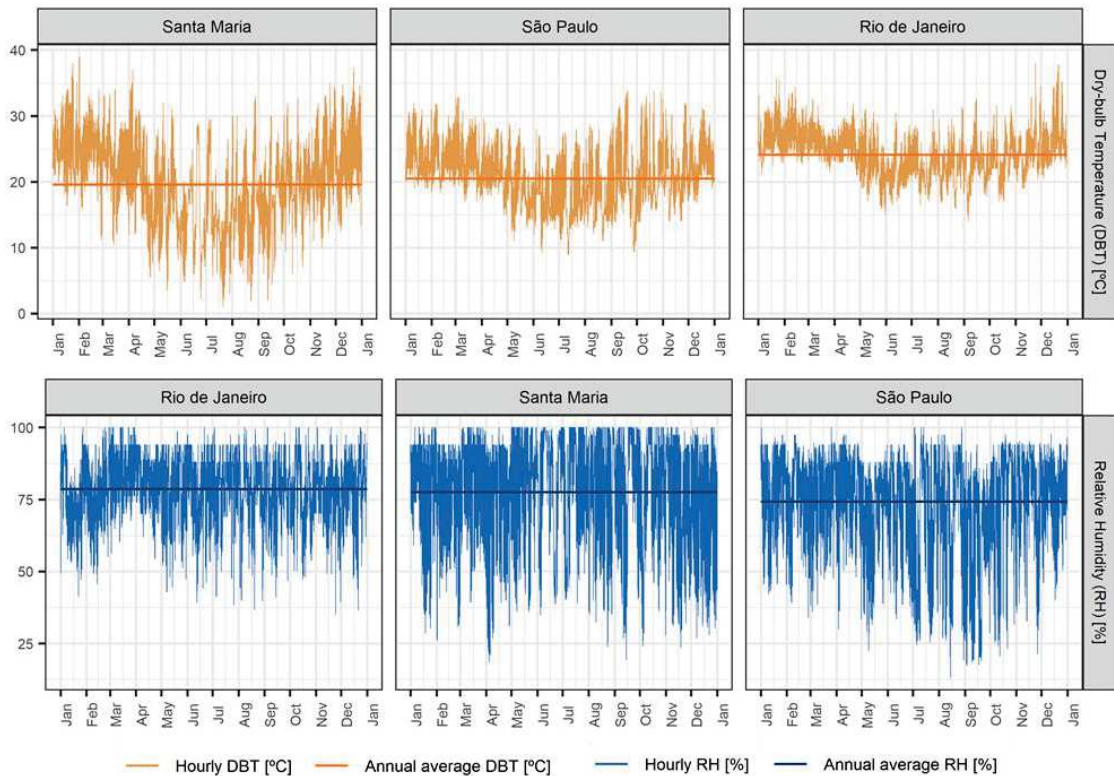


Fig. 4 Outdoor air dry-bulb temperature (DBT) and relative humidity (RH) of cities throughout the year.

2.5 Thermal balance on the indoor air

In order to demonstrate the influence of the heat flow at the envelope surfaces and the internal loads in the rooms of extended stay, the thermal balance in the air in a zone was analyzed, as adopted by Melo et al. (Melo *et al.*, 2015a). In this analysis the convection heat exchange that occurs between the envelope surfaces and the internal loads in the room, the gains and losses due to infiltration through natural ventilation and the thermal load added or removed from the environment by air conditioning (when applied) were investigated. The thermal load results represent the heat to be removed or added to the environment to maintain a thermal

balance. With this detailed analysis, it is possible to observe the heat flow that occurs through each surface.

In this analysis, the simulation output data can be divided into four categories: the first is the gain or loss of heat by convection at the envelope surfaces, the second is the heat gain from internal loads (people, lighting and equipment), the third is the gain or loss of heat due to infiltration (natural ventilation and/or cracks) and the fourth is the thermal load added or removed from the environment (air conditioning). For the first category, related to the surfaces of the envelope, the result is obtained at each timestep for each surface of the building: internal walls, external walls, floor, roof, doors and windows. The other three categories are obtained for each thermal zone.

3 Results and Discussion

3.1 Analysis of indicators considering constructive, behavioral and climatic variations

The results of building simulation models are reported in this section. These models originate from a parametric combination considering different constructive, behavioral and climatic parameters. The results for percentage of occupied hours within the operative temperature range (PHFT) and thermal loads for each parameter combination can be seen in Fig. 5. The number zero above the bars represents the lowest PHFT value (Fig. 5a) and the highest thermal load value (Fig. 5b), corresponding to the worst result for each indicator at a given combination of climate and occupant behavior. For the PHFT indicator, the other values represent how much (absolute value) the PHFT was improved in relation to the worst performing envelope. For the thermal load indicator, the other values represent the percentage of reduction in relation to the worst performing envelope. The envelope variations can be observed in Table 3 (varying from walls and roof with high thermal transmittance to low thermal transmittance as well as high and low thermal capacity). It's important to explain that

these results refer only to the envelope thermal performance and it does not take into account the efficiency of the mechanical cooling system.

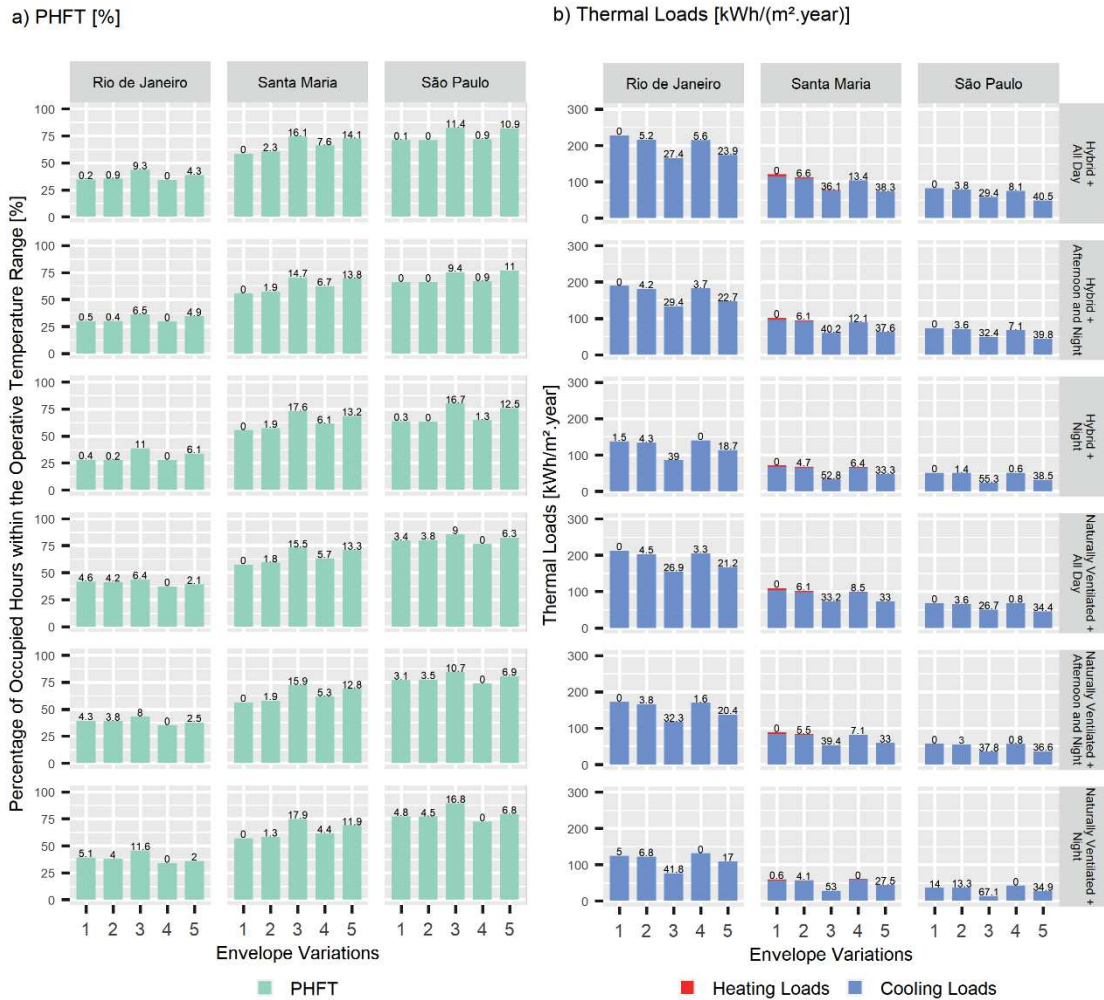


Fig. 5. Results for PHFT and thermal loads.

According to the results obtained, it can be observe that, in addition to the climate, the behavioral parameters significantly modify the building thermal performance for both indicators considered. In the city of São Paulo, for example, the cooling strategy of Naturally Ventilated with a behavior pattern of All Day showed the lowest PHFT value for Envelope 4. However, on changing the cooling strategy to Hybrid, the lowest PHFT value was found for

Envelope 2. It can be observed that the performance of each envelope is strongly dependent on the type of cooling strategy adopted. The way occupants behave within buildings can have a considerable effect on its energy performance, where a variable number of occupants, study and work routines, among other factors, can generate stochastic patterns that differ significantly from those adopted in the regulations. This gap between the scenarios adopted in normative procedures and the reality of occupation is reflected in significant differences in the results obtained for building thermal performance (Yao, 2018).

In addition, the building thermal performance may differ according to the indicator used, highlighting the importance of defining the analysis metric. If the normative only considers the building thermal loads as an analysis metric, for example, it may not encourage the use of bioclimatic strategies for natural ventilation. On the other hand, if the normative does not consider the building thermal loads in the analysis, it can significantly reduce the thermal performance of the occupants who use air conditioning. To exemplify this, on analyzing only the PHFT indicator for the city of Rio de Janeiro and the Naturally Ventilated behavioral pattern, Envelope 1 obtained the second-best thermal performance. Thus, we could consider it as a construction system to be used in this case. However, for the thermal load indicator, this envelope presented one of the highest thermal load values for most behavior patterns. Thus, if a dweller who uses only natural ventilation as a passive cooling strategy invested in an air conditioner, the thermal performance of the house would be unsatisfactory compared to other envelopes, consuming more electricity for air conditioning.

With regard to the Hybrid cooling strategy results, they present the highest values for the thermal load indicator and lower values for PHFT. This is due to the fact that after the air conditioning system is turned on, it is only turned off after the end of the occupation. Hence, if there is a reduction in external temperatures after a few hours of occupation, the use of passive cooling by natural ventilation is not considered as an option. However, in the Brazilian context,

this type of use is common in houses with an installed air conditioner (Ramos *et al.*, 2020a) where it may be activated for more than 9 h in living rooms and 15 h during the night in bedrooms. In bedrooms, this behavior might be because the users will not wake up to turn off the air conditioning and open the windows after they have gone to sleep. Also, other issues such as privacy, mosquitoes and security are related to the behavior of continuous hours without opening windows.

Although different thermal load results were obtained for the Hybrid and Naturally Ventilated, the average difference in the thermal load values was only 9.7 kWh/m².year. The simulation with the Hybrid behavior is more complex, mainly because it uses the Energy Management System (EMS) object class. Many simulators may not understand the use of the EMS object class because this involves programming language. Thus, to reduce this knowledge gap and also the computational cost of the simulations, for public policies, the simplification of the Hybrid behavioral pattern is justified. For instance, in the review of the computer simulation procedure proposed by the chapters on thermal performance in the Brazilian standard NBR 15575 (ABNT, 2020), the adoption of two separate models was considered, when simulating natural ventilation and air conditioning.

The thermal balance for two cases can be seen in Fig. 6, differing only by the cooling and heating strategies adopted (Natural Ventilation or Hybrid). Both cases have the combination of the climate of Rio de Janeiro, All Day occupancy pattern and Envelope 3. In the living room with hybrid strategy, the air conditioning system was activated after 11:00, remaining on until the end of the occupation at 21:59. However, it can be observed that in the model with the Naturally Ventilated behavior, natural ventilation was allowed from 17:00 onwards, and the operative temperature of the room was lower than 26 °C (26 °C is the operative temperature for turning on mechanical cooling system). This result indicates that if users observe the increase

in the potential of natural ventilation after a few hours of mechanical cooling, they can save electricity by reducing the temperature in environments through natural ventilation.

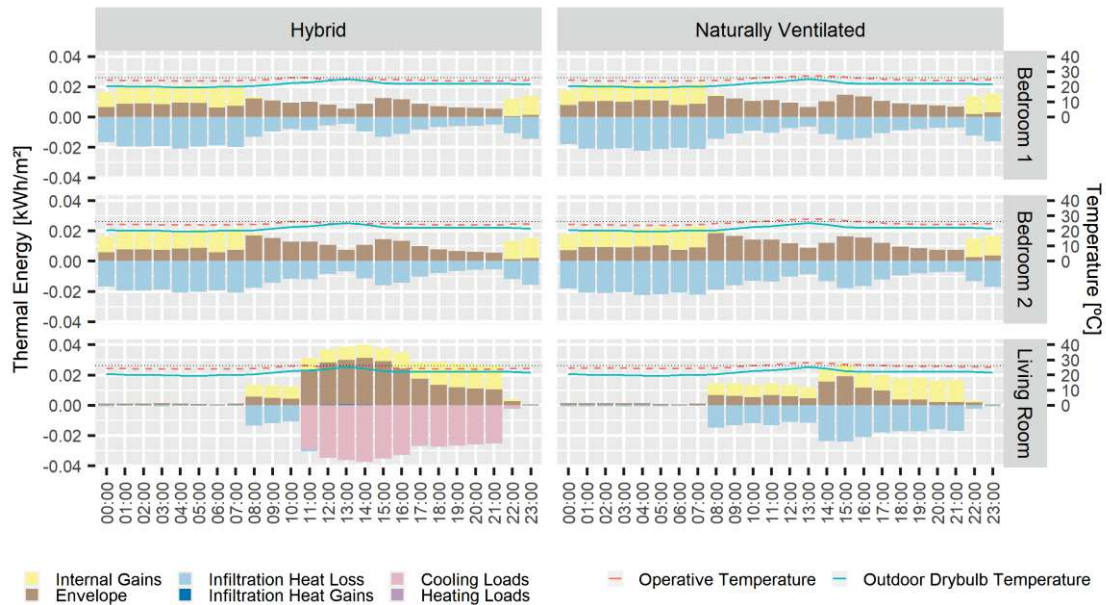


Fig. 6 Thermal balance at 05/20 (autumn season in Brazil) with the combination: climate of Rio de Janeiro, Envelope 3, occupancy pattern All Day.

On comparing the performance of the building in different cities, Fig. 5 shows that Rio de Janeiro presented the highest values for thermal load and lowest for PHFT. São Paulo obtained the lowest thermal load and highest PHFT values. The values for Santa Maria were between those obtained for the other two cities. These results indicate that São Paulo was the city with the greatest potential for maintaining satisfactory temperatures inside the house without the use of air conditioning.

With regard to the variations in the building envelope, the envelopes with thermal insulation on the external walls and roof showed the lowest thermal loads. For cases with the Hybrid behavior and All Day or Afternoon and Night occupancy patterns, Envelope 5 (low transmittance and high thermal capacity) had the highest thermal load reduction potential when

compared to the worst thermal load results for the combination of climate and occupant behavior. For cases with the Naturally Ventilated strategy and All Day occupancy, Envelope 5 also showed the highest thermal load reduction potential. For other climatic and behavioral combinations, Envelope 3 (low transmittance and low thermal capacity) was the one that obtained the highest thermal load reduction potential. With the same external wall as Envelope 5 but with a roof with high transmittance and high thermal capacity, Envelope 4 was among the envelopes with the worst thermal performance according to the thermal load indicator. This demonstrates, for the cases analyzed, that the heat gains from the roof are greater than those from the external walls, as can be seen in Fig. 7. In this figure, the thermal balance of the residence is presented considering the city of São Paulo, with the Hybrid strategy and Afternoon and Night occupancy pattern, considered both Envelopes 4 and 5.

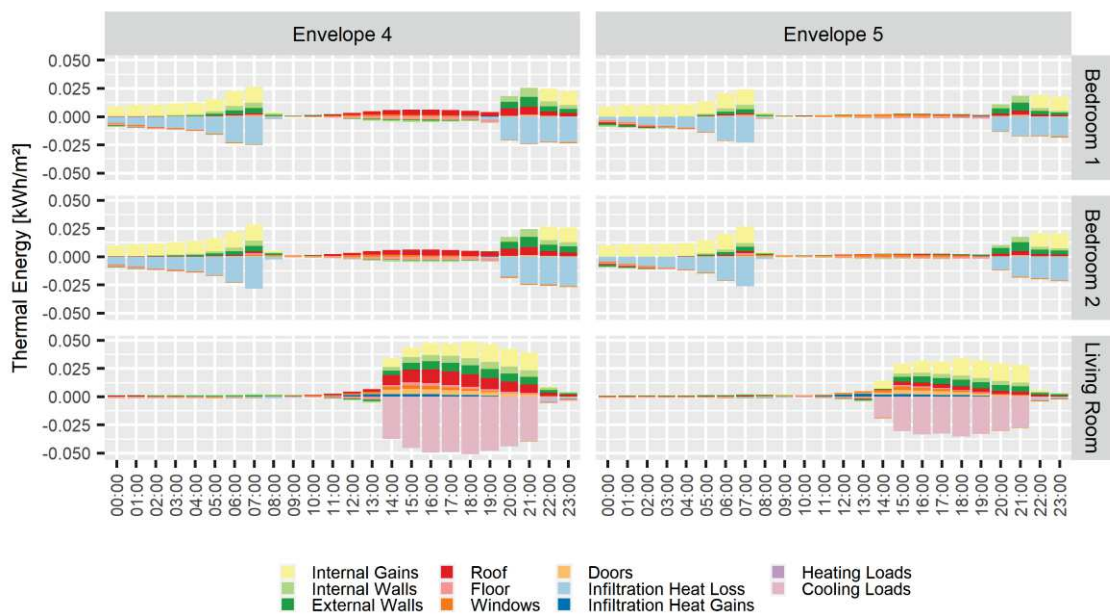


Fig. 7 Thermal balance on 10/21 (spring season in Brazil) with the combination: climate of São Paulo, occupancy pattern Afternoon and Night, Hybrid strategy. Variations in building envelope.

Thermal insulation on the external walls and roof is an energy efficiency measure that helps to improve the thermal performance of the building for all user-profiles and climates adopted in this study. This result is similar to those reported by other authors who considered similar climates (Fosas *et al.*, 2018; Rakhshan; Friess, 2017; Triana; Lamberts; Sassi, 2018a; Tubelo *et al.*, 2018). It should be noted that many authors considered thermal insulation levels much greater than that adopted in this study, reaching values of thermal transmittance close to $0.1 \text{ W} / \text{m}^2\cdot\text{K}$. With regard to thermal inertia, few studies indicate this characteristic as an energy efficiency measure (Ghoreishi, 2019; Mantesi *et al.*, 2019), and most research is limited to considering thermal transmittance.

The dispersion diagram in Fig. 8 shows PHFT on the x-axis and thermal load on the y-axis. For each behavioral profile, the variation of these indicators for each climate and envelope can be observed. The best performance combinations (with higher PHFT and lower thermal load) are in the lower right corner. Fig. 8 was used to identify a relationship between the performance indicators within the same behavioral profile. Based on this graph, there is a negative linear correlation, as also confirmed by the Pearson's coefficient (r).

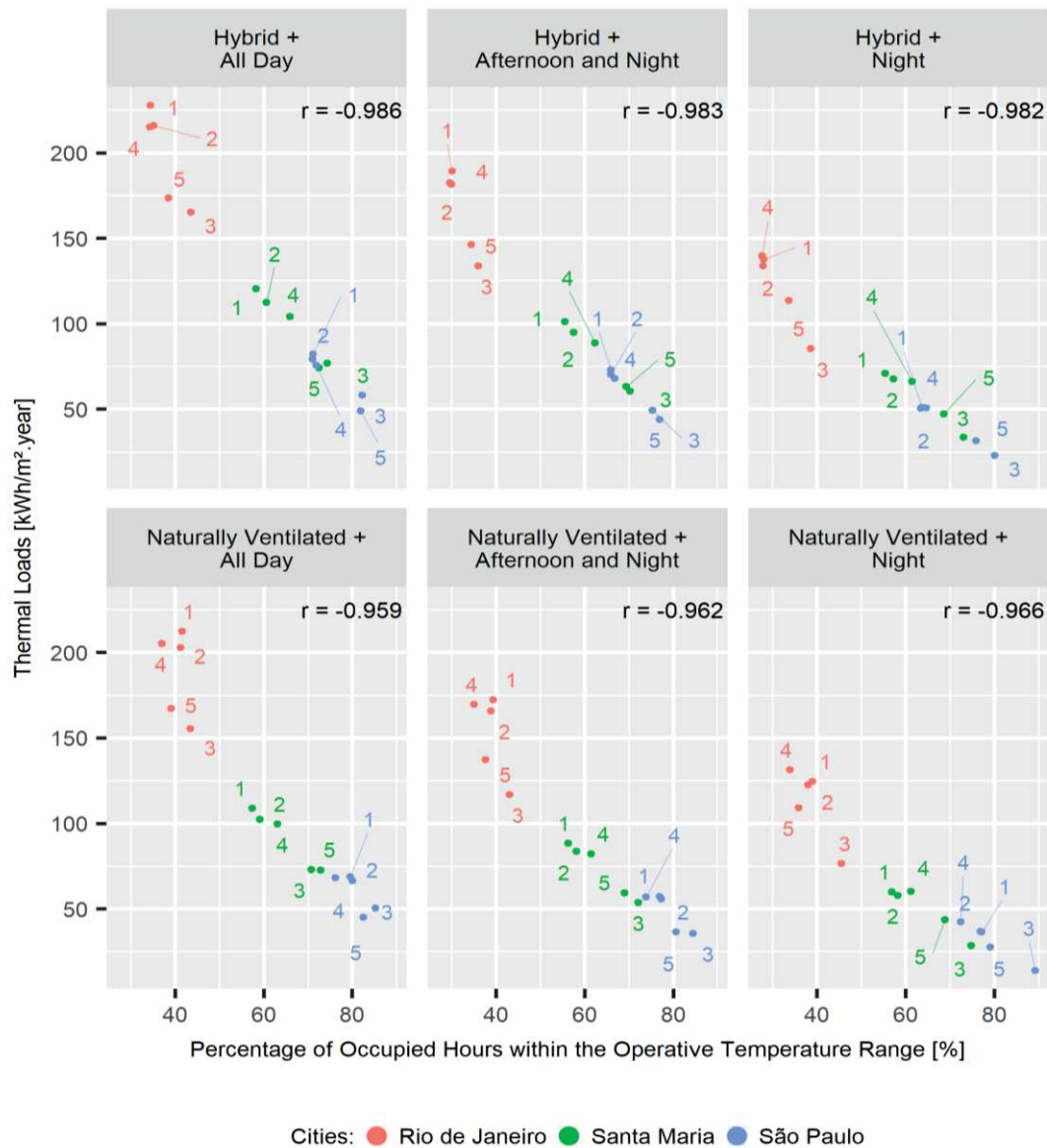


Fig. 8 Correlation between the PHFT and thermal load indicators.

For cases with Hybrid strategy, the correlation is stronger than the cases with Naturally Ventilated strategy. This result shows that the consideration of both indicators in the analysis with Naturally Ventilated strategy is more relevant than in models with Hybrid strategy. This is because in the latter case both indicators describe the building thermal performance. However, different conclusions might be drawn depending on the indicator, especially when the objective is to compare the thermal performance of the envelopes. For a user in the city of

Rio de Janeiro with an All Day occupancy pattern and who adopts the Naturally Ventilated for cooling, considering Envelopes 1, 2, or 5 for the house would lead to obtaining approximately equal PHFT indicators. On the other hand, the thermal load indicator highlights the variation of thermal performance between these envelopes. For this reason, despite the strong correlation, with all r values higher than 0.95, it is clear that in no situation could one indicator completely replace the other.

There is a need to establish baselines when considering the development of public policies for assessing the thermal performance of buildings. It is common that standards specify analysis based on two computer simulation models: the proposed building and the baseline building (O'Brien *et al.*, 2020a). Baseline buildings in general have the same geometric characteristics and use pattern as the proposed building, but they must consider predefined constructive parameters according to the normative procedure. Thus, the thermal performance of the baseline building acts as a reference, as the thermal performance of the proposed building must be superior to that of the baseline building to be approved by the standard procedure. Thus, considering the results obtained in Fig. 8, if Envelope 1 is considered as a reference for the whole of Brazil, in some cases, envelopes like Envelope 2, which are generally used in the Brazilian construction sector, will not be acceptable according to the PHFT indicator. However, this does encourage more effective bioclimatic strategies to be considered to improve the construction sector in Brazil. Another point to be noted is that, in Brazil, there are cities with very different climates and cultures, as is the case of the three cities adopted in this study. Thus, for the construction of a robust public policy for the analysis of thermal performance, it may be necessary to define different reference buildings for each region (Ballarini; Corgnati; Corrado, 2014).

It is important to highlight that the procedure to calculate the PHFT indicator will lead to different results. Temperature ranges other than between 18 °C and 26 °C, for instance, may

vary for different climates, since people from warmer cities tend to have a different tolerance for heat compared to those from colder cities. Building users in hot climates, for example, tend to have a greater tolerance for the sensation of heat than users in cold climates (de Dear; Kim; Parkinson, 2018; Ramos *et al.*, 2020a). Thus, defining a temperature related to the use of an air conditioner or natural ventilation is complex. Standards such as ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017b), for instance, indicate a range of comfort conditions, considering different levels of acceptability. However, in this study, the temperature criteria were considered fixed throughout the year. If there are temperature differences during the year, the results could vary considerably according to the external temperature, among other factors. Another factor that could significantly change the results of the PHFT is the use of the weighted average based on the area or hours of occupation of each environment, instead of the average considering the number of environments associated with prolonged stay. In the case of the weighted average based on the number of hours occupied, environments occupied for a short period would have less impact on the PHFT result than the environments occupied for longer periods. O'Brien *et al.* (O'Brien *et al.*, 2020a), note that the ideal situation would be that the regulations present more than one occupation scenario. However, regardless of whether or not a standard has different occupancy scenarios, the indicator should consider the weighted average for the number of occupied hours.

3.2 Variation in the activation temperature for the mechanical cooling system

In this analysis, the operative temperature for turning on the mechanical cooling system was varied. The Hybrid strategy was studied to verify the reduction in the annual cooling thermal load when the users were more tolerant regarding the internal thermal conditions of the residence. The savings in thermal load were observed for each variation of 1°C in the operating temperature to turn on the air conditioner. Fig. 9 shows the results for the cases with activation temperatures of 27°C, 28°C, 29°C and 30°C, with the base case activation set at 26°C.

Fig. 9 shows the All Day occupancy pattern (where people occupy the house all day long) is associated with higher thermal loads. However, when the activation temperature of the air conditioning system is increased, the thermal load is significantly reduced, becoming close to the values obtained in other occupancy patterns. Similarly, buildings in cities with warmer climates and with higher thermal loads were those that achieved the highest potential for reducing the thermal cooling load. Thus, considering the ability to adapt to the climate (De Vecchi *et al.*, 2015; Ramos *et al.*, 2020a), building users in these cities have great potential for reducing energy consumption without exceeding the thermal comfort limit. However, such ranges are hard to generalize considering recent surveys which show that users activate the air conditioning system at different temperatures, as well as adopting a range of setpoint temperatures (PROCEL, 2019; Ramos *et al.*, 2020a).

On analyzing different construction systems, it was observed that the reduction gradients for the thermal loads for Envelopes 1, 2, and 5 behave similarly, with curves being approximately parallel over the temperature variation between 26 °C and 30 °C. On the other hand, Envelope 3, with insulation and low thermal inertia, presented one of the lowest potentials for reducing the annual thermal load through an increase in the activation temperature. This result shows the difficulty associated with dissipating energy through the insulated envelope after the air conditioning is activated. In addition, the low thermal capacity of the system does not allow significant storage of heat in the building structure, thus raising the indoor air temperature. In Envelope 5, the concrete responsible for the high thermal inertia is found in the inner layer of the external wall, allowing the storage of a significant portion of the heat generated by the internal loads. Thus, the thermal load to be removed from the ambient air in Envelope 5 is lower than that of Envelope 3. Envelope 5 gradually releases the heat stored in the concrete, resulting in a lower thermal load to be withdrawn per hour.

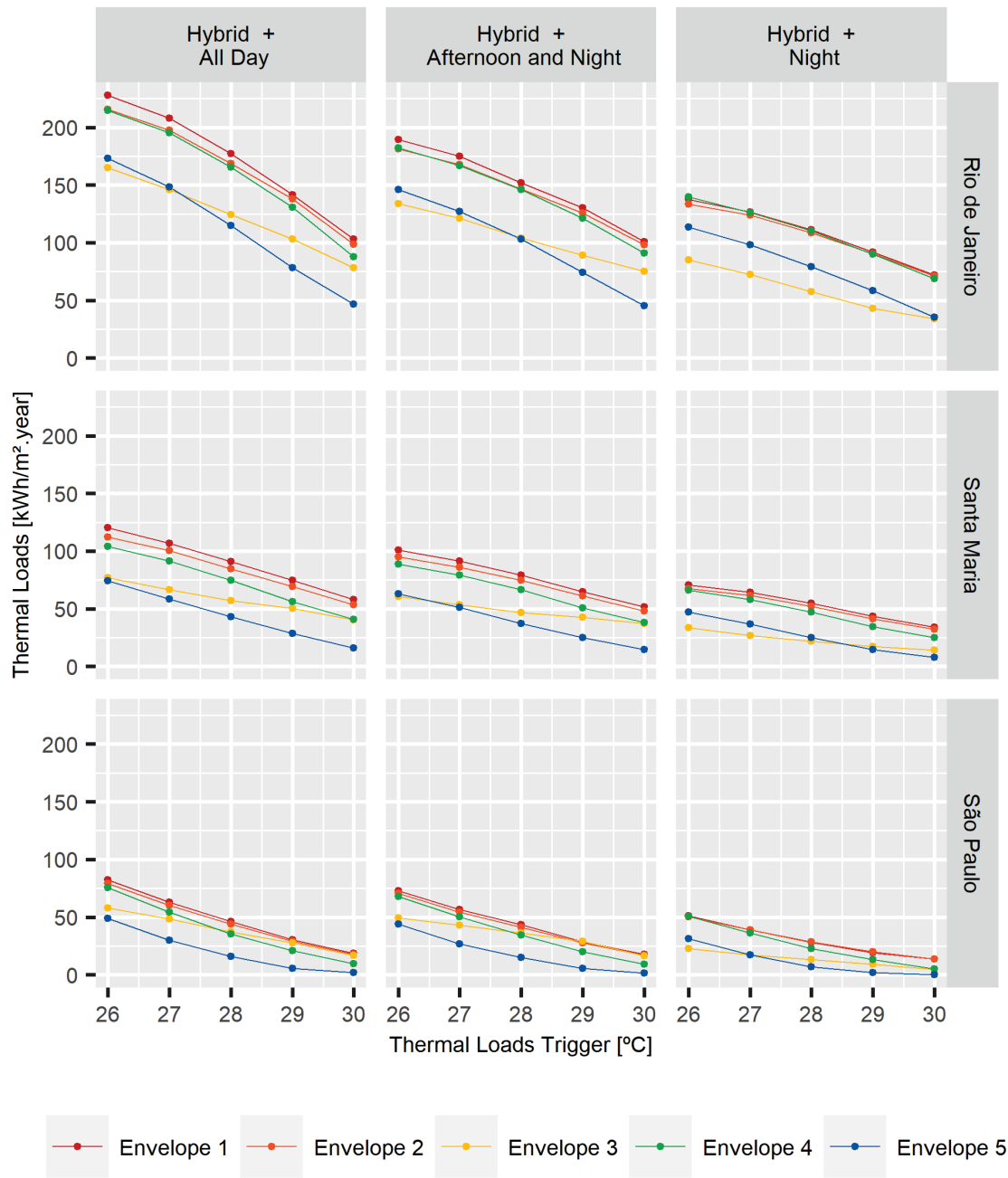


Fig. 9 Variations in the operative temperature for turning on the air conditioning.

Envelopes with high thermal inertia therefore reduce the thermal load when the operative temperature for turning on the air conditioner is higher. Envelopes with a combination of high thermal inertia and high thermal insulation perform better than those with only high thermal inertia. The thermal inertia increases the thermal lag. Thus, the surfaces do not reach their

maximum thermal capacity and store the heat during the day when there are higher solar incidence and higher thermal gains. Subsequently, this heat will only be transferred to the indoor a few hours after the solar incidence.

Regarding the different envelopes studied, Envelope 4 showed the highest rate of thermal load reduction. When the model considers an operative temperature of 30 °C, Envelope 4 has a gradient of thermal load reduction similar to that of Envelope 5. Envelope 4 considers insulated external walls with high thermal inertia and a roof with high thermal inertia but without insulation. Thus, after triggering the artificial conditioning at a higher internal operative temperature, the insulation of the walls reduces the addition of more heat to the environment, and the high thermal capacity of walls and roof increase the thermal lag. Unlike Envelope 5, Envelope 4 has no insulation on the roof, which allows for greater heat dissipation across this surface.

In a real situation, users could turn on the air conditioner at operative temperatures higher than 26 °C. So, if regulations establish a standard temperature to activate the air conditioning, the simulation could indicate an inadequate construction system for those houses that the users turn on the air conditioner at different temperature. Thus, in public policies for evaluating the thermal performance of residential buildings, these criteria need to be properly analyzed before their implementation nationally. In several cases seen in Fig. 9, the envelope with the best thermal performance changed when the trigger temperature of the air conditioning increased. In the Night occupancy pattern in the city of São Paulo, for example, Envelope 3 shows the best thermal performance when considering the operative temperature of 26 °C. However, this changed to Envelope 5 when the operative temperature exceeded 27 °C. Based on this analysis, for a regulatory standard, it would be helpful if the consultants could choose, from different user profiles, the option that best represents how people use the building.

3.3 Assessment of a mechanical cooling and heating system based on international norms

In this study, behavioral patterns typical of Brazilian residential users were defined. The behavioral patterns were characterized by passive cooling through natural ventilation and by turning on the air conditioner for cooling or heating. The users turn on the air conditioner or open the windows for natural ventilation when the thermal tolerance limits are exceeded [27,29]. Thus, results are related to the predefined use patterns. However, some international regulations consider a type of user with the air conditioning system turned on 24 hours a day (Felmer; Yannas, 2020), and the potential of natural ventilation is not considered. Thus, in this study, a similar type of user was simulated, called Artificially Conditioned, which considers the use of artificial air conditioning throughout the day. The results for the user type Artificially Conditioned can be seen in Fig. 10. This computer simulation model considers an air renewal rate of $0.0075 \text{ m}^3/\text{s}$ and considers setpoints of $24 \text{ }^\circ\text{C}$ and $22 \text{ }^\circ\text{C}$ for cooling and heating, respectively.

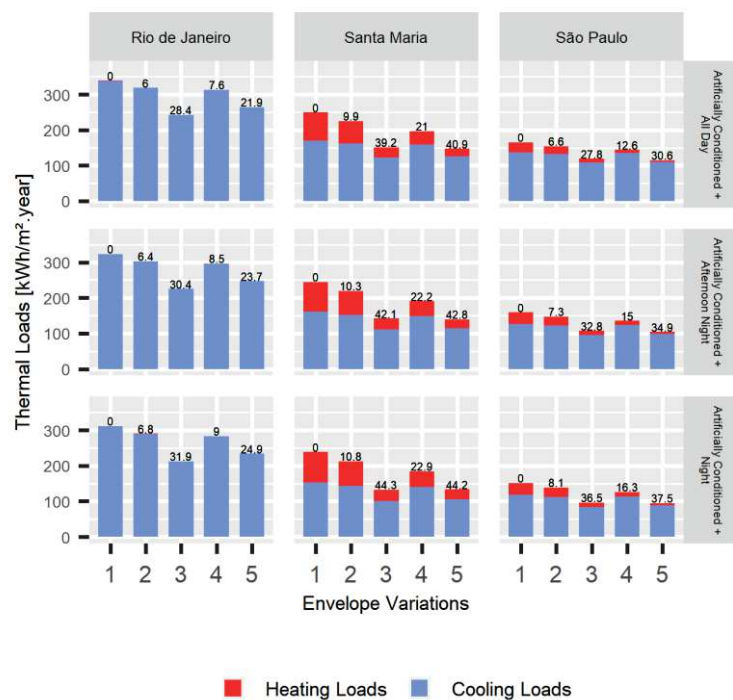


Fig. 10 Thermal load results for the strategy 'Artificially Conditioned'.

On comparing the Artificially Conditioned strategy with the Hybrid strategy a significant increase in the thermal load can be noted, in the range of 58 to 174 kWh/m².year. Also, the heating increases considerably for the cities of Santa Maria and São Paulo. This is because a setpoint temperature of 22°C was considered for heating in the case of Artificially Conditioned strategy while for the Hybrid strategy the corresponding setpoint temperature was 18 °C. The setpoint temperature for cooling and heating is another point that needs attention with regard to national standard regulations. In Brazil, for example, Ramos (Ramos *et al.*, 2020a) shows that both the cooling and heating setpoints are highly variable. For cooling, setpoint temperatures are between 16 °C and 28 °C and for heating they range from 18 °C to 32 °C.

If a Brazilian standard regulation adopts a behavior pattern similar to Artificially Conditioned, the indicator results not only dismiss the building's bioclimatic potential but also do not reflect the behavior of residential users in Brazil. Thus, it is essential to develop public policies that are appropriate for the nation's socio-cultural reality, to reduce the gaps between the predicted and the real thermal performance (Yao, 2018).

4 Limitations in computational simulation

In this study, the main limitations are related to natural ventilation. The algorithms of the EnergyPlus Airflow Network object class neglect the connection between the window glass surface and the ventilation opening criteria. This means that, no matter how much of the time the window is at 100% opening for ventilation, the glass remains closed and thus the portion of radiation incident on the glass that is transmitted to the environment is the same under any natural ventilation condition. This limitation of the EnergyPlus program is yet another uncertainty related to the simulation and can lead to an increase in the thermal load (Veiga; Melo; Lamberts, 2019).

Another limitation is related to hybrid ventilation. Based on tests performed by the authors, the “Availability Manager: Hybrid Ventilation” object of the EnergyPlus program did not work

as expected. This object should control the natural ventilation and the air conditioning system, but it was observed that the temperature criteria are not obeyed by the algorithm. This generates an increase in the thermal load when compared to the addition of hybrid ventilation controls through the Energy Management System (EMS) object class. The EMS object class makes it possible to control and modify pre-established routines in the EnergyPlus program, through the so-called “programs” (DOE, 2018; Eli, 2020; Veiga *et al.*, 2019). In this study, the use of the EMS object class was centered on the Hybrid behavior. For this behavior, the activation of the air conditioning system can be set to occur at temperatures which differ from the defined setpoint. Also, it is possible to define the moment that the air conditioning system is activated and disabled (i.e., when the occupation in the room becomes null). These criteria make the behavior closer to that of a real situation, since the system does not turn on and off at each timestep that reaches the setpoint temperature. For the Hybrid strategy, the EMS aided the definition of the criterion that after the air conditioning is activated, natural ventilation no longer occurs.

In addition to the limitations of the EnergyPlus program, there are those related to the way users are modeled in the building. As previously noted, the behavior of building users is dependent on psychological, physical and social aspects, among others, which directly affect the need for natural ventilation, as well as the activation of air conditioning. In addition, there are aspects such as routine, which make the occupation similar on most days of the year, but there is an error associated with considering that every day is the same.

In practice, the behavior of users, most of the time, does not reflect the simulated behavior. A user who does not understand about the thermal performance of building systems will consider their thermal perception, but other aspects, such as psychological or physical factors, for instance the need to open the window to reduce the feeling of claustrophobia or to prevent the proliferation of mold, are not taken into account. According to Ramos *et al.* (Ramos *et al.*,

2020a), the window opening factor is psychological when the resident arrives home and feels the need to open the window to look out at the external environment. In this study, this type of user behavior was not simulated, considering solely those who have a knowledge of the internal and external temperature conditions and will only ventilate the environment when the external temperature is lower than the internal temperature. If the user opens the windows even with the external temperature higher than the internal temperature, the heating of the room will be more accentuated, since, in addition to the internal loads, there would be a flow of hot air into the room. In summary, it is up to the building modeler to analyze and be aware of the errors associated with the simulation process, considering simplifications compatible to each specific objective.

5 Conclusions

Two thermal performance indicators were analyzed for the evaluation of residential buildings. The percentage of occupied hours within the operative temperature range (PHFT) indicator was applied to homes that adopt natural ventilation as a passive cooling strategy. The PHFT attempts to reflect the fraction of time that the residence has temperatures within a tolerance range, considering the periods when users are in the room. The thermal load indicator applies to moments when artificial conditioning is adopted. Thermal load is divided between cooling and heating loads, representing the energy to be removed or provided to the environment to meet pre-established thermal conditions.

The analysis of these indicators applies to the Brazilian context, where the climatic characteristics make it possible to consider bioclimatic strategies in the design of dwellings. At the same time, the increase in the number of homes with air conditioning equipment highlights the need to consider the indicators applied to different cooling strategies. Moreover, the

interaction between the user and their house represents a significant source of uncertainty, and cultural and economic factors make it difficult to generalize. Therefore, in this work, the PHFT and thermal load indicators were evaluated for 90 computer simulation models, which represent parametric combinations with variations in the behavioral, building envelope and climatic parameters.

The results obtained in this study allow the following conclusions to be drawn:

- Thermal performance indicators: the choice of a thermal performance indicator must be in harmony with the way buildings are used. Inadequate indicators show a performance that might not be obtained by the user if their interaction with the residence is very different from that considered in the modeling. Analysis only based on the thermal load does not consider passive cooling by natural ventilation, which represents the predominant cooling strategy applied by Brazilian residents. However, considering only PHFT can lead to the construction of extremely inefficient buildings if dwellers choose to use artificial conditioning systems. Although a strong correlation between these indicators was identified, it was concluded that considering them independently can lead to the choice of less appropriate construction systems. Also, when the building is observed within the context of climate change, it is essential to have a resilient approach to the analysis of thermal performance, considering different indicators. Such an approach contributes to the identification of design solutions that encourage resilient, efficient and climate-protective buildings.
- Impact of user behavior: different behavioral patterns of building users have a significant impact on the thermal performance of the building. Construction systems indicated for a user can differ significantly if the time and period of occupation are changed, as well as if a different cooling or heating strategy is adopted.

- Effect of thermal capacity and thermal insulation on the construction system: envelopes with thermal insulation, without materials that configure high thermal capacity, present favorable thermal performance in most simulated cases, with both Hybrid and Naturally Ventilated strategies. However, when air conditioning is activated at temperatures above 27°C, insulation must be combined with thermal capacity. This reduces the heat exchange between the internal and external environments, as well as lowering the internal temperatures. This temperature reduction occurs due to the capacity of the material to store part of the heat from the room (internal loads, radiation transferred through the windows) instead of it remaining in the indoor air. In this way, when the air conditioning is activated, the heat stored in the construction system is gradually released into the indoor ambient air. In the case of envelopes with high insulation and low thermal capacity, the ambient air is at a much higher temperature, so air conditioning needs to remove a greater thermal load. In the case of users who rely only on natural ventilation, building systems with high thermal capacity can be favorable, even when there is no thermal insulation. Due to the thermal lag related to this type of material, the heat stored in the construction component starts to be released hours after the heat peak of the day.
- Climate adaptation: when considered that users can have different tolerances regarding the indoor operative temperature, before the activation of the air conditioning, the thermal load indicator, was significantly changed. Naturally, for all of the building envelopes the thermal load reduced with an increase in the activation temperature of the air conditioning, but at with different reduction rates. The insulated envelope with low thermal capacity had the lowest reduction rate for thermal load. This system, which in most cases presented the best performance among the envelopes, was outperformed by a constructive system with higher thermal capacity, by raising the activation

temperature of 26 °C. This analysis highlights another aspect of user interaction, which concerns user preferences and tolerances related to the environmental thermal condition. The conception that people adapt to the climate might allow the use of air conditioning systems to be more flexible, leading to energy savings. However, the delimitation of this tolerance is complex and difficult to generalize, especially when the user is unknown or very comprehensive, as in the case of the development of public policies.

- Policy actions: Encouraging the development of buildings with better thermal performance requires the implementation of national or regional public policies. Such policies usually start from constructive guidelines that offer minimal performance. However, the establishment of these guidelines requires assumptions regarding how the buildings will be operated. Based on the results of this study, it could be concluded that the impact of the behavioral pattern may lead to the need of proposing more than one user profile scenario, to allow the selection of an appropriate option when a normative procedure is applied. These behavioral patterns should be based on analysis of the relationship between the building users in a certain country and their homes, taking into account social, cultural and economic characteristics. For this reason, the application of international standards may not reflect the real performance of the building in countries similar to Brazil, as was found in this study, for instance, when considering the use of artificial air conditioning throughout the year. In addition to behavioral standards, public policies applied in countries with a large territorial area, like Brazil, may require the establishment of different construction systems for baseline buildings, which could vary with the user profile and the climate of the region where the residence is located.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

The work reported in this paper was supported by the Brazilian Federal Agency for the Support and Evaluation of Graduate Education - Brazil (CAPES) - Financing Code 001.

6 References

- [1] IEA - International Energy Agency, Electricity Information 2018: Overview, 2018. <https://webstore.iea.org/electricity-information-2018-overview>.
- [2] Brasil. Ministério de Minas e Energia. EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional 2019: Ano Base 2018 [in Portuguese], Rio de Janeiro, Brasil, 2019. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019> (accessed December 28, 2020).
- [3] Brasil. Ministério de Minas e Energia. EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Plano Decenal de Energia 2029 - Demanda de Energia Elétrica [in Portuguese], Rio de Janeiro, Brasil, 2019. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2029> (accessed December 28, 2020).
- [4] IEA - International Energy Agency, The Future of Cooling, 2018. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- [5] F. Liu, A.S. Meyer, J.F. Hogan, Mainstreaming Building Energy Efficiency Codes in Developing Countries, The World Bank, Washington, D.C., 2010.
- [6] M. Fossati, V.A. Scalco, V.C.C. Linczuk, R. Lamberts, Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 65 (2016) 1216–1231. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.048>.
- [7] INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) [in Portuguese], Rio de Janeiro, Brasil, 2010. http://docs.wixstatic.com/ugd/5d557a_5c69f2b65b08481e2c80db6dbace63.pdf.
- [8] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades [in Portuguese], Rio de Janeiro, 2005.
- [9] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15575: Edificações Habitacionais - Desempenho [in Portuguese], Rio de Janeiro, 2013.
- [10] CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção, Termina discussão sobre a Emenda de Desempenho Térmico da ABNT NBR 15575. (2020). https://cbic.org.br/pt_BR/termina-discussao-sobre-a-emenda-de-desempenho-termico-da-abnt-nbr-15575/ (accessed October 13, 2020).
- [11] S. Hu, D. Yan, E. Azar, F. Guo, A systematic review of occupant behavior in building energy policy, *Build. Environ.* 175 (2020) 106807. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106807>.
- [12] J. Yao, Modelling and simulating occupant behaviour on air conditioning in residential buildings, *Energy Build.* 175 (2018) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.013>.
- [13] G. Felmer, S. Yannas, Designing naturally-conditioned dwellings for warm and cold-temperate regions of Chile Designing naturally-conditioned dwellings for warm and cold-temperate regions of Chile, *Archit. Sci. Rev.* (2020). <https://doi.org/10.1080/00038628.2020.1764328>.
- [14] T. Hong, J. Langevin, K. Sun, Building simulation: Ten challenges, *Build. Simul.* 11 (2018) 871–898. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0444-x>.

- [15] W. O'Brien, A. Wagner, M. Schweiker, A. Mahdavi, J. Day, M.B. Kjærgaard, S. Carlucci, B. Dong, F. Tahmasebi, D. Yan, T. Hong, H.B. Gunay, Z. Nagy, C. Miller, C. Berger, Introducing IEA EBC annex 79: Key challenges and opportunities in the field of occupant-centric building design and operation, *Build. Environ.* 178 (2020) 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106738>.
- [16] T. Hong, D. Yan, IEA EBC Annex 66 : A recently-completed international collaborative project, *Ibpsa NEWS*. 28 (2018) 19–23. <http://www.ibpsa.org/Newsletter/IBPSANews-28-2.pdf>.
- [17] D. Yan, T. Hong, B. Dong, A. Mahdavi, S. D'Oca, I. Gaetani, X. Feng, IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings, *Energy Build.* 156 (2017) 258–270. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.084>.
- [18] V. Fabi, R.V. Andersen, S. Corgnati, B.W. Olesen, Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models, *Build. Environ.* 58 (2012) 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.009>.
- [19] T. Hong, S. D'Oca, S.C. Taylor-Lange, W.J.N. Turner, Y. Chen, S.P. Corgnati, An ontology to represent energy-related occupant behavior in buildings. Part II: Implementation of the DNAS framework using an XML schema, *Build. Environ.* 94 (2015) 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.006>.
- [20] R. Markovic, E. Grintal, D. Wölki, J. Frisch, C. van Treeck, Window opening model using deep learning methods, *Build. Environ.* 145 (2018) 319–329. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.09.024>.
- [21] E. Marshall, J.K. Steinberger, V. Dupont, T.J. Foxon, Combining energy efficiency measure approaches and occupancy patterns in building modelling in the UK residential context, *Energy Build.* 111 (2016) 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.039>.
- [22] A. Ghoreishi, The Effects of Exterior Thermal Mass (eTM) on Energy Consumption in Residential Buildings, *Acad. Res. Community Publ.* (2019) 14–26.
- [23] M.A. Triana, R. Lamberts, P. Sassi, Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures, *Energy Build.* 158 (2018) 1379–1392. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.003>.
- [24] A.D. Peacock, D.P. Jenkins, D. Kane, Investigating the potential of overheating in UK dwellings as a consequence of extant climate change, *Energy Policy*. 38 (2010) 3277–3288. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.021>.
- [25] D. Fosas, D.A. Coley, S. Natarajan, M. Herrera, M. Fosas de Pando, A. Ramallo-Gonzalez, Mitigation versus adaptation: Does insulating dwellings increase overheating risk?, *Build. Environ.* 143 (2018) 740–759. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.033>.
- [26] E. Mantesi, C.J. Hopfe, K. Mourkos, J. Glass, M. Cook, Empirical and computational evidence for thermal mass assessment: The example of insulating concrete formwork, *Energy Build.* 188–189 (2019) 314–332. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.021>.
- [27] M. Kordjamshidi, S. King, R. Zehner, D. Prasad, Modeling Efficient Building Design: A Comparison of Conditioned and Free-Running House Rating Approaches, *Archit. Sci. Rev.* 50 (2007) 52–59. <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5008>.
- [28] M.J. Sorgato, A.P. Melo, R. Lamberts, The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption, *Energy Build.* 133 (2016) 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.059>.
- [29] M. Pacheco, R. Lamberts, Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy buildings in brazil: Climatic and cultural considerations, *Energy Policy*. 63 (2013) 716–725. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.133>.

- [30] G. Ramos, R. Lamberts, K. Abrahão, F.B. Bandeira, C. Barbosa Teixeira, M. de Lima, E.E. Broday, A. Castro, L. de Queiroz Leal, R. De Vecchi, L. De Zorzi, K. Dornelles, S. Duarte, R. Faisca, M. Fontenelle, T. Freitas, C. Gregorio Atem, G. Grigoletti, L. Maciel, C. Moraes, C. Mueller, T. Sartori, B. Silva, C. Silva, M. Silva, A.L. Silveira, R. Souza, A. Xavier, Adaptive behaviour and air conditioning use in Brazilian residential buildings, *Build. Res. Inf.* (2020) 1–16. <https://doi.org/10.1080/09613218.2020.1804314>.
- [31] Brasil. PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, Pesquisas de Posse e Hábitos de Consumo de Energia (PPHs), PROCEL INFO [in Portuguese]. (2019). <http://www.procel.gov.br/main.asp?View=%7B4A5E324F-A3B0-482A-B1CD-F75A2A150480%7D> (accessed November 1, 2019).
- [32] M.A. Triana, R. Lamberts, P. Sassi, Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance, *Energy Policy*. 87 (2015) 524–541. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.041>.
- [33] ASHRAE - The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Standard 55-2017 -- Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI/ASHRAE Approved), 2017.
- [34] R. De Vecchi, M.J. Sorgato, M. Pacheco, C. Cândido, R. Lamberts, ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: The Brazilian case, *Archit. Sci. Rev.* 58 (2015) 93–101. <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.981145>.
- [35] Brasil. Ministério da Economia. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD | IBGE, (2015) [in Portuguese]. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/rendimento-despesa-e-consumo/9127-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios.html?=&t=o-que-e> (accessed March 25, 2020).
- [36] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Emenda de Desempenho Térmico da norma de Edificações habitacionais – Desempenho (ABNT NBR 15575 – Parte 1) [in Portuguese], Brasil, 2020.
- [37] ASHRAE - The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Description 2017 ASHRAE Handbook—Fundamentals, 2017. <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2017-ashrae-handbook-fundamentals> (accessed October 14, 2020).
- [38] M.W. Liddament, *Air Infiltration Calculation Techniques - An Applications Guide*, Bracknell, UK, 1986.
- [39] L.G. Eli, A.F. Krelling, R.M.S. Machado, L.S. Mendes, A.P. Melo, R. Lamberts, Análise de Sensibilidade e Incertezas dos Parâmetros Relacionados à Modelagem do Contato do Piso com o Solo no Programa EnergyPlus [in Portuguese], in: XV ENCAC, ANTAC, João Pessoa, PB, 2019: pp. 1551–1560.
- [40] L.G. Eli, A.F. Krelling, L.S. Mendes, R.M. e S. Machado, L. Mazzaferro, A.P. Melo, R. Lamberts, Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto Ground Domain no Programa EnergyPlus - Versão 9.0.1 [in Portuguese], (2019).
- [41] D. Crawley, L. Lawrie, Repository of free climate data for building performance simulation: Brazil, Region 3 - South America, (2020). http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html (accessed March 10, 2020).
- [42] P.C. Sentelhas, C.A. Alvares, J.L. Stape, G. Sparovek, J.L. de Moraes Gonçalves, Köppen's climate classification map for Brazil, *Meteorol. Zeitschrift*. 22 (2014) 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- [43] ASHRAE - The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ANSI/ASHRAE 169-2013 Climatic data for building design standards, 2013.

- [44] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15220-3 - Desempenho térmico de edificações parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, Rio de Janeiro, 2005.
- [45] A.P. Melo, R. Lamberts, R. de S. Versage, Y. Zhang, IS THERMAL INSULATION ALWAYS BENEFICIAL IN HOT CLIMATE?, in: Build. Simul. Conf., Hyderabad, India, 2015: pp. 1353–1360.
- [46] R. Tubelo, L. Rodrigues, M. Gillott, J.C. Gonçalves Soares, Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil’s moderate climates zones, Build. Environ. 133 (2018) 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.038>.
- [47] K. Rakhshan, W.A. Friess, Effectiveness and viability of residential building energy retrofits in Dubai, J. Build. Eng. 13 (2017) 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.07.010>.
- [48] W. O’Brien, F. Tahmasebi, R.K. Andersen, E. Azar, V. Barthelmes, Z.D. Belafi, C. Berger, D. Chen, M. De Simone, Simona d’Oca, T. Hong, Q. Jin, D. Khovalyg, R. Lamberts, V. Novakovic, J.Y. Park, M. Plagmann, V.S. Rajus, M. Vellei, S. Verbruggen, A. Wagner, E. Willems, D. Yan, J. Zhou, An international review of occupant-related aspects of building energy codes and standards, Build. Environ. 179 (2020) 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106906>.
- [49] I. Ballarini, S.P. Corgnati, V. Corrado, Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project, Energy Policy. 68 (2014) 273–284. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.027>.
- [50] R. de Dear, J. Kim, T. Parkinson, Residential adaptive comfort in a humid subtropical climate—Sydney Australia, Energy Build. 158 (2018) 1296–1305. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.028>.
- [51] R.K. Veiga, A.P. Melo, R. Lamberts, Limitações da modelagem de janelas em edificações ventiladas naturalmente [in Portuguese], in: IV LATAM, Mendoza, Argentina, 2019: pp. 1–9.
- [52] EnergyPlus, Documentation Application Guide for EMS - EnergyPlus, (2018) 117.
- [53] R.K. Veiga, L.G. Eli, M.S. Olinger, R.M. e S. Machado, L. Mazzaferro, A.P. Melo, R. Lamberts, Manual de Uso do Energy Management System (EMS) no Programa EnergyPlus - Versão 9.1 [in Portuguese], (2019).
- [54] L.G. Eli, O Impacto do Padrão de Uso no Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares no Brasil, Master's degree [in Portuguese]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, Brasil, Univesidade Federal de Santa Catarina, 2020.

APÊNDICE C – ARTIGO 2

How to improve the thermal performance of buildings with one simulation run? The Heat Exchange Index applied to hot climates

L.G. Eli^{*a}, A.P. Melo^a, R. Lamberts^a

^a *Laboratory for Energy Efficiency in Buildings, Federal University of Santa Catarina*

Abstract

Improvements in the thermal and energy performance of buildings usually involves techniques with high computational costs, such as multi-objective optimization and parametric simulation. However, sometimes, achieving the optimal case is not desirable, though only the refinement of thermal performance. Hence, methods that enable this analysis are helpful for designers and researchers. Then, this study proposed a framework based on the Heat Exchange Index to assist thermal performance analysis of buildings. The framework consists of two phases and begins by exploring air and surface heat balance derived from the base case building simulation. This analysis is based on the Heat Exchange Index, an index developed in this work, and its result indicates the impact of each heat exchange on the thermal performance. The next phase is the improvement, where strategies are defined and implemented, and the thermal performance of the improved case is evaluated against the base case. A single-family house was modeled using EnergyPlus to demonstrate the framework application. Results showed that the Heat Exchange Index could be used to enhance the thermal performance of buildings since the strategies adopted in the base case increased its thermal autonomy and decreased thermal load.

Keywords: thermal performance, heat balance, thermal balance, building performance simulation, BPS, heat exchange index

Nomenclature

AC	Air Conditioner
BPS	Building Performance Simulation
DBT	outdoor dry bulb temperature
DBT _m	mean outdoor dry bulb temperature
HEI	heat exchange index
HEI _y	Heat Exchange Index for heat transfers that occur on the opaque surface in the surface heat balance
HEI _x	Heat Exchange Index for heat exchanges that occur in the zone air heat balance

HY	Hybrid
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Brazilian Standard
NV	Natural Ventilation
q''	Gains or losses in the air room during a period
$q''_{\text{convection}}$	Heat exchanges by convection between surface and the air
$q''_{\text{conduction}}$	Heat exchanges by conduction between inside surface and constructive element core
q''_{cooling}	Cooling load from a mechanical system
q''_{heating}	Heating load from a mechanical system
q''_{IG}	Heat added to the air by internal gains (e.g., people, light, and equipment)
$q''_{\text{NV,internal}}$	Heat exchange due to natural ventilation or crack infiltration from adjacent zones air
$q''_{\text{NV>window}}$	Heat exchange due to natural ventilation or crack infiltration from outdoor air
$q''_{\text{other,rad}}$	The sum of heat gain by shortwave radiation from electric lights and longwave radiation from internal sources
q''_s	Heat flow between surfaces and air
$q''_{\text{solar,rad}}$	Heat absorbed by surface from solar radiation that enters into the room by exterior windows
$q''_{\text{surfaces,rad}}$	Heat exchanges by longwave radiation between surfaces
q''_y	Gains or losses on an opaque surface during a period
$q_{y,\text{transfer}}$	The sum of all heat transfer that happens on the opaque surface
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient
TC	Thermal Capacity
U	Thermal Transmittance
α	Solar Absorptance

1 Introduction

The thermal performance of buildings is influenced by dynamic interactions among envelope, internal sources, user habits, and environmental conditions (Hensen; Lamberts, 2019b). Each variable affects indoor temperature and how people adapt to the thermal environment, such as the habit of opening windows for natural ventilation and air conditioner operation. The user influence on thermal performance is even more important in residential buildings since the user behavior varies according to many aspects, such as social, economic, and cultural (Ramos *et al.*, 2020b). Concerning thermal performance assessment, building performance simulation (BPS) programs are applicable in residential building design insofar as these tools simulate the thermal interactions that happen between the many parts of the building. For example, some applications include evaluating different envelope characteristics against different weather conditions (Triana *et al.*, 2023; Triana; Lamberts; Sassi, 2018b), changes in

how windows open for natural ventilation and the operation of shading devices (Gou *et al.*, 2018; Ran *et al.*, 2022; Sorgato, M.J.; Melo; Lamberts, 2016), and considering variations in locations, occupancy patterns, and user behaviors (Eli, *et al.*, 2021b). A similar approach in those studies was the investigation of the multiple variations to find the most suitable solution. For example, Triana *et al.* (Triana *et al.*, 2023) simulated different cases varying the envelope for eight Brazilian bioclimatic zones. After simulations, the optimal cases were determined regarding life-cycle cost and thermal performance indicators from NBR 15575 (ABNT, 2021c), a Brazilian standard for assess residential buildings performance. Similarly, Gonçalves *et al.* (Gonçalves *et al.*, 2024) simulated a thousand cases to optimize the thermal performance of a residential building. The authors applied a multi-objective optimization method based on the Pareto front technique.

Other studies embraced BPS and multi-objective methods to reach optimal cases regarding thermal performance (Bichiou; Krarti, 2011; Gossard; Lartigue; Thellier, 2013; Liu *et al.*, 2023). However, the applicability of BPS and multi-objective methods is limited since it requires a high computational cost, from efficient computers to runtime. A sensitivity analysis could then be used as an alternative to reduce computational costs for building optimization (Chen; Yang, 2017b; Chen; Yang; Sun, 2017b; Hemsath; Alagheband Bandhosseini, 2015). Sensitivity analysis shows how important each input is for a specific indicator, so it reduces the number of parameter variations adopted in the optimization phase since only the leading parameters are varied. Although applying sensitivity analysis decreases the computational cost for multi-objective optimization, it is still considerable. Likewise, efficient computers and cloud servers are expensive, decreasing their applicability for building designers. In addition, some studies do not require the optimal case, just a slight improvement in thermal performance level. Thus, another alternative must be investigated for faster analysis of strategies in early-stage design, such as the heat balance method (Gaetani; Hoes; Hensen, 2018; Zambrano *et al.*, 2023). Since the indoor environment is governed by heat exchanges, the air and surface heat balance are an alternative to understanding building performance and defining the heat gain and loss points. One example of a BPS program that uses heat balance equations to calculate building thermal performance is EnergyPlus (DEO, 2023). Furthermore, EnergyPlus also allows users to obtain each heat balance value as an output.

Concerning these findings, this study proposed a framework based on heat balance to investigate the thermal performance of buildings and determine improvement strategies. The zone air and surface heat balance were obtained from one simulation run in EnergyPlus, and the Heat Exchange Index (HEI) was calculated for each heat transfer. From HEI values, it is

possible to identify which parts of the building need improvements regarding thermal performance since this index indicates the principal heat gains and losses for each thermal zone. An illustrative case study was conducted to demonstrate the framework application, considering a residential building for two Brazilian cities with three different user behaviors regarding climatization. This novel framework assists the analysis of how envelope characteristics and systems adopted influence the thermal performance of buildings and could be applied in various stages, such as early-stage or retrofit design. Since this framework application is faster than optimization methods, such as the multi-objective method, designers could understand the thermal interactions in spaces without significant computational demands. Furthermore, the heat balance is not related to one thermal performance indicator but influences all of them. Thus, methods based on heat exchanges could be used to understand the thermodynamics of space, and afterward, the assessment could be evaluated with different indicators.

2 Overview of the heat balance applications

In building physics, the indoor air temperature results from all the heat exchanges that occur among the constructive systems, room air, and the internal heat gains from people, lights, and equipment (Hensen; Lamberts, 2019b). These heat exchanges aim for thermal equilibrium between all components present in the environment, which is reached when the sum of all heat flows equals zero. Thermal equilibrium is known as thermal or heat balance, and it directly affects how indoor air temperature increases or decreases, influencing heating and cooling loads.

Three types of heat exchanges occur in buildings radiation, conduction, and convection, so it is possible to understand the indoor environment through them. It is feasible to determine how heat exchanges happen by equations (Hensen; Lamberts, 2019b) and quantify environmental variables, such as thermal loads and indoor temperature. For instance, Ustaoglu, Kurtoglu, and Yaras (Ustaoglu; Kurtoglu; Yaras, 2020) adopted heat balance equations to determine the relationship between the total heat needs and the thickness of external wall insulation. Standard ISO 52016-1 (ISO, 2017b) uses heat balance calculations to predict the operative temperature and thermal loads of thermal zones considering hourly and monthly timesteps. These are examples of simplified heat balance applications, but detailed alternatives are developed in BPS programs, such as EnergyPlus. Researchers compared the simplified method from ISO 52016-1 with detailed calculations presented on EnergyPlus (Ballarini *et al.*, 2019, 2020b; De Luca *et al.*, 2021b). The authors pointed out that the main simplifications of ISO 52016-1 are regarding the distribution of the thermal mass in a constructive system, the

invariable value of longwave and convection coefficient, and the solar radiation that enters an indoor environment, which is considered only the direct radiation and is transmitted as a short wave on the indoor environment. These assumptions could cause deviations between results from ISO and EnergyPlus. For instance, the thermal load for heating is generally overestimated and cooling underestimated (De Luca *et al.*, 2022). Furthermore, ISO 52016-1 was developed for spaces with a mechanical system for maintaining indoor temperature, so it is not recommended for use in naturally ventilated cases, which is common in Brazil. For naturally ventilated cases, another simplified standard needs to be accoupled with ISO 52016-1 (EPB Center, 2021).

Building simulation programs, such as EnergyPlus, were developed considering heat balance calculations to predict the thermal performance of thermal zones (DEO, 2023). Some studies apply the heat balance method to improve building thermal and energy analysis using EnergyPlus. Luo, Hong, and Tang (Luo; Hong; Tang, 2020b) explored the heat balance related to longwave radiation emitted by surroundings and absorbed by the building envelope and how it impacts building thermal performance. Melo *et al.* (Melo *et al.*, 2015b) analyzed the zone air heat balance in a commercial building to understand whether the envelope insulation or the internal load has more influence on cooling demand in hot climates. Eli *et al.* (Eli, *et al.*, 2021b) applied the zone air heat balance to understand the thermal performance results for a residential building and how to enhance results. Ballarini and Corrado (Ballarini; Corrado, 2012b) also applied the zone air heat balance to understand the effect of an envelope with thermal insulation on cooling demand for an office and a residential building. The authors divided heat balance into two categories: the heat flow related to the envelope and the heat flow not related to the envelope. These two categories indicate whether the envelope is the most critical part of the energy performance in summer for the whole building. As a result, the heat balance showed that the envelope significantly impacts cooling demand for residential buildings more than office buildings.

In EnergyPlus, it is possible to obtain results for zone air and surface heat balance. Zone air heat balance considers convective heat exchanges between air and surfaces, devices, an air conditioner, or airflow from natural ventilation. Surface heat balance explains the heat transfers on each surface, and convection, conduction, and radiation are considered. In brief, convection is the transfer that directly affects indoor air temperature, and surface heat balance is what clarifies the amount of heat added or lost by convection from each surface.

From one simulation run, it is feasible to determine the absolute values for heat balance and to understand each heat transfer. However, to compare different buildings and make application

easier, Gaetani, Hoes, and Hensen (Gaetani; Hoes; Hensen, 2018) developed a method based on building heat balance to understand the influence of occupant behavior on thermal load. The authors developed the Impact Index to estimate the influence of occupant behavior on building heating and cooling energy, intending to simplify analyses for applying strategies to reduce thermal load needs. The authors used the Impact Index method on an office building and used a sensitivity analysis for validation. Results showed that applying an Impact Index method is feasible rather than a sensitivity analysis, considering the Impact Index can explain 85% to 95% of cooling and heating variations in the cases. Zambrano et al. (Zambrano *et al.*, 2023) published a similar study when the Impact Index and sensitivity analysis were applied in a commercial building.

Concerning environmental variations, in cities where climate conditions do not change significantly over all seasons, an annual heat balance analysis could be sufficient for understanding the thermal performance of the buildings. However, in cases with well-defined seasons (hot summer and cold winter, for example), a monthly result shows how heat exchanges change over the seasons. Designers must define strategies that consider those environmental conditions. Hot and warm climates require strategies that decrease heat gain from the envelope and increase heat loss, such as low solar absorptance on external surfaces, mainly on roofs (Dabaieh, M. *et al.*, 2015; Gonçalves *et al.*, 2024; Triana *et al.*, 2023; Triana; Lamberts; Sassi, 2018b). Meanwhile, in cities with well-defined seasons, hot and cold seasons and transition periods, a medium or low solar absorptance combined with an insulation material could be required to reduce heat loss during the winter and gain during summer (Gou *et al.*, 2018; Sorgato, M.J.; Melo; Lamberts, 2016; Triana *et al.*, 2023; Triana; Lamberts; Sassi, 2018b). Likewise, user behavior plays a fundamental role in thermal performance analysis and even changes the optimal envelope solution (Balvedi; Ghisi; Lamberts, 2018b; Eli, *et al.*, 2021b; Sorgato, M.J.; Melo; Lamberts, 2016). For instance, in addition to the envelope strategies mentioned above, naturally ventilated or hybrid houses could embrace constructive systems with medium or high inertia to improve the reduction of internal temperatures (Eli, *et al.*, 2021b; Gou *et al.*, 2018; Sorgato, M.J.; Melo; Lamberts, 2016; Triana *et al.*, 2023). Additionally, for climates with at least a summer season, increasing opening ventilation areas and solar shading devices is also an important strategy (Dabaieh, M. *et al.*, 2015; Gonçalves *et al.*, 2024; Gou *et al.*, 2018; Ran *et al.*, 2022; Sorgato, M.J.; Melo; Lamberts, 2016; Triana *et al.*, 2023; Triana; Lamberts; Sassi, 2018b).

3 Proposed framework

The proposed framework is divided into four steps, as Fig. 11 shows.

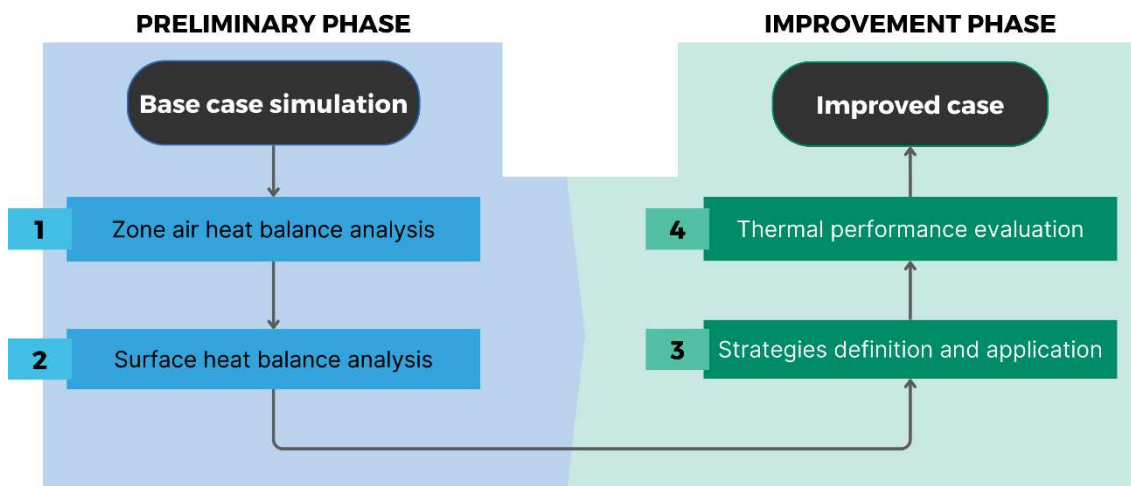


Fig. 11 Heat Exchange Index (HEI) framework.

A single-family house was modeled on EnergyPlus version 22.2 (DEO, 2023) to demonstrate the framework application. This house has two bedrooms, one living room with an integrated kitchen, and one bathroom, as Fig. 12 shows. The bedrooms and living room floor area are also present in Fig. 12. In this work, the living room and bedrooms were also called rooms of prolonged stay, and these were the rooms analyzed in the framework application.

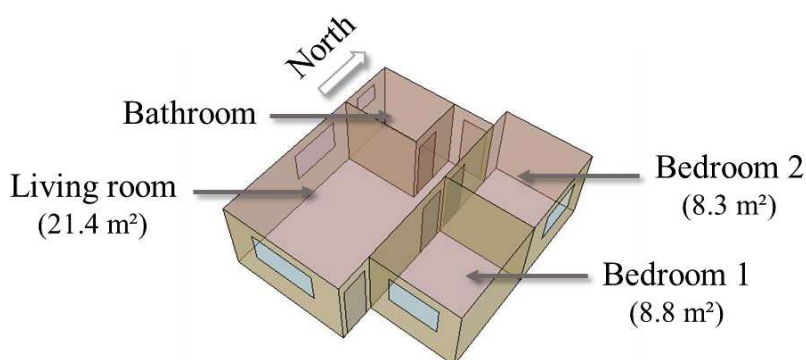


Fig. 12. Single-family house (adapted from Triana et al. (Triana; Lamberts; Sassi, 2015b)).

Building characteristics were according to reference building from the simulation procedure for evaluating the thermal performance of residential buildings, present on Brazilian Standard NBR 15575-1 (ABNT, 2021c). These characteristics include an envelope with high thermal inertia and medium absorptance, windows with clear and single glass, as Table 5 shows, a glazed area of 17% based on the floor area in each room of prolonged stay, and a ventilation factor equal to 45% of the glass area. These characteristics are the reference building from the Brazilian Standard for thermal performance evaluation (ABNT, 2021c).

Table 5. Thermal properties of constructive systems.

Constructive system	Thermal properties
Internal walls	Concrete
	U: 4.40 W/(m ² .K)
	TC: 220.00 kJ/(m ² .K)
	α : 0.50
External walls	Concrete
	U: 4.40 W/(m ² .K)
	TC: 220.00 kJ/(m ² .K)
	α : 0.58 external and 0.50 internal
Roof	Slab + air gap + fiber cement tiles
	U: 2.10 W/(m ² .K)
	TC: 233.00 kJ/(m ² .K)
	α : 0.65 tiles and 0.50 slab
Floor	Concrete
	U: 3.70 W/(m ² .K)
	TC: 220.00 kJ/(m ² .K)
	α : 0.50
Glass	Clear single glass
	U: 5.70 W/(m ² .K)
	SHGC: 0.87

U: thermal transmittance; TC: thermal capacity;
 α : solar absorptance; SHGC: solar heat gain coefficient.

Internal gains (e.g., lights, equipment, and people) are also from the Brazilian Standard NBR 15575-1. Regarding the occupancy pattern, it was considered that the living room was occupied by two people from 14h00 to 17h59, four people from 18h00 to 21h59, and two people in bedrooms from 22h00 to 07h59.

Three types of behaviors were considered concerning room climatization: Natural Ventilation (NV), Air Conditioner (AC), and Hybrid (HY). Natural Ventilation (NV) represents people who use natural ventilation to decrease indoor temperature and renew the indoor air. Air Conditioner (AC) was the behavior where rooms of prolonged stay were operated with an air conditioner to maintain room temperature at a determined value during the occupation. The last one, Hybrid (HY), was the behavior where people could choose between opening windows or turning on an air conditioner to regulate indoor temperature. Schedules for the living room and bedrooms were explained in Appendix A. Regarding bathroom operation, its window was considered open during all timestep simulations, and the door remained closed.

About climate, two Brazilian cities were considered: Belém, located in the North region of Brazil, and São Paulo, located in the Southeast region. The weather data applied was TMYx2007-2021 from Climate One Building (Crawley; Lawrie, 2024). Fig. 13 shows climate characteristics extracted from weather data for each city. The main contrast between these cities is the variation in temperature throughout the year. São Paulo has a warm summer and mild winter, while Belém has hot weather and temperatures that remain unchanged throughout the year.

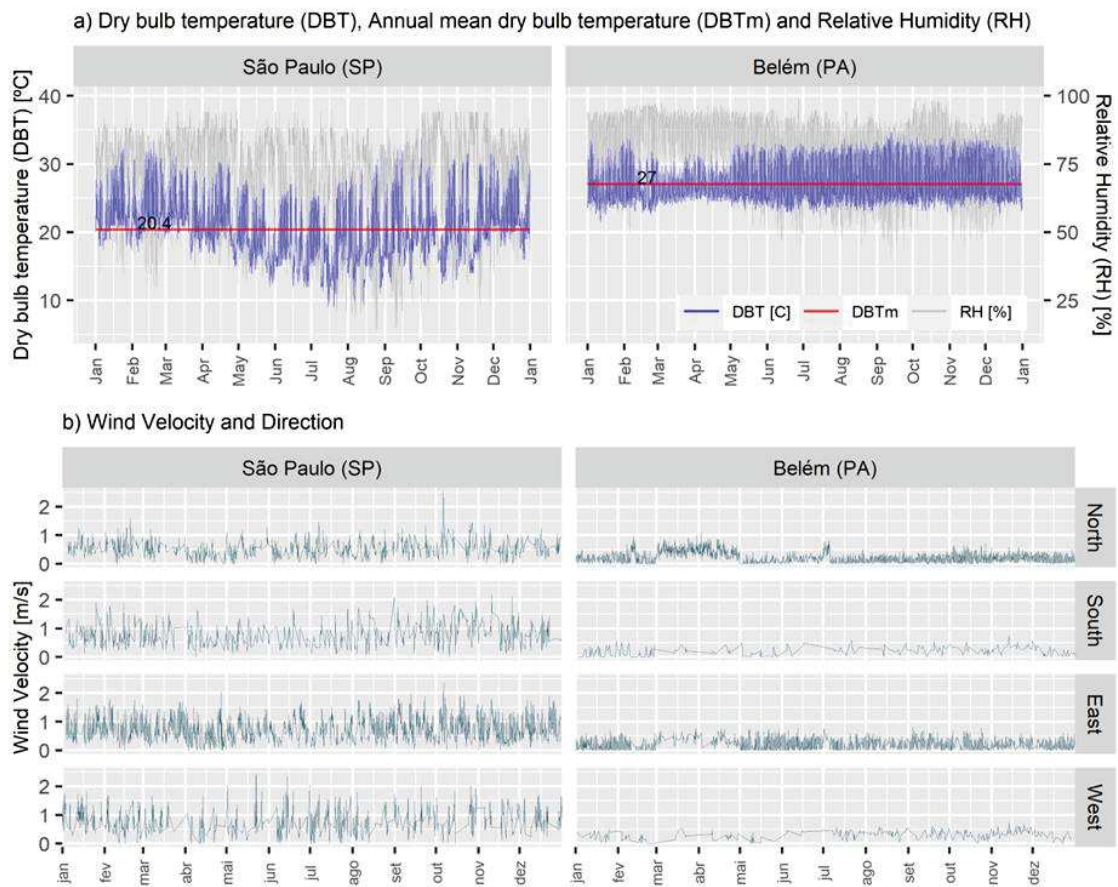


Fig. 13. Weather characteristics from TMYx2007-2021 weather data.

Table 6 presents the climate classification by ASHRAE 169 (ASHRAE, 2013b-), Köppen (Sentelhas *et al.*, 2014b), and NBR 15220-3 (ABNT, 2005c), a Brazilian standard that classifies cities into eight zones, where 1 is the coldest region, and 8 is the hottest region.

Table 6. Cities climate classification.

City	ASHRAE 169	Köppen	NBR 15220-3
Belém	0A – Extremely Hot and Humid	Af – Tropical zone without a dry season	8
São Paulo	2A – Hot Humid	Cfa – Humid subtropical zone with hot summer	3

3.1 Zone air heat balance

Convection is the heat exchange that governs air temperature in the indoor environment, so it directly affects thermal sensation and, consequently, the demand for air conditioning. Thus, in this study, convection is the heat transfer explored in zone air heat balance, considering only the sensible heat exchanges. Specific heat transfer, such as solar radiation and conduction, is investigated in the next step of this proposed framework.

3.1.5 Heat balance variables

EnergyPlus uses the heat balance to calculate air and surface temperature, influencing all simulation results, such as operative temperature and thermal load. It is possible to obtain each heat exchange as simulation output from a simulation on EnergyPlus (EnergyPlus, 2022b). Zone air heat balance considers heat removed or added from the air by surfaces, internal loads, airflow, and systems, as Equation (1) shows. In Equation (1), the plus signal (+) was related to gains and the minor (-) was related to losses. About the variables: q''_s represents the heat flow between surfaces and air, $q''_{NV,window}$ is heat exchange due to natural ventilation or crack infiltration from outdoor air, $q''_{NV,internal}$ is heat exchange due to natural ventilation or crack infiltration from adjacent zones air, $q''_{cooling}$ and $q''_{heating}$ is related to cooling (-) and heating (+) load from a mechanical system, and q''_{IG} is heat added to the air by internal gains (e.g., people, light, and equipment).

$$\sum (q''_{s,+} + q''_{s,-}) + (q''_{IG,+} + q''_{NV,window,+} + q''_{NV,window,-} + q''_{NV,internal,+} + q''_{NV,internal,-} + q''_{cooling,-} + q''_{heating,+}) = 0 \quad (1)$$

For zone air heat balance application, in this study, thermal equilibrium regarding Equation (1) was calculated considering annual and monthly periods, depending on the case analyzed.

3.1.6 Heat Exchanges Index

This study developed the Heat Exchanges Index (HEI) to understand the impact of each heat exchange on the total heat balance. HEI value could be between 0 and 1. In zone air heat balance, values closer to 0 means that the heat exchange has zero or lower impact on the total zone air heat balance, but values closer to 1 mean that the heat exchange has a higher impact.

The HEI calculation for zone air heat balance was done according to Equation (2) for gains and (3) for losses. In Equations, the x represents possible heat exchanges from each envelope surface, such as walls and floor, internal loads, and airflow or system. The $\sum q''$ represents the sum of all gains and losses in the air room during a period. All values are considered in the module, so negative values are summed as positive.

$$HEI_{x,+} = |q_{x,+}| / \sum |q''| \quad (2)$$

$$HEI_{x,-} = |q_{x,-}| / \sum |q''| \quad (3)$$

3.1.7 Illustrative case results

Fig. 14 shows the annual zone air heat balance HEI, considering the living room and bedroom 1 for São Paulo and Belém. Similar results were found for bedrooms 1 and 2, so discussions were focused on Bedroom 1.

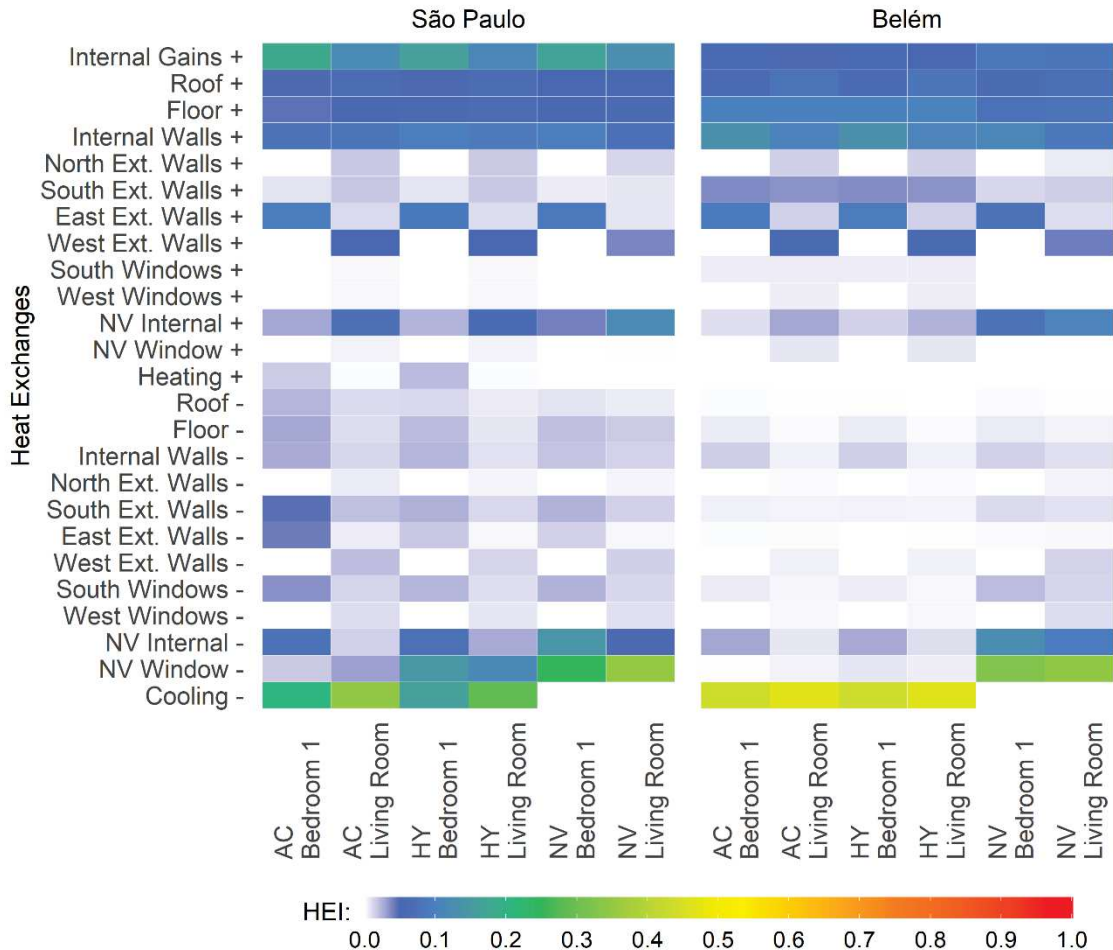


Fig. 14. Annual zone air heat balance. AC: Air Conditioner; HY: Hybrid; NV: Natural Ventilation.

Analyzing heat exchanges, both in Belém and São Paulo, the highest HEI was cooling load in AC and HY behaviors, and heat lost through natural ventilation by windows (NV Window -) in NV behavior. About window surfaces, it is possible to notice that their impact was lower than that of opaque surfaces, nearly zero in some cases. Since the window material was a single glass, its contribution to air heat balance was related to solar radiation entering the room and being absorbed by the interior envelope. However, a surface heat balance must be used to clarify this behavior. Correlating zone air heat balance with outdoor dry bulb temperature (DBT) and wind speed from weather data, it is feasible to notice that the potential of passive cooling through natural ventilation in Belém was low compared to São Paulo. In Belém, the annual mean outdoor dry bulb temperature (DBT_m) was 27.0 °C, and the mean wind speed was 1 m/s,

which reduces the cooling potential by natural ventilation. It results in a similar performance for AC and HY behaviors since, in the base case, the indoor operative temperatures were above 30 °C (T_{sup}) during most of the day, and a mechanical system was required to decrease temperatures during occupied hours. Meanwhile, in São Paulo, DBT_m was 20.4 °C, and the mean wind speed was 3.3 m/s, which benefits cooling by natural ventilation.

The warm climate in Belém resulted in more heat coming through the envelope than internal gains. In most cases, internal walls were the main heat gain, followed by floor, roof, and east and west external walls. However, in the living room with NV behavior, the airflow from bedrooms, represented by “NV Internal +”, added more heat into the air than envelope surfaces. For a warm climate, like Belém, this gain means that cross-ventilation removes heat from bedrooms, and airflow decreases indoor temperature. This effect could be the opposite in climates with considerable heating seasons since the heat gains come through internal gains, systems, and solar radiation absorbed by the envelope. Hence, HEI for loss by natural ventilation between spaces was also high in the bedroom with NV behavior. Regarding losses, in NV behavior, the heat was removed by natural ventilation, while in AC and HY behavior, the cooling loads were predominant. The predominance of cooling load was related to envelope performance. The indoor temperature stayed high even when the outdoor temperature decreased, making it difficult to heat remotion by natural ventilation.

In São Paulo, a city with a mild climate, the principal heat gain was internal gains, followed by internal walls, east and west external walls, and roof. In the living room, the roof added more heat to the air than the external walls, unlike the bedroom. Also, in the living room, but with NV behavior, the heat exchanges between spaces added more heat into the air than envelope surfaces. Regarding bedrooms, the heat addition by air conditioner was necessary when AC and HY behaviors were considered. About losses, the main HEI was from natural ventilation and cooling load, but the sequence varies according to behavior and room. For instance, the natural ventilation heat loss from windows and the cooling load were similar in the bedroom with HY behavior, but when the living room was analyzed, HEI for the cooling load was more than two times higher. The envelope also loses heat, especially in the bedroom. Insofar as the weather in São Paulo varies significantly during the year, with periods with outdoor air temperatures below 10 °C and above 30 °C, it is crucial to analyze envelope performance during hot and cold months. The envelope was losing heat in the annual zone air heat balance, so a monthly analysis makes it possible to understand if it was during the hot or cold period. Then, to complement the annual analysis, the monthly zone air heat balance for São Paulo is presented in Fig. 15.

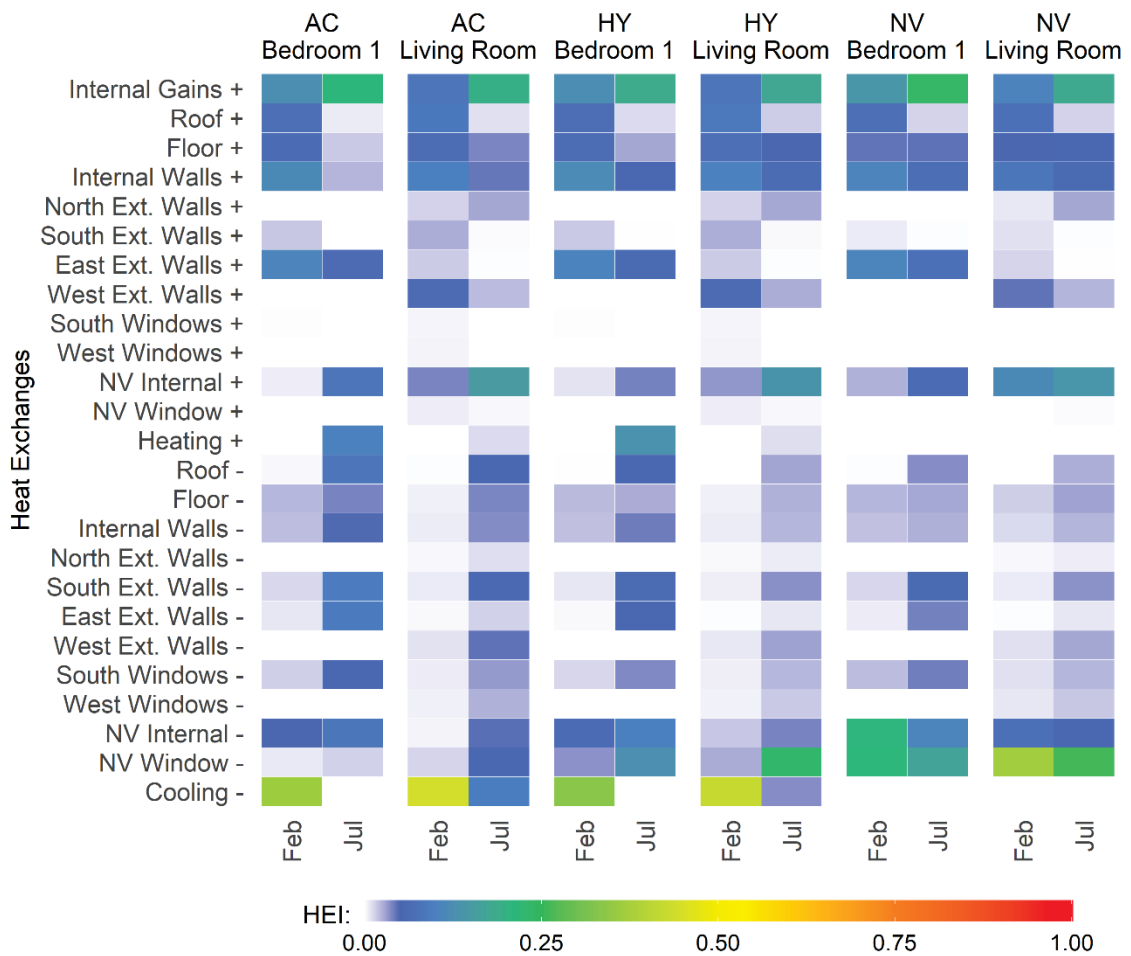


Fig. 15. Monthly zone air heat balance for São Paulo. AC: Air Conditioner; HY: Hybrid; NV: Natural Ventilation.

The monthly result shows how heat exchanges varied over the seasons. For instance, considering February, the hottest month, the main heat exchange was by natural ventilation and cooling, as well as what the annual zone air heat balance showed. In July, the coldest month, the principal HEI were internal gains, heating, and natural ventilation by windows. Considering only losses by envelope, in July, there were expressive losses by the roof, south, and east external walls, especially in rooms that required heating. For NV behavior, heat losses by envelope were similar in both months. However, as the weather is known, it was feasible to consider envelope changes regarding decreased heat loss since outdoor temperatures were below 10 °C during the winter. Nevertheless, on improvement analysis, a thermal indicator is necessary to complement heat balance determinations since, in naturally ventilated buildings, the thermal equilibrium could occur at any temperature, and only heat balance does not determine thermal performance.

3.2 Surface heat balance

Convection heat balance is a way to understand which building element is responsible for increasing or decreasing internal temperatures. However, some details still need to be clarified. Thus, selecting the principal opaque envelope heat exchanges in the zone air heat balance is necessary for an amplified surface analysis.

3.2.8 Heat balance variables

EnergyPlus provides outputs for each heat transfer on each opaque surface (walls, floor, roof, and doors), and the heat balance is attended when the sum of all heat exchanges on the surface is equal to zero, as Equation (4) shows. Equations consider the following: the plus signal (+) was related to gains, and the minor signal (-) was related to losses; about the variables: $q''_{convection}$ is the heat exchanges by convection between surface and the air, $q''_{conduction}$ is the heat exchanges by conduction between inside surface and constructive element core, $q''_{solar,rad}$ represents heat absorbed by surface from solar radiation that enters into the room by exterior windows, $q''_{surfaces,rad}$ is the heat exchanges by longwave radiation between surfaces, and $q''_{other,rad}$ is the sum of heat gain by shortwave radiation from electric lights and longwave radiation from internal sources.

$$q''_{convection,-} + q''_{convection,+} + q''_{conduction,-} + q''_{conduction,+} + q''_{solar,rad,+} + q''_{surfaces,rad,-} + q''_{surfaces,rad,+} + q''_{other,rad,+} = 0 \quad (4)$$

3.2.9 Heat Exchanges Index

Heat Exchanges Index (HEI) for surface heat balance was developed with the same proposes as zone air heat balance. The HEI calculation is according to Equations (5), where the y in HEI_y and q''_y represents one of the possible heat transfers that occur on the opaque surface. The q''_y was the heat transfer for the opaque surface and $q_{y,transfer}$ was the sum of all heat transfer that happens on the opaque surface. HEI values closer to 0 indicate that the heat transfer has a lower impact than the heat transfer closer to 1. In this analysis, each surface is investigated individually. All values are considered in the module, so negative values are summed as positive.

$$HEI_y = \frac{|q''_y|}{\sum |q_{y,transfer}|} \quad (5)$$

In this proposed framework, surface heat balance considers only the highest HEI values for gain or loss for opaque surfaces in zone air heat balance. The median HEI value was calculated

to select surfaces, assuming only the HEI for opaque envelope surfaces. Afterward, values of HEI that are highest or equal to the median were selected for surface heat balance analysis, considering each room.

3.2.10 Illustrative case result

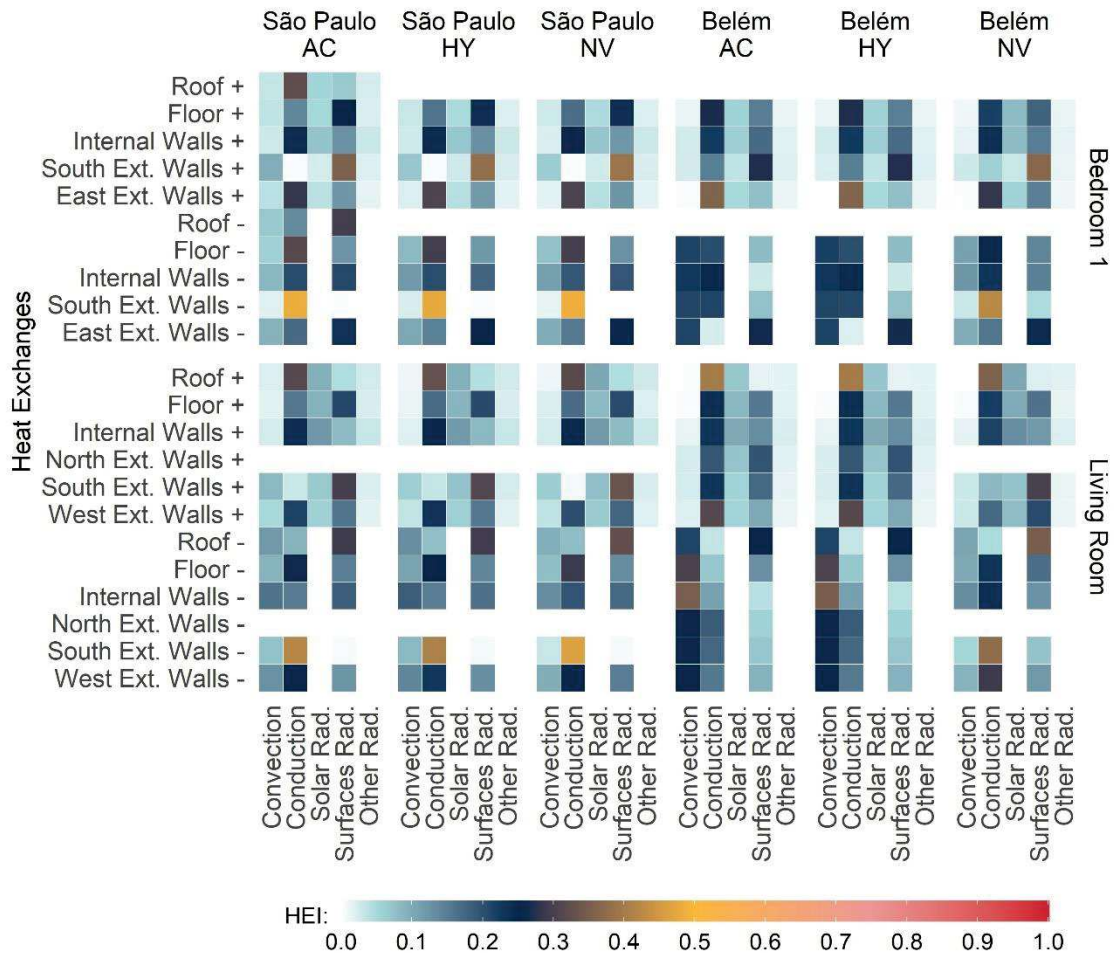


Fig. 16 presents results for the annual surface heat balance considering the HEI median values for the envelope in the zone air heat balance. In surface heat balance, positive values mean heat was transferred to the inner surface, and negative values mean heat was removed. For instance, a negative convection indicates heat was removed from the surface and added to the air, a negative conduction means heat was transferred from the inside surface to the constructive element core, and a negative radiation implies inside surface emitted radiation. Regarding glazing surfaces, the impact of windows was not shown directly since the surface heat balance is related to the opaque envelope. However, this effect could be investigated by analyzing solar radiation that enters the room and is absorbed by opaque surfaces.

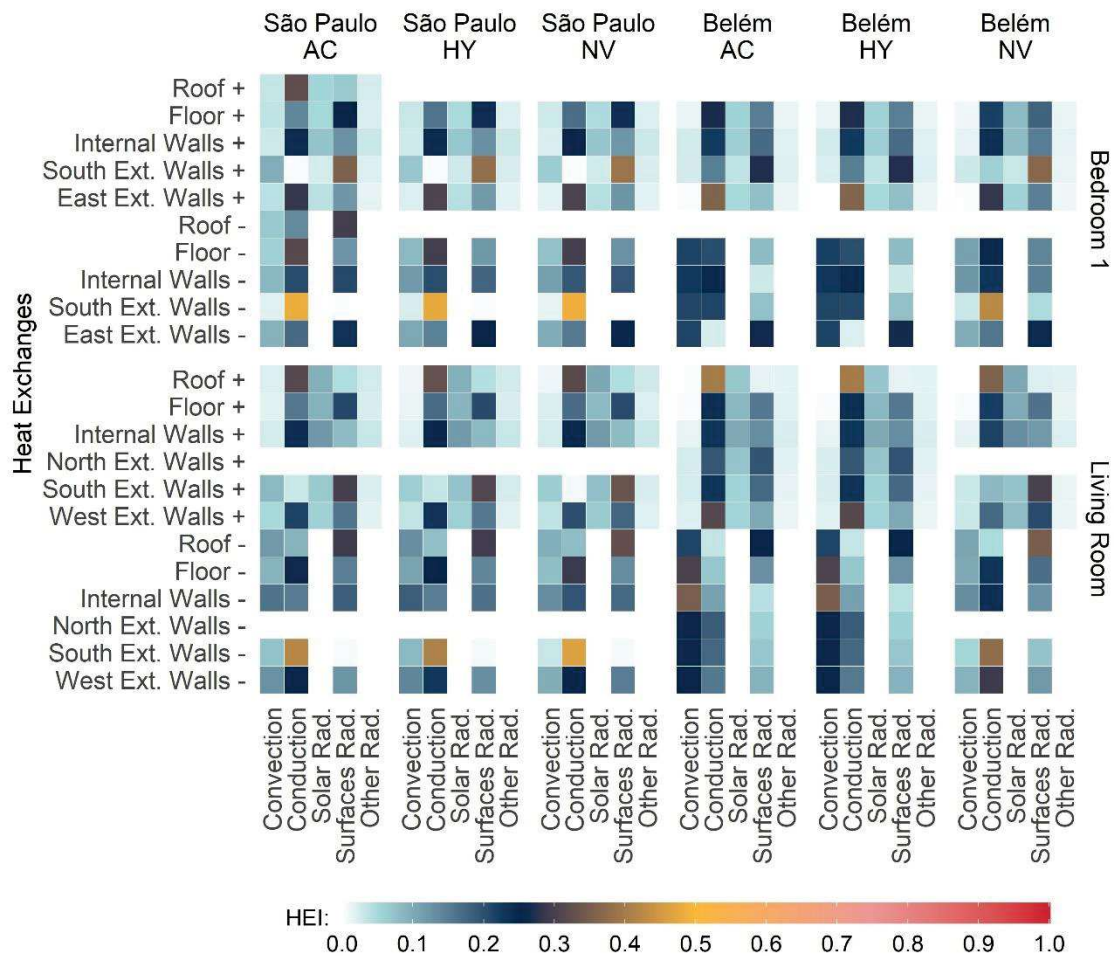


Fig. 16. Annual surface heat balance.

Annual surface heat balance results show that Belém AC and HY behaviors continued with similar values, such as for zone air heat balance. In these behaviors, the principal heat addition to the inside surface was by conduction in most cases, but for losses, the main HEI was convection. The difference between indoor air and surface temperature was the cause of heat removal by convection from surfaces. Thus, since the air conditioner operated at 23 °C in AC and HY behaviors, the system removed heat from the air until the surface and air reached equilibrium. Then, this operation forced the heat exchanges in surfaces by convection since its temperature was higher than the air temperature. The highest HEI for gains for NV behavior was conduction and radiation from other surfaces. For losses, the heat was transferred to the core by conduction, and radiation was emitted to other surfaces.

For São Paulo, heat exchanges were similar between behaviors. In this city, the heat balance for the south external walls showed that this surface lost heat by conduction, but it was not one of the primary heat gains. However, heat exchanges were different for other external walls. For example, the west external wall in the living room transferred more heat to the inside surface

by conduction while also removing more heat by conduction. For the roof, the highest heat addition to the inside surface was by conduction, and the highest removal was by radiation emitted to other surfaces. Then, for zone air heat balance, it was necessary to analyze the monthly surface heat balance presented in Fig. 17 for February and July.

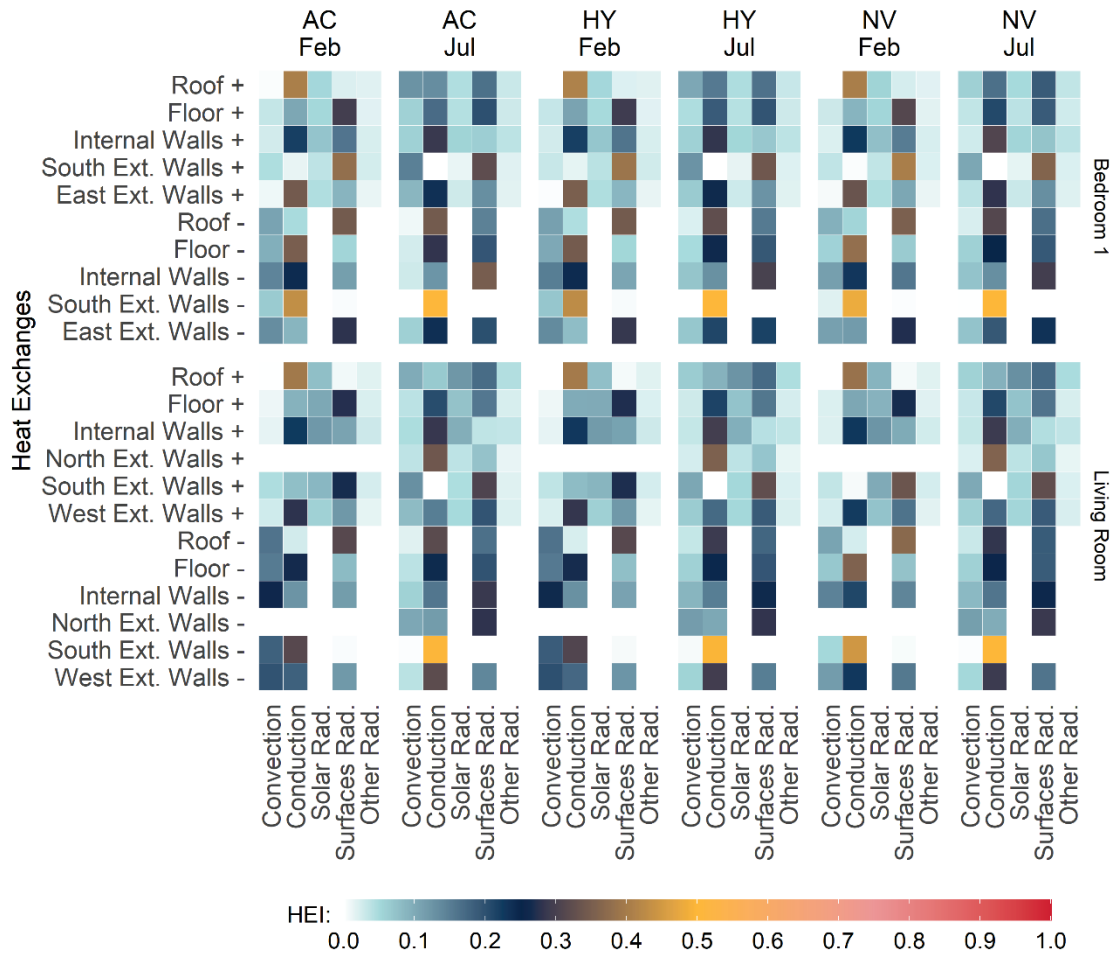


Fig. 17. Monthly surface heat balance for São Paulo.

The heat exchanges for AC and HY behavior were similar, and between HY and NV, the main difference was regarding loss by convection in the living room during summer. Likewise, to Belém, the convection was more expressive in HY behavior than in NV. Analyzing heat exchanges in July, the heat lost by conduction is higher in the bedroom, and it was the cause of heating load necessity when the operative temperature decreased below 18 °C. The heating load was unnecessary in the living room, but heat lost by conduction was also expressive, especially in the roof. However, the living room was occupied during daytime hours when the outdoor temperature was higher. During February, gains by conduction were significant in both rooms.

3.3 Strategies definition and application

The improvement strategies were defined considering the principal heat exchanges in zone air and surface heat balance. The principal strategies were defined by considering the median for HEI values for each room, gain, and loss. Opaque envelope exchanges and the window exchange were summed. Then, HEI values higher or equal to the median were considered the principal exchanges.

3.3.11 Improvement definitions

In this study, building modifications were adopted in the points mentioned in Fig. 18. It is worth noting that the points mentioned in Fig. 18 considered results from the previous steps. For other cases and weather conditions, the HEI values could be different and demand different thermal performance improvements.

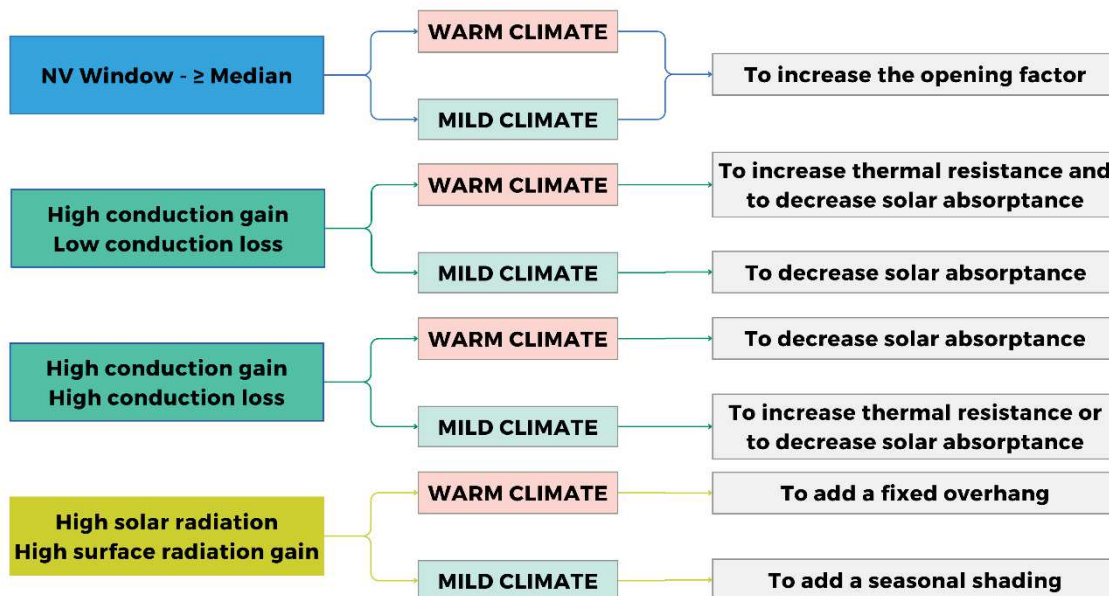


Fig. 18. Strategies definitions.

For the illustrative case study adopted in this work, the main HEI values were related to exchanges shown in Fig. 8. Thus, the heat removal by natural ventilation was enhanced by increasing the window opening factor. Since conduction is related to constructive systems applied on the envelope, strategies were defined, considering the necessity of increasing or decreasing heat transfer. Surface and solar radiation exchanges are related to solar gains, so shading devices were applied. These strategies were defined considering the constructive solutions for Brazil, climate, and which is a low-income building typology. For other buildings

and boundary conditions, other modifications could be desirable to improve the thermal performance of the building.

3.3.12 Illustrative case result

The thermal performance of buildings is dynamic, and each case requires a particular improvement. The social and economic aspects must be considered when defining a strategy. Therefore, since the illustrative case adopted in this study is a reference building for the Brazilian low-income household, the strategy definition considered what is feasible for this economic range and country.

From the zone air heat balance, it was noticeable that a cooling load was essential to remove heat in both cities. However, in São Paulo, when HY behavior was applied, natural ventilation also removed heat from indoor air and decreased cooling load demand. The HEI for cooling was 0.16, followed by natural ventilation from windows with an HEI of 0.14, higher than the median. This performance shows the importance of improving heat exchanges by natural ventilation. Thus, one of the strategies applied in the improvement phase was to increase openable window areas where the NV Window - HEI was higher than the median, such as HY and NV behavior in São Paulo and NV in Belém.

In warm weather, such as Belém, whether surfaces assist in heat losses could be helpful. Hence, a strategy assumed in Belém is to reduce external wall absorptance without changing system transmittance or thermal capacity. The roof was the principal heat gain in hot periods since this surface received heat by conduction while emitting radiation to other surfaces, and a minor part was lost by convection. Then, a strategy adopted in the roof was to reduce the solar absorptance of tiles and apply thermal insulation on the slab. No strategy was adopted for internal walls and floor since the surface heat balance showed that the principal gain was for conduction, representing an exchange between an adjacent room or soil. For example, considering cases with NV behavior in Belém, while the floor and internal walls gained heat by conduction, these surfaces lost heat by the same transfer, which must be positive during the year. Another point is that this behavior also resulted from solar and surface radiation that added heat to the floor and internal walls. Solar shading was applied to reduce this heat transfer and decrease heat addition since internal walls and floors absorb radiation.

In São Paulo, the HEI for conduction was higher for external walls and roof. Then, a strategy related to thermal insulation could be applied to those surfaces. Regarding solar absorptance, there was no need to change the absorptance of tiles since, during winter, the heat gain by the roof is essential for increasing the indoor temperature. However, solar absorptance was reduced

in the living room for external walls since this room was occupied during the day when exterior surfaces received more solar radiation. Concerning heat gain by radiation, this gain could improve thermal performance during winter. Then, only a seasonal shading was applied.

Fig. 19 presents the principal heat exchange and strategies analyzed in the illustrative case study in the improvement phase. All the strategies were adopted together in the improved case to summarize the strategies adopted.

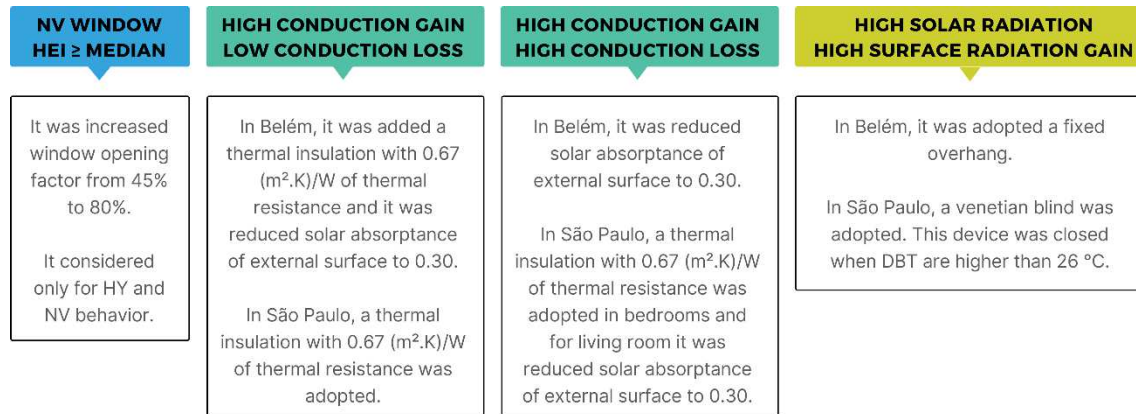


Fig. 19. The leading heat gains and losses and strategies adopted in the improvement phase.

3.4 Thermal performance evaluation

This step seeks to validate whether the definitions implemented in the improved case enhanced its thermal performance. Then, any indicator related to thermal performance could be considered.

3.4.13 Thermal performance indicators

In this study, three indicators from the Brazilian Standard [16,41] were considered to assess thermal performance and validate heat balance assumptions. The maximum and minimum annual operative temperature (Tomax and Tomin, respectively), the percentage of occupied hours within an acceptable temperature range (PHFT), which is named "Thermal Autonomy" in this paper, and cooling and heating loads (CgTR and CgTA, respectively), were called Cooling Load and Heating Load in this paper.

Tomax and Tomin were obtained only for cases with NV behavior since these indicators define the highest and lowest operative temperatures in rooms during occupied hours with free-running mode. Thermal Autonomy describes the number of hours in which the room was occupied, and natural ventilation was sufficient to maintain the operative temperature in a range suitable for thermal performance. Equation (7) is used for Thermal Autonomy (TA) calculation.

$$TA = \left(N_{occ;range} / N_{occ;tot} \right) \cdot 100 \quad \text{Equation (7)}$$

$N_{occ,tot}$ is the total number of hours a room is occupied throughout the year and N_{occ} . The range is the total number of hours a room is occupied throughout the year, and the operative temperature remains within a predetermined range based on the city's annual mean dry bulb outdoor temperature (DBT_m). The operative temperature range for Thermal Autonomy is T_{sup} for the superior limit and T_{inf} for the inferior limit. These T_{sup} and T_{inf} are determined according to the DBT_m of the city weather data. Therefore, T_{sup} was 26 °C and 30 °C for São Paulo and Belém, respectively, and T_{inf} was 18 °C only for São Paulo. Tomax, Tomin, and Thermal Autonomy were used as thermal performance indicators in all cases, but for HY and AC behaviors, when the thermal load is on, the $N_{occ;range}$ is zero. Cooling and Heating Load is accounted for only in Air Conditioner or Hybrid cases. Cooling Load starts to be considered when the operative temperature is higher or equal to T_{sup} , and Heating Load when the operative temperature is lower or equal to T_{inf} .

3.4.14 Illustrative case result

The improved case results were presented in Table 7 for São Paulo and Table 8 for Belém. All the strategies mentioned in Fig. 19 were adopted together in the improved case. Results showed that it was achievable to improve thermal performance in all cases, and strategies adopted in Belém showed better thermal performance than in São Paulo. Considering requirements for thermal performance levels from the Brazilian standard, in Belém, the three behaviors attended to a superior level of thermal performance, while in São Paulo, only NV behavior was superior, HY and AC were intermediary levels.

Table 7. Improvement phase results for São Paulo.

		Living Room		Bedroom 1	
		Base	Improved	Base	Improved
NV	Tomax [°C]	33.5	29.9	30.9	28.7
	Tomin [°C]	16.9	17.1	15.0	16.6
	Thermal Autonomy [%]	56.9	80.5	84.1	95.7
HY	Thermal Autonomy [%]	42.1	66.3	61.9	80.2
	Cooling Load [kWh/year]	27920.3	12303.9	5437.6	2960.0
	Cooling Load [kWh/year.m ²]	1304.7	574.9	617.9	336.4
	Heating Load [kWh/year]	89.5	153.4	646.4	122.5
	Heating Load [kWh/year.m ²]	4.2	7.2	73.5	13.9
AC	Thermal Autonomy [%]	31.6	54.0	59.4	72.1
	Cooling Load [kWh/year]	31463.8	16624.4	5831.3	4172.6
	Cooling Load [kWh/year.m ²]	1470.3	776.8	662.6	474.2

Heating Load [kWh/year]	84.1	51.5	405.9	26.0
Heating Load [kWh/year.m ²]	3.9	2.4	46.1	3.0

Table 8. Improvement phase results for Belém.

		Living Room		Bedroom 1	
		Base	Improved	Base	Improved
NV	Tomax [°C]	38.3	32.5	34.5	30.7
	Thermal Autonomy [%]	2.50	55.00	30.00	84.50
HY	Thermal Autonomy [%]	1.70	38.70	11.80	99.70
	Cooling Load [kWh/year]	102285	43517.9	32587.5	88.6
	Cooling Load [kWh/year.m ²]	4779.7	2033.5	3703.1	10.1
AC	Thermal Autonomy [%]	0.5	25.3	11.8	95.7
	Cooling Load [kWh/year]	104518.3	55367.5	32221.3	1356.4
	Cooling Load [kWh/year.m ²]	4884.0	2587.3	3661.5	154.1

Tomax decreased 2.2 °C to 5.8 °C, and Tomin increased 0.2 °C to 1.6 °C. Thermal Autonomy also increased. For instance, in São Paulo with NV behavior, Thermal Autonomy was 56.9% for the living room in the base case, and after envelope improvements, it enhanced to 80.5%. In Belém, Thermal Autonomy was 2.5% for the base case with the same behavior, but it increased by 55.0% after envelope modifications. For bedrooms, in Belém, the enhancement was even more expressive since Thermal Autonomy was 30% in the base case and improved was 84.5%. For São Paulo, the same strategies were adopted for HY and VN cases, but the Thermal Autonomy for the NV case was higher than HY. Thermal Autonomy is accounted for only during hours without operating an air conditioner. Thus, when the air conditioner starts to work in AC and HY behavior, the system only stops when the occupation is zero. So, windows do not open even when the outdoor temperature decreases, and natural ventilation can be used to reduce the indoor temperature. A strategy that reduces the heat gain during uncopied and initial occupied hours could be adopted to increase the number of hours without the air conditioner.

Analyzing the Heating Load, only the living room for HY behavior increases heating needs. The other cases reduced 38.8% to 93.6%. The Cooling Load reduction was more expressive in Belém than in São Paulo, but in both cities, the cooling reduction was 45.6% to 99.7%. Regarding cooling values, when comparing results for HY and AC behaviors, it was possible to notice how natural ventilation reduces cooling necessities. For instance, in São Paulo, the Cooling Load was 12303.9 kWh/year for the improved case living room with HY behavior, while for AC behavior, this value was 25% higher. In the same case in Belém, the Cooling Load for HY behavior was 43517.9 kWh/year, 21% lower than for AC behavior.

Regarding thermal load, cities considered in this study do not include winter temperatures that require heating load during long periods to maintain indoor temperatures higher than 18 °C (T_{inf}). This weather condition is the cause of the disproportionate values for cooling and heating loads in São Paulo and zero heating loads for Belém. This result is feasible for locations such as Brazil, where even in cities with cold seasons, it is not common for people to use heating systems (Ramos *et al.*, 2020b).

4 Conclusion

Studying how to improve the thermal performance of buildings is essential for ensuring thermal comfort for people in their homes and reducing energy needs to acclimatize spaces. Research studies analyzed how to achieve satisfactory indoor building temperatures and reduce thermal loads. However, many optimization methods require high computational costs, such as efficient computers, programming knowledge and high runtime, reducing their applicability for designers. Furthermore, buildings sometimes demand specific thermal performance improvements, without focusing on the optimal cases. Considering this, this study proposed a novel framework to improve the thermal performance of buildings based on zone air and surface heat balance from building performance simulation (BPS) programs. Heat Exchange Index (HEI) was developed to define the principal heat exchanges and which strategies will be applied to enhance thermal performance. Intent to show the application of the proposed framework, an illustrative case study was conducted considering a single-family house with variations in user behavior and climate. Results showed a significant improvement in the thermal performance of the study case. For instance, considering the Hybrid user, the cooling load reduction for bedroom 1 in São Paulo was 45.56%, and in Belém, it was 99.7%. Regarding thermal Autonomy, considering the Natural Ventilation user behavior in Belém, values went from 30.0% to 84.5% for bedroom 1. Then, the HEI method proved to be applicable to enhance the thermal performance of buildings. The framework was shown to be applied in studies to improve the thermal performance of buildings. However, it is worth mentioning that the case study adopted in this work has its particularities and the weather adopted. Therefore, other building typologies and climate conditions must be analyzed for future studies.

The proposed framework based on the Heat Exchange Index is a low computational cost method to improve the thermal performance of buildings. However, since the framework is based on a building performance simulation program, its applicability depends on the program used. For example, outputs provided by EnergyPlus version 22.2 could be different from other latest versions. Another limitation relates to previous knowledge about building physics and the

climate conditions to define the right strategies. Then, as a future study, a tool will be developed to further framework usability and facilitate applications for designers and researchers.

Acknowledgements

This work was supported by the Brazilian Federal Agency for the Support and Evaluation of Graduate Education (CAPES), Financing Code 001; and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq). However, the funding source was not involved in this work.

5 References

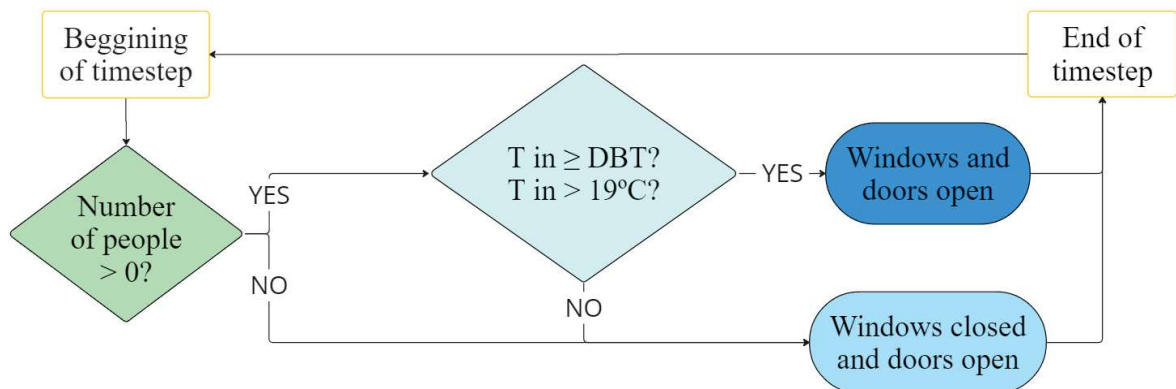
- [1] J.D., Spitler, Thermal load and energy performance prediction, in: J.L.M. Hensen, R. Lamberts (Eds), *Building Performance Simulation for design and operation*, second ed., Routledge, 2019, pp 13-75.
- [2] G. Ramos, R. Lamberts, K. Abrahão, F.B. Bandeira, C. Barbosa Teixeira, M. de Lima, E.E. Broday, A. Castro, L. de Queiroz Leal, R. De Vecchi, L. De Zorzi, K. Dornelles, S. Duarte, R. Faisca, M. Fontenelle, T. Freitas, C. Gregorio Atem, G. Grigoletti, L. Maciel, C. Moraes, C. Mueller, T. Sartori, B. Silva, C. Silva, M. Silva, A.L. Silveira, R. Souza, A. Xavier, Adaptive behaviour and air conditioning use in Brazilian residential buildings, *Building Research & Information* (2020) 1–16. <https://doi.org/10.1080/09613218.2020.1804314>.
- [3] M.A. Triana, R. Lamberts, P. Sassi, Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures, *Energy Build* 158 (2018) 1379–1392. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.003>.
- [4] M.A. Triana, R.M. e Silva Machado, A. Martins Kamimura, M. Körbes Bracht, A.P. Melo, R. Lamberts, Energy efficiency strategies for Brazilian social housing considering a life cycle perspective: Optimisation between thermal autonomy, energy consumption and costs, *Energy Build* 295 (2023) 113254. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.113254>.
- [5] M.J. Sorgato, A.P. Melo, R. Lamberts, The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption, *Energy Build* 133 (2016) 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.059>.
- [6] J. Ran, K. Xiong, M. Dou, H. Zhong, Y. Feng, M. Tang, Z. Yang, Effect of Window Openable Area and Shading on Indoor Thermal Comfort and Energy Efficiency in Residential Buildings with Various Operating Modes, *Atmosphere (Basel)* 13 (2022) 2020. <https://doi.org/10.3390/atmos13122020>.
- [7] S. Gou, V.M. Nik, J.L. Scartezzini, Q. Zhao, Z. Li, Passive design optimization of newly-built residential buildings in Shanghai for improving indoor thermal comfort while reducing building energy demand, *Energy Build* 169 (2018) 484–506. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.095>.
- [8] L.G. Eli, A.F. Krelling, M.S. Olinger, A.P. Melo, R. Lamberts, Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context, *Energy Build* 244 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111047>.
- [9] ABNT – Brazilian National Standards Organization, NBR 15575 – Residential Buildings – Performance, 2021. Brazil, <https://www.abntcatalogo.com.br>.
- [10] E.L.S. Gonçalves, J.L. Braga, A. de O. Sampaio, V. dos S. Batista, L.J. da R. Menezes, L.G. Eli, M.S. Barata, R. da S. Ventura Neto, B.R. Zemer, Multiscale modeling to

- optimize thermal performance design for urban social housing: A case study, *Appl Therm Eng* 236 (2024) 121379. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121379>.
- [11] Y. Bichiou, M. Krarti, Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings, *Energy Build* 43 (2011) 3373–3382. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.031>.
- [12] D. Gossard, B. Lartigue, F. Thellier, Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network, *Energy Build* 67 (2013) 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.026>.
- [13] Y. Liu, Y. Gao, C. Zhuang, D. Shi, Y. Xu, J. Guan, Y. Di, Optimization of top-floor rooms coupling cool roofs, natural ventilation and solar shading for residential buildings in hot-summer and warm-winter zones, *Journal of Building Engineering* 66 (2023) 105933. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105933>.
- [14] T.L. Hemsath, K. Alagheband Bandhosseini, Sensitivity analysis evaluating basic building geometry's effect on energy use, *Renew Energy* 76 (2015) 526–538. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.044>.
- [15] X. Chen, H. Yang, Sensitivity analysis and optimization of a typical passively designed residential building with hybrid ventilation in hot and humid climates, *Energy Procedia* 142 (2017) 1781–1786. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.12.563>.
- [16] X. Chen, H. Yang, K. Sun, Developing a meta-model for sensitivity analyses and prediction of building performance for passively designed high-rise residential buildings, *Appl Energy* 194 (2017) 422–439. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.180>.
- [17] I. Gaetani, P.J. Hoes, J.L.M. Hensen, Estimating the influence of occupant behavior on building heating and cooling energy in one simulation run, *Appl Energy* 223 (2018) 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.108>.
- [18] J.M. Zambrano, I. Gaetani, U.F. Oberegger, G. Salvalai, Advancing and demonstrating the Impact Indices method to screen the sensitivity of building energy use to occupant behaviour, *Build Simul* 16 (2023) 1257–1272. <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1004-6>.
- [19] DOE – United States Department of Energy, EnergyPlus 22.2.0, (2023). <https://github.com/NREL/EnergyPlus/releases/tag/v22.2.0> (accessed April 23, 2023).
- [20] A. Ustaoglu, K. Kurtoglu, A. Yaras, A comparative study of thermal and fuel performance of an energy-efficient building in different climate regions of Turkey, *Sustain Cities Soc* 59 (2020) 102163. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102163>.
- [21] ISO – International Organization for Standardization 52016-1:2017 - Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Part 1: Calculation procedures, 2017. <https://www.iso.org/standard/65696.html> (accessed December 20, 2021).
- [22] I. Ballarini, A. Costantino, E. Fabrizio, V. Corrado, A Methodology to Investigate the Deviations between Simple and Detailed Dynamic Methods for the Building Energy Performance Assessment, *Energies (Basel)* 13 (2020) 6217. <https://doi.org/10.3390/en13236217>.
- [23] G. De Luca, F. Bianco Mauthe Degerfeld, I. Ballarini, V. Corrado, Accuracy of Simplified Modelling Assumptions on External and Internal Driving Forces in the Building Energy Performance Simulation, *Energies (Basel)* 14 (2021) 6841. <https://doi.org/10.3390/EN14206841>.
- [24] I. Ballarini, A. Costantino, E. Fabrizio, V. Corrado, The dynamic model of EN ISO 52016-1 for the energy assessment of buildings compared to simplified and detailed simulation methods, in: *Building Simulation Conference Proceedings*, International Building Performance Simulation Association, 2019: pp. 3847–3854. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210431>.

- [25] G. De Luca, F. Bianco Mauthe Degerfeld, I. Ballarini, V. Corrado, Improvements of simplified hourly models for the energy assessment of buildings: The application of EN ISO 52016 in Italy, *Energy Reports* 8 (2022) 7349–7359. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.120>.
- [26] EPB Center – Energy Performance of a Building Center, Report on Case Study to EN 16798-7 Natural Ventilation, 2021. https://epb.center/media/documents/EPB-Center-Case_Study_EN_16798-7_natural_ventilation_Report_2021-10-31.pdf.
- [27] X. Luo, T. Hong, Y.H. Tang, Modeling Thermal Interactions between Buildings in an Urban Context, *Energies* 2020, Vol. 13, Page 2382 13 (2020) 2382. <https://doi.org/10.3390/EN13092382>.
- [28] A.P. Melo, R. Lamberts, R. de S. Versage, Y. Zhang, IS THERMAL INSULATION ALWAYS BENEFICIAL IN HOT CLIMATE?, in: Building Simulation Conference, Hyderabad, India, 2015: pp. 1353–1360.
- [29] I. Ballarini, V. Corrado, Analysis of the building energy balance to investigate the effect of thermal insulation in summer conditions, *Energy Build* 52 (2012) 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.004>.
- [30] M. Dabaieh, O. Wanas, M.A. Hegazy, E. Johansson, Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings, *Energy Build* 89 (2015) 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.034>.
- [31] B.F. Balvedi, E. Ghisi, R. Lamberts, A review of occupant behaviour in residential buildings, *Energy Build* 174 (2018) 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.049>.
- [32] M.A. Triana, R. Lamberts, P. Sassi, Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance, *Energy Policy* 87 (2015) 524–541. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.041>.
- [33] D. Crawley, L. Lawrie, Repository of free climate data for building performance simulation: Brazil, Region 3 - South America, (2023). https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html (accessed April 2, 2024).
- [34] ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineering, ANSI/ASHRAE 169-2013 Climatic data for building design standards, 2013.
- [35] P.C. Sentelhas, C.A. Alvares, J.L. Stape, G. Sparovek, J.L. de Moraes Gonçalves, Köppen's climate classification map for Brazil, *Meteorologische Zeitschrift* 22 (2014) 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- [36] ABNT – Brazilian National Standards Organization, NBR 15220-3 – Thermal performance in buildings Part 3: Brazilian bioclimatic zones and building guidelines for low-cost houses, Brazil, 2005. <https://www.abntcatalogo.com.br>.
- [37] DOE – United States Department of Energy, Input Output Reference - EnergyPlus Version 22.2.0 Documentation, 2022. https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.2.0/InputOutputReference.pdf (accessed January 11, 2023).

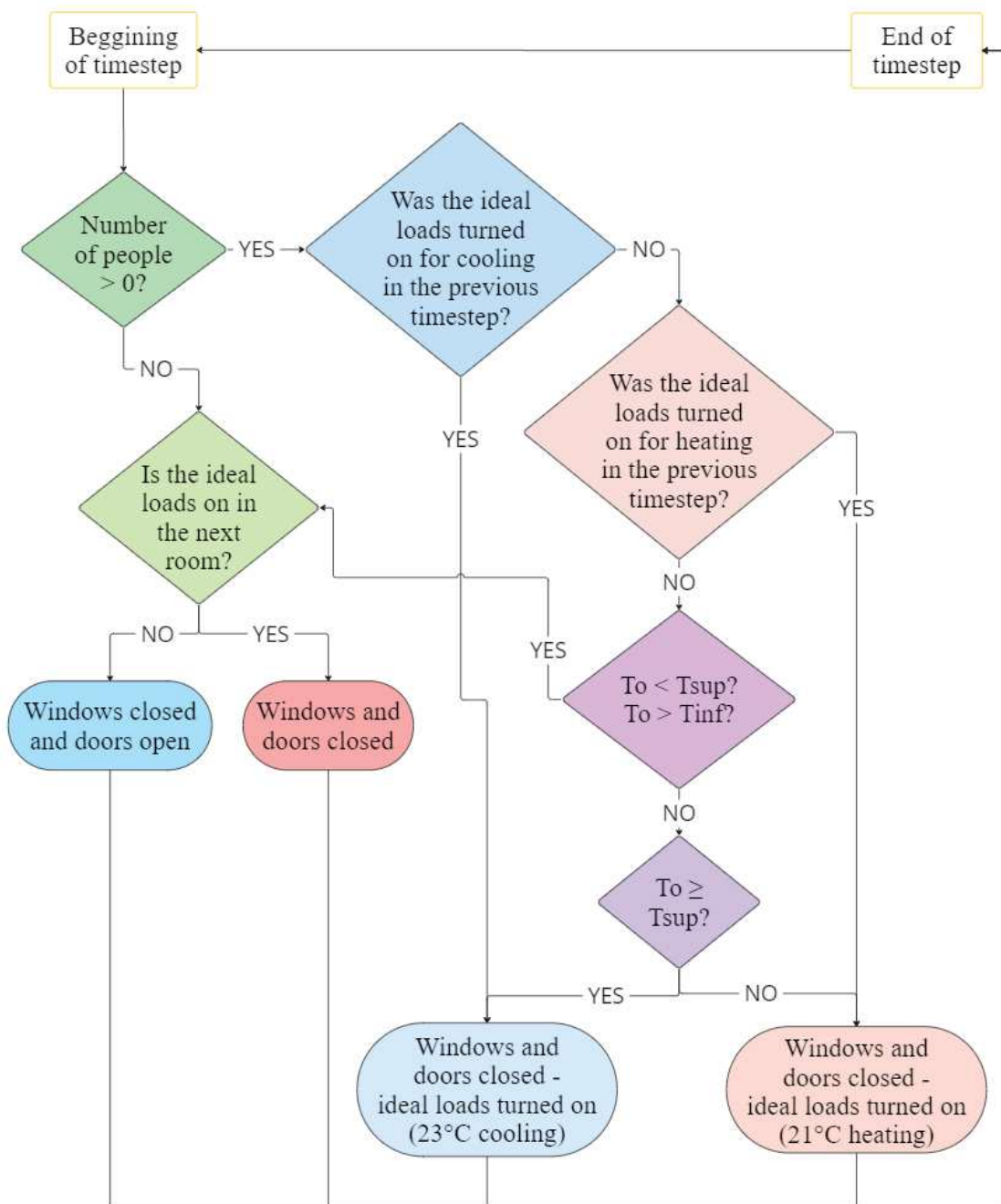
Appendix A

The user behaviors used in this work were adapted from the simulation procedure for evaluating the thermal performance of residential buildings in the Brazilian Standard NBR 15575-1:2021 (ABNT, 2021c). The assumptions about range temperatures for turning on the air conditioner and opening the windows were also from the Brazilian Standard NBR 15575-1:2021.



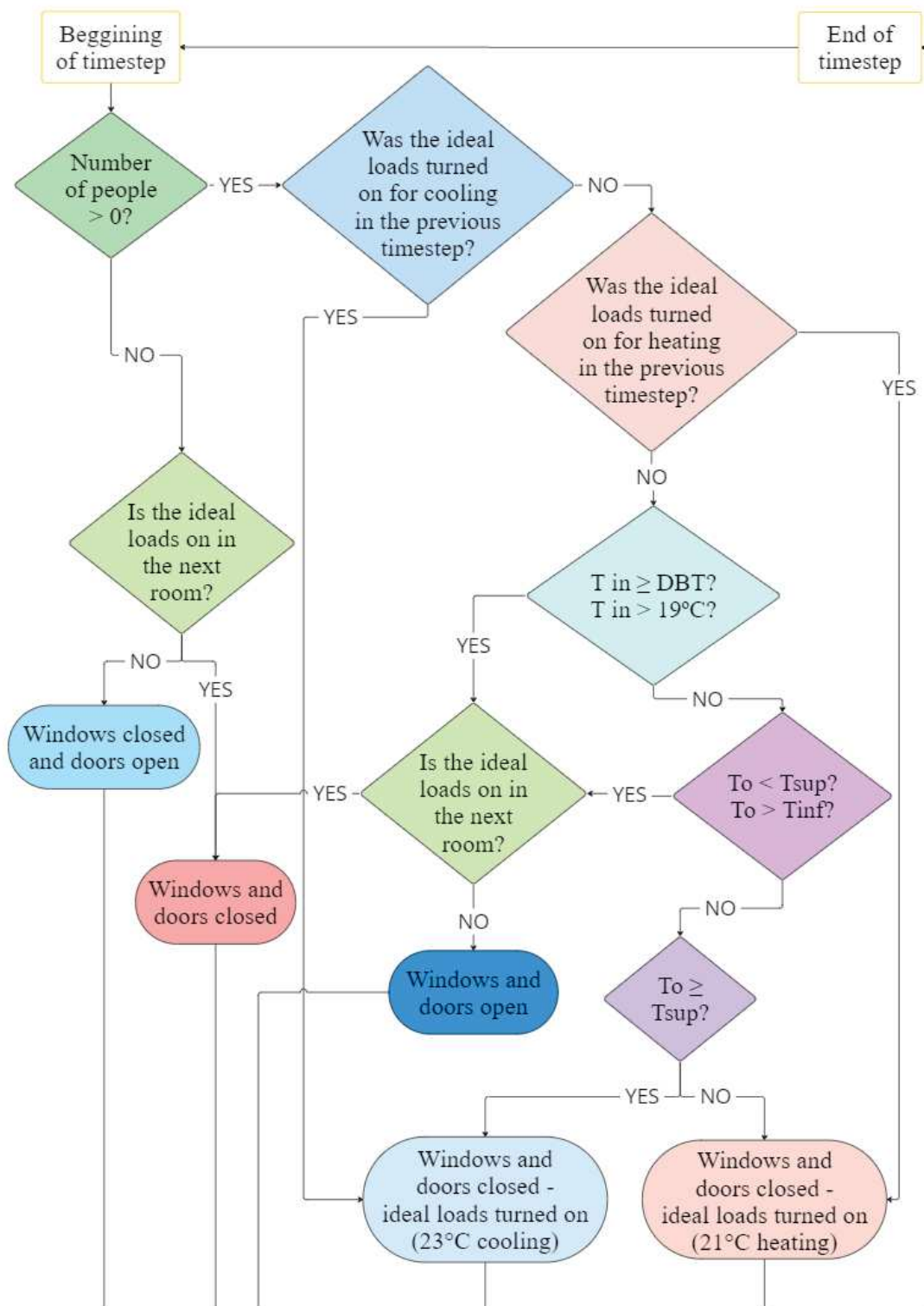
T_{in}: Indoor Air Temperature; **DBT**: Outdoor Dry Bulb Temperature.

Fig. A.1. Operation flowchart for Natural Ventilation (NV) user behavior, considering bedrooms and living room.



T_{in}: Indoor Air Temperature; **DBT**: Outdoor Dry Bulb Temperature;
T_o: Indoor Operative Temperature; **T_{sup}**: Superior Operative Temperature;
T_{inf}: Inferior Operative Temperature

Fig. A.2. Operation flowchart for Air Conditioner (AC) user behavior, considering bedrooms and living room.



T_{in}: Indoor Air Temperature; **DBT**: Outdoor Dry Bulb Temperature;
T_o: Indoor Operative Temperature; **T_{sup}**: Superior Operative Temperature;
T_{inf}: Inferior Operative Temperature

Fig. A.3. Operation flowchart for Hybrid (HY) user behavior, considering bedrooms and living room.

Contrato de autoria compartilhada

Esse documento atesta que todos os coautores do artigo intitulado “*Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context*” **CONCORDAM** com o seu uso como parte da tese de doutorado da **Leticia Gabriela Eli**, orientada pela professora Ana Paula Melo e coorientada pelo professor Roberto Lamberts do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Autores: Leticia Gabriela Eli, Amanda Fraga Krelling, Marcelo Salles Olinger, Ana Paula Melo, Roberto Lamberts

Revista: Energy and Buildings

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111047>



Documento assinado digitalmente

AMANDA FRAGA KRELLING

Data: 25/06/2024 15:28:02-0300

CPF: ***.594.099-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Amanda Fraga Krelling, Dra.

Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, EUA



Documento assinado digitalmente

MARCELO SALLES OLINGER

Data: 27/06/2024 10:27:54-0300

CPF: ***.383.479-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Marcelo Salles Olinger, MSc

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil

Florianópolis, 25 de junho de 2024.