



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

Letícia Gabriela Eli

**O IMPACTO DO PADRÃO DE USO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE
EDIFICAÇÕES UNIFAMILIARES NO BRASIL**

Florianópolis
2020

Letícia Gabriela Eli

**O IMPACTO DO PADRÃO DE USO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE
EDIFICAÇÕES UNIFAMILIARES NO BRASIL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de mestra em
engenharia civil.

Orientador: Prof^ª, Ana Paula Melo Dra.

Coorientador: Prof. Roberto Lamberts PhD.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Eli, Leticia

O Impacto do Padrão de Uso no Desempenho Térmico de
Edificações Unifamiliares no Brasil / Leticia Eli ;
orientadora, Ana Paula Melo, coorientador, Roberto

Lamberts, 2020.

98 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Desempenho térmico. 3.
Edificações residenciais unifamiliares. 4. Padrão de uso.
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

**O Impacto do Padrão de Uso no Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares no
Brasil**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Aldomar Pedrini, Dr.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Michele Fossati, Dra.

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 mestra em Engenharia Civil.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Profa. Ana Paula Melo, Dra.

Orientadora

Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Coorientador

Florianópolis, 2020.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, sem Ele nada seria possível.

Aos meus pais e irmãos por todo o apoio no desenvolvimento deste trabalho, sem a minha família como base eu não estaria aqui. Agradeço ao meu namorado, Nardel Cassaniga, por toda a paciência, pelas palavras de incentivo, e por estar sempre ao meu lado. E agradeço também a sua família por apoiar e incentivar esses anos (e os próximos) de estudo.

Aos meus mentores, professora Ana Paula Melo e professor Roberto Lamberts. Agradeço pela dedicação, paciência, e, acima de tudo, todo o aprendizado que me proporcionaram.

Aos meus colegas de laboratório, LabEEE/UFSC, agradeço por cada aprendizado, cada almoço e janta no RU e por todos os “*copa time*” em que as alegrias e angústias foram compartilhadas. Cada um desses momentos foi de extrema importância para a conclusão deste trabalho.

Agradeço também a Priscila Ferreira do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC, por toda a ajuda e companheirismo ao longo de todo o curso.

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

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

RESUMO

O principal fator levantado nas pesquisas de desempenho térmico é o clima, porém, além deste, existe o padrão de uso. A forma como as pessoas ocupam e se comportam nos espaços têm influência significativa nos resultados. Entretanto, a modelagem do padrão de uso nas simulações computacionais para a análise do desempenho térmico de edificações é um desafio complexo. As pessoas se comportam de maneira diferente, dependendo da sua rotina, cultura, saúde, entre vários outros fatores. Nas edificações residenciais essa variação é ainda mais acentuada. Dessa maneira, buscou-se analisar o impacto no desempenho térmico de edificações residenciais frente às variações no tipo do padrão de uso. Neste trabalho, foram considerados nove padrões de uso, sendo esses a combinação de três diferentes ocupações e três comportamentos. Por ocupação, variou-se o período ocupado (totalmente e parcialmente ocupado) e a densidade de pessoas. Os comportamentos adotados variaram o tipo de climatização, sendo: Ventilação Natural (VN), Ar Condicionado (AC) e Híbrido (H). A tipologia adotada para o estudo foi uma residência unifamiliar térrea, sendo um projeto representativo do programa Minha Casa Minha Vida do governo federal brasileiro. Foram consideradas cinco variações na envoltória, variando transmitância térmica e capacidade térmica de paredes e cobertura, e três diferentes climas, Rio de Janeiro, São Paulo e Santa Maria. Como indicadores, foi analisada a carga térmica anual de refrigeração (CgT_R) e o percentual de fração de horas ocupadas com as temperaturas operativas entre 18°C e 26°C (PHFT). Com base nos resultados, observou-se que a alteração do padrão de uso apresentou impacto significativo no desempenho térmico, com variação de até 85% na CgT_R e de 75% no PHFT. De maneira complementar, foi aplicada a variação na temperatura operativa de acionamento do cálculo da carga térmica de refrigeração, variando em 26°C (caso base), 27°C, 28°C, 29°C e 30°C. Com essa análise, foi possível verificar que essa alteração no padrão de uso influencia significativamente no resultado da CgT_R , com reduções de até 96% na CgT_R , quando alterada a temperatura de 26°C para 30°C. O balanço térmico no ar dos ambientes de alguns casos selecionados também foi analisado, demonstrando a importância do uso da ventilação natural como uma estratégia de resfriamento das edificações.

Palavras-chave: Desempenho térmico. Edificações residenciais. Padrão de uso.

ABSTRACT

The main factor associated to the thermal performance research is climate and, mainly, the user behavior. User behavior has a significant influence on result of the analysis. However, the user behavior in computer simulations for building thermal performance analysis is a challenging and complex task. People behave differently depending on their routine, culture, among many other factors. In residential buildings this disparity is even more noticeable. Given the above, this study attempts to evaluate the effect of modeling occupant behavior and quantifying its impact on building energy savings. Different user behaviors were considered, varying the occupied period (fully and partially occupied) and the people density. Three types of cooling were varied: Natural Ventilation (NV), Air Conditioning (AC) and Hybrid (H). The typology adopted for the study was a single-family residence, being a representative project of the "My house, my life" program of the Brazilian federal government. Five variations in the building envelope were considered, varying thermal transmittance and thermal capacity of walls and roof. Also, three different climates were considered: Rio de Janeiro, São Paulo and Santa Maria. As indicators, the annual cooling thermal load (CgT_R) and the percentage of fraction of hours occupied with operating temperatures between 18°C and 26°C (PHFT) were analyzed. Based on results, it was observed that the variation in user behavior showed a significant impact on building thermal performance, with a variation of approximately 85% in CgT_R and 75% in PHFT. In addition, the influence of the thermostat control on cooling thermal load calculation was also applied, ranging from 26°C (base case), 27°C, 28°C, 29°C and 30°C. The results have shown that the thermostat control may significantly influences the result of CgT_R , with reductions of approximately 96% in CgT_R . The air heat balance of some selected cases was also analyzed, indicating the importance of using natural ventilation as a building cooling strategy.

Keywords: Thermal performance. Residential buildings. User behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estimativa do consumo de eletricidade por uso final no setor residencial – PNE 2050.	20
Figura 2 – Estrutura <i>fit-for-purpose</i>	23
Figura 3 – Estrutura DNAs.....	25
Figura 4 – Tipologia unifamiliar.	42
Figura 5 – Perfis de ocupação adotados.	48
Figura 6 – Dados climáticos cidades – Temperatura do ar e umidade relativa.	50
Figura 7 – Fluxograma cálculo da CgT para os casos com comportamento do usuário VN. ...	53
Figura 8 – Cálculo da CgT para os casos com comportamento do usuário VN.....	53
Figura 9 – Resultados para carga térmica anual de refrigeração.	63
Figura 10 – Resultados para carga térmica anual de aquecimento.....	67
Figura 11 – Resultados para o PHFT.	68
Figura 12 - Variação da temperatura operativa de acionamento do cálculo da carga térmica de refrigeração.....	72
Figura 13 – Verificação do cálculo do balanço térmico do ambiente.	74
Figura 14 – Balanço térmico dos ambientes de permanência prolongada.	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados de saída do programa EnergyPlus para cálculo do balanço térmico.	57
Quadro 2 – Síntese das variações analisadas.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das tipologias representativas do MCMV.....	33
Tabela 2 – Área útil de cada ambiente da residência unifamiliar.....	42
Tabela 3 – Informações das janelas dos ambientes da residência unifamiliar.	43
Tabela 4 – Equipamentos.	43
Tabela 5 – Pessoas.....	44
Tabela 6 – Iluminação.	44
Tabela 7 – Tipos de cobertura adotados no trabalho.....	45
Tabela 8 – Tipos de paredes adotados no trabalho.....	45
Tabela 9 – Envoltórias utilizadas (combinação parede e cobertura).	46
Tabela 10 – Classificação climática cidades.	50
Tabela 11 – Combinações de padrão de uso e cidade em que o CgT_R e o PHFT deram envoltórias diferentes como a pior e melhor resultado.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

AC Comportamento do usuário Ar Condicionado

AC + 1 Padrão de uso com comportamento Ar Condicionado e ocupação 1, Dia Inteiro

AC + 2 Padrão de uso com comportamento Ar Condicionado e ocupação 2, NBR

AC + 3 Padrão de uso com comportamento Ar Condicionado e ocupação 3, Noite

APP Ambiente de permanência prolongada

CgT_A Carga térmica anual de aquecimento

CgT_R Carga térmica anual de refrigeração

CT Capacidade térmica [kJ/(m².K)]

DNAs Drives, Needs, Actions and Systems

EMS Energy Management System

EPE Empresa de Pesquisa Energética

FS Fator solar

H Comportamento do usuário Híbrido

H + 1 Padrão de uso com comportamento Híbrido e ocupação 1, Dia Inteiro

H + 2 Padrão de uso com comportamento Híbrido e ocupação 2, NBR

H + 3 Padrão de uso com comportamento Híbrido e ocupação 3, Noite

ICF Insulating Concrete Formwork

IEA International Energy Agency

MCMV Minha Casa Minha Vida

MEE Medida de Eficiência Energética

NBR Norma Brasileira Registrada

OCDE Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

PDE Plano Decenal de Expansão de Energia

PHFT_{APP} Percentual de fração de horas ocupadas com as temperaturas operativas entre 18°C e 26°C, para o ambiente de permanência prolongada

PHFT Percentual de fração de horas ocupadas com as temperaturas operativas entre 18°C e 26°C, para toda a residência

PNE 2050 Plano Nacional de Energia 2050

PPHC Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo

RTQ-C Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

RTQ-R Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

U Transmitância térmica [$W/(m^2.K)$]

VN Comportamento do usuário Ventilação Natural

VN + 1 Padrão de uso com comportamento Ventilação Natural e ocupação 1, Dia Inteiro

VN + 2 Padrão de uso com comportamento Ventilação Natural e ocupação 2, NBR

VN + 3 Padrão de uso com comportamento Ventilação Natural e ocupação 3, Noite

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	CONSUMO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES	18
2.2	CARACTERIZAÇÃO DO USUÁRIO NO CONSUMO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS	21
2.3	DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS	28
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO	39
3	MÉTODO	41
3.1	CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO – CASO BASE	41
3.2	VARIAÇÕES NO CASO BASE.....	44
3.2.1	Envoltória	44
3.2.2	Padrão de Uso	46
3.2.2.1	<i>Perfil de Ocupação.....</i>	<i>47</i>
3.2.2.2	<i>Comportamento do usuário</i>	<i>48</i>
3.2.3	Climas	50
3.2.4	Variação nos critérios de cálculo de carga térmica	51
3.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
3.3.1	Cálculo do balanço térmico dos ambientes de permanência prolongada.....	56
3.3.1.1	<i>Verificação do método de cálculo do balanço térmico do ambiente.....</i>	<i>57</i>
3.3.1.2	<i>Análise do balanço térmico dos ambientes de permanência prolongada</i>	<i>58</i>
4	RESULTADOS	61

4.1	VARIAÇÕES NA ENVOLTÓRIA, PADRÃO DE USO E CLIMA.....	61
4.2	VARIAÇÃO NOS CRITÉRIOS DE CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA DE REFRIGERAÇÃO	71
4.3	BALANÇO TÉRMICO NO AR.....	73
4.3.1	Verificação do método de cálculo do balanço térmico do ambiente	74
4.3.2	Balanço térmico no ar dos ambientes de permanência prolongada	75
4.4	LIMITAÇÕES NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	77
5	CONCLUSÕES.....	79
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A – Modelagem dos Padrões de uso	91

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

O consumo de energia vem aumentando significativamente ao longo dos anos. Em 2018, o valor final consumido em eletricidade no mundo foi de 23.031 TWh, 57% a mais do que o consumido no ano 2000 (IEA, 2018a). Entre as edificações, as residências vêm se destacando devido ao aumento da demanda energética. No Brasil, por exemplo, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2019a) estima que 25,4% da eletricidade total consumida no país foi para atender edificações residenciais no ano de 2018, tendo como previsão de aumento de aproximadamente 3,9% ao ano até 2029 (EPE, 2019b). Dividindo por usos finais, segundo previsão do Plano Decenal de Expansão de Energia da EPE (2019b), até o ano de 2029 o principal equipamento consumidor de energia elétrica será o ar condicionado, que atualmente ocupa a quarta posição, atrás da geladeira, da televisão e do chuveiro elétrico. Esse crescimento na demanda voltada à climatização em edificações residenciais é previsto em todo o mundo, principalmente devido a fatores como mudanças climáticas e ao aumento do poder aquisitivo da população dos países atualmente considerados em desenvolvimento (IEA, 2018b).

O aumento no consumo de energia nas edificações está diretamente ligado a aspectos sociais, econômicos e culturais das pessoas que irão utilizar os espaços. Andersen (2012) e Yao (2018), através de medição, mostraram que, para uma mesma residência, o consumo de energia pode ser alterado significativamente se modificado o usuário. Da mesma forma, estudos que utilizaram a simulação computacional para análise de desempenho térmico de edificações, demonstraram que diferentes padrões de uso modificam consideravelmente o resultado da análise, seja ele o consumo final de energia ou o desconforto por frio e/ou calor (FOSAS et al., 2018; MARSHALL et al., 2016; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016).

Para a modelagem do padrão de uso na simulação computacional de análise de desempenho térmico e energético de edificações devem ser consideradas diversas variáveis (HONG; YAN, 2018), uma vez que a definição do padrão de ocupação e comportamento dos usuários depende de fatores que envolvem aspectos aleatórios, diversos e complexos, pois os usuários que residem em um mesmo local possuem diferentes hábitos, percepções e rotinas (FABI et al., 2012; YAN et al., 2017). Devido à alta complexidade, a modelagem dos usuários é por diversas vezes simplificada nas simulações computacionais, resultando em divergências significativas entre o desempenho térmico simulado e o obtido na fase pós-ocupação (HONG

et al., 2015a). Para auxiliar a representação do usuário nos programas de simulação computacional, estudos procuraram desenvolver estratégias para a modelagem dos usuários buscando alternativas que indiquem qual o nível de complexidade do padrão de uso exigido na simulação computacional, com base no objetivo do estudo (GAETANI; HOES; HENSEN, 2016; HONG et al., 2015b). Quando o objetivo da simulação computacional é indicar o consumo de residências que abrangem um país, os padrões de comportamento e ocupação dos usuários, ligados principalmente a aspectos culturais e socioeconômicos, influenciam de forma significativa no resultado. No Brasil, as residências ainda são predominantemente climatizadas de maneira passiva através da ventilação natural. Isto é relacionado à inexistência de equipamento de ar condicionado juntamente com o hábito de abrir as janelas da residência durante o dia, independentemente da temperatura externa, para evitar mofo ou reduzir a sensação de claustrofobia, por exemplo (PACHECO; LAMBERTS, 2013; PROCEL, 2019; RAMOS, 2019; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016). Além disso, as edificações residenciais brasileiras são construídas predominantemente com materiais como alvenaria e concreto (PROCEL, 2019; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015), sem isolamento térmico na envoltória, muitas vezes favorecendo o hábito relacionado à ventilação natural. Essa forma de uso das edificações, é o oposto do que ocorre em países com o clima predominantemente frio, onde o isolamento térmico das edificações muitas vezes é obrigatório, a climatização é voltada ao aquecimento dos ambientes e a renovação de ar ocorre de forma mecânica (FOSAS et al., 2018; PORRITT et al., 2012; VAN HOOFF et al., 2015). Dessa maneira, estratégias adotadas em países desenvolvidos, com clima predominantemente frio, não devem ser replicadas para outros climas sem um estudo detalhado do desempenho térmico.

O estudo do desempenho térmico de edificações envolve o entendimento de diferentes variáveis, entre elas o clima, envoltória e usuários, sendo de fundamental importância desde a fase de projeto da edificação (CHEN et al., 2015; STEEMERS; YUN, 2009). Dentre os objetivos do estudo do desempenho térmico das edificações residenciais está a procura por alternativas que reduzam o consumo de energia elétrica destinada à climatização dos ambientes. Dentre as medidas de eficiência energética que os estudos analisam para climas quentes ou amenos, como é o caso do Brasil, destaca-se o uso de isolamento térmico na envoltória (FOSAS et al., 2018; MIRRAHIMI et al., 2016; RAKHSHAN; FRIESS, 2017; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018; TUBELO et al., 2018), como também a utilização de componentes construtivos que combinem isolamento térmico com massa térmica elevada (GHOREISHI, 2019; MANTESI et al., 2019; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018). A principal problemática relacionada à utilização de isolamento térmico em edificações residenciais é o

sobreaquecimento dos ambientes. Estudos abordando o sobreaquecimento estão sendo publicados principalmente em climas frios, onde, com o avanço das mudanças climáticas, as edificações apresentam temperaturas internas elevadas nas estações quentes (HAMDY et al., 2017; PATHAN et al., 2017; PEACOCK; JENKINS; KANE, 2010; PORRITT et al., 2012). Envelopes isolados reduzem as trocas de calor, o que pode ser favorável, visto que reduz o ganho de calor do ambiente externo para o ambiente interno, porém é reduzido também o fluxo na direção contrária. Dessa forma, o risco de sobreaquecimento está diretamente ligado ao padrão de uso, uma vez que ambientes com alta densidade de carga (equipamentos, iluminação e pessoas) e com o uso da ventilação natural de forma indiscriminada favorecem o aumento da carga interna e geram o sobreaquecimento.

Frente ao exposto, é possível destacar a importância do estudo do desempenho térmico de edificações residenciais brasileiras, considerando variações no padrão de uso e no tipo de sistema construtivo utilizado na envoltória. As pessoas que ocupam os ambientes possuem características distintas que muitas vezes levam a divergências entre o desempenho térmico simulado do desempenho térmico real. Assim, sistemas construtivos que muitas vezes não são recomendados a determinados padrões de uso e climas, passam a ser aceitos. Dessa maneira, este trabalho procura contribuir para o entendimento do desempenho térmico das edificações unifamiliares de baixa renda brasileiras, para variações nos padrões de uso e climas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o impacto no desempenho térmico de edificações residenciais a partir da consideração de diferentes padrões de uso (perfil de ocupação e comportamento do usuário).

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Apresentar a variação no desempenho térmico da residência entre sistemas construtivos adotados;

- Demonstrar a influência do clima no desempenho térmico da residência para os diferentes padrões de uso;
- Verificar a influência do indicador adotado para a análise de desempenho térmico de edificações residenciais, frente a modelagem de diferentes padrões de uso;
- Analisar a influência no desempenho térmico dos casos estudados devido às variações na temperatura de acionamento para o cálculo da carga térmica de refrigeração;
- Analisar quais os elementos com maior influência nas trocas de calor.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado nos seguintes capítulos: introdução, referencial teórico, método, resultados e conclusões. Na introdução são elencados os principais pontos da pesquisa, sua relevância e seus objetivos. No referencial teórico são abordados os seguintes temas: consumo de energia elétrica no Brasil e no mundo; como é realizada a modelagem dos usuários dentro da simulação computacional de desempenho termoeenergético de edificações residenciais e os principais desafios; levantamento de estudos voltados ao desempenho térmico e energético de edificações residenciais no Brasil e no mundo; e por fim, as considerações finais sobre o referencial teórico levantado. No capítulo de método, são abordados os passos a elencados para atingir os objetivos apresentados no primeiro capítulo. Entre os pontos abordados no método está a tipologia adotada, os parâmetros de entrada, as variações de padrões de uso e envoltória, os indicadores utilizados para a análise e o método de balanço térmico para análise do desempenho térmico da residência. No capítulo resultados, traz os resultados obtidos e discussões. No capítulo conclusões são apresentados os principais resultados, discussões e recomendações de trabalhos futuros. Por fim, ao final do trabalho é apresentado um apêndice com a modelagem utilizada na simulação computacional dos padrões de uso utilizados neste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONSUMO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES

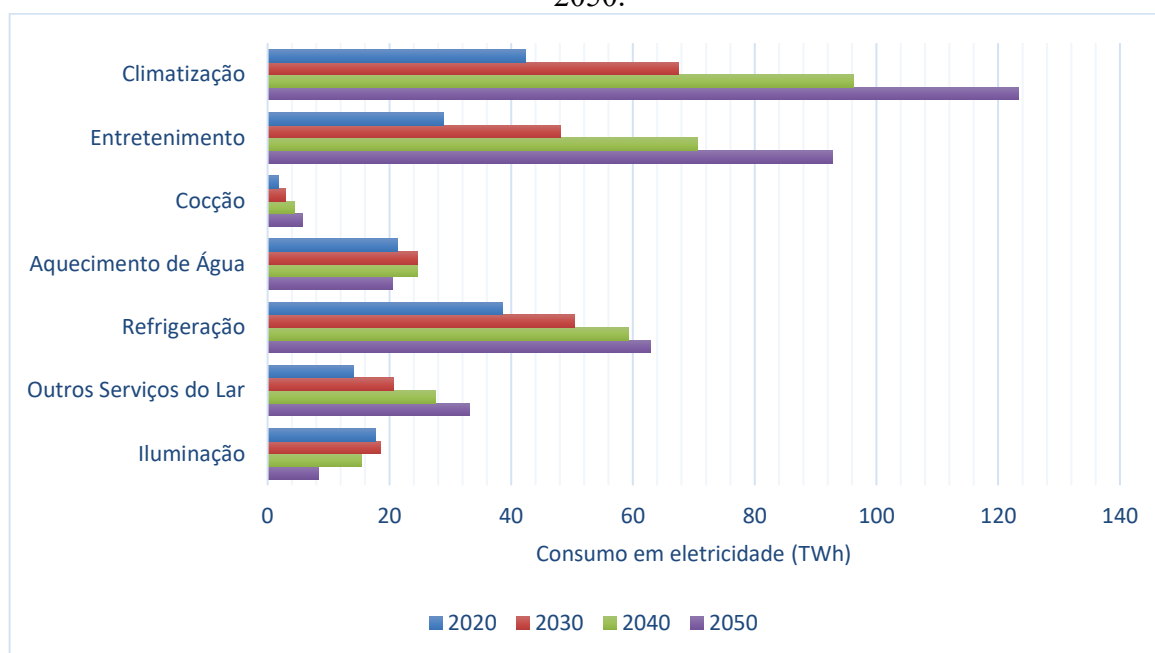
No ano de 2018, o valor final consumido no mundo em eletricidade foi de 23.031 TWh, sendo as edificações responsáveis por consumir 51% deste montante (IEA, 2019a). Entre as diferentes tipologias de edificações, as residenciais consomem parcela significativa de energia. Segundo dados referentes ao ano de 2017, divulgados pela IEA (IEA, 2019b), as edificações residenciais dos 36 países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), que inclui boa parcela dos países da Europa juntamente com Canadá e Estados Unidos, consumiram cerca de 30,8% de toda a energia elétrica utilizada nestes países. Nos países que não fazem parte da OCDE, como por exemplo, China, Índia e Brasil, a parcela consumida em energia elétrica pelas edificações residenciais foi 24,0% do total de energia elétrica utilizada nesses países. Cabe ressaltar que, a parcela consumida em eletricidade pelo Brasil é a menor entre China, Rússia e Índia, sendo a China a principal consumidora. Analisando em detalhe o consumo de energia elétrica no Brasil, no ano de 2018, 25,4% do total da eletricidade utilizada no país foi para atender as edificações residenciais (EPE, 2019a). Mesmo considerando as políticas públicas adotadas pelos países, como por exemplo, as certificações de eficiência energética e a troca de equipamentos ineficientes, essa demanda seguirá crescendo ao longo dos anos. Estima-se que em países desenvolvidos, até o ano de 2040, o consumo de energia terá aumentado 12%; já nos países que hoje são considerados em desenvolvimento, o consumo atual pode duplicar. Esse aumento é aliado a fatores como: crescimento da população, expansão da indústria, entrada de novas tecnologias no mercado, mudanças climáticas e aumento do poder aquisitivo (EPE, 2015; IEA, 2018b).

A demanda de energia elétrica no setor residencial pode ser dividida em diferentes usos finais e/ou equipamentos elétricos, como: aquecimento de água (chuveiro elétrico), climatização (condicionador de ar), entretenimento (televisão, *home theater*, entre outros), iluminação e refrigeração (geladeira e congelador). No Brasil, levantamentos mostram que os equipamentos elétricos residenciais que mais consomem energia são geladeira e chuveiro elétrico (GHISI; GOSCH; LAMBERTS, 2007; SILVA et al., 2014). Porém, isso não deve ser considerado um padrão, visto que, o uso final de energia elétrica varia de acordo com a região do país, época do ano, renda mensal familiar e, sobretudo, a amostra na qual está sendo realizado o estudo. Uma nova pesquisa sobre posse de equipamentos e hábitos, chamada de Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo, PPHC, foi publicada no final do

ano de 2019 (ELETROBRAS; PROCEL, 2019). O PPHC trouxe novas percepções sobre o setor residencial, sobretudo na questão dos principais usos finais para energia elétrica nas residências brasileiras.

A Empresa de Pesquisa Energética, EPE, como forma de auxiliar no planejamento do governo, lançou em 2016 uma coletânea de estudos com projeções de consumo energético até o ano de 2050, chamado de Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) (EPE, 2016). Para o setor residencial, o PNE 2050, divide o consumo em eletricidade nos seguintes usos-finais: climatização (condicionadores de ar e ventiladores), entretenimento (televisão e computadores), cocção (preparo de alimentos e bebidas), aquecimento de água, refrigeração (geladeira e freezer), outros serviços do lar (máquina de lavar roupas, aspirador de pó) e iluminação (EPE, 2016). Como pode ser observado na Figura 1, os únicos usos que apresentarão redução até o ano 2050, com relação aos anos anteriores, serão os voltados à iluminação e ao aquecimento de água. A justificativa, segundo a EPE, é que na iluminação, ocorrerá a troca das lâmpadas ineficientes devido à redução de preço dos produtos e às políticas públicas lançadas pelo governo, como por exemplo, a proibição da venda de lâmpadas incandescentes (BRASIL, 2010). O aquecimento de água, por sua vez, reduzirá o consumo devido à queda do número de habitantes por domicílio em todas as classes sociais. Entre os usos que apresentarão aumento na demanda de energia elétrica está o entretenimento, a cocção, a refrigeração, outros serviços do lar e, principalmente, a climatização. Para o entretenimento, a EPE aponta o aumento na demanda de energia como consequência da futura facilidade de acesso pela população a equipamentos como *smartphones*, *notebooks*, vídeo games e televisão. Para a cocção, é considerado o uso cada vez maior de equipamentos que utilizem energia elétrica para aquecer alimentos. Na refrigeração, embora seja considerado o aumento no número de novos refrigeradores nas residências, a EPE indica que o aumento na demanda de eletricidade para esse uso será baixo, pois é considerado que ocorrerá a entrada de equipamentos mais eficientes no mercado, devido às novas tecnologias e também às políticas públicas voltadas à troca de equipamentos ineficientes. Para os equipamentos de condicionamento de ar acontece a mesma situação, porém, como a posse destes dispositivos irá aumentar, o impacto da posse é mais significativo do que a melhoria na eficiência energética. Segundo as projeções, que podem ser observadas na Figura 1, foi previsto que a partir de 2020 a energia consumida com climatização ultrapassaria todos os outros usos nas unidades habitacionais brasileiras, o que é confirmado pelo Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (PDE 2029), estudo que procura validar o que foi levantado no PNE 2050, lançando projeções com intervalo de tempo menor, de 10 anos (EPE, 2019b).

Figura 1 – Estimativa do consumo de eletricidade por uso final no setor residencial – PNE 2050.



Fonte: Adaptado de Demanda de Energia 2050 (EPE, 2016).

Para a EPE (2016), o aumento na demanda de eletricidade para climatização é tido como consequência da melhora do poder aquisitivo da população e a entrada de mais equipamentos condicionadores de ar no mercado. No PNE 2050 não está claro se o estudo considera os efeitos das mudanças climáticas, como o aumento da temperatura e consequente maior necessidade de climatização, como aponta a *International Energy Agency*, IEA, em seu documento *The Future of Cooling* (IEA, 2018b). No estudo da IEA, as projeções apresentam o aumento significativo na eletricidade consumida para suprir a demanda de condicionamento de ar, sobretudo nos países quentes e com economia emergente. Como forma de reduzir esse acréscimo na demanda de energia, a IEA cita a necessidade de investimentos em estudos voltados ao desempenho térmico das edificações, pois com as estratégias corretas, pode-se atingir temperaturas agradáveis dentro das edificações sem o uso de condicionamento artificial. Para isto, os espaços devem ser projetados de forma mais eficiente e condizente com o clima na qual estão inseridos. Sabendo que o desempenho térmico e energético de uma edificação é resultado da interação de diversas variáveis, inclusive da forma como as pessoas irão ocupar e utilizar os ambientes, antes de qualquer análise de desempenho térmico o padrão de uso deve ser descrito e considerado.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO USUÁRIO NO CONSUMO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS

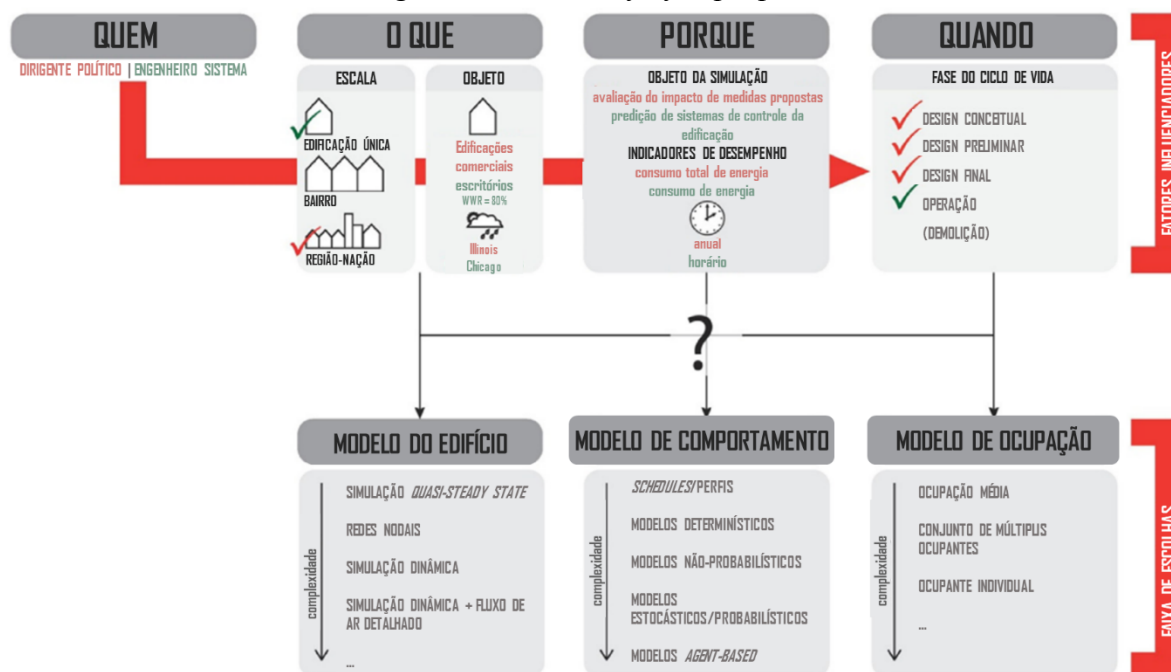
Nos estudos para a predição do desempenho térmico e energético de uma edificação, parâmetros como clima, envoltória e equipamentos são rigorosamente considerados nas simulações, enquanto que o comportamento dos usuários é, em sua maioria, simplificado (HONG et al., 2015a). As edificações são projetadas e construídas para serem posteriormente ocupadas. A influência da ocupação no desempenho térmico e energético das edificações ocorre de forma passiva, através, por exemplo, da emissão de calor pelo metabolismo das pessoas, e ativa, através da interação com os dispositivos da edificação (MAHDAVI, 2011). Desse modo, é sensato que, durante a fase de projeto da edificação, seja definido o funcionamento da edificação, como os padrões de ocupação, a instalação de dispositivos e suas respectivas operações (automatizada ou manual).

Um estudo realizado na cidade de Copenhagen, mostrou que o comportamento dos usuários influencia diretamente no consumo de energia para aquecimento de unidades habitacionais (ANDERSEN, 2012). Para comprovar essa premissa, a pesquisa monitorou mais de 300 unidades habitacionais, entre elas 290 eram residências unifamiliares idênticas, mudando somente a orientação. Ao final do período de monitoramento foi possível analisar que o consumo entre as residências idênticas variou de 9,7 kWh/m² até 197,0 kWh/m². Embora o estudo de Andersen (2012) tenha encontrado correlação entre diferentes consumos de energia para aquecimento e usuários, não foi possível monitorar efetivamente quando e como o dispositivo de climatização era acionado, e, dessa forma, não foi possível definir padrões de comportamento. Para simulações computacionais, em que existe a necessidade de entender o desempenho das edificações ainda na fase de projeto, o padrão de ocupação e os modelos de comportamento precisam ser definidos para que os resultados obtidos sejam próximos aos alcançados na pós-ocupação. A definição do comportamento dos usuários depende de diferentes fatores, visto que estão envolvidos aspectos aleatórios, diversos e complexos, uma vez que pessoas que residem em um mesmo local possuem diferentes hábitos, percepções e compromissos (YAN et al., 2017). Para o completo entendimento do comportamento dos usuários, é necessário que sejam realizadas abordagens interdisciplinares, pois, os indivíduos são influenciados por fatores externos, como socioeconômicos e culturais, e internos, como aspectos físicos, psíquicos e preferências individuais (FABI et al., 2012; HONG; YAN, 2018). Um exemplo é o ato de abrir e fechar as janelas, que pode ser influenciado pela temperatura, qualidade do ar, tipo da edificação, segurança, entre outros. Além disso, os dispositivos

instalados na edificação e o consumo de energia a estes relacionados também influenciam no modo como o usuário se comporta. Para os aspectos sociais e psicológicos, Hong et al. (2017) sugerem que sejam realizadas pesquisas utilizando métodos da área de ciências sociais, como questionários, para o melhor entendimento. Porém deve ser entendido que esses métodos podem ser falhos, no que diz a respeito à veracidade dos dados, uma vez que o usuário, ao responder, pode manipular as informações. Devido à dificuldade em monitorar e quantificar os aspectos psicológicos, estes raramente são considerados de forma correta nas pesquisas que envolvem o comportamento dos usuários (BALVEDI; GHISI; LAMBERTS, 2018).

Devido ao grande número de variáveis envolvidas na ocupação, Gaetani et al. (2016) buscaram reduzir a complexidade da modelagem do padrão de uso através de uma estrutura chamada de *fit-for-purpose*. Este método tem como finalidade simplificar a definição do padrão de ocupação e comportamento dos usuários utilizado nas simulações, mas ao mesmo tempo mantendo a coerência com a realidade. Conforme pode-se observar na Figura 2, a estrutura conta com quatro fatores influentes: quem está interessado no resultado; o objetivo da simulação; o motivo da simulação; e qual a etapa da vida útil da edificação. Junto com esses quatro fatores estão as opções de escolha do simulador, de acordo com a complexidade que se quer atingir. Dessa forma, seguindo essas diretrizes, o responsável pela simulação pode definir qual o nível de complexidade dos parâmetros relacionados aos usuários que devem ser analisados para chegar ao resultado desejado.

A complexidade da modelagem de usuários indicada na estrutura *fit-for-purpose*, mostra que podem existir múltiplas formas de definição do usuário. O tipo de comportamento pode ser através de padrões fixos, aleatórios, entre outros. Já a ocupação, pode ser definida de forma média, múltipla ou individual. Ou seja, dependendo da complexidade da simulação, podem existir diferentes modelagens. Por exemplo, para a simulação de uma residência, onde o objetivo é entender o consumo energético de forma precisa, é necessário que a modelagem do usuário seja bem estudada, com a ocupação e comportamento real, considerando os aspectos aleatórios da ocupação e comportamento múltiplo dos residentes. Já para a construção de um metamodelo, onde o objetivo é obter a predição do consumo energético para uma variedade de residências, o tipo de usuário pode ser determinado de forma padrão, considerando uma ocupação fixa e comportamento médio.

Figura 2 – Estrutura *fit-for-purpose*.

Fonte: Adaptado de Gaetani et al. (2016).

A interação das pessoas com a edificação vem sendo estudada considerando as seguintes etapas: monitoramento, modelagem, simulação e, eventualmente, validação (HONG et al., 2015a). Balvedi et al. (2018) estudaram a operação de janelas e persianas em edificações residenciais multifamiliares, naturalmente ventiladas, na cidade de Florianópolis, Brasil. Para o monitoramento, foram aplicados questionários, com base anual, distinguindo dias da semana de finais de semana, mas não as diferentes estações do ano. Ao todo, foram obtidas 100 respostas, mas como o estudo considerou somente edificações naturalmente ventiladas, a base de dados utilizada contou com 25 casos. A partir do monitoramento, foi realizada a fase de agrupamento dos casos. Foram definidos 3 grupos, entre pessoas que ficam em casa o dia inteiro (perfil 1), pessoas que saem de manhã e voltam à noite (perfil 2) e também as pessoas que saem de manhã e voltam à noite, porém estão em casa no período de almoço (perfil 3). Essa ocupação descrita é referente aos dias de semana. Entre os grupos, houve distinção do comportamento durante a semana e nos finais de semana, como também no comportamento relacionado à operação de cortinas/persianas e também janelas para ventilação natural. A última etapa do trabalho foi analisar os graus-hora de resfriamento (limite de 26°C) e aquecimento (limite de 18°C), para quatro apartamentos de uma edificação multifamiliar de baixa renda, das tipologias representativas levantada por Triana (2016). Entre os graus-hora, o resfriamento foi a maior parcela na residência. Entre os diferentes padrões de uso, foi encontrada uma diferença de cerca de 130% nos graus-hora de resfriamento. O perfil 1, que fica em casa o dia inteiro, é o que

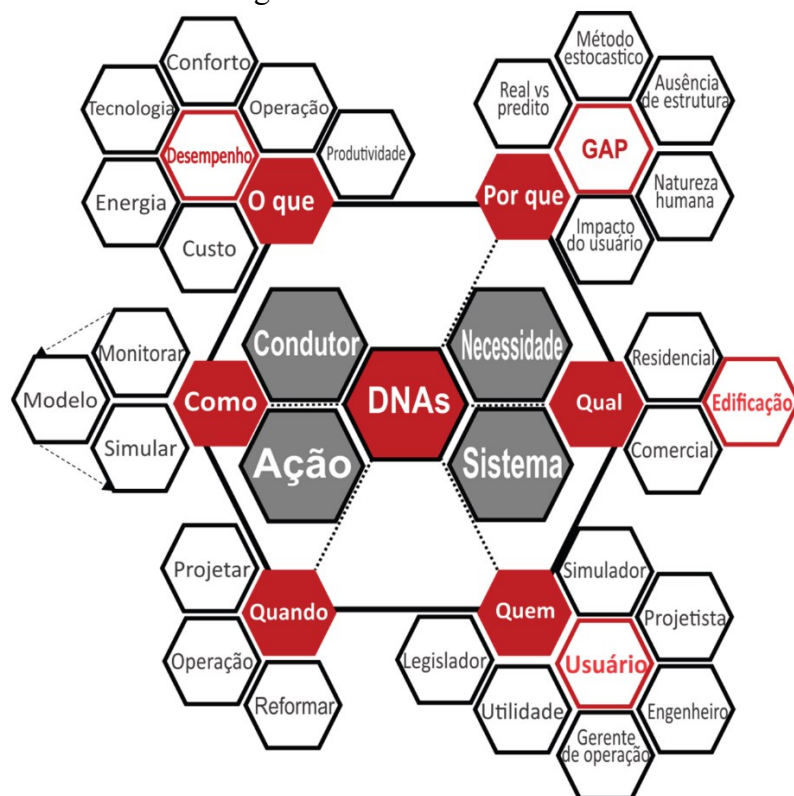
obteve os maiores valores de graus-hora de resfriamento, seguido do perfil 2 e 3. Para os graus-hora de aquecimento o comportamento foi o contrário, porém com valores absolutos menores.

Yao (2018) estudou como dois diferentes comportamentos de uso do sistema de condicionamento de ar, para refrigeração, podem resultar em consumos de energia distintos. O autor buscou comparar um modelo real, criado a partir do monitoramento de usuários com o padrão normativo da China. Para a análise do usuário real, o autor monitorou o quarto principal de um apartamento localizado na China, ocupado por 2 adultos e 1 criança. Foram levantados os dados de acionamento do ar condicionado, ocupação e temperatura interna e externa, durante o período de verão chinês nos anos de 2016 e 2018. Com os dados levantados, foi aplicada uma análise estatística e regressão lógica para encontrar o comportamento dos usuários, de forma a representar a probabilidade do acionamento do sistema de ar condicionado durante o verão. A modelagem das interações dos residentes com o equipamento de condicionamento de ar apresentou comportamento estocástico, ao contrário do modelo padrão determinado pelas normativas de simulação de desempenho energético utilizadas na China. A simulação mostrou que o consumo de energia para refrigeração do modelo estocástico levantado, foi de 533 kWh, enquanto que o consumo de energia do usuário determinado pelo padrão normativo, foi de 3.543 kWh. Com esses resultados, o autor mostrou que o comportamento do usuário definido pela normativa superestima o consumo.

Na relação entre consumo de energia do setor residencial e usuários, a demanda para aquecimento é uma das mais estudadas entre os pesquisadores de países com clima predominantemente frio (GILL et al., 2010; GUERRA-SANTIN; ITARD, 2010; GUERRA SANTIN, 2013; MARSHALL et al., 2016; SANTIN, 2011). Monitorar os usuários, especialmente de edificações residenciais, é um trabalho de campo demorado e que pode ser entendido como invasão de privacidade. Como o comportamento do usuário é aleatório, pesquisadores buscam encontrar modelos que possam padronizar o comportamento e representá-lo de forma mais precisa, para auxiliar nos estudos sobre a relação entre consumo de energia e as interações dos ocupantes (HONG et al., 2015b, 2015a; HONG; YAN, 2018). Uma das ferramentas de destaque é a estrutura chamada DNAs, Impulsionador/Condutor, Necessidade, Ações e Sistemas (*Drivers, Needs, Actions and Systems*). A modelagem do comportamento dos usuários é realizada por arquivo XML Schema, podendo ser acoplada a programas de simulação, como o EnergyPlus. Da mesma forma que a estrutura proposta por Gaetani et al. (2016), a estrutura DNAs utiliza fatores que influenciam na complexidade e tipo de modelagem do comportamento dos usuários. Esses fatores, expostos na Figura 3, podem ser

sintetizados como: de que forma o comportamento será construído, o que será abordado, qual a razão, o tipo de edificação e quem está modelando.

Figura 3 – Estrutura DNAs.



Fonte: Adaptado de Hong et al. (2015a) por Sorgato (2015).

A aplicação da estrutura DNAs pode ser exemplificada envolvendo a probabilidade de acionamento do ar condicionado. O *Condutor* seria a temperatura de ar interno, a *Necessidade* a busca por conforto térmico, a *Ação* é ligar o sistema de condicionamento de ar, e por fim, o *Sistema* é o equipamento ar condicionado. Essa e outras ferramentas para modelagem de comportamento dos usuários podem ser utilizadas com dados levantados em campo ou obtidos através de um banco de dados pré-existente.

Como exemplo de estudo que não utilizou dados de comportamento monitorados em campo, Sorgato, Melo e Lamberts (2016), analisaram como diferentes controles para abertura e fechamento de janelas poderiam influenciar no consumo do ar condicionado em uma residência unifamiliar localizada em Florianópolis. A ocupação considerada na residência foi de um casal com duas crianças. O comportamento dos residentes variou em três diferentes controles de abertura das janelas para ventilação. O primeiro controle considerou que quando a temperatura externa for maior ou igual a 21°C e o período for entre 7h00 e 24h00, as janelas são abertas. No segundo controle, chamado de controle automatizado, são 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 é maior ou igual a 21°C. As características consideradas na residência unifamiliar incluem vidro simples nas janelas, venezianas de madeira em todos os ambientes de permanência prolongada e absorvância de 0,4 nas paredes e cobertura. Os parâmetros relacionados ao tipo de parede e cobertura variaram. Nas paredes foi considerada transmitância térmica de 1,0 W/(m².K) e 2,2 W/(m².K), capacidade térmica de 11,0 kJ/(m².K) e 167,0 kJ/(m².K), na cobertura o valor alterado foi da capacidade térmica, definida como de 11,0 kJ/(m².K) e 113,0 kJ/(m².K), a transmitância térmica foi fixada em 1,0 W/(m².K). Além das pessoas, foram consideradas as cargas internas relacionadas ao sistema de iluminação e aos equipamentos, que tiveram seu acionamento nos horários definidos conforme a ocupação. O uso da ventilação híbrida foi considerado, ou seja, possibilidade de uso de ventilação natural ou condicionamento de ar. O sistema de condicionamento de ar utilizou os princípios do conforto adaptativo, utilizando a temperatura operativa para acionamento. Quando a temperatura operativa fica acima do limite aceitável de conforto da ASHRAE 55 ou abaixo de 19,5°C e a ocupação não for nula, o condicionamento de ar é acionado e somente desligado quando a ocupação se tornar nula novamente. A ventilação natural é acionada sem ocupação ou quando a temperatura operativa estiver abaixo do limite aceitável de conforto ou acima de 19,5°C. As simulações de desempenho energético foram realizadas no programa EnergyPlus, utilizando a classe *Energy Management System* (EMS), como forma de tornar a modelagem do uso da ventilação natural e sistema de condicionamento mais próxima do real. Como resultados, Sorgato, Melo e Lamberts (2016) apresentaram as horas de conforto para a edificação ventilada naturalmente e a energia consumida para refrigeração e aquecimento. Os valores encontrados mostraram que os diferentes tipos de controle de aberturas utilizados pelos residentes, e a capacidade térmica da edificação, foram os parâmetros que mais impactaram no desempenho térmico e energético da residência em estudo. O caso que obteve o maior número de horas em conforto térmico foi o com baixa transmitância e média capacidade térmica (1,0 W/(m².K) de transmitância térmica para paredes e cobertura; 167,0 kJ/(m².K) e 113,0 kJ/(m².K) de capacidade térmica para paredes e cobertura, respectivamente), e com o menor número de horas de conforto térmico foi o com alta transmitância e baixa capacidade térmica (2,2 W/(m².K) e 1,0 W/(m².K) de transmitância térmica para paredes e cobertura, respectivamente; 167,0 kJ/(m².K) e 11,0 kJ/(m².K) de capacidade térmica para paredes e cobertura, respectivamente), ambos utilizando controle de

aberturas automatizado. Para os diferentes tipos de controle de abertura das janelas, os autores compararam o resultado de carga térmica de refrigeração obtido para a envoltória com baixa transmitância térmica e média capacidade térmica, que apresentou os melhores resultados, com a envoltória com alta transmitância térmica e baixa capacidade térmica, que apresentou os piores resultados. Quando utilizada a envoltória com o melhor desempenho térmico, a redução na refrigeração foi de 32% para a ventilação dia e noite, 66% para a ventilação automatizada e 43% para a ventilação noturna. Os resultados evidenciam que nas análises de desempenho térmico existe a importância não somente do conhecimento da envoltória da edificação, mas também do tipo de usuário e como este interage com a abertura para ventilação natural frente as variações de temperatura interna e temperatura externa.

Embora o uso de ferramentas computacionais se apresente como uma solução para a definição de estratégias, em muitos casos, observa-se que, após o início da operação da edificação, há a variação entre os dados preditos e reais. Hong, Langevin e Sun (2018) citam essa lacuna entre simulado e predito como um dos 10 desafios para a simulação de edificações. Segundo os autores, essa diferença resulta da falta de comunicação entre as pessoas envolvidas no projeto. Porém essa variação, sobretudo quando os resultados a serem obtidos envolvem consumo de energia, pode estar relacionada a simplificações referentes à interação dos usuários com a edificação.

Silva e Ghisi (2014) analisaram as incertezas relacionadas ao comportamento dos usuários e parâmetros físicos de uma edificação unifamiliar, localizada em Florianópolis. Foi adotada uma abordagem probabilística no trabalho, de forma que as análises identificaram a variabilidade dos parâmetros de saída através da determinação das incertezas nos parâmetros de entrada, sendo as variáveis de entrada consideradas independentes e as variáveis de saída dependentes. Os passos para o desenvolvimento do trabalho incluíram a definição da probabilidade de um parâmetro de entrada assumir determinado valor, a organização das variáveis de entrada, a realização de uma amostragem através do método do Hipercubo Latino, a preparação dos arquivos de entrada no programa EnergyPlus, a realização da análise de incertezas e, por fim, a análise da sensibilidade dos parâmetros. As variáveis dependentes, foram o graus-hora para aquecimento (horas em que a temperatura está abaixo de 19°C) e refrigeração (horas em que a temperatura está acima de 26°C), e o consumo de energia para o sistema de condicionamento de ar. Para a obtenção dos graus-hora a edificação foi simulada com ventilação natural, para o consumo de energia com ar condicionado a edificação foi considerada com climatização híbrida, com ventilação natural entre às 8h00 e 21h00 horas e condicionamento de ar somente nos dormitórios, durante o período de sono, entre 21h00 até às

8h00 horas. Para os dados considerados físicos, como tipo de envoltória e ventilação, foram considerados diferentes valores. A ocupação e o comportamento dos usuários foram definidos a partir de um levantamento em 60 residências realizado na cidade de Florianópolis. O levantamento foi realizado através de medições, questionários e entrevistas, que buscaram informações sobre a ocupação em cada cômodo, a abertura de janelas e portas, o uso de lâmpadas e equipamentos. Os resultados obtidos mostram que para os graus-hora de aquecimento, os parâmetros físicos apresentam 17,2% de incertezas e os relacionados ao perfil dos usuários apresentam 21,5%. Para os graus-hora de resfriamento, são apresentados valores de incertezas de 15,2% e 6,6%, para parâmetros físicos e comportamentais, respectivamente. Para o consumo de energia com o sistema de condicionamento de ar foram obtidos valores de incertezas de 19,5% e 36,5%, para os parâmetros da edificação e do comportamento dos usuários, respectivamente. Os autores concluem que a quantificação das incertezas e a confiabilidade das simulações é mais importante do que propor soluções através de simulações determinísticas de desempenho térmico e energético. Esses resultados demonstram a necessidade de entender e estudar a precisão dos parâmetros de entrada a serem considerados na simulação, antes de utilizar os resultados obtidos.

2.3 DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS

O desempenho térmico e energético de uma edificação pode ser alterado significativamente dependendo do padrão de uso a utilizar os espaços. Um estudo voltado às edificações residenciais localizadas na cidade de Londres, utilizou o *software* TRNSYS para mostrar o impacto no consumo de energia elétrica devido à aplicação de medidas de eficiência energética na residência, juntamente com variações no tipo de ocupação (MARSHALL et al., 2016). Os autores estudaram o consumo de energia elétrica para aquecimento dos ambientes, considerando somente o período de inverno. Entre as análises, foi estudada a adoção de isolamento térmico na envoltória, três diferentes tipos de ocupação e modificações no sistema de aquecimento dos ambientes. Para a ocupação considerou-se: “famílias que trabalham”, constituída de um casal com dois filhos e ocupação nula durante o período das 8h30 às 16h00; “casal que trabalha”, considerando dois adultos, com ocupação nula variável durante a semana, sendo que em quatro dias ninguém está em casa entre 8h30 e 18h00, e no restante dos dias, a ocupação é nula na residência entre 8h30 e 21h00; e, por fim, o último tipo de ocupação foi “casal presente diariamente”, que considera dois adultos, sendo que a casa nunca está com ocupação igual a zero, pois em algum período um ou dois residentes está em casa. No sistema

de aquecimento dos ambientes, as medidas de eficiência energética (MEE) consideradas incluem: redução da temperatura de termostato do sistema de condicionamento de ar; sistema liga somente com o cômodo ocupado (aquecimento parcial); e divisão do termostato de aquecimento entre os cômodos da casa (aquecimento zonal). Para a temperatura do termostato do sistema de condicionamento de ar, foi considerada a redução dos valores em 1°C e 2°C em cada cômodo da residência, sendo as temperaturas iniciais do termostato para cada cômodo: 17°C nos dormitórios durante o período noturno (sono), 19°C para cozinha, dormitórios (durante a manhã) e hall, 21°C para banheiros e sala de estar. As medidas de eficiência energética aplicadas na envoltória incluíram o uso de isolamento térmico, reduzindo a transmitância térmica, de 1,40 W/(m².K) para 0,44 W/(m².K) nas paredes, e de 1,00 W/(m².K) para 0,16 W/(m².K) na cobertura. Os resultados obtidos para a combinação das medidas de eficiência energética e a ocupação, mostraram que em todos os casos, a medida com o melhor potencial de economia foi o isolamento térmico das paredes. As chamadas medidas de serviço, redução da temperatura do sistema de aquecimento e o aquecimento zonal (um termostato para cada ambiente em aquecimento), também reduziram o consumo de energia. A combinação de isolamento térmico nas paredes e coberturas teve o maior potencial de economia para os 3 tipos de ocupação. Para a ocupação “casal que trabalha” e “casal presente diariamente”, as medidas de serviço combinadas, redução da temperatura de aquecimento em 1°C e aquecimento parcial (sem ocupação não há aquecimento) e zonal (diferentes termostatos na residência), obtiveram economias similares com a consideração da envoltória isolada termicamente. O isolamento térmico da envoltória e a redução das temperaturas de termostato do sistema de aquecimento da residência, quando aplicados individualmente, tiveram economias similares para as três ocupações. O aquecimento parcial atingiu economias de 17-18% em casas com menor período e densidade de ocupação. Segundo os autores, além do desempenho térmico, a análise financeira se faz necessária para a tomada de decisão do tipo de medida de eficiência energética a ser adotada na edificação. No caso de reformas, medidas passivas como o isolamento térmico da envoltória, tende a exigir um investimento superior a medidas menos invasivas, como mudanças no sistema de aquecimento da residência.

Marshall et al. (2016) encontraram correlação entre a economia de energia e o tipo de ocupação das residências, porém, o comportamento dos usuários é considerado somente no acionamento do sistema de aquecimento, sendo este com temperaturas fixas e em função da presença ou não de pessoas. A simplificação do padrão de ocupação e do comportamento dos usuários é citada pelos autores como um dos fatores que podem ressaltar a diferença entre os valores reais e simulados. Além disso, outros parâmetros de entrada da simulação foram

inseridos de forma simplificada, considerando somente o período de inverno da cidade de Londres, com valor de infiltração fixo em 0,75 trocas de ar por hora, sem ventilação, temperatura do solo fixa em 10°C e ganhos internos nulos. Ter abordado somente a estação fria do ano e anulado os ganhos internos, leva a acreditar que não são encontradas temperaturas elevadas dentro das residências, superestimando o consumo com aquecimento e também validando as medidas de eficiência energética somente para o período de inverno, ignorando o risco de sobreaquecimento nas estações quentes atuais e futuras (LIU et al., 2016).

Peacock, Jenking e Kane (2010) investigaram o impacto das mudanças climáticas no risco de sobreaquecimento de uma mesma residência simulada para as cidades de Edimburgo e Londres. Os maiores problemas por sobreaquecimento foram encontrados para residências localizadas em Londres, Sul do Reino Unido (região mais quente), com envoltória leve (sistemas com transmitância térmica de 0,47 W/(m².K) e 0,37 W/(m².K) e capacidade térmica baixa). A envoltória considerada pesada (transmitância térmica de 1,60 W/(m².K) e capacidade térmica alta) teve os menores valores para o sobreaquecimento. Mesmo com a abertura das janelas sendo permitida, a temperatura interna esteve acima de 28°C em 12% das horas ocupadas nessas residências. Os critérios considerados para a abertura das janelas incluíram somente a época do ano e a hora do dia, da seguinte forma: durante o verão, as janelas não podem ser abertas; durante o restante do ano, a abertura das janelas ocorre respeitando critérios de ocupação e horário, ou seja, se houver ocupação no ambiente, as janelas são abertas, com exceção do período noturno, que permanecem fechadas. Com esse tipo de uso, durante a época mais crítica de sobreaquecimento (verão) não ocorre ventilação na residência e assim o ganho de calor passa a ser proveniente principalmente das cargas internas. O que poderia reduzir as horas de desconforto seria a programação do funcionamento das aberturas considerando a diferença de temperatura interna e externa, deixando abrir as janelas quando a temperatura externa for menor que a temperatura interna, dentro de determinados limites de conforto.

Fosas et al. (2018) investigaram o uso do isolamento térmico no aumento do risco de superaquecimento de residências naturalmente ventiladas, localizadas em 8 diferentes cidades: Cairo, Londres, Nova Deli, Nova Iorque, Xangai, Sevilha, Sydney e São Paulo. Cabe ressaltar que, embora o estudo considere diferentes cidades, somente alguns resultados foram apresentados discriminando por local. A pesquisa contou com a utilização do programa EnergyPlus e das linguagens computacionais *Phyton* e R. Foram simulados 576.000 casos, variando: latitude, clima, isolamento térmico, massa térmica, proporção de vidro, sombreamento, ocupação, infiltração, ventilação, orientação e modelos de conforto térmico. As tipologias adotadas como base foram uma residência unifamiliar e uma multifamiliar. A

edificação unifamiliar foi considerada térrea, com dois pavimentos, com aberturas na fachada principal e fundos da residência unifamiliar. A residência multifamiliar foi considerada na cobertura, com somente uma fachada com aberturas. Em ambos os casos, o fator de abertura para a ventilação foi considerado como 50%, sendo 5% da área de piso do ambiente. No apartamento, as paredes que fazem divisa com outras unidades habitacionais, foram consideradas adiabáticas. Os componentes da envoltória variaram da seguinte forma: cinco diferentes transmitâncias térmicas, entre $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$; 3 diferentes capacidades térmicas, entre $38,0 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $520,0 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$; três tamanhos de abertura, 8%, 11% e 14% da área de fachada; com e sem sombreamento. Todas as quatro orientações foram analisadas (norte, sul, leste e oeste). As variações adotadas com relação à ocupação consideraram um casal que ocupa a residência ao longo do dia e outro casal que não ocupa a residência no período entre 09h00 e 17h00. Para as questões de conforto térmico dos usuários, foram considerados dois modelos, o primeiro modelo assume temperaturas fixas para a abertura das janelas, o segundo modelo permite o aumento da temperatura limite para a abertura das janelas e o seu fechamento. As janelas somente podem ser abertas quando a temperatura interna é maior que a temperatura externa. O indicador utilizado para analisar o sobreaquecimento dos casos foi o desconforto, considerando a sua duração e intensidade ao longo do ano para as horas com temperaturas acima de 28°C . Por duração, os autores indicam como sendo a porcentagem de horas ocupadas em que as temperaturas ficaram acima de 28°C . Os autores indicam como intensidade, quantos graus acima da temperatura de 28°C , foram observados na residência, no período de ocupação. Os resultados encontrados mostram que a transmitância térmica ficou em quinto lugar na importância para a duração e em sétimo para a intensidade. A massa térmica foi o oitavo parâmetro mais importante para a duração e o nono para a intensidade do sobreaquecimento. A estratégia de abertura das janelas, ficou em segundo lugar de importância para a duração do sobreaquecimento e em terceiro sobre a intensidade do mesmo. O algoritmo de ventilação, que é referente à temperatura considerada para a abertura das janelas, ficou em segundo lugar de importância na intensidade do sobreaquecimento, isto demonstra que existe correlação entre altos valores para temperaturas internas e o tipo de controle de aberturas. Os autores concluem que não há evidência concreta entre o tipo de isolamento térmico da envoltória e o sobreaquecimento, a menos que a ventilação natural seja utilizada de forma indiscriminada (sem considerar critérios de temperatura que favoreçam o desempenho térmico).

Ghoreishi (2019) utilizou a interface do EnergyPlus, *Design Builder*, para a simulação de edificações residenciais, com envoltória de alta e baixa inércia térmica, localizadas nos Estados Unidos, para as cidades de: Miami, Fênix, Albulquerque, Chicago, Mineápolis, Duluth

e Fairbanks. Para a parede de alta inércia térmica, foi adotado o material concreto, variando a espessura entre 20, 30, 40 e 50 cm. Para as paredes de baixa inércia térmica, foi considerado um material metálico, caracterizando paredes equivalentes à de concreto (mesma transmitância térmica, porém diferente massa térmica). O autor buscou manter a equivalência entre a transmitância térmica da parede de concreto e a parede metálica. Os resultados encontrados mostraram que, comparando os casos com alta e baixa massa térmica, o uso de paredes com maior massa térmica melhorou o desempenho energético da edificação. Para o consumo de energia voltado à refrigeração, em São Francisco, a redução chegou a 27% para a parede de 20 cm. Para o aquecimento, em Miami, a redução chegou a 44% utilizando a parede de 20 cm. Cabe ressaltar que para a cidade de Miami os valores absolutos de aquecimento deram os menores entre as cidades analisadas, dessa forma, essa redução de 44%, quando analisado o valor em Watts, se torna de pouca relevância perto das demais cidades estudadas. Como espessura ideal da parede de massa térmica alta, os autores indicam a espessura de 20 cm como a melhor para otimização do consumo de energia para refrigeração e aquecimento. Outro trabalho que buscou verificar o impacto da massa térmica no desempenho térmico das edificações foi a pesquisa de Mantesi et al. (2019). Os autores buscaram analisar o desempenho térmico de edificações construídas com o material ICF (*Insulating Concrete Formwork* – camadas externas de isolante térmico com concreto na parte central da parede). O comportamento deste material foi comparado com outros dois tipos: com alta inércia, porém com a camada de concreto exposta ao ambiente; e um material com baixa inércia, considerando uma camada de reboco, isolante térmico e placa de gesso. Os três tipos de parede possuem transmitância térmica semelhante, entre 0,113 W/(m².K) e 0,115 W/(m².K). Os resultados encontrados demonstraram que a camada de concreto central, no material ICF, se mantém a uma temperatura constante, isto porque as camadas externas de isolamento reduzem o fluxo de calor pela parede. Devido ao fluxo de calor reduzido na parede de ICF, este material pode ser considerado como um fator de risco para o sobreaquecimento nas edificações localizadas em regiões quentes e com altos valores de cargas internas. No trabalho, os autores calibraram a simulação utilizando dados reais de uma edificação monitorada.

Envoltórias isoladas termicamente são indicadas para países com o clima predominantemente frio, uma vez que para manter a temperatura interna em patamares confortáveis, sem aumentar excessivamente o consumo energético, é necessário que o calor seja mantido dentro da edificação. Seguindo essa linha, pesquisas referentes à incorporação de medidas de eficiência energética em edificações residenciais (sejam estas localizadas em regiões de clima predominantemente frio ou quente), tendem a indicar o uso de envoltórias

isoladas, como forma de não permitir a perda de calor nas estações frias e o ganho nas estações quentes (DEPECKER et al., 2001; HEMSATH; ALAGHEBAND BANDHOSSEINI, 2015; MIRRAHIMI et al., 2016; PREMROV; ŽIGART; ŽEGARAC LESKOVAR, 2018). A *International Energy Agency*, IEA (2013), define diretrizes a serem aplicadas na envoltória como forma de melhorar a eficiência energética das edificações, recomendando a adoção de isolamento térmico também em climas quentes, como forma de manter a temperatura interna e não permitir a entrada de calor do exterior. Porém, como estudos já citados, a adoção de isolamento térmico pode gerar sobreaquecimentos dos ambientes, principalmente devido ao tipo de padrão de uso, que pode utilizar a ventilação natural de maneira incorreta, como também utilizar diferentes equipamentos eletrônicos aumentando a carga interna. Dessa maneira, somente importar estratégias de eficiência energética de outros países sem conhecer o clima, as características do setor da construção civil e também a população do local, pode ser um equívoco.

No Brasil, o setor construtivo, em especial o voltado para edificações de baixa renda, aumentou significativamente. Desde 2009 até março de 2017, o programa do governo federal Minha Casa Minha Vida (MCMV), chegou ao patamar de 3,8 milhões de unidades habitacionais entregues (BRASIL, 2017). Diante da grande quantidade de projetos executados, Triana, Lamberts e Sassi (2015) elaboraram modelos de tipologias representativas do MCMV (nível 1 e 2 de renda), utilizando levantamentos dos empreendimentos contratados até o final de abril de 2014. Para o nível 1 de renda, as tipologias representativas encontradas foram a residência unifamiliar isolada, a geminada e a multifamiliar de planta H de quatro a cinco pavimentos com quatro apartamentos por pavimento. Para o nível de renda 2, foram definidas como representativas somente tipologias multifamiliares, a primeira linear com cinco pavimentos com seis a oito apartamentos por pavimento e a segunda em formato H de quatro a seis pavimentos com quatro apartamentos por pavimento. Na Tabela 1 estão listadas as características dos componentes representativos da envoltória das tipologias levantadas. Para as paredes não foi definida a absorvância, uma vez que este parâmetro não foi observado na maioria dos projetos levantados pelo estudo. Na Tabela 1: U: transmitância térmica; CT: capacidade térmica; FS: fator solar.

Tabela 1 – Características das tipologias representativas do MCMV.

Tipologia	Parede	Cobertura	Aberturas
-----------	--------	-----------	-----------

NÍVEL 1	Unifamiliar	Bloco cerâmico com reboco U: 2,43 W/(m².K) CT: 132,00 kJ/(m².K)	Telha cerâmica e forro de madeira – α : 0,60 U: 1,75 W/(m².K) CT: 21,40 kJ/(m².K)	Vidro transparente 3,00 mm U: 5,70 W/(m².K) FS: 0,87
	Geminada			
	Multifamiliar planta H	Painel de concreto 10,00 cm U: 4,40 W/(m².K) CT: 240,00 kJ/(m².K)	Telha de fibrocimento e forro de laje de concreto – α : 0,7 U: 2,06 W/(m².K) CT: 233,00 kJ/(m².K)	
NÍVEL 2	Multifamiliar planta linear	Bloco de concreto com reboco U: 2,80 W/(m².K) CT: 209,00 kJ/(m².K)		
	Multifamiliar planta H			

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

A partir das tipologias representativas e seus componentes construtivos, Triana, Lamberts e Sassi (2015) puderam verificar que não existe distinção entre projetos, e suas respectivas características, executados nas diferentes regiões brasileiras. A eficiência energética da envoltória das tipologias foi analisada para as zonas bioclimáticas 3 e 8, através das diretrizes da etiquetagem brasileira para edificações residenciais, que classifica a edificação de A (mais eficiente) até E (menos eficiente) (BRASIL, 2012). Dos projetos levantados, variando a absorvância das paredes (em 0,3, 0,5 e 0,7) e orientação (norte, sul, leste, oeste), as classes de eficiência energética para a envoltória foram C, D e E. Com esses resultados, perante a etiquetagem de eficiência energética brasileira, o setor construtivo atual não busca a economia de energia da população, mas sim a construção em massa de edificações com baixo desempenho térmico e energético. Sendo assim, se faz necessária a aplicação de políticas públicas que incentivem a melhoria das edificações brasileiras.

Em um estudo mais recente, Triana, Lamberts e Sassi (2018) reforçam a necessidade de aplicação de medidas de eficiência energética nas edificações residenciais, através do estudo utilizando a tipologia unifamiliar isolada representativa da classe de nível 1 de renda, levantada no trabalho anterior (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015). O desempenho térmico e energético foi analisado através de simulação computacional, utilizando o programa EnergyPlus, sendo consideradas quatro zonas térmicas: sala, quarto 1 e 2, e banheiro. Foram estudadas as cidades de São Paulo e Salvador, considerando três cenários climáticos para as simulações: primeiro com os arquivos climáticos atuais, depois considerando as mudanças climáticas nos anos de 2020 e 2050. Os anos futuros foram considerados, uma vez que as

edificações são construídas para serem utilizadas por no mínimo 50 anos e isto significa que irão enfrentar as consequências das mudanças climáticas previstas. Na edificação, além das características construtivas atuais, já expostas na Tabela 1, foi considerada a aplicação de medidas de eficiência energética, tais como: aplicação de esquadrias que melhoram a ventilação, redução de transmitância térmica dos componentes construtivos, redução da absorvância solar da envoltória, aplicação de sombreamento (veneziana nas aberturas) e diferentes fatores de ventilação (45% e 90% de abertura para ventilação nas janelas). Essas medidas de eficiência energética (MEE), foram inicialmente adicionadas na simulação de forma paramétrica e, posteriormente, combinada. Os dados de saída da simulação utilizados para a análise foram os graus-hora de resfriamento e consumo de energia. Os limites para os graus-hora foram de 19,5°C para aquecimento e 26°C para refrigeração. Ao todo foram executadas 2.460 simulações no programa computacional EnergyPlus. Como resultados obtidos, o cenário futuro (baseado nos arquivos climáticos modificados para os anos de 2020 e 2050) apontou como tendência o aumento da necessidade de refrigeração. Dessa forma, o caso base (tipologia e características construtivas levantadas por Triana, Lamberts e Sassi (2015)) apresentaria um desempenho térmico pior frente aos arquivos modificados para o cenário futuro. Para a cidade de São Paulo, as medidas de eficiência energética que apresentaram melhorias mais significativas foram as aplicadas nas paredes com baixa transmitância térmica e capacidade térmica média/alta e nos telhados com isolamento e baixa absorvância solar. As medidas aplicadas nas janelas não alteraram significativamente o desempenho da residência ao longo dos anos. Em Salvador, as medidas analisadas que apresentaram melhorias mais significativas foram relacionadas à redução da absorvância solar da envoltória, isolante térmico no telhado e sombreamento na janela da sala. O aumento no percentual de abertura para ventilação, aliado ao aumento do tamanho da abertura de janela, reduziu os ganhos de calor, em Salvador. A pesquisa mostrou ainda que práticas comumente adotadas na construção civil, como a construção de paredes de concreto sem isolamento térmico e utilização de absorvância solar alta na envoltória, afetam negativamente o desempenho térmico da edificação, para os casos simulados. Triana, Lamberts e Sassi (2018) observaram em seu estudo que a ventilação natural é uma medida de eficiência energética que apresentou bons resultados para a cidade de Salvador. Sorgato (2009), em seu estudo envolvendo edificações residenciais naturalmente ventiladas, mostrou através do balanço térmico no ar dos ambientes que o principal meio de perda de calor é a ventilação natural, especialmente em envoltórias com paredes com baixo valor de transmitância térmica. Isto se dá pelo fato de que paredes mais isoladas tendem a dificultar a dissipação de calor para o ambiente externo, o que passa a ocorrer pela ventilação

natural. Já para o ganho de calor interno, o fator com maior influência foi a ocupação, sendo mais relevante nos ambientes de menor área.

Tubelo et al. (2018) analisaram o custo econômico de melhorar a envoltória de uma residência de interesse social nas cidades brasileira de Curitiba, São Paulo e Porto Alegre. A residência adotada é unifamiliar térrea, com sombreamento horizontal na fachada norte. Os componentes construtivos adotados foram desde os comumente utilizados no setor da construção civil brasileira (por exemplo blocos cerâmicos) até componentes massivamente isolados, utilizando como base nas diretrizes da certificação *Passivhaus*. O piso foi considerado isolado e mantido constante nas simulações. Foram consideradas as cargas internas de iluminação e equipamentos, a ocupação de duas pessoas por dormitório que permanecem na residência por 10 horas durante a semana e 12 aos finais de semana. A ventilação natural considerada foi seletiva, ou seja, durante um determinado período do ano (verão e entre os meses de abril e outubro), sendo os critérios de temperatura 23°C e 25°C (com 23°C todas as janelas da residência abrem parcialmente, com 25°C abrem completamente), além de que, quando a temperatura externa excede a interna, as janelas são totalmente fechadas. Não foi utilizada ventilação mecânica para a renovação do ar. Foram consideradas duas taxas de infiltração, sendo de 1,00 e 0,15 trocas de ar por hora. As simulações foram realizadas no *Thermal Analysis Simulation (TAS)*, considerando duas zonas térmicas, o ático e o pavimento térreo, desconsiderando, portanto, as paredes que dividem os ambientes internamente. Foram analisados dois intervalos de temperatura, o primeiro mais amplo, de 18-29°C, o segundo, que foi considerado na avaliação de custo econômico, com temperaturas entre 20-25°C. Os resultados mostraram que o melhor desempenho térmico foi obtido para as envoltórias altamente isoladas, que obtiveram o menor número de graus-horas de aquecimento para os dois intervalos de temperatura analisados. Cabe ressaltar que, a consideração do piso isolado, desfavorece as envoltórias sem isolamento térmico nas paredes e cobertura, pois a troca de calor entre o solo e a edificação é limitada, reduzindo o resfriamento passivo da edificação por esse meio. Outro ponto, foi simular a edificação somente com duas zonas térmicas, reduzindo a proximidade com o desempenho real, uma vez que os cômodos da residência não são discriminados e, dessa forma, não é considerado o diferente comportamento térmico entre os ambientes, as trocas de calor, diferenças na ocupação, entre outros pontos. O estudo utiliza como objeto de estudo climas brasileiros que têm como característica invernos frios e restante do ano com temperaturas amenas (Curitiba, Porto Alegre e São Paulo), porém, mesmo nessas cidades, o uso do isolamento térmico massivo na fachada pode favorecer o sobreaquecimento dos ambientes, e conseqüentemente aumentar a necessidade de refrigeração da residência, uma

vez que no Brasil existe a possibilidade de ventilar as residências, sendo essa uma estratégia de resfriamento passivo muito utilizada por questões como: conforto térmico, saúde e psicológicas (PACHECO; LAMBERTS, 2013). Por conta de a ventilação natural ser utilizada por questões além do conforto térmico, as pessoas não utilizam um critério de temperatura para a operação das janelas, por exemplo. Isso significa que, os usuários tendem a abrir as janelas mesmo nos horários em que a temperatura externa excede a temperatura interna, e a ventilação natural não seria adequada, refletindo no aumento da temperatura do ambiente. Além disso, as cargas internas (equipamentos, iluminação e pessoas), tendem a aumentar a temperatura do ambiente, e uma vez isolada a envoltória, o calor interno não consegue ser dissipado para o ambiente externo, gerando o sobreaquecimento da residência. Com o aumento da temperatura no planeta devido às mudanças climáticas, o sobreaquecimento das residências tende a ser cada vez mais comum. Pathan et al. (2017) monitoraram 122 residências localizadas em Londres, durante o período de verão nos anos de 2009 e 2010. O levantamento mostrou que no ano de 2009, 29% das salas e 31% dos dormitórios monitorados tiveram mais de 1% das horas ocupadas fora da zona de conforto recomendada pela ASHRAE Standard 55, com 90% de aceitabilidade. Em 2010, esses números aumentaram, passando para 37% das salas e 49% dos dormitórios. A partir dessa pesquisa, os autores recomendam a revisão dos códigos e certificações, visto que, com as diretrizes construtivas recomendadas atualmente, as edificações tendem a não proporcionar temperaturas aceitáveis para a habitabilidade, especialmente nos climas futuros.

Diante desses estudos, é possível analisar que melhorar o desempenho térmico e energético das edificações, a fim de torná-las mais eficiente, é um desafio para os projetistas. Diferentes abordagens para um mesmo dado de entrada, podem favorecer o comportamento de determinados parâmetros. Como apresentado, análises de desempenho térmico e energético devem considerar diversas variáveis, desde clima, características físicas da edificação e comportamentais dos usuários. Estudos que indiquem as melhores estratégias para o Brasil, com a visão do setor construtivo brasileiro e não somente que tentem importar tecnologias internacionais, podem auxiliar na implantação de políticas públicas, como normas e diretrizes, que visem a melhoria do setor construtivo do país.

O governo brasileiro começou a preocupar-se em economizar energia no ano de 2001, com a promulgação da Lei da Eficiência Energética, tendo como objetivo incentivar a implementação de pesquisas envolvendo o desempenho energético de diversos produtos, juntamente com as edificações (BRASIL, 2001). Em 2005, buscando melhorar os níveis de desempenho térmico das edificações residenciais de interesse social, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou a NBR 15220 (ABNT, 2005a). A norma é dividida em cinco

partes, onde são apresentadas definições, propriedades térmicas de elementos construtivos e sistemas, método de cálculo de propriedades térmicas e também diretrizes construtivas para cada uma das oito zonas bioclimáticas brasileiras, que são também apresentadas na NBR 15220.

Já no ano de 2008, como forma de elevar os padrões construtivos brasileiros, a ABNT lançou a NBR 15575 (ABNT, 2013). A NBR 15575 é dividida em seis partes e contém critérios para atendimento do desempenho mínimo em diversas áreas, entre elas a térmica. O desempenho térmico é abordado nas partes 1, 4 e 5 da NBR 15575, que são referentes aos requisitos gerais, aos sistemas de vedação vertical, e à cobertura, respectivamente. Os critérios de desempenho térmico podem ser avaliados através de três procedimentos: simplificado, simulação e medição, sendo o último somente informativo. Desde 2013, a NBR 15575 tornou-se obrigatória. Atualmente a NBR 15575 encontra-se em revisão (CBIC, 2018), já possuindo uma nova proposta para a classificação do desempenho térmico pelo método simplificado e de simulação (LABEEE, 2019).

Na versão atual da NBR 15575 o método de simulação avalia o desempenho térmico das residências considerando um dia típico de projeto, a edificação não tem nenhum tipo de carga interna, e é considerada uma taxa de renovação constante (ABNT, 2013). O indicador de desempenho térmico é a temperatura interna do ambiente e a temperatura externa, sendo que, para a condição de verão, a temperatura interna deve ser inferior à externa, e na condição de inverno a temperatura interna deve ser superior à externa do dia típico adotado. São avaliados os ambientes correspondentes à sala e aos dormitórios. Com esse tipo de análise, não são consideradas as variações nas condições climáticas ao longo do ano. Além disso, como já mencionado nesta revisão, os usuários têm influência significativa no desempenho térmico das edificações. Assim, simular a residência sem considerar a interação do usuário com os espaços aumenta a lacuna entre o desempenho térmico simulado e o real. Na proposta de novo método de simulação para avaliação do desempenho térmico da NBR 15575 essas e outras falhas presentes na versão atual estão sendo corrigidas (LABEEE, 2019). Na nova proposta, a edificação deve ser simulada com o uso de arquivos climáticos que representem um ano inteiro. Quanto às cargas internas, deve ser considerada a ocupação, iluminação e equipamentos. Para a ocupação da sala deve ser considerada a presença de duas pessoas das 14h00 às 17h59, e quatro pessoas das 18h00 às 21h59. Caso a residência tenha somente um dormitório, serão duas pessoas das 14h00 às 21h59. Para os dormitórios a ocupação deve ser modelada para ocorrer das 22h00 às 07h59. O sistema de iluminação deve ser acionado na sala das 16h00 às 21h59, nos dormitórios deverá ser acionado em dois períodos, das 06h00 às 07h59 e das 22h00 às 23h59. As cargas internas correspondentes aos equipamentos são consideradas somente na sala,

no período igual a ocupação, das 14h00 às 21h59. Outro diferencial da proposta de novo método de simulação de desempenho térmico da NBR 15575 é a consideração da residência ventilada naturalmente ou condicionada artificialmente, este através da modelagem do sistema de condicionamento de ar ideal (*Ideal Loads Air System*).

Além de normas, as certificações e etiquetas de eficiência energética vêm sendo adotadas como forma de política pública de incentivo a prática de melhor desempenho térmico e energético nas edificações. Atualmente, existem cerca de 113 tipos diferentes de políticas públicas (certificações e/ou códigos) no mundo com o foco em eficiência energética em edificações (IEA, 2018c). Dentre essas políticas públicas, 81 são voltadas a edificações residenciais, sendo 70 destas obrigatórias. No Brasil, nos anos de 2009 e 2010, foram lançados os Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações, voltados a edificações comerciais, de serviços e públicas (RTQ-C) e as edificações residenciais (RTQ-R) (BRASIL, 2010, 2012). Esses documentos apresentam as diretrizes para obtenção da classe de eficiência energética das edificações, classificando-as de A (mais eficientes) até E (menos eficientes). A etiquetagem de edificações no Brasil, não é obrigatória, com exceção das edificações públicas federais, conforme Instrução Normativa nº 2 publicada em 4 de junho de 2014 (BRASIL, 2014). Ambos os documentos, RTQ-C e RTQ-R, encontram-se em revisão (CB3E, 2018a, 2018b).

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO

O consumo em energia elétrica vem aumentando ao longo dos anos em todo o mundo, sendo as edificações residenciais responsáveis por boa parte do total. Um dos fatores principais para o crescimento do consumo de energia elétrica nas edificações residenciais é o aumento da demanda por climatização dos ambientes. A fim de tentar reduzir o aumento da necessidade de refrigeração dos ambientes, diversas pesquisas buscam analisar o desempenho térmico das edificações através do uso de simulação computacional. Entretanto, para que o resultado obtido na simulação represente com acurácia o real desempenho térmico da edificação, os parâmetros de entrada devem ser inseridos na análise de maneira condizente com o que será construído e, principalmente, da maneira como a edificação será operada na fase pós-ocupação.

Diferentes estudos apresentados no referencial teórico aqui exposto, mostram que quando comparado os resultados simulados e os reais, na grande maioria dos casos existe uma lacuna entre esses valores. Essa diferença pode estar relacionada às simplificações, especialmente no que diz respeito à ocupação e ao comportamento dos usuários. Porém para a

determinação do padrão de uso que irá utilizar a edificação são necessárias informações que, geralmente, somente serão obtidas na fase pós-ocupação. Devido à complexidade da modelagem do padrão de uso, alguns estudos mostram que podem ser realizadas simplificações. No caso de políticas públicas para promoção da eficiência energética, por exemplo, a modelagem do padrão de uso (padrão de ocupação e comportamento), pode ser simplificada, porém, sempre buscando representar de forma mais abrangente possível a população do local em que se deseja implementar as políticas públicas.

Analisar o desempenho térmico e energético de edificações sem a modelagem correta do padrão de uso, pode favorecer estratégias de eficiência energética que não são adequadas ao local onde a edificação será construída. Por exemplo, algumas pesquisas indicam o uso de isolamento térmico na envoltória de edificações construídas tanto em climas frios quanto quentes, porém, adotar esse tipo de estratégia sem antes analisar as condições climáticas e o padrão de uso pode levar a construção de edificações sem o desempenho térmico mínimo adequado.

3 MÉTODO

O método utilizado para o desenvolvimento deste trabalho é dividido três seções principais. A primeira é a definição do caso base, que corresponde à tipologia da edificação e aos parâmetros de entrada fixos na simulação computacional; a segunda seção é a definição das variações a serem aplicadas no caso base, correspondendo às mudanças na envoltória, no padrão de uso, quais os climas estudados e às variações no critério de cálculo da carga térmica de refrigeração; e, por fim, a terceira seção é a definição da maneira como os resultados foram analisados. Na terceira seção, além dos indicadores de desempenho térmico definidos, foi apresentada o método aplicado para a análise do balanço térmico, a fim de caracterizar quais as principais fontes de ganho e perda de calor nos ambientes de permanência prolongada.

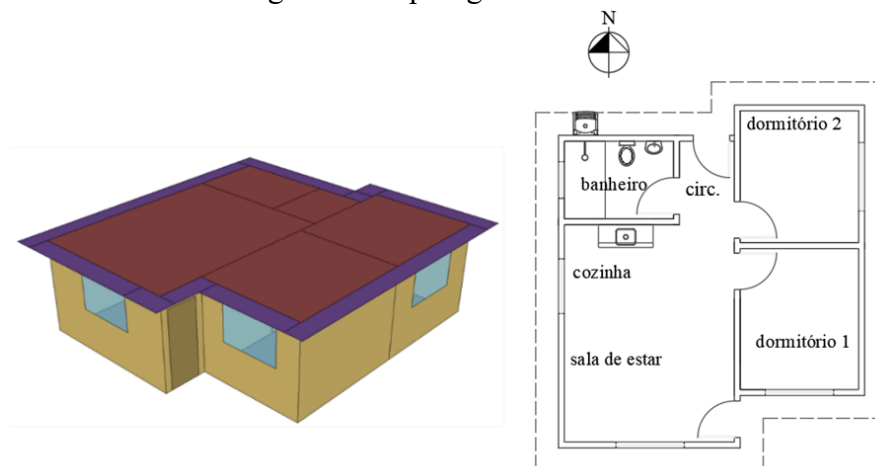
Para o desenvolvimento das etapas deste trabalho foram utilizadas as ferramentas EnergyPlus (versão 9.0.1) e R (versão 3.5.1). O EnergyPlus é um programa computacional que permite prever, por exemplo, a carga térmica necessária para refrigerar ou aquecer os ambientes de uma edificação. No programa EnergyPlus, uma das classes de objetos explorada foi o *Energy Management System* (EMS). Esta classe permite o desenvolvimento de códigos para a execução de determinados critérios. Um exemplo de aplicação, que inclusive foi utilizado neste trabalho, envolve o acionamento do cálculo da carga térmica integrada. A linguagem R é um ambiente computacional voltado para análises estatísticas e gráficas, além de manipulação de dados. Os códigos desenvolvidos em linguagem R foram utilizados no desenvolvimento dos casos a serem simulados e na análise dos resultados obtidos.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO – CASO BASE

No Brasil, a grande maioria da população reside em residências unifamiliares. Segundo a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) do IBGE (2015), em 2015 88,3% da população residia em casas, já a Pesquisa de Posses e Hábitos de Consumo (PPHC) da Eletrobrás e PROCEL (2019) indica que em 2019 cerca de 95,9% da população reside em residências unifamiliares térreas, principalmente a população de baixa e média renda. A fim de abranger esses casos, a tipologia utilizada neste trabalho é uma edificação residencial unifamiliar de dois dormitórios, um banheiro e uma sala com cozinha conjugada, conforme o projeto representativo de habitações sociais levantado por Triana, Lamberts e Sassi (2015), para a faixa de renda 1 (até R\$ 1.600,00 de renda familiar). A orientação solar não foi alterada, permanecendo a mesma do projeto levantado, dessa maneira a fachada principal é voltada para

o sul, correspondendo às fachadas da sala e dormitório 1, ambas com aberturas. A perspectiva da residência e sua planta baixa podem ser visualizadas na Figura 4. Na Tabela 2 são definidas as áreas úteis dos ambientes, conforme a geometria modelada na simulação.

Figura 4 – Tipologia unifamiliar.



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

Tabela 2 – Área útil de cada ambiente da residência unifamiliar.

Ambiente	Área Útil (m²)
Sala e Cozinha Conjugada + Circulação	21,43
Dormitório 1	8,85
Dormitório 2	8,30
Banheiro	4,66
Total UH:	43,24

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os parâmetros de entrada definidos para o caso base incluem características geométricas, levantadas por Triana, Lamberts e Sassi (2015), e definições presentes na proposta de novo método de simulação computacional para avaliação de desempenho térmico de edificações residenciais da NBR 15575 (LABEEE, 2019).

As características da edificação modelada incluem: pé-direito de 2,50 m, beiral com 0,50 m, esquadrias em metal, sem venezianas. As portas internas e externas são de madeira com dimensões de 0,80 m de largura e 2,10 m de altura, sendo uma folha pivotante. A área de abertura das portas é de 1,68 m². As janelas da sala de estar, cozinha e dormitórios da residência são duas folhas com deslizamento horizontal, com peitoril de 1,10 m. No banheiro, a janela é do tipo pivotante com eixo horizontal superior e possui peitoril de 1,60 m. Outras características das janelas são descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Informações das janelas dos ambientes da residência unifamiliar.

Ambiente	Área de abertura (m²)	Orientação	Fator de Ventilação
Sala de estar com cozinha conjugada	1,50	Sul	0,45
	1,20	Oeste	0,45
Dormitório 1	1,50	Sul	0,45
Dormitório 2	1,50	Leste	0,45
Banheiro	0,48	Oeste	0,90

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Sobre a ventilação natural pelas aberturas (portas e janelas), conforme as definições da proposta de método de simulação computacional da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais (LABEEE, 2019), as portas permanecem sempre fechadas, ocorrendo infiltração pelas frestas; a janela do banheiro é considerada sempre aberta, ou seja, com ventilação constante. As demais janelas, localizadas nos ambientes de permanência prolongada (APP) da residência, têm seus critérios de ventilação definidos na seção 3.2.2.2 deste trabalho, item referente às variações no padrão de uso. Cabe ressaltar que, mesmo com as janelas e portas fechadas, ocorre infiltração por frestas.

Foi mantido o mesmo tipo de vidro para a análise dos sistemas construtivos, considerando vidro simples de 3,00 mm, com fator solar de 0,87 e transmitância térmica de 5,70 W/(m².K). A absorptância térmica dos materiais foi considerada a mesma em todas as simulações, sendo adotado um valor de 0,50 para paredes e cobertura.

O calor gerado nos ambientes devido aos equipamentos, à presença de pessoas e ao sistema de iluminação será constante, conforme os valores indicados nas Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6. Esses parâmetros de entrada foram adotados com base na proposta de método de simulação da NBR 15575 (LABEEE, 2019), para a avaliação do desempenho térmico de residências. A indicação dos períodos em que ocorrerá a presença de pessoas nos ambientes e, conseqüentemente, a utilização dos equipamentos e do sistema de iluminação, está descrita na seção 3.2.2.1 uma vez que isso depende do tipo de ocupação dos usuários.

Tabela 4 – Equipamentos.

Ambiente	Potência (W)
Sala	120

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 5 – Pessoas.

Ambiente	Atividade realizada	Calor produzido (W/m ²)	Calor produzido para área de pele = 1,80 m ² (W)
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	45	81

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 6 – Iluminação.

Ambiente	DPI - Densidade de potência instalada (W/m ²)
Sala	5,0
Dormitórios	5,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Por ser uma edificação térrea, será modelado o contato com o solo. No programa EnergyPlus, a simulação do solo pode ser realizada de diferentes formas, variando em grau de detalhamento e exigência computacional (ELI et al., 2019a, 2019b). A forma mais simplificada utiliza as temperaturas médias do solo, extraídas dos arquivos climáticos. A forma mais detalhada utiliza o pré-processador *Slab*, que necessita de simulações extras para a predição das temperaturas do solo a serem utilizadas na simulação computacional. Por fim, o *Ground Domain*, é a terceira forma de modelagem do solo na simulação pelo programa EnergyPlus. Nesta forma de modelagem, as temperaturas do solo são calculadas de maneira iterativa, através de três métodos distintos: *Finite Difference*, *Kusuda-Achenbach* e *Xing*. Neste trabalho, foi utilizado o método *Finite Difference* do objeto *Ground Domain*, conforme exemplo do manual de uso do objeto *Ground Domain* desenvolvido no LabEEE/UFSC (ELI et al., 2019b).

3.2 VARIAÇÕES NO CASO BASE

3.2.1 Envoltória

Para a envoltória, foram analisados cinco sistemas construtivos, variando a composição da cobertura, Tabela 7, e das paredes, Tabela 8, buscando atender desde padrões construtivos consolidados como referência no Brasil (ELETROBRAS; PROCEL, 2019; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015), quanto sistemas construtivos com isolamento térmico, ainda pouco empregados em residências brasileiras. Os valores de transmitância térmica e capacidade térmica, presentes na Tabela 7 e Tabela 8, foram calculados conforme a NBR

15220-2 (ABNT, 2005a). Nessas tabelas, U corresponde à transmitância térmica [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$] e CT à capacidade térmica [$\text{kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$].

Tabela 7 – Tipos de cobertura adotados no trabalho.

ID	Cobertura	
	Composição	Características Térmicas
Cobertura 1	Telha de fibrocimento (0,008 m) + Câmara de ar ($> 0,05$ m) + Concreto (0,10 m)	U: 2,04 CT: 231,42
Cobertura 2	Telha de fibrocimento (0,008 m) + Manta de baixa emissividade (alumínio) + Câmara de ar ($> 0,05$ m) + Lã de vidro (0,08 m) + Placa de gesso (0,0125 m)	U: 0,38 CT: 24,29
Cobertura 3	Telha de fibrocimento (0,008 m) + Manta de baixa emissividade (alumínio) + Câmara de ar ($> 0,05$ m) + Lã de vidro (0,05 m) + Concreto (0,10 m)	U: 0,50 CT: 233,35

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 8 – Tipos de paredes adotados no trabalho.

ID	Paredes Externas		Paredes Internas	
	Composição	Características Térmicas	Composição	Características Térmicas
Parede 1	Concreto (0,10 m)	U: 4,40 CT: 220,00	Iguais às paredes externas	
Parede 2	Argamassa (0,025 m) + Tijolo cerâmico vazado (0,19 m) + Argamassa (0,025 m)	U: 2,39 CT: 151,00	Iguais às paredes externas	
Parede 3	Placa cimentícia (0,01 m) + Lã de vidro (0,08 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
Parede 4	Lã de vidro – externa (0,05 m) + Concreto (0,10 m)	U: 0,75 CT: 221,93	Concreto (0,10 m)	U: 4,40 CT: 220,00

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A combinação de parede e cobertura para cada uma das cinco envoltórias analisadas pode ser visualizada na Tabela 9. Para a definição das cinco combinações estudadas, buscou-se

manter a proximidade com o que realmente é construído, como a Envoltória 1 e Envoltória 2, além de outras alternativas que pudessem ser aplicadas, como a envoltória 3, 4 e 5.

Tabela 9 – Envoltórias utilizadas (combinação parede e cobertura).

ID Envoltória	Composição Paredes e Cobertura
Envoltória 1	Parede 1 + Cobertura 1
Envoltória 2	Parede 2 + Cobertura 1
Envoltória 3	Parede 3 + Cobertura 2
Envoltória 4	Parede 4 + Cobertura 1
Envoltória 5	Parede 4 + Cobertura 3

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Entre as cinco combinações de envoltórias presentes na Tabela 9, as Envoltórias 1 e 2 não possuem isolamento térmico, sendo que, entre os componentes analisados, essas possuem elevada inércia térmica e transmitância térmica. A Envoltória 1 tem como principal componente do sistema o concreto com 0,10 metros de espessura nas paredes e na laje da cobertura. A Envoltória 2 é composta de tijolo cerâmico vazado nas paredes internas e externas, e cobertura com laje em concreto e telha de fibrocimento. As Envoltórias 3, 4 e 5 possuem como característica o uso de isolamento térmico, sendo nas paredes externas e cobertura nas composições 3 e 5, e somente nas paredes externas na composição 4. A Envoltória 3 busca representar construções em *steel frame*, sendo a composição que, entre as envoltórias analisadas, apresenta o valor mais baixo de capacidade térmica e transmitância térmica. As Envoltórias 4 e 5 possuem a mesma parede externa, com concreto e isolamento térmico. Já a composição da cobertura variou entre alta inércia térmica e alta transmitância térmica e alta inércia térmica com baixa transmitância térmica. Nas Envoltórias 3, 4 e 5, as paredes internas são diferentes das externas, enquanto que nas Envoltórias 1 e 2 as paredes internas permaneceram com a mesma composição das paredes externas, mantendo a similaridade com o que é usualmente construído.

3.2.2 Padrão de Uso

A maneira como as pessoas ocupam e se comportam nos espaços depende de diversos aspectos tendo papel importante no desempenho térmico das edificações. Neste trabalho, o padrão de uso se refere ao perfil de ocupação e ao comportamento. Por perfil de ocupação, entende-se os períodos em que há pessoas nos ambientes de permanência prolongada, sala e dormitórios, como também a quantidade de pessoas. Por comportamento entende-se a interação

das pessoas com as janelas, para ventilação natural, e com o sistema de condicionamento de ar, neste trabalho representado como o cálculo da carga térmica ideal. Foram simulados nove padrões de uso, resultante da combinação de três padrões de ocupação e três comportamentos distintos.

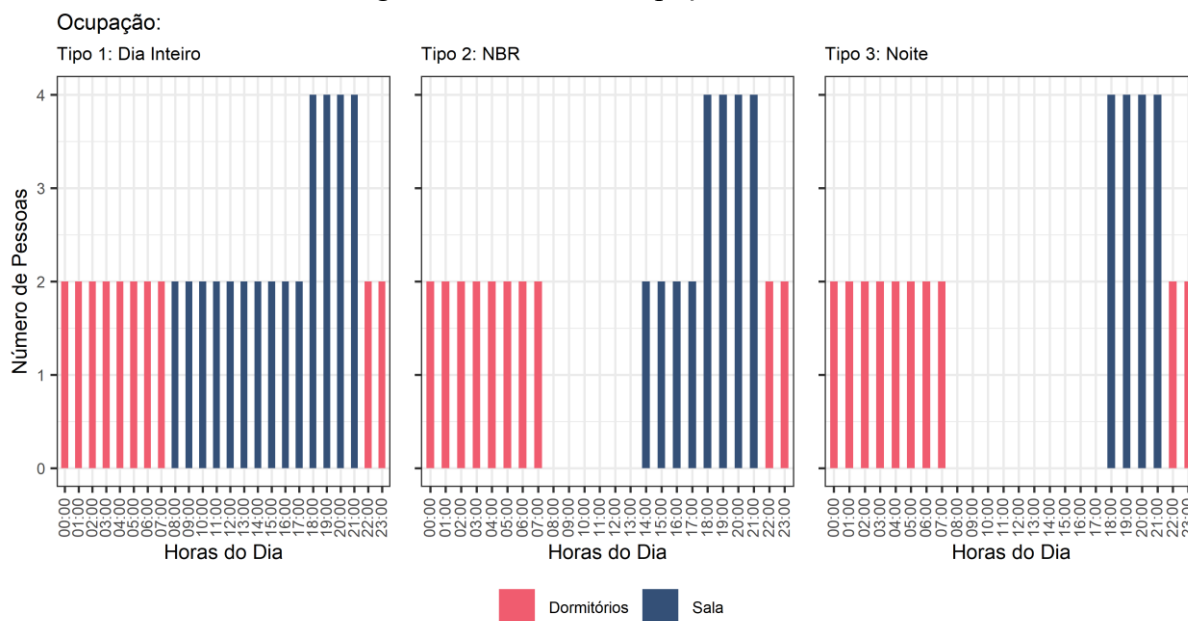
3.2.2.1 Perfil de Ocupação

Para o perfil de ocupação das residências brasileiras, levantamentos apontam que é maior a frequência de pessoas que permanecem em casa somente no período noturno, configurando perfis que trabalham e/ou estudam durante todo o período diurno (RAMOS, 2019). Além deste padrão, outro recorrente é o das pessoas que trabalham como *home office*, por exemplo, e dessa maneira sempre há pelo menos uma pessoa em casa durante todo o dia. Já a proposta de novo método de simulação para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais da NBR 15575 (LABEEE, 2019), indica um padrão de ocupação intermediário a esses citados, considerando que somente em um período do dia não haverá pessoas na residência, representando, por exemplo, pessoas que trabalham meio período.

Tendo como referência esses estudos, neste trabalho foram utilizadas três variações no perfil de ocupação, sendo dois perfis considerando a residência parcialmente ocupada e um perfil com a residência ocupada em todas as horas do dia, conforme apresentado na Figura 5. O eixo x corresponde às horas do dia e o eixo y à ocupação, ou seja, o número de pessoas.

O horário e a densidade de ocupação nos dormitórios foram fixados em duas pessoas das 22h00 às 07h59 para todas as análises. Para a sala, foram estudadas três variações de ocupação. A ocupação 1, Dia Inteiro, corresponde ao uso da sala das 8h00 às 21h59, sendo ocupada por duas pessoas entre 8h00 e 17h59 e no restante do período por quatro pessoas. Na ocupação 2, NBR, a ocupação na sala inicia às 14h00 encerrando às 21h59, sendo ocupada por duas pessoas entre 14h00 e 17h59, e por quatro pessoas no restante do período. Na ocupação 3, Noite, a ocupação da sala ocorre entre 18h00 até 21h59, com um total de quatro pessoas durante todo o período.

Figura 5 – Perfis de ocupação adotados.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O sistema de iluminação é acionado conforme a presença de pessoas no ambiente. Nos dormitórios, para todos os perfis de ocupação, o sistema de iluminação é acionado nos períodos das 6h00 às 7h59 e das 22h00 às 23h59. Na sala, para os perfis de ocupação tipo 1 e 2, Dia Inteiro e NBR, o sistema de iluminação é acionado das 16h00 até 21h59, quando a ocupação é encerrada naquele ambiente. Para o perfil de ocupação tipo 3, Noite, o sistema de iluminação da sala é acionado durante todo o período de ocupação, das 18h00 às 21h59.

3.2.2.2 Comportamento do usuário

As variações no comportamento do usuário consideram a interação das pessoas com a abertura das janelas para ventilação natural e o acionamento do sistema de condicionamento de ar. Como já citado, no Brasil, as pessoas ao sentirem calor em suas residências, têm como primeira atitude a abertura das janelas para ventilação natural. Isto ocorre devido a aspectos culturais, como também à inexistência de condicionamento de ar nas residências. Porém observa-se aumento na compra destes equipamentos para atender residências, o que justifica as análises de desempenho térmico com o foco no uso da ventilação natural e do sistema de condicionamento de ar.

Os comportamentos do usuário adotados neste trabalho foram nomeados como: Ventilação Natural (VN), Ar Condicionado (AC) e Híbrido (H). No comportamento do usuário VN, a abertura das janelas ocorre somente se a temperatura do ar no ambiente for maior que

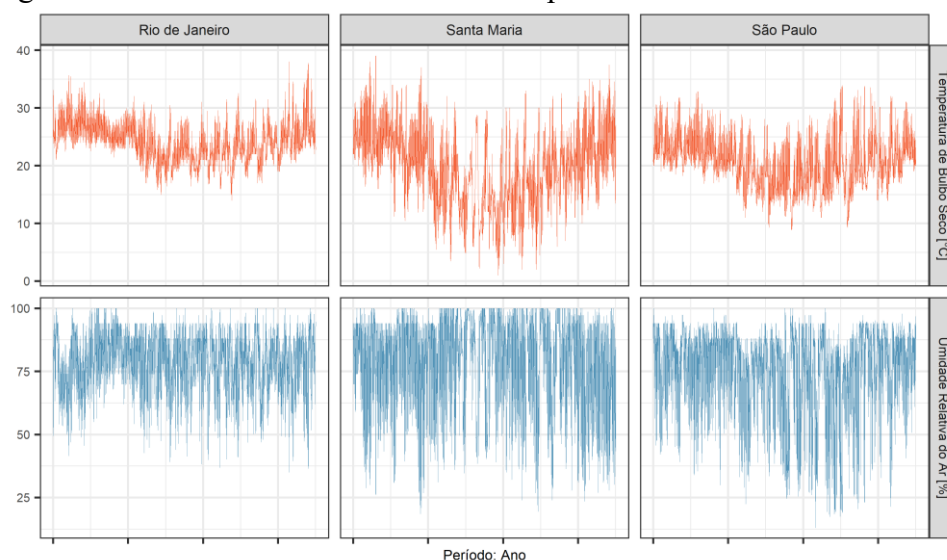
19°C e a temperatura externa for menor que a temperatura do ar no ambiente. Além de critérios de temperatura, há o critério de ocupação. Na sala as janelas somente podem ser abertas se o ambiente estiver ocupado, já nos dormitórios, se há ocupação na residência, as janelas podem ser abertas. No comportamento do usuário AC, se a temperatura operativa do ambiente for maior ou igual a 26°C, o cálculo da carga térmica de refrigeração é iniciado para reduzir a temperatura do ar e mantê-la a 23°C, se a temperatura operativa do ambiente for menor ou igual a 16°C, o cálculo da carga térmica de aquecimento é iniciado para aumentar a temperatura do ar e mantê-la em 18°C. Por carga térmica de refrigeração, entende-se a energia a ser retirada do ambiente; por carga térmica de aquecimento, entende-se a energia a ser adicionada no ambiente. As temperaturas operativas de acionamento do cálculo da carga térmica são referentes à zona de adaptação apresentada por De Vecchi et al. (2015), onde é considerado que as pessoas se adaptam ao clima, podendo ajustar a roupa, por exemplo, para manter a temperatura em uma faixa de conforto. No comportamento do usuário AC também há critério de ocupação, porém difere do critério do comportamento do usuário VN, pois o cálculo da carga térmica ocorre somente caso exista ocupação no ambiente, tanto na sala quanto no dormitório. Cabe ressaltar que, no comportamento AC, uma vez que o cálculo da carga térmica é acionado em determinado ambiente, este somente é desabilitado quando a ocupação passa a ser nula naquele mesmo ambiente. O comportamento do usuário H é a união dos comportamentos VN e AC.

A modelagem, no programa EnergyPlus, dos casos com comportamento VN foi realizada através da classe de objetos *Air Flow Network*. Para a simulação dos casos com comportamento do usuário AC, que busca reproduzir um sistema de condicionamento de ar ideal, a modelagem no programa EnergyPlus foi realizada utilizando objetos relacionados ao *Ideal Loads Air System*, que calcula a quantidade de carga térmica a ser adicionada ou retirada do ambiente de acordo com a temperatura de termostato determinada. Para o comportamento Híbrido (H), foram considerados ambos os objetos, *Air Flow Network* e *Ideal Loads Air System*, do programa EnergyPlus. Para o comportamento AC e H, além dos objetos citados, foi utilizada a classe de objetos *Energy Management System* (EMS). Uma das funções do EMS é a de alterar determinados critérios definidos no programa EnergyPlus, através do uso de linguagem de programação. Neste trabalho, o EMS possibilitou alterações nos critérios dos comportamentos AC e H: 1) acionamento do cálculo de carga térmica a uma temperatura diferente do termostato; 2) desativação do cálculo da carga térmica somente após a ocupação ser nula no ambiente; 3) no caso do comportamento H, a utilização da ventilação híbrida de forma precisa, ou seja, não permitindo que o cálculo da carga térmica ocorra juntamente com a abertura das janelas para ventilação natural em um mesmo *time step*.

3.2.3 Climas

O Brasil é um país com grande diversidade climática, sendo assim, este trabalho procurou abranger diferentes climas, como também cidades consideradas polos habitacionais. Dessa maneira, os climas adotados foram os referentes às cidades do Rio de Janeiro, de Santa Maria e de São Paulo. Na Figura 6 são apresentados, para as três cidades, os valores de temperatura do ar e de umidade relativa. Estes valores foram obtidos a partir da simulação computacional no programa EnergyPlus, com o uso dos arquivos climáticos TMYx (2003-2017) de cada cidade (CRAWLEY; LAWRIE, 2019).

Figura 6 – Dados climáticos cidades – Temperatura do ar e umidade relativa.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Tabela 10 estão as classificações climáticas destas cidades, segundo a classificação de *Köppen* (SENTELHAS et al., 2014), da ASHRAE 169 (ASHRAE, 2013) e da NBR 15220 (ABNT, 2005b).

Tabela 10 – Classificação climática cidades.

Cidade	Köppen	ASHRAE 169	NBR 15220
Rio de Janeiro	Aw – Savânico	1A	ZB 8
Santa Maria	Cfa – Subtropical úmido	3A	ZB 2
São Paulo	Cfb – Oceânico temperado	2A	ZB 3

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A cidade do Rio de Janeiro possui como característica ser uma cidade litorânea, com umidade relativa do ar média de 78,6% ao longo do ano e temperaturas externas variando entre 14°C e 38°C ao longo do ano, com média de 24,1°C. A cidade de Santa Maria possui um clima com estações bem definidas, tendo como temperatura do ar média 19,6°C, chegando ao valor de 1°C durante o inverno e de 39°C durante o verão. Quanto a umidade, assim como Rio de Janeiro, a cidade de Santa Maria possui a umidade relativa do ar média alta, igual a 77,6%. São Paulo é a cidade com o clima intermediário entre as três escolhidas. Com temperaturas baixas no inverno, chegando a 8,8°C, e temperaturas altas no verão, chegando a 33,9°C, a média anual é de 20,5°C. Quanto a umidade relativa do ar, a cidade de São Paulo é a que possui o menor valor médio, porém não muito distante das demais cidades, com 74,3%.

3.2.4 Variação nos critérios de cálculo de carga térmica

Para complementar as análises do caso base e suas variações na envoltória, padrão de uso e climas, foi realizado um estudo complementar, envolvendo as temperaturas de acionamento do cálculo de carga térmica voltada à refrigeração. Esta análise é justificada pelo fato de que os usuários utilizam de diferentes formas os sistemas de climatização instalados na residência (ELETROBRAS; PROCEL, 2019; RAMOS, 2019). Por exemplo, uma pessoa pode sentir a necessidade de acionar o sistema de condicionamento de ar a uma temperatura operativa diferente de outra. Dessa maneira, essa análise tem como objetivo observar a variação no desempenho térmico da edificação para diferentes valores de temperatura operativa de acionamento do cálculo de carga térmica a ser retirada do ambiente.

Foram considerados os padrões de uso que possuem o sistema de condicionamento de ar, ou seja, com o comportamento do usuário Ar Condicionado (AC) e Híbrido (H). Somente um tipo de ocupação foi considerado nas simulações, o perfil de ocupação tipo 2, NBR. O perfil de ocupação 2 considera que não há pessoas na residência das 8h00 às 13h59, nos demais horários há ocupação na sala ou nos dormitórios. Dessa forma, a ocupação 2 pode ser considerada intermediária entre as três ocupações adotadas neste trabalho, pois, tem um número menor de horas ocupadas do que o perfil de ocupação tipo 1, Dia Inteiro, e um número maior de horas ocupadas que o perfil de ocupação tipo 3, Noite.

Para a análise da economia de energia gerada a cada variação na temperatura operativa de acionamento do sistema de condicionamento de ar ideal, foi analisada a economia de energia obtida a cada variação de 1°C na temperatura, ou seja, a economia dos casos com a temperatura

de acionamento igual a 27°C, 28°C, 29°C e 30°C, com relação ao caso base, acionamento a 26°C.

3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados utilizou como indicadores os presentes na proposta de novo método de simulação computacional da NBR 15575, para a avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais (LABEEE, 2019). Sendo os indicadores: carga térmica anual de refrigeração e de aquecimento (CgT_R e CgT_A), e o percentual de fração de horas ocupadas com as temperaturas operativas entre uma faixa estabelecida na proposta de norma (PHFT). Essa faixa de temperatura operativa varia conforme a temperatura de bulbo seco da cidade avaliada. Para as três cidades escolhidas para a análise, a faixa de temperatura operativa é entre 18°C e 26°C. Cabe ressaltar que a versão da proposta utilizada neste trabalho é do mês de junho e ocorreram alterações no método até a sua publicação final.

A CgT_R representa a carga térmica que foi necessária ser retirada de cada ambiente de permanência prolongada (APP) da residência ao longo do ano, conforme a Equação 1. Enquanto que a CgT_A representa o aquecimento, através da carga térmica que foi necessário ser adicionada em cada APP da residência ao longo do ano, conforme a Equação 2. A CgT_R e a CgT_A têm como unidade o kWh/ano.

$$CgT_R = \sum (CgT_{R,APP1,1} + \dots CgT_{R,APP1,n}) + \dots + (CgT_{R,APPn,1} + \dots CgT_{R,APPn,n}) \quad 1$$

Onde:

CgT_R é a carga térmica de refrigeração da unidade habitacional [kWh/ano];

$CgT_{R,APP1,1}$ é a carga térmica de refrigeração do APP 1 no *time step* 1 [kWh];

$CgT_{R,APP1,n}$ é a carga térmica de refrigeração do APP 1 no *time step* n [kWh];

$CgT_{R,APPn,1}$ é a carga térmica de refrigeração do APP n no *time step* 1 [kWh];

$CgT_{R,APPn,n}$ é a carga térmica de refrigeração do APP n no *time step* n [kWh].

$$CgT_A = \sum (CgT_{A,APP1,1} + \dots CgT_{A,APP1,n}) + \dots + (CgT_{A,APPn,1} + \dots CgT_{A,APPn,n}) \quad 2$$

Onde:

CgT_A é a carga térmica de aquecimento da unidade habitacional [kWh/ano];

$CgT_{A,APP1,1}$ é a carga térmica de aquecimento do APP 1 no *time step* 1 [kWh];

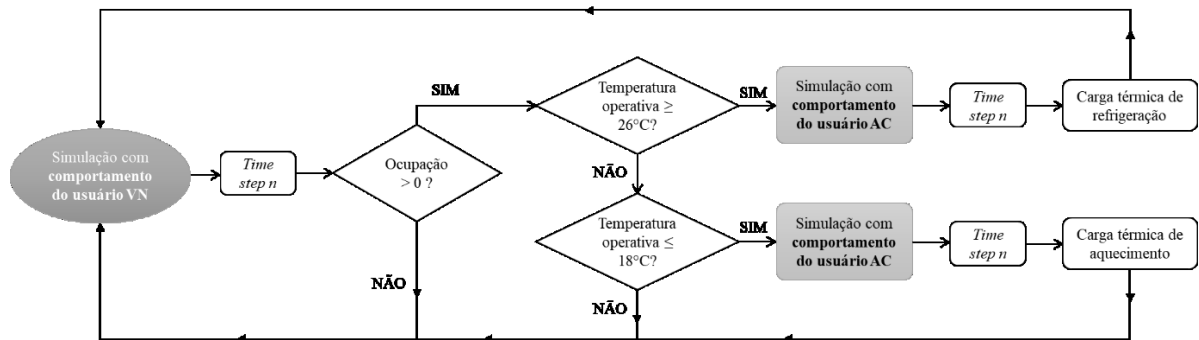
$CgT_{A,APP1,n}$ é a carga térmica de aquecimento do APP 1 no *time step* n [kWh];

$CgT_{A,APPn,1}$ é a carga térmica de aquecimento do APP n no *time step* 1 [kWh];

$CgT_{A,APPn,n}$ é a carga térmica de aquecimento do APP n no *time step* n [kWh].

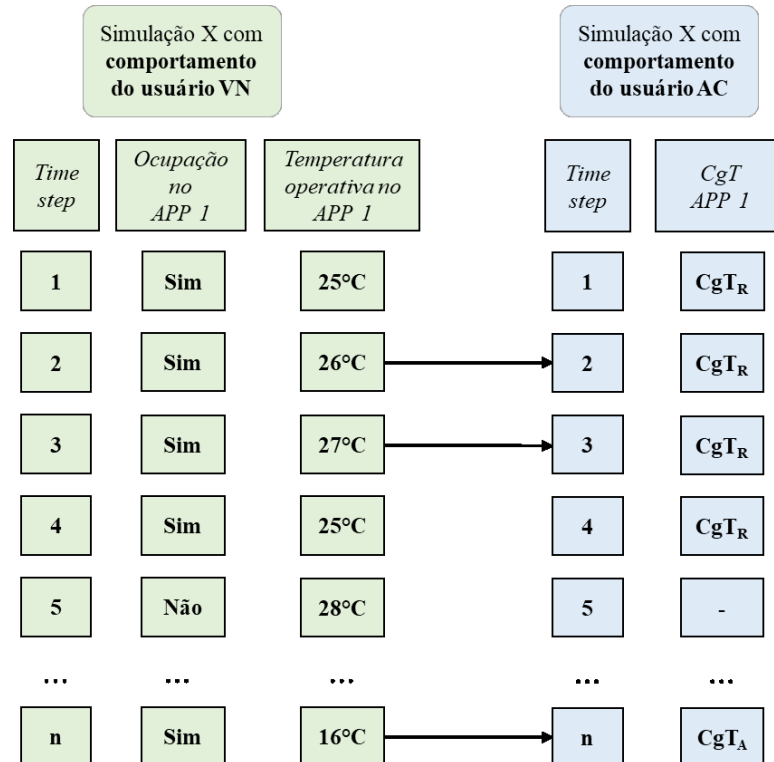
Nos casos com comportamento do usuário Ar Condicionado (AC) ou Híbrido (H) o valor da CgT_R e CgT_A puderam ser extraídos diretamente da simulação computacional, uma vez que foi modelado o condicionado de ar ideal. Porém nos casos com comportamento do usuário Ventilação Natural (VN), o condicionamento de ar ideal não foi modelado, devido à utilização de somente ventilação natural para climatização dos ambientes. Dessa maneira, os resultados de carga térmica não puderam ser extraídos diretamente da simulação. Nesses casos adotou-se paralelamente os resultados dos casos simulados com comportamento do usuário AC, utilizando o procedimento presente na Figura 7 e Figura 8.

Figura 7 – Fluxograma cálculo da CgT para os casos com comportamento do usuário VN.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 8 – Cálculo da CgT para os casos com comportamento do usuário VN.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O procedimento consiste em analisar paralelamente a simulação com comportamento do usuário VN e a com o comportamento do usuário AC. Se no *time step* n da simulação caso X com comportamento do usuário VN a temperatura operativa no APP for igual ou maior que 26°C e a mesma estiver ocupada, deve-se considerar a carga térmica de refrigeração obtida no *time step* n da simulação caso X, mas com comportamento do usuário AC. Para o aquecimento, se no *time step* n da simulação caso X com comportamento do usuário VN a temperatura operativa no APP for igual ou menor que 18°C e a mesma estiver ocupada, deve-se considerar a carga térmica de aquecimento obtida no *time step* n da simulação caso X, mas com comportamento do usuário AC. Esse procedimento de cálculo segue o definido na proposta de método de simulação para a classificação de desempenho térmico para a NBR 15575 (LABEEE, 2019).

O cálculo do percentual de fração de horas ocupadas com as temperaturas operativas 18°C e 26°C (PHFT) resulta em um número adimensional, visto que é uma porcentagem. O cálculo inicialmente deve ser realizado para cada APP, conforme Equação 3. Este cálculo representa a divisão entre o somatório dos *time step* com ocupação no APP, sem o acionamento do cálculo da carga térmica, em que as temperaturas operativas são maiores do que 18°C e menores do que 26°C, sobre o somatório dos *time step* em que foi considerada a ocupação no APP ao longo do ano. O valor de PHFT total da unidade habitacional (UH) é calculado considerando a média aritmética entre os valores de PHFT_{APP}, conforme Equação 4.

$$PHFT_{APP} = \frac{\sum TOTop_n}{\sum TO_n} \quad 3$$

Onde:

TOTop_n é o número total de *time steps* ocupados ao longo do ano em que a temperatura operativa do APP foi maior que 18°C e menor que 26°C, sem o cálculo da carga térmica;

TO_n é o número total de *time steps* ocupados no APP ao longo do ano.

$$PHFT = \frac{\sum PHFT_{APP1} + \dots + PHFT_{APPn}}{n} \quad 4$$

Onde:

PHFT é o percentual de fração de horas ocupadas com as temperaturas operativas menores do que 18°C e maiores do que 26°C da UH;

PHFT_{APP1} é o PHFT do APP 1;

PHFT_{APPn} é o PHFT do APP n ;

n é o número de APP na unidade habitacional.

De maneira a facilitar a identificação da envoltória com maior potencial de melhoria no desempenho térmico para cada padrão de uso, foram incluídos também os indicadores redução de carga térmica de refrigeração (%RedCgT_R) e aquecimento (%RedCgT_A) conforme Equação 5 e Equação 6, respectivamente. A elevação de PHFT (ElevPHFT) também foi calculada, conforme Equação 7.

$$\%RedCgT_{R,(En)} = \left(1 - \frac{CgT_{R,(En)}}{CgT_{R,(Emaior)}}\right) * 100 \quad 5$$

Onde:

%RedCgT_{R,(En)} é a redução de CgT_R da UH com a envoltória n, para um padrão de uso e cidade [%];

CgT_{R,(En)} é a CgT_R da UH com a envoltória n, para um padrão de uso e cidade [kWh/ano];

CgT_{R,(Emaior)} é a CgT_R da UH com a envoltória que apresentou o maior valor de CgT_A, para um padrão de uso e cidade [kWh/ano].

$$\%RedCgT_{A,(En)} = \left(1 - \frac{CgT_{A,(En)}}{CgT_{A,(Emaior)}}\right) * 100 \quad 6$$

Onde:

%RedCgT_{A,(En)} é a redução de CgT_A da UH com a envoltória n, para um padrão de uso e cidade [%];

CgT_{A,(En)} é a CgT_A da UH com a envoltória n, para um padrão de uso e cidade [kWh/ano];

CgT_{A,(Emaior)} é a CgT_A da UH com a envoltória que apresentou o maior valor de CgT_A, para um padrão de uso e cidade [kWh/ano].

$$ElevPHFT_{En} = PHFT_{En} - PHFT_{Emenor} \quad 7$$

Onde:

ElevPHFT_{En} é a elevação de PHFT da UH com a envoltória n, para determinado padrão de uso e cidade [%];

PHFT_{En} é o PHFT da UH com a envoltória n, para determinado padrão de uso e cidade [%];

PHFT_{Emenor} é o PHFT da UH com a envoltória que apresentou o menor valor de PHFT, para determinado padrão de uso e cidade [%].

Cabe ressaltar que a %RedCgT_R, %RedCgT_A e a ElevPHFT foram calculadas para cada envoltória, considerando todos os padrões de uso e cidades variados. Por exemplo, considerando o cálculo da %RedCgT_R: para a cidade do Rio de Janeiro, para o padrão de uso AC + 1, a envoltória com o maior valor de CgT_R foi a Envoltória X. Assim, para a Envoltória Y, padrão de uso AC + 1 e para a cidade do Rio de Janeiro, a %RedCgT_R da Envoltória Y com relação à Envoltória X foi calculada com a Equação 6. Para o cálculo da ElevPHFT, como o PHFT já é uma porcentagem, foi calculada a diferença absoluta ao invés da relativa, como demonstra a Equação 7. Dessa forma, para cada envoltória foram obtidos 27 resultados de %RedCgT_R, 27 resultados de %RedCgT_A e 27 resultados de %ElevPHFT, visto que são três cidades combinadas com nove padrões de uso.

Para a redução de carga térmica de refrigeração da seção 3.2.4 Variação nos critérios de cálculo de carga térmica, o cálculo é similar ao da Equação 5. Porém considerando ao invés da variação na envoltória, a variação na temperatura de acionamento do condicionamento de ar para cada envoltória e padrão de uso.

3.3.1 Cálculo do balanço térmico dos ambientes de permanência prolongada

Para demonstrar a representatividade do fluxo de calor das superfícies da envoltória e cargas internas dos ambientes de permanência prolongada da residência, foi analisado o balanço térmico no ar dos ambientes de permanência prolongada (APP). O método utilizado foi similar ao desenvolvido por Melo et al. (2015) em seu estudo sobre isolamento térmico em edificações comerciais. A análise do balanço térmico no ar do APP tem como princípio as trocas de calor por convecção que ocorrem em cada *time step* no ambiente. As trocas de calor ocorrem entre as superfícies da envoltória e as cargas internas do ambiente, os ganhos e perdas por infiltração através da ventilação natural e, por fim, a carga térmica adicionada ou retirada do ambiente pelo condicionamento de ar ideal. Com o cálculo do balanço térmico no ar do APP é possível demonstrar, por exemplo, quais as superfícies que devem ser alteradas para aprimorar o desempenho térmico da residência, uma vez que o balanço térmico no ar do ambiente apresenta o fluxo de calor que ocorre por cada superfície.

Cabe ressaltar que além das trocas de calor por convecção, ocorrem também as trocas por condução e radiação no ambiente. Mas como a convecção é a troca que ocorre entre determinado elemento e o ar que o envolve, as trocas por condução e radiação já estão englobadas no balanço térmico do ar do ambiente.

Os dados de saída da simulação computacional utilizados para o cálculo do balanço térmico no ar do ambiente podem ser divididos em quatro categorias: a primeira é o ganho ou perda de calor por convecção das superfícies da envoltória, a segunda é o ganho de calor pelas cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos), a terceira é o ganho ou perda de calor devido à infiltração (ventilação natural e/ou frestas) e, por fim, a quarta categoria é a carga térmica adicionada ou retirada do ambiente pelo condicionamento de ar ideal (cálculo de carga térmica). Para a primeira categoria, referente às superfícies da envoltória, o resultado é obtido a cada *time step* para cada superfície da edificação. Porém neste trabalho, as superfícies foram agrupadas em seis grupos: paredes internas, paredes externas, piso, cobertura, portas e janelas. Os dados de saída da simulação computacional referentes à ventilação natural e ao condicionamento de ar foram obtidos para cada ambiente de permanência prolongada. No

Quadro 1 pode ser visualizada a nomenclatura dos dados de saída obtidos no EnergyPlus, a nomenclatura utilizada neste trabalho e o significado de cada dado de saída da simulação.

Quadro 1 – Dados de saída do programa EnergyPlus para cálculo do balanço térmico.

Dado de saída	Nomenclatura	Significado
<i>Surface Inside Face Convection Heat Gain Energy [J]</i>	Superfícies	É o calor que o ambiente ganha ou perde devido à convecção que ocorre em cada superfície da envoltória.
<i>Zone Total Internal Convective Heating Energy [J]</i>	Cargas Internas	São os ganhos de calor por convecção devido às cargas internas (iluminação, equipamentos e pessoas).
<i>AFN Zone Infiltration Sensible Heat Gain Energy [J]</i>	Ganhos por Ventilação Natural	É o calor sensível que o ambiente analisado ganha devido à ventilação natural.
<i>AFN Zone Infiltration Sensible Heat Loss Energy [J]</i>	Perdas por Ventilação Natural	É o calor sensível que o ambiente analisado perde devido à ventilação natural.
<i>Zone Air System Sensible Heating Energy [J]</i>	Aquecimento	É a carga térmica adicionada no ambiente, para satisfazer o limite de temperatura estipulado no termostato (18°C).
<i>Zone Air System Sensible Cooling Energy [J]</i>	Refrigeração	É a carga térmica retirada do ambiente, para satisfazer o limite de temperatura estipulado no termostato (23°C).

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O balanço térmico foi analisado para os ambientes de permanência prolongada, sala e dormitórios, sendo executado em duas etapas: 1) verificação do método; 2) análise do balanço térmico do ambiente.

3.3.1.1 Verificação do método de cálculo do balanço térmico do ambiente

O desempenho térmico de uma edificação é resultado das trocas de calor que ocorrem nos seus ambientes, que por sua vez são determinadas através da combinação do tipo de envoltória, da densidade de cargas internas, do tipo de climatização (ventilação natural ou condicionamento de ar), entre outros. O balanço térmico busca responder quais as parcelas mais significativas na troca de calor por convecção dos ambientes.

Como o programa EnergyPlus apresenta diversos dados de saída relacionados às trocas de calor, se faz necessária a verificação do balanço térmico do ambiente através da análise do equilíbrio térmico em cada *time step*, conforme Equação 8. Essa verificação demonstra se todas

as fontes de ganho ou perda de calor foram ou não contabilizadas no balanço térmico do ambiente.

$$ET_n = |Env_n + CI_n + VN_{G,n} + CgT_{A,n}| - |VN_{P,n} + CgT_{R,n}| = 0 \quad 8$$

Onde:

ET_n é o Equilíbrio Térmico do APP no *time step* n [J];

Env_n é a perda ou ganho no APP de calor de cada superfície da envoltória no *time step* n [J];

CI_n é o ganho de calor do APP pelas cargas internas no *time step* n [J];

$VN_{G,n}$ é o ganho de calor do APP pela ventilação natural no *time step* n [J];

$CgT_{A,n}$ é a carga térmica adicionada no APP pelo ar condicionado no *time step* n (aquecimento) [J];

$VN_{P,n}$ é a perda de calor no APP pela ventilação natural no *time step* n [J];

$CgT_{R,n}$ é a carga térmica retirada do APP pelo ar condicionado no *time step* n (refrigeração) [J];

Cabe ressaltar que o valor referente às superfícies pode ser positivo ou negativo, dependendo do fluxo de calor no *time step* (calor sendo propagado do ambiente interno para o exterior do ambiente ou contrário).

Para a verificação do balanço térmico, o resultado da Equação 8 para cada *time step* deve ser zero ou muito próximo deste valor. Neste caso indica que todas as trocas de calor foram consideradas na análise, não existindo fontes de perda ou ganho de calor não contabilizadas.

3.3.1.2 Análise do balanço térmico dos ambientes de permanência prolongada

Após a verificação do cálculo, a análise do balanço térmico dos ambientes de permanência prolongada (APP) pode ser realizada. O balanço térmico foi calculado integrado para todo o ano. Essa consideração pode mascarar as variações que ocorrem ao longo do ano devido às diferentes estações, por exemplo. Entretanto os demais indicadores também são integrados ao longo do ano, de forma a mostrar o balanço anual das variações climáticas no desempenho térmico, o que justifica essa consideração.

Como já citado, as superfícies foram agrupadas em seis grupos: paredes internas, paredes externas, piso, cobertura, portas e janelas. Para a análise do balanço térmico, o valor das trocas de calor de cada grupo foi calculado conforme a Equação 9. Assim, ao longo do ano, foi somada a quantidade de energia adicionada no ambiente pela superfície e subtraída do somatório de energia retirada do ambiente pela mesma superfície. Se o somatório anual for positivo, a superfície adicionou mais calor no ambiente ao longo do ano do que retirou, se for negativo, a superfície retirou mais calor no ambiente ao longo do ano do que adicionou.

$$BT_{Env} = \sum APP_{Adc} - \sum APP_{Rem} \quad 9$$

Onde:

BT_{Env} é o balanço térmico anual da superfície [J];

APP_{Adc} é o calor adicionado no APP durante o ano pela superfície [J];

APP_{Rem} é o calor removido do APP durante o ano pela superfície [J].

A carga interna adicionada ao ambiente devido à presença de pessoas, equipamentos e sistema de iluminação foi sempre positiva, sendo considerada também no somatório de toda a carga adicionada no ambiente ao longo do ano, conforme Equação 10.

$$CI = \sum CI_n \quad 10$$

Onde:

CI é a carga interna anual (pessoas, equipamentos e sistema de iluminação) do APP [J/ano];

CI_n é a carga interna (pessoas, equipamentos e sistema de iluminação) do APP em cada *time step* [J];

Os dados de saída referentes à ventilação natural e ao sistema de condicionamento de ar foram obtidos da simulação computacional na parcela ganhos e perdas. Sendo assim, cada um dos dados foi somado ao longo do ano, conforme Equação 11 e Equação 12, sendo considerados positivos para os ganhos e negativos para as perdas.

$$VN_{G,P} = \sum VN_{G,P,n} \quad 11$$

Onde:

$VN_{G,P}$ é o ganho ou perda de calor no APP pela ventilação natural durante o ano [J/ano];

$VN_{G,P,n}$ é o ganho ou perda de calor no APP pela ventilação natural em cada *time step* [J];

$$CgT_{A,R} = \sum CgT_{A,R,n} \quad 12$$

Onde:

$CgT_{A,R}$ é a carga térmica adicionada (refrigeração) ou removida (aquecimento) do APP pelo condicionamento de ar durante o ano [J/ano];

$CgT_{A,R,n}$ é a carga térmica adicionada (refrigeração) ou removida (aquecimento) do APP pelo condicionamento de ar em cada *time step* [J];

No total, foram onze os grupos considerados no balanço térmico do ar do ambiente: cargas internas, paredes internas, paredes externas, piso, cobertura, portas, janelas, perdas pela ventilação natural, ganhos pela ventilação natural, carga térmica de refrigeração e carga térmica de aquecimento.

Os resultados para cada grupo foram obtidos em Joule [J], entretanto, para facilitar a análise entre diferentes sistemas construtivos e padrões de uso, o valor anual de cada grupo foi transformado em um fator, que varia de 0 a 1. O cálculo deste fator foi executado considerando separadamente os grupos com valor anual positivo no balanço térmico dos grupos com valor anual negativo. Por exemplo, se o grupo 1 teve valor positivo como resultado anual do balanço térmico, este valor foi dividido pelo somatório dos resultados anuais de todos os grupos com valor positivo no balanço térmico, conforme Equação 13. Se para o grupo 2 o valor for negativo, este será dividido pelo somatório anual dos grupos com valores negativos, conforme Equação 14.

$$BT, G1_+ = \frac{\sum G1_+}{\sum G_+} \quad 13$$

Onde:

BT,G1₊ é o fator do Grupo 1 para o balanço térmico de ganho de calor anual;

G1₊ é o ganho de calor pelo Grupo 1 (por exemplo: parede interna) durante o ano [J/ano];

G₊ é o ganho de calor no APP pelos demais Grupos (por exemplo: cobertura, CgT_A, VN_G) com valor positivo no balanço térmico anual [J/ano];

$$BT, G2_- = \frac{\sum G2_-}{\sum G_-} \quad 14$$

Onde:

BT,G2₋ é o fator do Grupo 2 para o balanço térmico de perda de calor anual do APP;

G2₋ é a perda de calor pelo Grupo 2 (por exemplo: parede externa) durante o ano no APP [J/ano];

G₋ é a perda de calor no APP pelos demais Grupos (por exemplo: janelas, CgT_R, VN_P com valor negativo no balanço térmico anual [J/ano];

4 RESULTADOS

De maneira a facilitar o entendimento dos resultados expostos neste capítulo, o Quadro 2 apresenta uma síntese de cada nomenclatura utilizada na apresentação dos resultados.

Quadro 2 – Síntese das variações analisadas.

Quadro 2 – Síntese das variações analisadas.

Variações na Envoltória				
1	2	3	4	5
Material principal: Concreto (parede e cobertura).	Material principal: Bloco cerâmico (parede) e Concreto (cobertura).	Material principal: Isolante térmico (parede e cobertura).	Material principal: Isolante térmico (parede) Concreto (parede e cobertura).	Material principal: Isolante térmico e Concreto (parede e cobertura).

Variações no Comportamento do Usuário		
Ventilação Natural (VN)	Ar Condicionado (AC)	Híbrido (H)
Somente ventilação natural como estratégia de climatização dos APP.	Somente condicionamento de ar como estratégia de climatização dos APP.	Ventilação natural ou condicionamento de ar como estratégia de climatização dos APP.

Variações no Perfil de Ocupação		
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Dia Inteiro Sala: 08h00 – 21h59 Dormitórios: 22h00 – 07h59	NBR Sala: 14h00 – 21h59 Dormitórios: 22h00 – 07h59	Noite Sala: 18h00 – 21h59 Dormitórios: 22h00 – 07h59

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os padrões de uso foram nomeados como “comportamento + ocupação”. Por exemplo VN + 1, que é o comportamento do usuário Ventilação Natural (VN) com o perfil de ocupação Tipo 1 Dia Inteiro. Para as variações na envoltória a nomenclatura utilizada foi Envoltória 1, Envoltória 2 e assim sucessivamente.

4.1 VARIAÇÕES NA ENVOLTÓRIA, PADRÃO DE USO E CLIMA

Nesta etapa foram realizadas 135 simulações no programa EnergyPlus, versão 9.0.1, a partir da combinação paramétrica dos cinco sistemas construtivos, com os nove padrões de uso e os três climas.

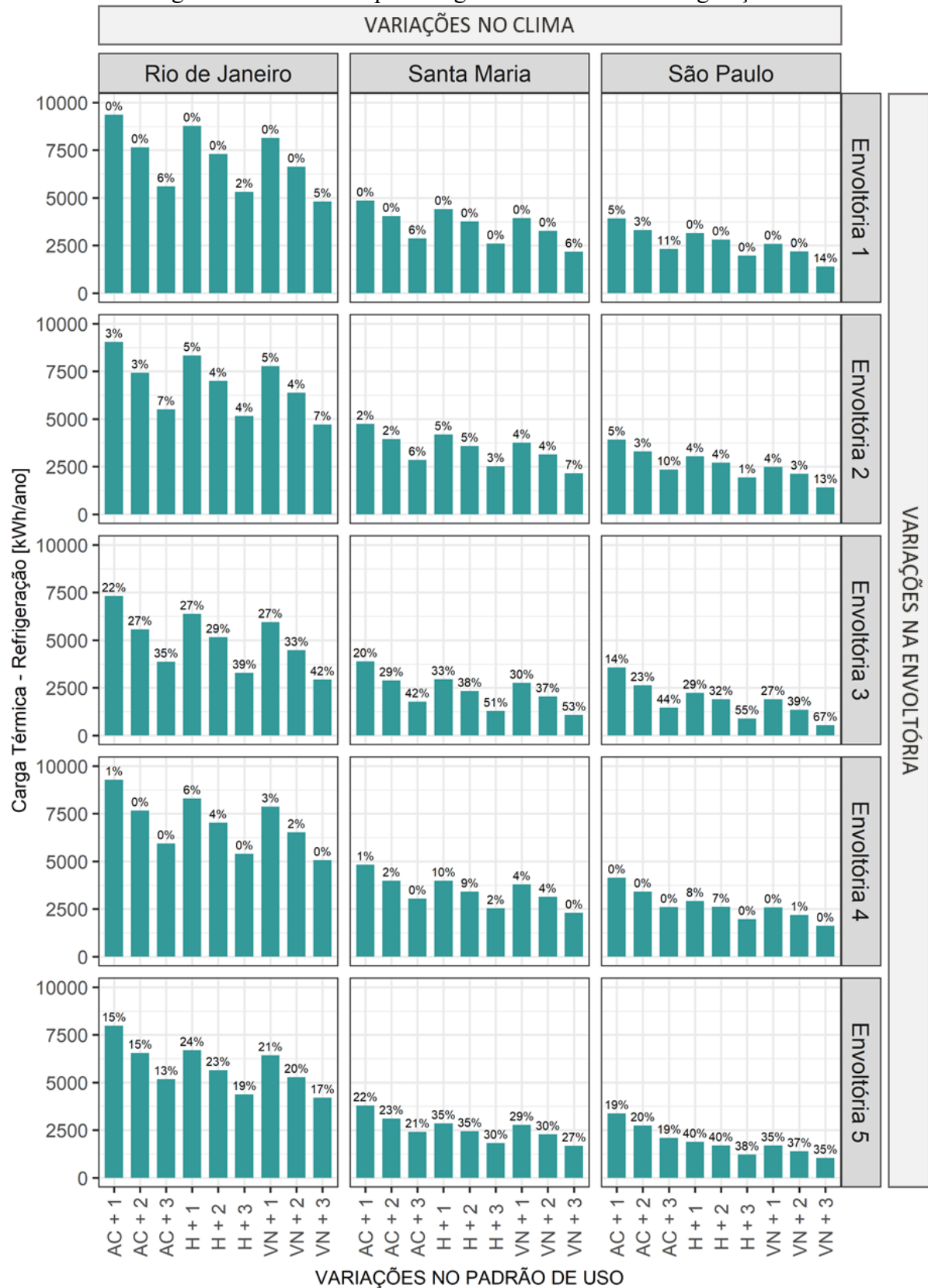
A carga térmica anual de refrigeração da unidade habitacional (Cg_{TR}), obtida para todas as variações de envoltória, padrão de uso e clima, pode ser visualizada na Figura 9. Na Figura 9 é exposta também a porcentagem de redução de Cg_{TR} (%Red Cg_{TR}). Este indicador é calculado com relação à variação na envoltória para cada padrão de uso e cidade.

Nos padrões de uso analisados, quanto maior o período de horas em que a sala permanece ocupada, maior o valor obtido para a carga térmica anual de refrigeração. Logo, os padrões de uso com o perfil de ocupação tipo 1, Dia Inteiro, em que a sala é ocupada no período das 8h00 até 21h59, obtiveram os maiores valores de CgT_R em todas as cidades. Tomando como exemplo, o caso que apresentou a maior CgT_R entre todos os 135 estudados foi na cidade do Rio de Janeiro com a combinação de Envoltória 1 e padrão de uso AC + 1 (comportamento do usuário Ar Condicionado com perfil de ocupação tipo 1). Se para esse caso alterarmos o tipo de ocupação para o tipo 2 (perfil de ocupação NBR), ocorre uma redução de 18,2% na CgT_R , alterando o perfil de ocupação do tipo 1 para o tipo 3 (Noite), a redução chega a 40,2%. Para o padrão de uso AC + 1, quando localizado na cidade do Rio de Janeiro a envoltória que pode ser considerada mais eficiente é a Envoltória 3 que, como se pode observar na Figura 9, reduziu em 22% a CgT_R quando comparada com a Envoltória 1.

Além do padrão de ocupação, o comportamento do usuário influenciou na variação da carga térmica de refrigeração. Entre os comportamentos que apresentaram o maior valor de CgT_R , o comportamento Ar Condicionado (AC) obteve os maiores resultados para todas as ocupações, variando de 1.462 kWh/ano até 9.361 kWh/ano. Isto se dá pelo fato de que não há a possibilidade de ventilar os ambientes em nenhum horário. Dessa forma, se em algum período, no início da ocupação as temperaturas operativas estiverem abaixo de 26°C, o cálculo da carga térmica de refrigeração não é iniciado. Porém ocorre o aumento das cargas internas devido a presença de pessoas, acionamento do sistema de iluminação e, no caso da sala, acionamento dos equipamentos, levando ao aumento da temperatura interna e, conseqüente, necessidade de retirar carga térmica. No comportamento Híbrido (H), por exemplo, o aumento da temperatura interna, é amenizado em alguns momentos pela possibilidade do uso da ventilação natural.

O comportamento do usuários H apresentou resultados para a carga térmica anual de refrigeração entre 877 kWh/ano e 8.782 kWh/ano, próximos ao Ventilação Natural (VN), que variou a CgT_R de 529 kWh/ano até 8.138 kWh/ano. Os casos com comportamento do usuário VN obtiveram os menores valores de CgT_R . Sobre a alteração do padrão de uso, o caso mais expressivo foi para a cidade de São Paulo e envoltória 3, quando alterado o padrão de uso de AC + 1 para VN + 3, a redução na CgT_R foi de 85%.

Figura 9 – Resultados para carga térmica anual de refrigeração.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quanto às cidades, pelo percentual de redução apresentado na Figura 9, é possível observar que na cidade de São Paulo, a mudança no padrão de uso pode gerar reduções de CgT_R superiores às encontradas nas cidades de Santa Maria e, principalmente, de Rio de Janeiro. Isto porque a cidade do Rio de Janeiro tem como característica ser um clima quente e úmido durante todo o ano, enquanto que a cidade de São Paulo o clima é ameno praticamente todo o ano, sendo mais frio no inverno, e predominantemente úmido, porém com variações significativas ao longo do ano. A cidade de Santa Maria possui características climáticas próximas à cidade de São Paulo, porém com o inverno mais frio. Além dessas características climáticas, outra de destaque é a amplitude térmica ao longo do dia. A cidade de Santa Maria e, principalmente, a cidade de São Paulo, possuem maior amplitude térmica do que a cidade do Rio de Janeiro, o que favorece o resfriamento passivo da residência nos períodos mais frios. Na cidade do Rio de Janeiro, o resfriamento passivo da residência nos períodos mais frios do dia também ocorre, porém, como a amplitude é menor, o potencial de resfriamento também é reduzido. No verão, por exemplo, a temperatura operativa no ambiente pode ser sempre superior a 26°C . Dessa forma, longos períodos são contabilizados na CgT_R da residência.

Na maioria das envoltórias analisadas, os menores valores de CgT_R obtidos para a cidade de Rio de Janeiro, não chegam aos maiores resultados obtidos na cidade de São Paulo. Por exemplo, para a Envoltória 4, na cidade do Rio de Janeiro, o menor valor obtido foi 5.050 kWh/ano para o padrão de uso VN + 3 (comportamento do usuário VN com ocupação Noite), enquanto que na cidade de São Paulo, para a mesma envoltória, o maior resultado de CgT_R obtido foi de 4.137 kWh/ano, para o padrão de uso AC + 1.

Entre as diferentes envoltórias, na Figura 9 é possível analisar que para o indicador CgT_R as envoltórias com o pior desempenho térmico foram a Envoltória 1 e Envoltória 4. As características dessas envoltórias é a alta capacidade térmica, porém na Envoltória 1 a transmitância térmica é elevada nas paredes e cobertura, enquanto que a Envoltória 4 tem paredes com baixa transmitância térmica. A Envoltória 3 e Envoltória 5, com isolamento térmico nas paredes externas e cobertura foram as que apresentaram os menores resultados para CgT_R . A Envoltória 3 tem como combinação baixa transmitância térmica e baixa capacidade térmica, já a Envoltória 5 tem baixa transmitância, porém alta capacidade térmica. A característica de alta inércia da Envoltória 5 favoreceu o resultado para CgT_R em São Paulo e Santa Maria, principalmente para os casos com perfil de ocupação tipo 1. Na cidade do Rio de Janeiro os menores valores de CgT_R foram obtidos somente para a Envoltória 3.

Os resultados obtidos mostram que envoltórias com inércia térmica mais elevada podem ser recomendadas em locais com amplitude térmica significativa ao longo do dia. Os

componentes construtivos com significativa inércia térmica armazenam mais calor do que sistemas com baixa inércia. Assim, nos períodos mais quentes do dia esse calor é armazenado, sendo somente liberado quando o componente construtivo atingir o seu máximo. Dessa maneira, o calor muitas vezes passa a ser liberado nos períodos mais frios do dia, onde no ambiente talvez seja necessário o aquecimento. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 9, onde a Envoltória 5, que possui inércia térmica elevada e transmitância térmica baixa, apresentou os menores valores de CgT_R para os padrões de uso com ocupação 1 para a cidade de São Paulo. Na cidade de Santa Maria, para os padrões de uso AC + 1 e H + 1, a Envoltória 5 também teve melhor desempenho térmico do que as demais envoltórias. Como há a ocupação durante todo o dia, é possível resfriar a residência nos períodos mais frios e assim necessitar de menor quantidade de carga térmica a ser retirada nos períodos mais quentes. Da mesma forma que a Envoltória 5, a Envoltória 1 possui inércia térmica elevada, mas apresentou os piores resultados de desempenho térmico. Isto se dá pelo fato de que não há isolamento térmico na Envoltória 1, e dessa maneira, há a transferência de maior quantidade de calor do ambiente externo para o interno.

A Envoltória 2, que tem parede de bloco cerâmico, não apresentou em nenhum dos casos resultados relevantes, tendo desempenho térmico similar a Envoltória 1 e Envoltória 4 na simulação computacional. Analisando os valores de transmitância térmica e capacidade térmica, é possível analisar que a Envoltória 2 possui características térmicas semelhantes à Envoltória 1. Cabe ressaltar que os componentes tijolo cerâmico e concreto maciço possuem características higrotérmicas distintas, porém para os casos simulados o foco foi o desempenho térmico, logo neste critério os materiais se comportaram de maneira similar.

O isolamento térmico aplicado na envoltória é uma estratégia de eficiência energética que auxilia na melhora do desempenho térmico da edificação para todos os padrões de uso e climas. Esse resultado é semelhante ao encontrado em outros estudos que consideram climas próximos aos adotados neste trabalho (FOSAS et al., 2018; RAKHSHAN; FRIESS, 2017; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018; TUBELO et al., 2018). Cabe ressaltar que muitos dos estudos consideram níveis de isolamento térmico muito mais expressivos do que o adotado neste trabalho, chegando a valores de transmitância térmica menores próximos a $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Quanto a inércia térmica, poucos estudos citam essa característica térmica como uma medida de eficiência energética, além da transmitância térmica (GHOREISHI, 2019; MANTESI et al., 2019).

Entre as cinco combinações de envoltórias analisadas, foi possível verificar que os melhores casos para cada padrão de uso foram os que consideraram algum tipo de isolamento

térmico em toda a envoltória. Considerando os nove padrões de uso e os três climas, em um total de 27 variações, observou-se que a Envoltória 5, que tem baixa transmitância térmica e alta capacidade térmica, obteve seis vezes o menor valor de CgT_R e a Envoltória 3, que tem baixa transmitância térmica e baixa capacidade térmica, obteve 21 vezes o menor valor de CgT_R . Os maiores resultados de CgT_R considerando essas 27 variações, foram as combinações de envoltória com alta inércia térmica, sendo 18 vezes a Envoltória 1, sem isolamento térmico, e nove vezes a Envoltória 4, que possui isolamento térmico nas paredes externas. As envoltórias 3 e 5, apresentaram também o maior potencial de redução de CgT_R pela mudança de padrão de uso. Para a Envoltória 3, por exemplo, a $\%RedCgT_R$ entre o padrão de uso com maior valor de CgT_R , AC + 1, para o de menor valor, VN + 3, foi de 60%, 72% e 85% para as cidades de Rio de Janeiro, Santa Maria e São Paulo, respectivamente.

As envoltórias 4 e 5 possuem a mesma composição de parede, mas cobertura distintas. Essa única variação na composição da envoltória demonstrou ter impacto significativo no resultado de carga térmica anual de refrigeração. Ambas as coberturas possuem alta inércia térmica, mas a composição da envoltória 4 não possui isolamento térmico, o que aumenta a transferência de calor por esta superfície. Os resultados obtidos para a Envoltória 4 ficaram próximos da Envoltória 1, que possui a mesma cobertura da Envoltória 4, mas as paredes não têm isolamento térmico. Dessa maneira, observa-se que, no caso estudado, a cobertura está influenciando significativamente no desempenho térmico, reduzindo a importância da aplicação de isolamento térmico nas paredes.

Sobre a carga térmica anual de aquecimento (CgT_A), apresentada na Figura 10, foi observado que quando comparada com a carga térmica anual de refrigeração (CgT_R), a CgT_A representa uma pequena parcela da carga térmica da residência. Em São Paulo, para todos os casos, a CgT_A foi menor do que 1,0% do valor obtido para a CgT_R . Em Santa Maria, os resultados obtidos para CgT_A foram menores do que 7% do encontrado para CgT_R . Dessa maneira, devido aos valores de CgT_A não representarem parcela significativa de carga térmica, quando comparada com a CgT_R , os resultados obtidos para o aquecimento não foram abordados em detalhes neste trabalho.

Para o indicador percentual de fração de horas ocupadas com as temperaturas operativas entre 18°C e 26°C (PHFT) os resultados estão expostos na Figura 11, assim como o valor de elevação do PHFT (ElevPHFT).

Figura 10 – Resultados para carga térmica anual de aquecimento.

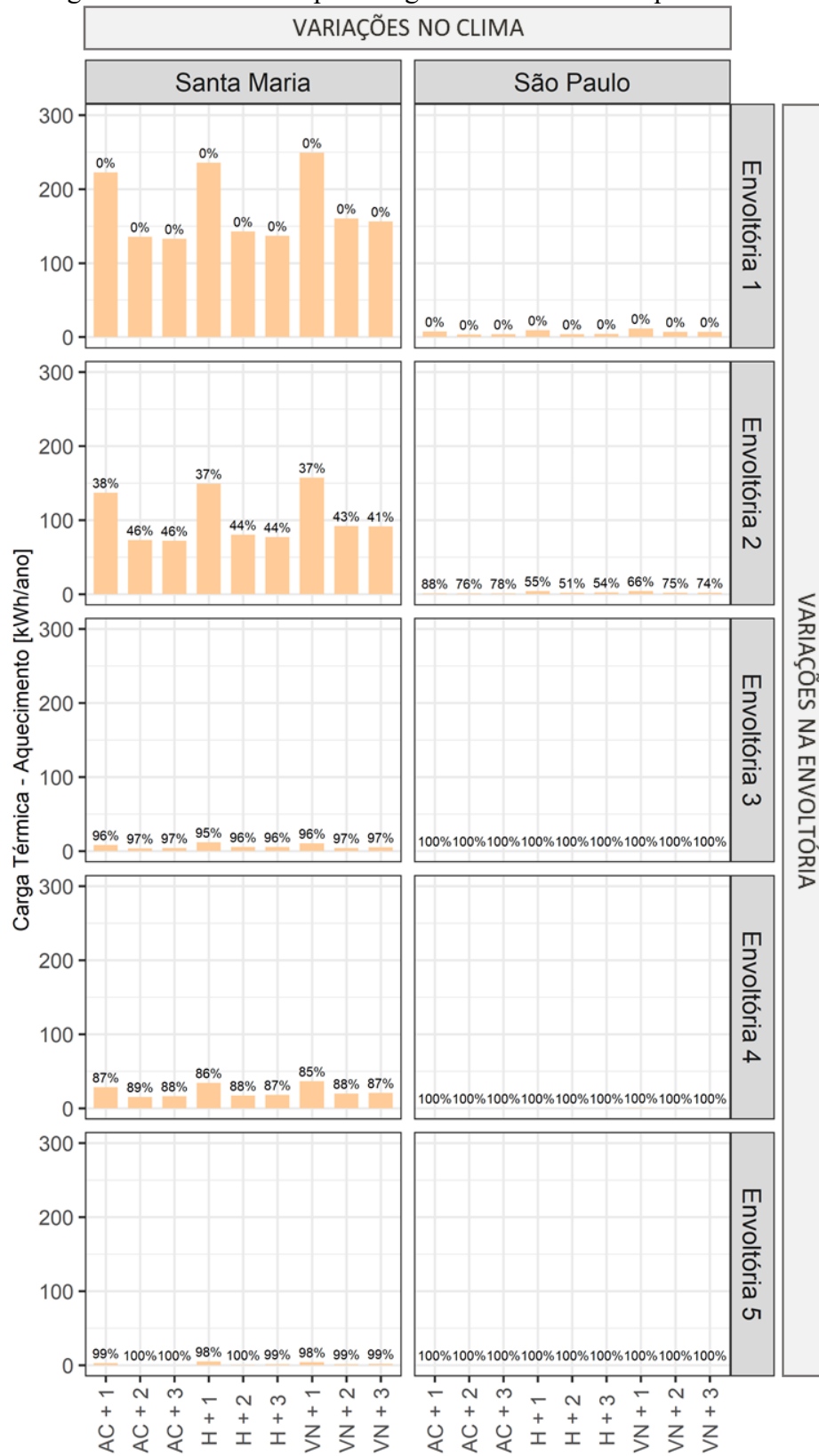
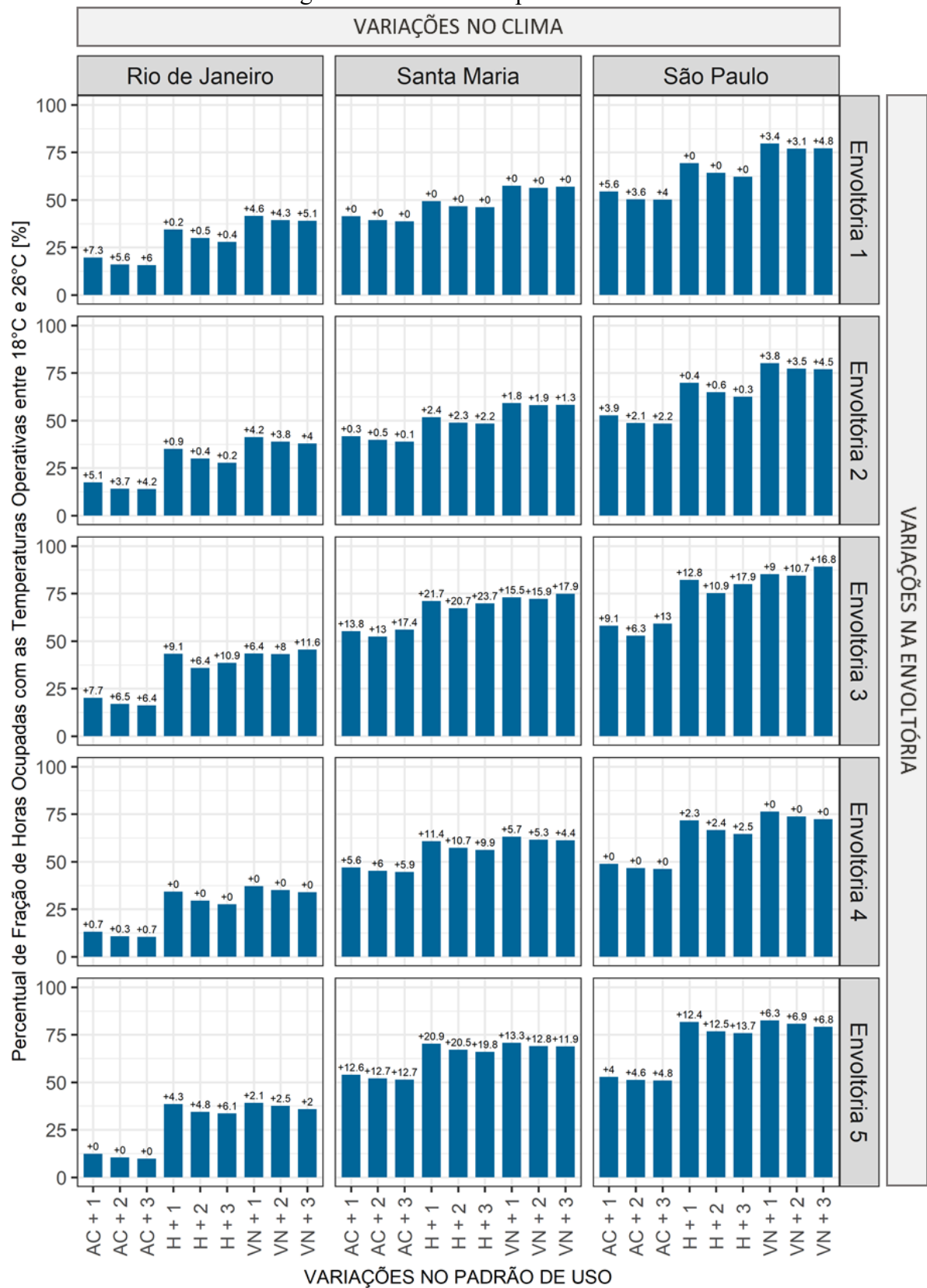


Figura 11 – Resultados para o PHFT.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na cidade do Rio de Janeiro, é possível analisar que em nenhum dos casos o valor de PHFT foi maior do que 50% das horas ocupadas ao longo do ano. Enquanto que nas cidades de São Paulo e Santa Maria os valores de PHFT para os casos com comportamento do usuário VN foram sempre superiores à 50% para a residência analisada. Em cidades de clima quente, como é o caso do Rio de Janeiro, a temperatura interna dos ambientes na maior parte do tempo é elevada, com grande probabilidade de ser maior do que 26°C. Dessa maneira, nessas cidades o PHFT é reduzido, enquanto que em cidades de clima ameno como São Paulo e Santa Maria o PHFT tende a ser maior.

Os padrões de uso com o comportamento do usuário AC apresentaram os maiores valores de carga térmica de refrigeração, seguindo essa linha, esses padrões de uso também apresentaram os menores valores de PHFT. Isto é resultado do tipo de modelagem do comportamento do usuário AC, visto que a partir do momento em que o cálculo da carga térmica é iniciado, o mesmo somente é desligado quando a ocupação passa a ser nula no ambiente analisado. Cabe ressaltar que essa modelagem é executada também no comportamento do usuário H, porém no híbrido pode ser utilizada também a ventilação natural para climatizar os ambientes. O potencial de uso da ventilação natural como estratégia passiva de climatização dos ambientes pode ser visualizado nos casos com comportamento do usuário VN. Para garantir temperaturas operativas entre 18°C e 26°C dentro dos ambientes de permanência prolongada da residência, os casos com comportamento do usuário VN usam somente a ventilação natural.

Para as diferentes envoltórias, entre as 27 combinações (variações de padrão de uso e cidade) a Envoltória 3 apresentou o melhor resultado 26 vezes e a Envoltória 5 apresentou o melhor resultado para a combinação de padrão de uso H + 2 e a cidade de São Paulo. Para as cidades de Santa Maria e São Paulo a Envoltória 5 foi a segunda melhor, mostrando que a combinação de inércia térmica com isolamento térmico é eficaz para garantir temperaturas entre 18°C e 26°C dentro da residência. No Rio de Janeiro, para os casos com comportamento do usuário AC a segunda melhor envoltória foi a Envoltória 1. A Envoltória 1 não possui isolamento térmico, mas tem alta inércia. Dessa forma, esse resultado para a cidade do Rio de Janeiro mostra que a inércia térmica auxilia na manutenção da temperatura abaixo de 26°C dentro da residência. Pois além de armazenar calor no componente construtivo há a possibilidade transferir esse calor para o exterior nos períodos mais frios do dia. Isto pode ser visualizado na Figura 11, em que para a cidade do Rio de Janeiro, nos casos com o comportamento do usuário AC a Envoltória 5 obteve o pior valor de PHFT ($ElevPHFT = 0\%$) entre as demais envoltórias. A Envoltória 5 além da alta inércia térmica como a Envoltória 1, possui isolamento térmico. Cabe ressaltar que a modelagem do comportamento do usuário AC

não permite a abertura das janelas para ventilação natural. Dessa forma, a transferência de calor do interior da residência para o exterior ocorre somente pelas superfícies da envoltória e pelas frestas das janelas e portas.

A partir da análise combinada de CgT_R e PHFT é possível verificar que para ambos os indicadores, as envoltórias com os melhores resultados de desempenho térmico foram as Envoltória 3 e Envoltória 5, com isolamento térmico nas paredes externas e cobertura. Para os piores casos, os resultados foram para as Envoltória 1, Envoltória 4 e Envoltória 5. Para as 27 combinações possíveis (nove padrões de uso e três climas), em 17 combinações o pior caso foi o mesmo para os indicadores CgT_R e PHFT e em 22 combinações o melhor caso foi o mesmo para ambos os indicadores. Na Tabela 11 podem ser visualizadas as combinações em que os resultados foram distintos entre os indicadores. Para a CgT_R , o melhor e o pior resultado foram obtidos através do %Red CgT_R , sendo o melhor para o maior valor de redução para cada combinação de padrão de uso e cidade, e o pior o valor igual a 0% de redução, ou seja, o maior valor de CgT_R obtido. Para o PHFT, o melhor resultado considerado foi aquele que mais elevou o PHFT para cada combinação de padrão de uso e cidade, e o pior aquele em que a elevação foi 0, ou seja, o menor PHFT obtido. Esses resultados para cada combinação de padrão de uso e cidade podem ser visualizados na Figura 10 e Figura 11, para CgT_R e PHFT, respectivamente.

Tabela 11 – Combinações de padrão de uso e cidade em que o CgT_R e o PHFT deram envoltórias diferentes como a pior e melhor resultado.

PIOR/ MELHOR	Combinação		CgT_R Envoltória	PHFT Envoltória
	Cidade	Padrão de uso		
PIOR CASO	Rio de Janeiro	AC + 1	1	5
		AC + 2	4	5
		AC + 3	4	5
		H + 1	1	4
		H + 2	1	4
		VN + 1	1	4
		VN + 2	1	4
	São Paulo	VN + 2	1	4
	Santa Maria	AC + 3	4	1
		VN + 3	4	1
MELHOR CASO	São Paulo	AC + 1	5	3
		H + 1	5	3
		VN + 1	5	3
	Santa Maria	AC + 1	5	3
		H + 1	5	3

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Embora ambos os indicadores tenham apresentado como envoltórias com o melhor desempenho térmico a Envoltória 3 e Envoltória 5, analisar somente a temperatura interna dos ambientes ou somente a carga térmica pode ser considerado um equívoco. Países emergentes

com climas mais quentes, como é o caso do Brasil, a climatização nas residências pode ainda ser predominantemente com o uso da ventilação natural, mas para as análises de desempenho térmico deve-se considerar o aumento da posse de equipamentos de condicionamento de ar para refrigeração, necessitando da análise por ambos indicadores. O indicador PHFT poderia apresentar diferentes resultados, caso ocorresse a mudança dos limites de temperaturas para diferentes climas, visto que pessoas de locais mais quentes tendem a ter uma tolerância diferente para o calor, do que de locais mais frios, por exemplo. Outro fator que poderia alterar significativamente os resultados do PHFT seria a utilização da média ponderada pela área ou horas de ocupação de cada ambiente, ao invés da média pelo número de ambientes de permanência prolongada. No caso da média ponderada pelo número de horas ocupadas, ambientes ocupados por um curto período, iriam impactar menos no resultado de PHFT da residência do que os ambientes ocupados por mais tempo.

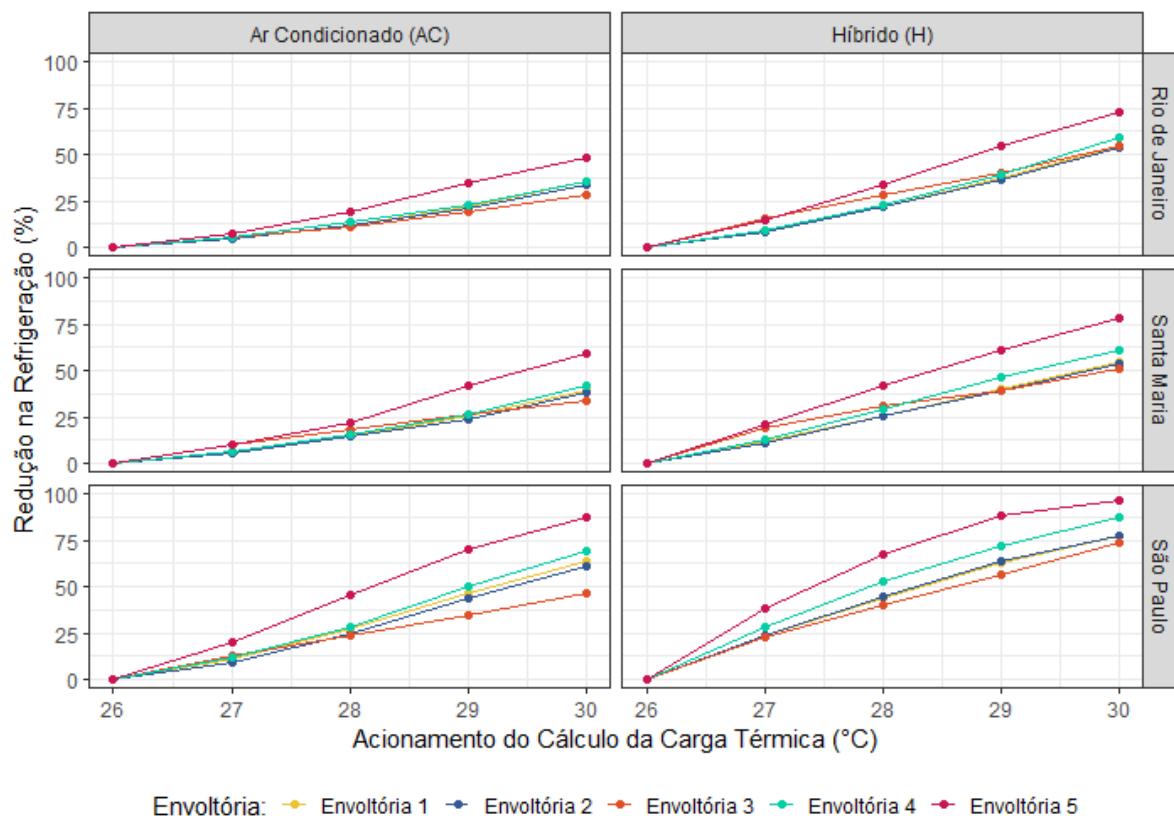
4.2 VARIAÇÃO NOS CRITÉRIOS DE CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA DE REFRIGERAÇÃO

A variação nos critérios de cálculo da carga térmica de refrigeração (CgT_R) foi aplicada para os casos AC + 2 e H + 2, nas três cidades. Os resultados podem ser observados na Figura 12.

Comparando os comportamentos do usuário, para a maioria das envoltórias, o Híbrido (H) apresentou o melhor desempenho frente ao comportamento Ar Condicionado (AC). Isto se dá pelo fato de que o comportamento H, como já mencionado, tem a possibilidade de ventilar o ambiente, reduzindo as chances de sobreaquecimento do ambiente devido às cargas internas, reduzindo assim a quantidade de calor a ser retirada do ambiente.

Analisando os diferentes sistemas construtivos, é possível observar que a Envoltória 5 destaca-se pelo potencial de redução na carga térmica anual de refrigeração (CgT_R), sendo superior às demais envoltórias. Na cidade de São Paulo, para o comportamento do usuário H, a redução de carga térmica é de 96% quando utilizada a temperatura operativa de 30°C para o acionamento do condicionamento de ar ideal. Para a mesma cidade, com comportamento do usuário AC, a redução de carga térmica chega a 87%. Nas cidades de São Paulo e Santa Maria, o potencial de redução da CgT_R para a Envoltória 5 com o comportamento do usuário AC chega a ser superior ao encontrado para as envoltórias 1, 2 e 3 com padrão de uso com o comportamento do usuário H.

Figura 12 - Variação da temperatura operativa de acionamento do cálculo da carga térmica de refrigeração.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A Envoltória 3, com baixa inércia térmica, porém isolada termicamente, apresentou o menor potencial de economia entre as demais envoltórias, conforme aumenta-se a temperatura de acionamento. Para o comportamento do usuário AC, em todas as cidades a Envoltória 3 obteve as menores reduções para o acionamento do cálculo da carga térmica de refrigeração com a temperatura operativa de 30°C, chegando a valores de 28%, 34% e 47%, para a cidade de Rio de Janeiro, Santa Maria e São Paulo, respectivamente. Para a temperatura de acionamento de 29°C, somente na cidade de Santa Maria a Envoltória 3 não teve a pior redução.

Pode-se concluir que sistemas com valores altos de inércia térmica reduzem a CgT_R quando há maior flexibilidade na temperatura operativa de acionamento do cálculo da carga térmica de refrigeração, principalmente quando há a combinação da inércia térmica com isolamento térmico, como é o caso da Envoltória 5. A inércia térmica auxilia no atraso térmico, dessa forma, nos horários em que ocorre a maior incidência solar e ganhos térmicos, as superfícies não atingiram a sua capacidade térmica máxima e estão armazenando o calor, que será liberado para o ambiente interno somente horas após a incidência solar.

A Envoltória 3 que apresentou os melhores resultados de desempenho térmico para os indicadores CgT_R e PHFT, nesta análise foi a que teve um dos menores potenciais de redução de carga térmica anual devido ao aumento da temperatura de acionamento. Isto porque, considerando as características do sistema, que é baixa transmitância térmica e baixa inércia térmica, o sistema construtivo não armazena calor, elevando ainda mais a temperatura interna. Nesses casos, no início da ocupação há casos em que a temperatura operativa ainda não atingiu o valor estabelecido para o início do cálculo da CgT_R , assim, a carga interna eleva-se devido à ocupação, acionamento de iluminação e equipamentos. Dessa forma, quando há o acionamento do sistema de condicionamento de ar, deverá ser retirado mais calor do ambiente do que se o sistema tivesse sido acionado a uma temperatura operativa inferior. Na Envoltória 5, que também possui baixa transmitância térmica, mas a inércia térmica é alta, não ocorre esse problema. Uma vez que o componente construtivo responsável pela inércia, ou seja, o concreto, está na camada interna da superfície. Essa característica faz com que o concreto armazene parcela significativa do calor gerado pelas cargas internas, e, dessa forma, a carga térmica a ser retirada do ar do ambiente é inferior do que o da Envoltória 3, por exemplo.

4.3 BALANÇO TÉRMICO NO AR

A análise de balanço térmico no ar é uma forma detalhada de verificar o que de fato importa nos ganhos e perdas de calor da edificação. Neste trabalho, a análise foi importante para entender o desempenho térmico da envoltória para diferentes sistemas construtivos e padrões de usos. Da mesma forma que a análise do desempenho térmico pelos indicadores carga térmica anual de refrigeração (CgT_R) e percentual de fração de horas ocupadas com as temperaturas operativas entre 18°C e 26°C (PHFT), o balanço térmico no ar foi analisado somente para os ambientes de permanência prolongada (APP), sala com cozinha conjugada e dormitórios.

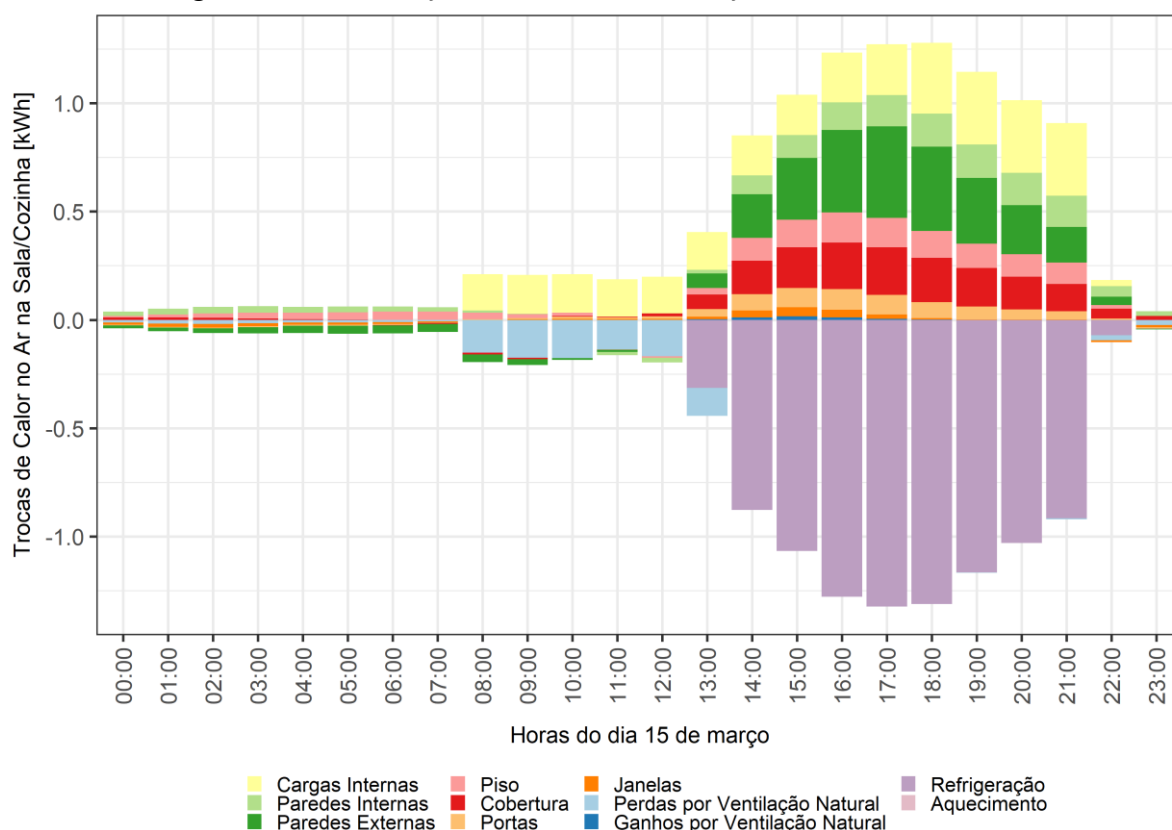
A análise foi aplicada nas envoltórias que obtiveram o maior número de casos (variações no padrão de uso e clima) com o pior e melhor desempenho térmico, considerando os indicadores CgT_R e PHFT. Foram analisados os três comportamentos do usuário: Ventilação Natural (VN), Ar Condicionado (AC) e Híbrido (H). Quanto ao perfil de ocupação utilizado nesta análise, para a Envoltória 1, foi considerada a ocupação que teve o maior valor de CgT_R e o menor PHFT, ou seja, o perfil de ocupação tipo 1, Dia Inteiro. Para a Envoltória 3, foi considerado o perfil de ocupação com o menor valor de CgT_R e maior PHFT, a o tipo 3, Noite.

A análise apresentada neste trabalho ficou concentrada na cidade do Rio de Janeiro, que, devido às características climáticas, apresentou os maiores resultados para as trocas de calor.

4.3.1 Verificação do método de cálculo do balanço térmico do ambiente

Utilizando a Equação 8, apresentada no método deste trabalho, Seção 3.3.1.1, para o cálculo do equilíbrio térmico em cada *time step* da simulação, pode-se verificar que o resultado dos ganhos e perdas resulta em valores iguais ou próximos de 0 kWh, ou seja, o balanço térmico no ar do ambiente está considerando todos os ganhos e perdas que estão ocorrendo no ambiente. Na Figura 13 são apresentadas as trocas de calor que ocorrem na sala com cozinha conjugada durante o dia 15 de março, dia de verão, considerando a Envoltória 1 e padrão de uso H + 1. Cabe ressaltar que a verificação foi executada para o ano inteiro.

Figura 13 – Verificação do cálculo do balanço térmico do ambiente.



Como é possível observar na Figura 13, a parcela de ganho de calor é anulada pela parcela de perda de calor, resultando no equilíbrio térmico e validação do balanço térmico no ar. Em alguns horários, como às 17h00, o equilíbrio térmico não é total, ou seja, há -0,1 kWh

de energia que não estão sendo representados por nenhum dos grupos considerados no balanço térmico. Essa parcela que não se encaixa em nenhum dos 11 grupos analisados, em alguns momentos pode ser referente às perdas ou aos ganhos de calor latente pela ventilação natural. Como a cidade do Rio de Janeiro é de clima quente e úmido, ocorrem também trocas de calor úmidas (latente), além das secas (sensível). Porém, as trocas de calor latente são pequenas, quando comparadas com a sensível. Por exemplo, neste caso específico às 17h00 o ganho de calor latente pela ventilação natural representou 0,003% do ganho de calor sensível, tornando insignificante a sua análise no contexto anual. Além disso, existem as incertezas relacionadas ao programa de simulação, que podem resultar nesses erros.

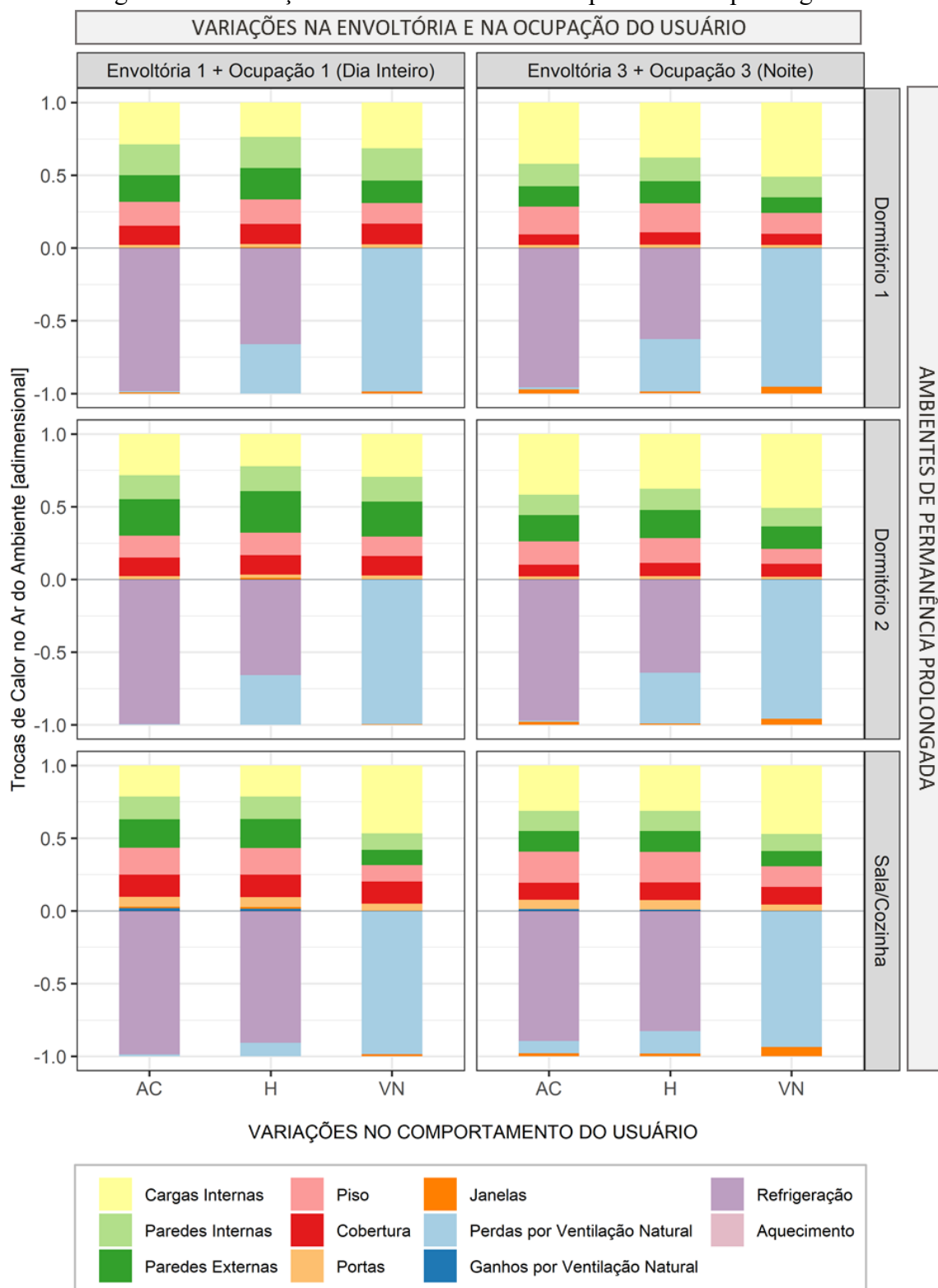
A mesma validação foi executada para todos os casos e ambientes analisados pelo balanço térmico no ar, considerando todos os *time steps* do ano.

4.3.2 Balanço térmico no ar dos ambientes de permanência prolongada

Após a validação, foi analisado o balanço térmico no ar dos ambientes no contexto anual. O resultado pode ser observado na Figura 14. A Figura 14 mostra que entre as diferentes envoltórias, a diferença de magnitude no valor de trocas de calor foi significativa. Enquanto que na Envoltória 1 o total de ganhos anuais na sala, por exemplo, chega a 6.000 kWh, na Envoltória 3, com isolamento térmico, chega a 1.500 kWh. Essa diferença nos valores de energia demonstram a necessidade de se analisar o balanço térmico entre os diferentes grupos utilizando um fator e não o valor total da energia.

Entre os diferentes casos simulados, é possível analisar que a carga interna tem maior importância nos casos com a Envoltória 3 do que com a Envoltória 1. Por exemplo, no comportamento do usuário VN, no dormitório 1, a carga interna representou 51% dos ganhos anuais totais de calor para a Envoltória 3, enquanto que para a Envoltória 1 representou 31%. Como citado anteriormente, a cobertura sem isolamento térmico representa uma fonte de ganho de calor. Isto pode ser visualizado nos casos com a Envoltória 1, onde, para os diferentes ambientes e comportamentos do usuário, a cobertura representou entre 13% a 15% dos ganhos anuais totais de calor. As paredes externas representaram maior parcela do que a cobertura para os casos com a Envoltória 1, chegando a 29% do ganho anual total de calor. Entretanto, esses valores estão atrelados a consideração da distribuição solar como “*Full exterior with reflections*” na simulação computacional.

Figura 14 – Balanço térmico dos ambientes de permanência prolongada.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A modelagem “*Full exterior with reflections*” é considerada devido principalmente à existência de sombreamento externo por beiral na tipologia estudada. Esse tipo de modelagem faz com que a radiação solar que entra pela janela no ambiente seja distribuída em todas as

superfícies internas, por isso o piso também aparece como uma parcela significativa nos ganhos anuais totais.

Como foi considerada a convecção na análise de balanço térmico, as janelas não representam significativa parcela no ganho de calor, mesmo sendo um vidro simples. Isto se dá por conta de que o ganho de calor que ocorrem devido à existência da janela possui maior representatividade quando analisada a radiação solar. No balanço térmico pela convecção, esse ganho é representado em outras superfícies, devido à radiação incidente sobre elas.

Analizando as perdas de calor, é possível verificar que a ventilação natural é uma estratégia de resfriamento dos ambientes que deve ser favorecida nos projetos. No comportamento do usuário H, a ventilação natural chega a retirar entre 9% e 36% do calor presente nos ambientes. Isso significa uma economia no sistema de condicionamento de ar, caso a ventilação natural seja utilizada de forma correta. No comportamento do usuário AC, embora não tenha a opção de ventilar a residência pela abertura efetiva de janelas, ocorre a infiltração por frestas. Devido à essa consideração, nos gráficos de balanço térmico aparece a infiltração de ar como uma fonte de perda de calor dos ambientes.

4.4 LIMITAÇÕES NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

As principais limitações na modelagem dos casos a serem simulados foram relacionadas à ventilação natural. Os algoritmos da classe de objetos *Air Flow Network* do EnergyPlus, responsáveis pela modelagem da ventilação natural no programa, não fazem a conexão entre a superfície do vidro da janela com os critérios de abertura para ventilação. Dessa maneira, por mais que a janela esteja com 100% de abertura para ventilação, o vidro permanece fechado e a parcela de radiação incidente no vidro que é transmitida para o ambiente é a mesma em qualquer condição de ventilação natural. Embora para vidros simples, em que o fator solar é de 0,87, a parcela de radiação solar bloqueada é pequena, essa limitação do programa EnergyPlus é mais uma incerteza relacionada à simulação e pode significar no aumento da carga térmica para refrigeração (VEIGA; MELO; LAMBERTS, 2019).

Outra limitação é referente à ventilação híbrida. Com base em testes realizados pela autora, o objeto *Hybrid Ventilation* do programa EnergyPlus não funcionou como o esperado. Esse objeto deveria controlar a ventilação natural e o acionamento do condicionamento de ar (no caso deste trabalho, do cálculo da carga térmica), de forma a não ocorrerem simultaneamente. Entretanto os critérios de temperatura de acionamento do sistema de condicionamento de ar estipulados, por exemplo, não são obedecidos pelo algoritmo. Isto gera

um aumento significativo da carga térmica, quando comparado com a adição de controles de ventilação híbrida através da classe de objetos *Energy Management System* (EMS). A classe de objetos EMS, torna possível controlar e modificar rotinas pré-estabelecidas no programa EnergyPlus, através dos chamados “programas” (DOE, 2018; VEIGA et al., 2019). Neste trabalho, o uso da classe de objetos EMS entrou em dois comportamentos do usuários estudados: Híbrido (H) e Ar Condicionado (AC). Nestes comportamentos, foi possível definir que o acionamento do cálculo da carga térmica ocorresse com valores de temperatura distintos ao termostato definido, como também utilizar como critério de acionamento do cálculo da carga térmica a temperatura operativa do ambiente e não a temperatura do ar. Ainda no sistema de condicionamento de ar ideal, com o EMS foi possível definir que a partir do momento que o cálculo da carga térmica é iniciado, o mesmo só encerra quando a ocupação no ambiente passa a ser nula. Este critério torna o comportamento mais próximo do real, visto que o sistema não liga e desliga a cada *time step* que atingir a temperatura de termostato. No comportamento do usuário H, o EMS auxiliou na questão relacionada à alternância entre ventilação natural e cálculo da carga térmica. Dessa forma, dentro do programa escrito no EMS, foi definido como critério que uma vez iniciado o cálculo da carga térmica, a ventilação natural é desativada.

Dessa maneira, todos os resultados obtidos neste trabalho estão condicionados a esses e outros fatores limitantes da simulação computacional.

5 CONCLUSÕES

O foco deste trabalho foi analisar o desempenho térmico de uma residência unifamiliar térrea adotando diferentes padrões de uso e sistemas construtivos. Para as variações nos padrões de uso, foram consideradas nove combinações, variando perfil de ocupação e comportamento do usuário. Por ocupação adotou-se variações no período ocupado e na densidade de pessoas no ambiente de permanência prolongada (APP), sala e dormitórios. Para o comportamento do usuário, foram consideradas três variações: Ar Condicionado (AC), Ventilação Natural (VN) e Híbrido (H). Dessa maneira, o comportamento do usuário refere-se à interação dos ocupantes com a climatização da residência. Na envoltória, foram consideradas cinco combinações de sistemas construtivos, variando a transmitância térmica e inércia térmica das paredes e cobertura, buscando abranger desde sistemas construtivos usualmente utilizados nas edificações residenciais brasileiras, quanto sistemas inovadores. As análises foram realizadas para três cidades brasileiras: Rio de Janeiro, Santa Maria e São Paulo.

Para a análise do desempenho térmico foram considerados dois indicadores principais: a carga térmica anual, tanto de refrigeração (CgT_R) quanto de aquecimento (CgT_A), e o percentual de fração de horas ocupadas com as temperaturas operativas entre 18°C e 26°C (PHFT). Estes indicadores estão presentes na proposta de novo método de simulação computacional para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais da NBR 15575 (LABEEE, 2019), versão junho de 2019. A consideração dos indicadores CgT e PHFT possibilitou analisar a edificação tanto na sua condição condicionada artificialmente quanto ventilada naturalmente.

Com este trabalho foi possível verificar que o padrão de uso influencia diretamente no desempenho térmico da edificação. Tomando como exemplo a Envoltória 3, que apresentou os menores valores de CgT_R , para a cidade de São Paulo o valor de CgT_R para a residência foi de 3.570 kWh/ano para o padrão de uso AC +1 (comportamento do usuário Ar Condicionado e perfil de ocupação Noite), enquanto que para o padrão de ocupação VN + 3 (comportamento do usuário Ventilação Natural e perfil de ocupação Noite) o valor da CgT_R foi de 529 kWh/ano, ou seja, uma redução de 85%. Na cidade de Santa Maria, também para a Envoltória 3 a redução na CgT_R quando alterado o padrão de uso de AC + 1 para VN + 3 foi de 72%, e para a cidade do Rio de Janeiro a redução foi de 60%. Essas variações nos valores de carga térmica para refrigeração demonstram que em climas amenos a mudança no padrão de uso tem maior potencial de redução na CgT_R do que climas quentes. Essa conclusão pode ser obtida também para as variações no valor da CgT_R para o mesmo padrão de uso, mas com a envoltória diferente.

Por exemplo, para o padrão de uso VN + 3 na cidade do Rio de Janeiro, a envoltória com o maior valor de CgT_R foi a Envoltória 4, com alta inércia e baixa transmitância térmica nas paredes externas. Se para o mesmo padrão de uso e cidade for utilizada a Envoltória 3, a redução obtida na carga térmica com relação à Envoltória 4 é de 42%. Nas cidades de São Paulo e Santa Maria, para esse mesmo padrão de uso, VN + 3, a %Red CgT_R foi de 53% e 67%, respectivamente, quando alterada a Envoltória 4 para a Envoltória 3.

Entre os padrões de uso e cidades, as envoltórias que apresentaram os melhores resultados para a CgT_R foram a Envoltória 3 para as três cidades, e a Envoltória 5 para alguns padrões de uso nas cidades de São Paulo e Santa Maria. As envoltórias 3 e 5 utilizam isolamento térmico na sua composição, porém a capacidade térmica da Envoltória 3 é de 24 kJ/(m².K) para a cobertura e 48 kJ/(m².K) para as paredes, enquanto que a capacidade térmica da Envoltória 5 é de 233 kJ/(m².K) para a cobertura e 222 kJ/(m².K) para as paredes externas. Dessa maneira, mostra que a inércia térmica juntamente com o isolamento térmico apresenta desempenho térmico satisfatório em cidades com clima ameno e com alta amplitude térmica.

O indicador de carga térmica de aquecimento (CgT_A) não foi analisado em detalhes neste trabalho, devido aos valores baixos, quando comparados com a CgT_R . No Brasil, a maioria das regiões não necessita aquecer os seus ambientes, porém há locais em que o aquecimento é requerido. Pesquisas demonstram que nas regiões mais frias do país, além da adaptação dos usuários, há o acionamento do sistema de aquecimento com temperatura de termostato acima de 20°C (RAMOS, 2019). Dessa forma, ao invés de reduzir a importância do aquecimento nas normativas, deveria ser estudado maneiras de demonstrar o seu real impacto nas regiões frias do país.

Analisando o desempenho térmico pelo indicador PHFT, a Envoltória 3, por exemplo, na cidade de São Paulo, a residência com o padrão de uso AC + 1 apresentou o menor valor de PHFT, sendo igual a 53%, 35% a menos do que o PHFT para o padrão de uso VN + 3, que foi de 89%. Na cidade de Santa Maria, para a residência com a envoltória 3 e padrão de uso VN + 3, o PHFT foi de 75%, enquanto que com o padrão de uso AC + 1 foi de 55%, uma redução de 27%. Na cidade do Rio de Janeiro, a mesma alteração no padrão de uso reduziu em 55% o percentual de horas ocupadas com as temperaturas operativas entre 18°C e 26°C. Cabe ressaltar que a cidade do Rio de Janeiro não foi a que apresentou o menor potencial de melhoria quanto ao desempenho térmico pelo indicador PHFT, ao contrário do que ocorre quando analisado pelo indicador CgT_R . Pelo PHFT, a cidade de Santa Maria teve o menor potencial de melhoria. Isso ocorre, pois, além de analisar a faixa de temperaturas acima de 26°C (calor), o PHFT considera

os períodos ocupados com temperaturas abaixo de 18°C (frio), mais recorrentes na cidade de Santa Maria.

Para o PHFT a melhor envoltória para todas as 27 combinações (nove padrões de uso e três cidades) foi a Envoltória 3. Porém diferentemente da CgT_R a Envoltória 1 foi a segunda melhor para os casos com o comportamento do usuário AC na cidade do Rio de Janeiro. Nestes casos, a Envoltória 5 foi a com o menor valor de PHFT. Isto demonstra que nesses comportamentos do usuário o sistema construtivo concreto, com alta inércia térmica e sem isolamento térmico, aumenta o número de horas ocupadas sem a necessidade do uso de condicionamento de ar. Pois, além de armazenar maior quantidade de calor, permite que o calor interno seja transferido para o exterior, ao contrário do que ocorre na Envoltória 5.

Analisando ambos os indicadores, CgT_R e PHFT, foi possível analisar que na maioria das combinações a envoltória que apresentou o melhor CgT_R é a mesma envoltória que apresentou o melhor PHFT. Isso demonstra que há relação entre os indicadores.

Para os padrões de uso com comportamento Ar Condicionado (AC) e Híbrido (H), variou-se também a temperatura operativa de acionamento para o cálculo da carga térmica de refrigeração. As variações partiram do caso base, 26°C, e foi acrescido 1°C, variando em 27°C, 28°C, 29°C e 30°C a temperatura operativa para o início do cálculo da carga térmica. Cabe ressaltar que a temperatura é de acionamento. Após o início do cálculo, a carga térmica de refrigeração é calculada para baixar a temperatura do ar e mantê-la a 23°C (termostato). Essa análise mostrou que conforme a temperatura operativa de acionamento é elevada, ocorre a redução da carga térmica anual de refrigeração, chegando a economias de até 96% na CgT_R quando o acionamento do condicionamento de ar ideal é realizado a 30°C ao invés de 26°C. Os resultados mostraram ainda que o potencial de redução da CgT_R conforme aumenta a temperatura operativa é diferente entre as envoltórias. A Envoltória 3 apresenta o pior desempenho térmico pela CgT_R quando a temperatura operativa de acionamento do condicionamento de ar é superior a 28°C. Enquanto que a Envoltória 5 apresenta os melhores resultados. Analisando do ponto de vista das políticas públicas, a modelagem de um padrão de uso que aciona o condicionamento de ar a uma temperatura fixa, no caso 26°C, pode apontar que o sistema construtivo a ser indicado para melhorar o desempenho térmico da residência não é o adequado para aquele padrão de uso. Como foi o que ocorreu com a Envoltória 3. Levantamentos recentes mostram que as pessoas acionam o condicionamento de ar a temperaturas muito diferentes, e o termostato também é muito variado (ELETROBRAS; PROCEL, 2019; RAMOS, 2019).

De maneira a complementar as análises de desempenho térmico, foi realizado o cálculo do balanço térmico dos ambientes sala e dormitórios da residência. Essa análise foi executada para a Envoltória 1 e Envoltória 3, que apresentaram o pior e melhor desempenho térmico, respectivamente, considerando os indicadores CgT_R e PHFT. Com a análise, pode-se verificar que o piso e as paredes são as superfícies mais significativas para o ganho de calor nos ambientes, considerando os três comportamentos do usuário e a cidade do Rio de Janeiro. A importância do piso no balanço térmico do ar da zona deve-se principalmente à incidência de radiação solar nesta superfície. Entre as diferentes envoltórias foi possível analisar que as trocas de calor na residência com a Envoltória 1 foram mais significativas do que com a Envoltória 3. Isto tem relação com o material construtivo, mas também com o tipo de ocupação. Na Envoltória 1 o perfil de ocupação é do tipo 1, Dia Inteiro, em que a residência é ocupada durante todo o dia. Enquanto que na simulação da Envoltória 3 foi considerado o perfil de ocupação tipo 3, Noite, com a residência ocupada entre as 18h00 até 07h59 do dia seguinte. Para os diferentes comportamentos do usuário, percebe-se que entre o comportamento do usuário Ar Condicionado (AC) e Híbrido (H), parte significativa do calor do ambiente, que seria retirado pelo sistema de condicionamento de ar no comportamento AC, passa a ser retirado por ventilação natural. Isto confirma o fato de que a ventilação natural pode ser utilizada para a economia de energia na climatização dos ambientes.

Como considerações finais, deve-se ressaltar as limitações relacionadas à modelagem dos usuários neste trabalho. Como já observado, o comportamento dos usuários nas edificações depende diretamente de aspectos psicológicos, físicos, sociais, entre outros, influenciando diretamente na necessidade de ventilação natural, como também no acionamento do condicionamento de ar. Além disso, existem aspectos como a rotina, que fazem com que a ocupação seja similar na maioria dos dias do ano, porém existe um erro associado a considerá-la igual todos os dias do ano. A maneira que as pessoas ocupam os ambientes depende da rotina de trabalho, estudo, número de residentes, entre outras questões que, analisando para um país, gera padrões estocásticos que podem diferir significativamente do adotado em normativas, por exemplo. Essa lacuna entre o adotado em diretrizes construtivas e o que representa a realidade da população é refletida em diferenças significativas no resultado do desempenho térmico (YAO, 2018).

Na prática, o padrão de uso, na maioria das vezes, não reflete o simulado. Dificilmente, um usuário que não compreende do desempenho térmico da edificação irá analisar a temperatura externa e interna para a abertura das janelas para ventilação. Mas irá analisar outros aspectos, psicológicos ou físicos, como por exemplo, a necessidade de abertura da janela para

a redução da sensação de claustrofobia, ou ainda, para evitar a proliferação de mofo. A pesquisa de Ramos (2019), ainda não publicada, mostra que, na maioria dos casos levantados, o fator de abertura da janela é psicológico, ou seja, o residente chega em casa e sente a necessidade de abrir a janela para olhar o ambiente externo. Neste trabalho, esse tipo de comportamento do usuário não foi simulado, considerando somente aquele que possui um conhecimento das condições internas e externas de temperatura e somente irá ventilar o ambiente no caso de a temperatura externa ser menor que a interna. Este tipo de usuário pode favorecer envoltórias mais isoladas, pois o sobreaquecimento dos ambientes devido às cargas internas, que não consegue se dissipar pelas superfícies, é amenizado pelo fluxo de ar entre o exterior e o ambiente. Se o usuário fosse modelado considerando a possibilidade de abrir as janelas mesmo com a temperatura externa maior que a interna, o aquecimento do ambiente iria ser mais acentuado, uma vez que, além das cargas internas, existiria o fluxo de ar quente para dentro do ambiente.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais recomendações para trabalhos futuros são:

- Modificar os padrões de uso com comportamento Ventilação Natural e Híbrido, buscando outras formas de uso, por exemplo a abertura das janelas para ventilação independente da temperatura externa;
- Replicar a metodologia para outros climas;
- Analisar outras combinações de envoltória, modificando também vidros e piso;
- Considerar diferentes geometrias de edificações residenciais, replicando por exemplo para outras faixas de renda;
- Verificar o impacto no desempenho térmico da edificação frente a outros perfis do usuário, considerando pesquisas recentes sobre comportamento do usuário;
- Estudar outros indicadores de desempenho térmico, de maneira a indicar qual compara de maneira mais concisa diferentes padrões de ocupação.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações. . 2005 a, 1, p. 1–34.
- 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. . 2005 b, p. 23.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575: Edificações Habitacionais - Desempenho. . 2013.
- ANDERSEN, Rune Korsholm. The influence of occupants' behaviour on energy consumption investigated in 290 identical dwellings and in 35 apartments. 2012 In: ABSTRACT FROM 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEALTHY BUILDINGS 2012, Brisbane, Australia. **Anais...** Brisbane, Australia
- ASHRAE, “American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineering (ANSI/ASHRAE)”. **ANSI/ASHRAE 169-2013 Climatic data for building design standards**. [s.l: s.n.]. 2013. v. 8400
- BALVEDI, Bruna Faitão et al. Identificação de perfis de comportamento do usuário para edificações residenciais multifamiliares e naturalmente ventiladas em Florianópolis. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 149–160, 2018.
- BALVEDI, Bruna Faitão; GHISI, Eneide; LAMBERTS, Roberto. A review of occupant behaviour in residential buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 174, p. 495–505, 2018.
- BRASIL, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. . 2012, p. 136.
- BRASIL. DECRETO Nº 4.059, DE 19 DE DEZEMBRO DE 2001. Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia . 2001.
- BRASIL. **PORTARIA INTERMINISTERIAL N o 1.007, DE 31 DE DEZEMBRO DE 2010. Aprova a Regulamentação Específica de Lâmpadas Incandescentes na forma constante dos Anexos I e II.** Ministério de Minas e Energia, , 2010. Disponível em: <www.inmetro.gov.br>. Acesso em: 26 nov. 2018.
- BRASIL. INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 2, DE 04 DE JUNHO DE 2014. Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit. 2014.
- BRASIL. **Minha Casa Minha Vida atinge 3,857 milhões de moradias — Governo do Brasil.** 2017. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2015/05/minha-casa-minha-vida-atinge-3-857-milhoes-de-moradias>>. Acesso em: 26 nov. 2018.

CB3E, Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. **Proposta de Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Florianópolis, Brasil. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B02A05065>>. Acesso em: 5 dez. 2018a.

CB3E, Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. **Novo método de avaliação energética de edificações com base em energia primária**. 2018b. Disponível em: <<http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas>>. Acesso em: 5 dez. 2018.

CBIC, Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Necessidades de revisão da ABNT NBR 15575 em relação ao desempenho térmico e lumínico de edificações habitacionais – COMAT – Comissão de Materiais, Tecnologia, Qualidade e Produtividade**. 2018. Disponível em: <<https://cbic.org.br/inovacao/2018/03/29/necessidades-de-revisao-da-abnt-nbr-15575-em-relacao-ao-desempenho-termico-e-luminico-de-edificacoes-habitacionais/>>. Acesso em: 6 dez. 2018.

CHEN, Shuqin et al. Definition of occupant behavior in residential buildings and its application to behavior analysis in case studies. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 104, p. 1–13, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.075>>

CRAWLEY, Dru; LAWRIE, Linda. **Repository of free climate data for building performance simulation: Brazil, Region 3 - South America**. 2019. Disponível em: <http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html>. Acesso em: 21 nov. 2019.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00038628.2014.981145>>

DEPECKER, P. et al. Design of buildings shape and energetic consumption. **Building and Environment**, [s. l.], v. 36, n. 5, p. 627–635, 2001.

DOE, Department of Energy. **Documentation Application Guide for EMS - EnergyPlus**, 2018.

ELETRONBRAS; PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (PPH BRASIL 2019)**. Brasil. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/BRASIL.pdf>>.

ELI, Letícia G. et al. Análise de Sensibilidade e Incertezas dos Parâmetros Relacionados à Modelagem do Contato do Piso com o Solo no Programa EnergyPlus. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2019a, João Pessoa, PB. **Anais...** João Pessoa, PB: ANTAC, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2019.

ELI, Letícia Gabriela et al. **Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto Ground Domain no Programa EnergyPlus - Versão 9.0.1** Florianópolis, Brasil Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, , 2019. b.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **PNE - Cenário econômico 2050**. Rio de Janeiro, Brasil. 2015.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Demanda de Energia 2050**. Rio de Janeiro. 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em: 1 jan. 2020.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2019: Ano Base 2018. Balanco Energético Nacional**. 2019a. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 1 jan. 2020.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Energia 2029 - Demanda de Energia Elétrica**. 2019b. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-481/02_Demanda_de_Energia.pdf>. Acesso em: 31 out. 2019.

FABI, Valentina et al. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. **Building and Environment**, [s. l.], v. 58, p. 188–198, 2012.

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

GAETANI, Isabella; HOES, Pieter Jan; HENSEN, Jan L. M. Occupant behavior in building energy simulation: Towards a fit-for-purpose modeling strategy. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 121, p. 188–204, 2016.

GHISI, Enedir; GOSCH, Samuel; LAMBERTS, Roberto. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. **Energy Policy**, [s. l.], v. 35, n. 8, p. 4107–4120, 2007.

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

GILL, Zachary M. et al. Low-energy dwellings: The contribution of behaviours to actual performance. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 38, n. 5, p. 491–508, 2010.

GUERRA-SANTIN, Olivia; ITARD, Laure. Occupants' behaviour: Determinants and effects on residential heating consumption. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 318–338, 2010.

GUERRA SANTIN, O. Occupant behaviour in energy efficient dwellings: Evidence of a rebound effect. **Journal of Housing and the Built Environment**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 311–327, 2013.

HAMDY, Mohamed et al. The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study. **Building and Environment**, [s. l.], v. 122, n. August 2003, p. 307–323, 2017.

HEMSATH, Timothy L.; ALAGHEBAND BANDHOSSEINI, Kaveh. Sensitivity analysis

evaluating basic building geometry's effect on energy use. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 76, p. 526–538, 2015.

HONG, Tianzhen et al. An ontology to represent energy-related occupant behavior in buildings. Part I: Introduction to the DNAs framework. **Building and Environment**, [s. l.], v. 92, p. 764–777, 2015. a.

HONG, Tianzhen et al. An ontology to represent energy-related occupant behavior in buildings. Part II: Implementation of the DNAs framework using an XML schema. **Building and Environment**, [s. l.], v. 94, n. P1, p. 196–205, 2015. b.

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.

HONG, Tianzhen; YAN, Da. IEA EBC Annex 66: A recently-completed international collaborative project. [s. l.], v. 28, n. 2, 2018.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD | IBGE**. 2015. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/rendimento-despesa-e-consumo/9127-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 25 mar. 2020.

IEA, International Energy Agency. **Technology Roadmap - Energy efficient buildings envelopes** SpringerReference. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.springerreference.com/index/doi/10.1007/SpringerReference_7300>.

IEA, International Energy Agency. **Electricity Information 2018: Overview**. 2018a [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/electricity-information-2018-overview>>.

IEA, International Energy Agency. **The Future of Cooling**. 2018b. [s.l: s.n.].

IEA, International Energy Agency. **IEA Building Energy Efficiency Policies Database**. 2018c. Disponível em: <<https://www.iea.org/beep/?country%5B%5D=Australia&country%5B%5D=Austria&country%5B%5D=Belgium&country%5B%5D=Brazil&country%5B%5D=Canada&country%5B%5D=Chile&country%5B%5D=China&country%5B%5D=Czech+Republic&country%5B%5D=Denmark&country%5B%5D=Finland&country%5B%5D=France&country%5B%5D=Germany&country%5B%5D=Greece&country%5B%5D=India&country%5B%5D=Indonesia&country%5B%5D=Italy&country%5B%5D=Japan&country%5B%5D=Korea&country%5B%5D=Kuwait&country%5B%5D=Latvia&country%5B%5D=Lithuania&country%5B%5D=Malaysia&country%5B%5D=Malta&country%5B%5D=Netherlands&country%5B%5D=Norway&country%5B%5D=Poland&country%5B%5D=Portugal&country%5B%5D=Romania&country%5B%5D=Russia&country%5B%5D=Singapore&country%5B%5D=South+Africa&country%5B%5D=Spain&country%5B%5D=Sweden&country%5B%5D=Switzerland&country%5B%5D=Taiwan&country%5B%5D=Thailand&country%5B%5D=Turkey&country%5B%5D=Ukraine&country%5B%5D=United+Kingdom&country%5B%5D=United+States&country%5B%5D=Vietnam>>. Acesso em: 5 dez. 2018.

IEA, International Energy Agency. **World Energy Outlook 2019**. [s.l: s.n.]. 2019a. Disponível em: <www.iea.org/weo>. Acesso em: 19 dez. 2019.

IEA, International Energy Agency. **Electricity information: overview 2019**. 2019b. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.iea.org/t_c/>. Acesso em: 19 dez. 2019.

INMETRO, "INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, Qualidade e Tecnologia". Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). . 2010, p. 93.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Relatório interno: Proposta de método de avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais pela NBR 15575 - versão junho de 2019.** Florianópolis, Brasil, 2019.

LIU, C. et al. Future probabilistic hot summer years for overheating risk assessments. **Building and Environment**, [s. l.], v. 105, p. 56–68, 2016.

MANTESI, Eirini et al. ESSE TEM UMAS NOTAS... MAS PEGAR PARA REVISÃO O OUTRO. 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. a.

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. b.

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 ? Energy Efficiency in Buildings Laboratory , Federal University of Santa Catarina , Energy Simulation Solutions Limited , Leicester , United Kindom. **Building Simulation Conference**, [s. l.], p. 1353–1360, 2015.

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.

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.

PATHAN, A. et al. Monitoring summer indoor overheating in the London housing stock. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 141, p. 361–378, 2017.

PEACOCK, A. D.; JENKINS, D. P.; KANE, D. Investigating the potential of overheating in UK dwellings as a consequence of extant climate change. **Energy Policy**, [s. l.], v. 38, n. 7, p. 3277–3288, 2010.

PORRITT, S. M. et al. Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 55, p. 16–27, 2012.

PREMROV, Miroslav; ŽIGART, Maja; ŽEGARAC LESKOVAR, Vesna. Influence of the building shape on the energy performance of timber-glass buildings located in warm climatic regions. **Energy**, [s. l.], v. 149, p. 496–504, 2018.

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

RAKHSHAN, 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. **Relatório Interno: Pesquisa relacionada ao comportamento de usuários residenciais brasileiros**. Florianópolis, Brasil. 2019.

SANTIN, Olivia Guerra. Behavioural patterns and user profiles related to energy consumption for heating. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 43, n. 10, p. 2662–2672, 2011.

SENTELHAS, Paulo Cesar et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

SILVA, Arthur Santos et al. Knowing electricity end-uses to successfully promote energy efficiency in buildings: a case study in low-income houses in Southern Brazil. **International Journal of Sustainable Energy Planning and Management**, [s. l.], v. 2, n. 0, p. 7–18, 2014.

SILVA, Arthur Santos; GHISI, Enedir. Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 76, p. 381–391, 2014.

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.

SORGATO, Marcio José. **Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente**. 2009. Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2009.

SORGATO, Marcio José. **A Influência do Comportamento do Usuário no Desempenho Térmico e Energético de Edificações Residenciais**. 2015. Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2015. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/Tese_Marcio_Jose_Sorgato_BU.pdf>

STEEMERS, Koen; YUN, Geun Young. Household energy consumption: A study of the role of occupants. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 37, n. 5–6, p. 625–637, 2009.

TRIANA, Maria Andrea. **Abordagem Integrada no Ciclo de Vida de Habitação de Interesse Social Considerando Mudanças Climáticas**. 2016. Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2016.

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.

VAN HOOFF, T. et al. Reprint of: On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 83, p. 142–158, 2015.

VEIGA, Rodolfo Kirch et al. **Manual de Uso do Energy Management System (EMS) no Programa EnergyPlus - Versão 9.1** Florianópolis, Brasil Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, , 2019.

VEIGA, Rodolfo Kirch; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. Limitações da modelagem de janelas em edificações ventiladas naturalmente. In: IV CONGRESO LATINOAMERICANO DE SIMULACIÓN EN EDIFICIOS (LATAM) 2019, Mendoza, Argentina. **Anais...** Mendoza, Argentina

YAN, Da et al. IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 156, p. 258–270, 2017.

YAO, Jian. Modelling and simulating occupant behaviour on air conditioning in residential buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 175, p. 1–10, 2018.

APÊNDICE A – Modelagem dos Padrões de uso

Este apêndice tem como função auxiliar pesquisas futuras que queiram adotar as rotinas consideradas nos padrões de uso deste trabalho, apresentados na Seção 3.2.2. Todas as imagens aqui expostas são capturas do IDF Editor desenvolvido pela autora deste trabalho. As simulações computacionais foram executadas no programa EnergyPlus versão 9.0.1.

Neste apêndice o padrão de uso foi dividido em ocupação e comportamento, conforme Seção 3.2.2.

OCUPAÇÃO 1 – DIA INTEIRO

Classe: *Schedule:TypeLimits*

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		fracao	atividade
Lower Limit Value	varies	0	0
Upper Limit Value	varies	1	1000
Numeric Type		Continuous	Continuous
Unit Type		Percent	ActivityLevel

Classe: *Schedule:Compact*

Field	Units	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		OcupSala	OcupDorm1	OcupDorm2	IlumSala	IlumDorm1	IlumDorm2
Schedule Type Limits Name		fracao	fracao	fracao	fracao	fracao	fracao
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Field 3	varies	Until: 8:00	Until: 8:00	Until: 8:00	Until: 16:00	Until: 6:00	Until: 6:00
Field 4	varies	0	1	1	0	0	0
Field 5	varies	Until: 18:00	Until: 22:00	Until: 22:00	Until: 22:00	Until: 8:00	Until: 8:00
Field 6	varies	0.5	0	0	1	1	1
Field 7	varies	Until: 22:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 22:00	Until: 22:00
Field 8	varies	1	1	1	0	0	0
Field 9	varies	Until: 24:00				Until: 24:00	Until: 24:00
Field 10	varies	0				1	1
Field 11	varies						

Field	Units	Obj8	Obj9	Obj10
Name		AtivSala	AtivDorm	EquipSala
Schedule Type Limits Name		atividade	atividade	fracao
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Field 3	varies	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 8:00
Field 4	varies	108	81	0
Field 5	varies			Until: 22:00
Field 6	varies			1
Field 7	varies			Until: 24:00
Field 8	varies			0
Field 9	varies			
Field 10	varies			
Field 11	varies			

Classe: *People*

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Dormitorio1	Dormitorio2	Sala1
Zone or ZoneList Name		Dorm1	Dorm2	Sala
Number of People Schedule Name		OcupDorm1	OcupDorm2	OcupSala
Number of People Calculation Method		People	People	People
Number of People		2	2	4
People per Zone Floor Area	person/m2			
Zone Floor Area per Person	m2/person			
Fraction Radiant		0.3	0.3	0.3
Sensible Heat Fraction				
Activity Level Schedule Name		AtivDorm	AtivDorm	AtivSala
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s-W			
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings				
Mean Radiant Temperature Calculation Type				
Surface Name/Angle Factor List Name				
Work Efficiency Schedule Name				
Clothing Insulation Calculation Method				
Clothing Insulation Calculation Method Schedule Name				
Clothing Insulation Schedule Name				
Air Velocity Schedule Name				
Thermal Comfort Model 1 Type				
Thermal Comfort Model 2 Type				
Thermal Comfort Model 3 Type				
Thermal Comfort Model 4 Type				
Thermal Comfort Model 5 Type				

OCUPAÇÃO 2 – NBR

Classe: *Schedule:TypeLimits*

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		fracao	atividade
Lower Limit Value	varies	0	0
Upper Limit Value	varies	1	1000
Numeric Type		Continuous	Continuous
Unit Type		Percent	ActivityLevel

Classe: *Schedule:Compact*

Field	Units	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		OcupSala	OcupDorm1	OcupDorm2	IlumSala	IlumDorm1	IlumDorm2
Schedule Type Limits Name		fracao	fracao	fracao	fracao	fracao	fracao
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Field 3	varies	Until: 14:00	Until: 8:00	Until: 8:00	Until: 16:00	Until: 6:00	Until: 6:00
Field 4	varies	0	1	1	0	0	0
Field 5	varies	Until: 18:00	Until: 22:00	Until: 22:00	Until: 22:00	Until: 8:00	Until: 8:00
Field 6	varies	0.5	0	0	1	1	1
Field 7	varies	Until: 22:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 22:00	Until: 22:00
Field 8	varies	1	1	1	0	0	0
Field 9	varies	Until: 24:00				Until: 24:00	Until: 24:00
Field 10	varies	0				1	1
Field 11	varies						

Field	Units	Obj8	Obj9	Obj10
Name		AtivSala	AtivDorm	EquipSala
Schedule Type Limits Name		atividade	atividade	fracao
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Field 3	varies	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 14:00
Field 4	varies	108	81	0
Field 5	varies			Until: 22:00
Field 6	varies			1
Field 7	varies			Until: 24:00
Field 8	varies			0
Field 9	varies			

Classe: *People*

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Dormitorio1	Dormitorio2	Sala1
Zone or ZoneList Name		Dorm1	Dorm2	Sala
Number of People Schedule Name		OcupDorm1	OcupDorm2	OcupSala
Number of People Calculation Method		People	People	People
Number of People		2	2	4
People per Zone Floor Area	person/m2			
Zone Floor Area per Person	m2/person			
Fraction Radiant		0.3	0.3	0.3
Sensible Heat Fraction				
Activity Level Schedule Name		AtivDorm	AtivDorm	AtivSala
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s-W			
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings				
Mean Radiant Temperature Calculation Type				
Surface Name/Angle Factor List Name				
Work Efficiency Schedule Name				
Clothing Insulation Calculation Method				
Clothing Insulation Calculation Method Schedule Name				
Clothing Insulation Schedule Name				
Air Velocity Schedule Name				
Thermal Comfort Model 1 Type				
Thermal Comfort Model 2 Type				
Thermal Comfort Model 3 Type				
Thermal Comfort Model 4 Type				
Thermal Comfort Model 5 Type				

OCUPAÇÃO 3 – NOITE

Classe: *Schedule:TypeLimits*

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		fracao	atividade
Lower Limit Value	varies	0	0
Upper Limit Value	varies	1	1000
Numeric Type		Continuous	Continuous
Unit Type		Percent	ActivityLevel

Classe: *Schedule:Compact*

Field	Units	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		OcupSala	OcupDorm1	OcupDorm2	IlumSala	IlumDorm1	IlumDorm2
Schedule Type Limits Name		fracao	fracao	fracao	fracao	fracao	fracao
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Field 3	varies	Until: 18:00	Until: 8:00	Until: 8:00	Until: 18:00	Until: 6:00	Until: 6:00
Field 4	varies	0	1	1	0	0	0
Field 5	varies	Until: 22:00	Until: 22:00	Until: 22:00	Until: 22:00	Until: 8:00	Until: 8:00
Field 6	varies	1	0	0	1	1	1
Field 7	varies	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 22:00	Until: 22:00
Field 8	varies	0	1	1	0	0	0
Field 9	varies					Until: 24:00	Until: 24:00
Field 10	varies					1	1
Field 11	varies						

Field	Units	Obj8	Obj9	Obj10
Name		AtivSala	AtivDorm	EquipSala
Schedule Type Limits Name		atividade	atividade	fracao
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Field 3	varies	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 18:00
Field 4	varies	108	81	0
Field 5	varies			Until: 22:00
Field 6	varies			1
Field 7	varies			Until: 24:00
Field 8	varies			0
Field 9	varies			

Classe: *People*

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Dormitorio1	Dormitorio2	Sala1
Zone or ZoneList Name		Dorm1	Dorm2	Sala
Number of People Schedule Name		OcupDorm1	OcupDorm2	OcupSala
Number of People Calculation Method		People	People	People
Number of People		2	2	4
People per Zone Floor Area	person/m2			
Zone Floor Area per Person	m2/person			
Fraction Radiant		0.3	0.3	0.3
Sensible Heat Fraction				
Activity Level Schedule Name		AtivDorm	AtivDorm	AtivSala
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s-W			
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings				
Mean Radiant Temperature Calculation Type				
Surface Name/Angle Factor List Name				
Work Efficiency Schedule Name				
Clothing Insulation Calculation Method				
Clothing Insulation Calculation Method Schedule Name				
Clothing Insulation Schedule Name				
Air Velocity Schedule Name				
Thermal Comfort Model 1 Type				
Thermal Comfort Model 2 Type				
Thermal Comfort Model 3 Type				
Thermal Comfort Model 4 Type				
Thermal Comfort Model 5 Type				

COMPORTAMENTO DO USUÁRIO – VENTILAÇÃO NATURAL (VN)

Classe: *Schedule:TypeLimits*

Field	Units	Obj3	Obj4
Name		On_Off	TEMPERATURE
Lower Limit Value	varies	0	0
Upper Limit Value	varies	1	50
Numeric Type		Discrete	Continuous
Unit Type		Control	Temperature

Classe: *Schedule:Compact*

Nesta classe, o preenchimento da ventilação do dormitório varia para cada tipo de ocupação. Isto porque é possível ventilar o dormitório caso exista ocupação na sala. A imagem aqui apresentada é referente à ocupação 1, Dia Inteiro.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		TempVentilacao	VN_Sala	VN_Dorm1	VN_Dorm2
Schedule Type Limits Name		TEMPERATURE	On_Off	On_Off	On_Off
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Field 3	varies	Until: 24:00	Until: 8:00	Until: 24:00	Until: 24:00
Field 4	varies	19	0	1	1
Field 5	varies		Until: 18:00		
Field 6	varies		1		
Field 7	varies		Until: 22:00		
Field 8	varies		1		
Field 9	varies		Until: 24:00		
Field 10	varies		0		
Field 11	varies				

Classe: *AirflowNetwork:MultiZone:Surface*

Como nesta classe são vários itens e a maneira como são preenchidos se repete, a imagem traz um representante de cada tipo de abertura: Janela dos ambientes de permanência prolongada como JANSALA_OESTE; janela do banheiro como JANBWC; e as portas como PORTAEXT_NORT.

Field	Units	Obj1	Obj6	Obj7
Surface Name		JANSALA_OESTE	JANBWC	PORTAEXT_NORT
Leakage Component Name		Det_Janela	Det_Janela	Det_Porta
External Node Name				
Window/Door Opening Factor, or Crack Factor	dimensionless	1	1	1
Ventilation Control Mode		Temperature	Constant	NoVent
Ventilation Control Zone Temperature Setpoint Schedule Name		TempVentilacao		
Minimum Venting Open Factor	dimensionless	0	0	0
Indoor and Outdoor Temperature Difference Lower Limit For Maximum Venting Open Factor	deltaC			
Indoor and Outdoor Temperature Difference Upper Limit for Minimum Venting Open Factor	deltaC			
Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Lower Limit For Maximum Venting Open Factor	deltaJ/kg			
Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Upper Limit for Minimum Venting Open Factor	deltaJ/kg			
Venting Availability Schedule Name		VN_Sala		
Occupant Ventilation Control Name				
Equivalent Rectangle Method				
Equivalent Rectangle Aspect Ratio	dimensionless			

COMPORTAMENTO DO USUÁRIO – AR CONDICIONADO (AC)

Classe: *Schedule:TypeLimits*

Field	Units	Obj3
Name		On_Off
Lower Limit Value	varies	0
Upper Limit Value	varies	1
Numeric Type		Discrete
Unit Type		Control

Classe: *Schedule:Constant*

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		HVAC_Sala	HVAC_Dorm1	HVAC_Dorm2
Schedule Type Limits Name		On_Off	On_Off	On_Off
Hourly Value	varies	0	0	0

Classe: *HVACTemplate:Thermostat*

Field	Units	Obj1
Name		Termostato
Heating Setpoint Schedule Name		
Constant Heating Setpoint	C	18
Cooling Setpoint Schedule Name		
Constant Cooling Setpoint	C	23

Classe: *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Zone Name		Dorm1	Sala	Dorm2
Template Thermostat Name		Termostato	Termostato	Termostato
System Availability Schedule Name		HVAC_Dorm1	HVAC_Sala	HVAC_Dorm2
Maximum Heating Supply Air Temperature	C	50	50	50
Minimum Cooling Supply Air Temperature	C	13	13	13
Maximum Heating Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryAir	0.0156	0.0156	0.0156
Minimum Cooling Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryAir	0.0077	0.0077	0.0077
Heating Limit		NoLimit	NoLimit	NoLimit
Maximum Heating Air Flow Rate	m3/s			
Maximum Sensible Heating Capacity	W			
Cooling Limit		NoLimit	NoLimit	NoLimit
Maximum Cooling Air Flow Rate	m3/s			
Maximum Total Cooling Capacity	W			
Heating Availability Schedule Name				
Cooling Availability Schedule Name				
Dehumidification Control Type		None	None	None
Cooling Sensible Heat Ratio	dimensionless	0.7	0.7	0.7
Dehumidification Setpoint	percent			
Humidification Control Type		None	None	None
Humidification Setpoint	percent			
Outdoor Air Method		None	None	None
Outdoor Air Flow Rate per Person	m3/s			
Outdoor Air Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2			
Outdoor Air Flow Rate per Zone	m3/s			
Design Specification Outdoor Air Object Name				
Demand Controlled Ventilation Type		None	None	None
Outdoor Air Economizer Type		NoEconomizer	NoEconomizer	NoEconomizer
Heat Recovery Type		None	None	None
Sensible Heat Recovery Effectiveness	dimensionless			
Latent Heat Recovery Effectiveness	dimensionless			

Classe: *EnergyManagementSystem:Program*

Deve ser escrito um programa para cada ambiente de permanência prolongada. Neste apêndice, como exemplo, estão os programas para o dormitório 1 e a sala. Cabe ressaltar que para o uso do EMS devem ser preenchidos outros objetos que irão fazer a conexão entre schedules de acionamento do EnergyPlus e do EMS. Para mais detalhes recomenda-se a leitura do Manual do EMS desenvolvido pelo LabEEE (VEIGA et al., 2019).

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		CompDorm1Ativo	CompSalaAtivo
Program Line 1		SET Temp_Conf = ((Temp_Dorm1 >= 26) (Temp_Dorm1 <= 16))	SET Temp_Conf = ((Temp_Sala >= 26) (Temp_Sala <= 16))
Program Line 2		IF (Ocup_Dorm1 > 0) && (Temp_Conf == 1)	IF (Ocup_Sala > 0) && (Temp_Conf == 1)
A4		Set Controle_HVAC_Dorm1 = 1	Set Controle_HVAC_Sala = 1
A5		ELSEIF ((Ocup_Dorm1 > 0) && (Sensor_HVACD1 > 0))	ELSEIF ((Ocup_Sala > 0) && (Sensor_HVAC_SALA > 0))
A6		Set Controle_HVAC_Dorm1 = 1	Set Controle_HVAC_Sala = 1
A7		ELSEIF ((Ocup_Sala > 0) (Ocup_Dorm1 > 0))	ELSEIF (Ocup_Sala == 0)
A8		Set Controle_HVAC_Dorm1 = 0	Set Controle_HVAC_Sala = 0
A9		ELSEIF (Ocup_Dorm1 == 0)	ENDIF
A10		Set Controle_HVAC_Dorm1 = 0	
A11		ENDIF	
A12			

COMPORTAMENTO DO USUÁRIO – HÍBRIDO (H)

Classe: *Schedule:TypeLimits*

Field	Units	Obj3
Name		On_Off
Lower Limit Value	varies	0
Upper Limit Value	varies	1
Numeric Type		Discrete
Unit Type		Control

Classe: *Schedule:Constant*

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		HVAC_Sala	VN_Sala	HVAC_Dorm1	VN_Dorm1	HVAC_Dorm2	VN_Dorm2
Schedule Type Limits Name		On_Off	On_Off	On_Off	On_Off	On_Off	On_Off
Hourly Value	varies	0	1	0	1	0	1

Classe: *AirflowNetwork:MultiZone:Surface*

Como nesta classe são vários itens e a maneira como são preenchidos se repete, a imagem traz um representante de cada tipo de abertura: Janela dos ambientes de permanência prolongada como JANSALA_OESTE; janela do banheiro como JANBWC; e as portas como PORTAEXT_NORT.

Field	Units	Obj1	Obj6	Obj7
Surface Name		JANSALA_OESTE	JANBWC	PORTAEXT_NORT
Leakage Component Name		Det_Janela	Det_Janela	Det_Porta
External Node Name				
Window/Door Opening Factor, or Crack Factor	dimensionless	1	1	1
Ventilation Control Mode		Temperature	Constant	NoVent
Ventilation Control Zone Temperature Setpoint Schedule Name		TempVentilacao		
Minimum Venting Open Factor	dimensionless	0	0	0
Indoor and Outdoor Temperature Difference Lower Limit For Maximum Venting Open Factor	deltaC			
Indoor and Outdoor Temperature Difference Upper Limit for Minimum Venting Open Factor	deltaC			
Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Lower Limit For Maximum Venting Open Factor	deltaJ/kg			
Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Upper Limit for Minimum Venting Open Factor	deltaJ/kg			
Venting Availability Schedule Name		VN_Sala		
Occupant Ventilation Control Name				
Equivalent Rectangle Method				
Equivalent Rectangle Aspect Ratio	dimensionless			

Classe: *HVACTemplate:Thermostat*

Field	Units	Obj1
Name		Termostato
Heating Setpoint Schedule Name		
Constant Heating Setpoint	C	18
Cooling Setpoint Schedule Name		
Constant Cooling Setpoint	C	23

Classe: *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Zone Name		Dorm1	Sala	Dorm2
Template Thermostat Name		Termostato	Termostato	Termostato
System Availability Schedule Name		HVAC_Dorm1	HVAC_Sala	HVAC_Dorm2
Maximum Heating Supply Air Temperature	C	50	50	50
Minimum Cooling Supply Air Temperature	C	13	13	13
Maximum Heating Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryAir	0.0156	0.0156	0.0156
Minimum Cooling Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryAir	0.0077	0.0077	0.0077
Heating Limit		NoLimit	NoLimit	NoLimit
Maximum Heating Air Flow Rate	m3/s			
Maximum Sensible Heating Capacity	W			
Cooling Limit		NoLimit	NoLimit	NoLimit
Maximum Cooling Air Flow Rate	m3/s			
Maximum Total Cooling Capacity	W			
Heating Availability Schedule Name				
Cooling Availability Schedule Name				
Dehumidification Control Type		None	None	None
Cooling Sensible Heat Ratio	dimensionless	0.7	0.7	0.7
Dehumidification Setpoint	percent			
Humidification Control Type		None	None	None
Humidification Setpoint	percent			
Outdoor Air Method		None	None	None
Outdoor Air Flow Rate per Person	m3/s			
Outdoor Air Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2			
Outdoor Air Flow Rate per Zone	m3/s			
Design Specification Outdoor Air Object Name				
Demand Controlled Ventilation Type		None	None	None
Outdoor Air Economizer Type		NoEconomizer	NoEconomizer	NoEconomizer
Heat Recovery Type		None	None	None
Sensible Heat Recovery Effectiveness	dimensionless			
Latent Heat Recovery Effectiveness	dimensionless			

Classe: *EnergyManagementSystem:Program*

Deve ser escrito um programa para cada ambiente de permanência prolongada. Neste apêndice, como exemplo, estão os programas para o dormitório 1 e a sala. Cabe ressaltar que para o uso do EMS devem ser preenchidos outros objetos que irão fazer a conexão entre schedules de acionamento do EnergyPlus e do EMS. Para mais detalhes recomenda-se a leitura do Manual do EMS desenvolvido pelo LabEEE (VEIGA et al., 2019) e o Guia para aplicação do EMS dos desenvolvedores do EnergyPlus (DOE, 2018).

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		CompDorm1Ativo	CompSalaAtivo
Program Line 1		SET Temp_Conf = ((Temp_Dorm1 >= 26) (Temp_Dorm1 <= 16))	SET Temp_Conf = ((Temp_Sala >= 26) (Temp_Sala <= 16))
Program Line 2		IF (Ocup_Dorm1 > 0) && (Temp_Conf == 1)	IF (Ocup_Sala > 0) && (Temp_Conf == 1)
A4		Set Controle_HVAC_Dorm1 = 1	Set Controle_HVAC_Sala = 1
A5		Set Controle_VN_Dorm1 = 0	Set Controle_VN_Sala = 0
A6		ELSEIF ((Ocup_Dorm1 > 0) && (Sensor_HVACD1 > 0))	ELSEIF ((Ocup_Sala > 0) && (Sensor_HVACSALA > 0))
A7		Set Controle_HVAC_Dorm1 = 1	Set Controle_HVAC_Sala = 1
A8		Set Controle_VN_Dorm1 = 0	Set Controle_VN_Sala = 0
A9		ELSEIF ((Ocup_Sala > 0) (Ocup_Dorm1 > 0))	ELSEIF (Ocup_Sala > 0)
A10		Set Controle_HVAC_Dorm1 = 0	IF ((Temp_Ext < Tar_Sala) && (Tar_Sala > 19))
A11		IF ((Temp_Ext < Tar_D1) && (Tar_D1 > 19))	Set Controle_HVAC_Sala = 0
A12		Set Controle_VN_Dorm1 = 1	Set Controle_VN_Sala = 1
A13		ELSEIF ((Temp_Ext > Tar_D1) && (Tar_D1 > 19))	ELSEIF ((Temp_Ext > Tar_Sala) && (Tar_Sala > 19))
A14		Set Controle_VN_Dorm1 = 0	Set Controle_HVAC_Sala = 0
A15		ELSEIF (Tar_D1 < 19)	Set Controle_VN_Sala = 0
A16		Set Controle_VN_Dorm1 = 0	ELSEIF (Tar_Sala < 19)
A17		ENDIF	Set Controle_HVAC_Sala = 0
A18		ELSEIF (Ocup_Dorm1 == 0) && (Ocup_Sala == 0)	Set Controle_VN_Sala = 0
A19		Set Controle_HVAC_Dorm1 = 0	ENDIF
A20		Set Controle_VN_Dorm1 = 0	ELSEIF (Ocup_Sala == 0)
A21		ENDIF	Set Controle_HVAC_Sala = 0
A22			Set Controle_VN_Sala = 0
A23			ENDIF
A24			