

ANO
2020

JAYNE GARCIA | ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DA ENVOLTÓRIA
EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL DE JOINVILLE/SC



UDESC

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO
TERMOENERGÉTICO DA
ENVOLTÓRIA EM HABITAÇÕES DE
INTERESSE SOCIAL DE
JOINVILLE/SC**

JAYNE GARCIA

JOINVILLE, 2020

A análise do desempenho térmico e energético de habitações sociais é de suma importância, pois possibilita a implementação de medidas que reduzam o consumo de energia e proporcionem condições mínimas de conforto às famílias de baixa renda. Assim sendo, o objetivo do trabalho foi analisar o desempenho termoenergético da envoltória em habitações multifamiliares de interesse social localizadas em Joinville/SC. Tal análise foi realizada pelo método de simulação da nova proposta do regulamento brasileiro de etiquetagem de edificações residenciais. A classificação energética obtida foi “C” e “D”, evidenciando o baixo desempenho termoenergético das habitações sociais de Joinville. Os resultados indicaram também que o contato com o solo e a cobertura exposta ao exterior afetam o desempenho da envoltória, assim como a orientação solar. Na análise de sensibilidade, constatou-se que a exposição do piso e sombreamento das aberturas promovem uma maior redução no consumo de energia da envoltória. Por outro lado, os parâmetros de absorvância das paredes e exposição da cobertura são os que mais contribuem com o aumento do consumo energético.

Orientadora: Ana Mirthes Hackenberg

Joinville, 2020

JAYNE GARCIA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DA ENVOLTÓRIA EM
HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL DE JOINVILLE/SC**

Dissertação de mestrado em Engenharia Civil
apresentada como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Civil pela
Universidade do Estado de Santa Catarina –
UDESC.

Orientadora: Dra. Ana Mirthes Hackenberg

JOINVILLE - SC

2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Garcia, Jayne

Análise do desempenho termoenergético da envoltória em
habitações de interesse social de Joinville/SC / Jayne Garcia.
-- 2020.

115 p.

Orientador: Ana Mirthes Hackenberg

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação , Joinville, 2020.

1. Habitação de interesse social. 2. Desempenho
termoenergético. 3. INI-R. I. Hackenberg, Ana Mirthes . II.
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de
Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação . III.
Título.

**Análise do Desempenho Termoenergético da Envoltória em Habitações de
Interesse Social de Joinville/SC**

por

Jayne Garcia

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL

Área de concentração em “Engenharia Urbana e da Construção Civil”
e aprovada em sua forma final pelo

**CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA CIVIL
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.**

Banca Examinadora:

ASSINADO DIGITALMENTE

Profa. Dra. Ana Mirthes Hackenberg
CCT/UDESC
(Orientadora/Presidente)

VIA VIDEOCONFERÊNCIA

Profa. Dra. Ana Paula Melo
UFSC

ASSINADO DIGITALMENTE

Profa. Dra. Elisa Henning
CCT/UDESC

Joinville,SC, 27 de maio de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, por me guiar, dar saúde, força e sabedoria para superar os desafios. Agradeço também à Nossa Senhora de Aparecida, por interceder a Deus por mim e estar sempre à minha frente apontando o caminho correto a seguir.

Aos meus pais, Sônia Maria Garcia e Valdir Garcia, pelo apoio incondicional, compreensão nos momentos de ausência e todos os ensinamentos que me tornaram a pessoa que sou hoje, sou imensamente grata.

Não posso deixar de citar os meus queridos irmãos, Valdiceia Garcia, Janine Garcia e Vilson Garcia, que sempre estiveram ao meu lado me incentivando e dando suporte nos momentos difíceis.

Ao meu namorado, Jordan Felipe Peters Paes, por todo amor, atenção e companheirismo. Você foi imprescindível para que eu mantivesse a perseverança para chegar até aqui.

Agradeço à minha orientadora, Ana Mirthes Hackenberg, pela competência, dedicação e contribuições no desenvolvimento da pesquisa. Aos membros da banca, pela disponibilidade em avaliar o presente trabalho.

Aos pesquisadores do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da UFSC pelas experiências e conhecimentos compartilhados, em especial ao colega Rayner Maurício e Silva Machado por sempre estar disposto a ajudar.

À UDESC e ao Programa de Pós-graduação da Engenharia Civil pelas oportunidades de crescimento profissional e pessoal durante o mestrado. À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pela bolsa de estudo concedida.

Agradeço ainda às instituições de ensino fundamental, médio e superior nas quais eu obtive minha formação, bem como a todos os professores pelos ensinamentos repassados e incentivo na busca dos meus objetivos.

Por fim, quero agradecer às pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho. A todos, meus sinceros agradecimentos!

"Apesar dos nossos defeitos, precisamos enxergar que somos pérolas únicas no teatro da vida e entender que não existem pessoas de sucesso ou pessoas fracassadas. O que existem são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles" (Augusto Cury).

RESUMO

O Programa Minha Casa Minha Vida foi criado em 2009, como uma iniciativa do governo federal, com o intuito de facilitar o acesso à moradia de famílias de baixa renda. Entretanto, o programa tem sido alvo de diversas críticas devido à baixa qualidade da construção e desempenho térmico das habitações sociais. Nesse sentido, torna-se importante a avaliação do comportamento térmico e energético dessas habitações, possibilitando a implementação de medidas que proporcionem condições mínimas de conforto aos usuários e reduzam o consumo de energia. Assim sendo, o objetivo do estudo foi analisar o desempenho termoenergético da envoltória em habitações multifamiliares de interesse social localizadas em Joinville/SC. Tal análise foi realizada pelo método de simulação da nova proposta do regulamento brasileiro de etiquetagem de edificações residenciais. Na primeira etapa do estudo, foi definido um modelo representativo das habitações para uso em simulação computacional, conforme as características geométricas e construtivas. Após isso, foram realizadas simulações do modelo representativo no programa EnergyPlus e, com base nos resultados, foi determinada a classificação de eficiência energética da envoltória. Na etapa seguinte, foi aplicado o método de amostragem hipercubo-latino, em que foram gerados 1000 casos. Posteriormente, foi realizada uma análise de sensibilidade de 10 parâmetros construtivos da edificação, através dos métodos dos coeficientes de regressão padronizados (SRC) e coeficientes de correlação parcial (PCC). Ao final da pesquisa, verificou-se a viabilidade econômico-financeira dos casos que obtiveram os melhores resultados, considerando dois cenários: tarifa de energia social e convencional. Quanto à classificação energética, os níveis obtidos foram “C” e “D”, evidenciando o baixo desempenho termoenergético das habitações sociais de Joinville. Os resultados indicaram também que o contato com o solo e a cobertura exposta ao exterior afetam o desempenho da envoltória, assim como a orientação solar. Na análise de sensibilidade, constatou-se que a exposição do piso e sombreamento das aberturas promovem uma maior redução no consumo de energia da envoltória. Por outro lado, os parâmetros de absorvância das paredes e exposição da cobertura são os que mais contribuem com o aumento do consumo energético, levando-se em consideração as características climáticas da cidade de Joinville. Do total de casos analisados, apenas três com tarifa convencional foram considerados viáveis sob o ponto de vista econômico e financeiro.

Palavras-chave: Habitação de interesse social. Desempenho termoenergético. INIR.

ABSTRACT

My House My Life program (called “Minha Casa Minha Vida” in portuguese) was created in 2009, as an initiative of the public government for low-income families that does not have dwelling. However, the program has received several criticisms due to low quality of construction and thermal performance of social housing. Therefore, it is necessary to evaluate the thermal and energy performance of these houses, enabling the implementation of measures that provides comfort conditions to users and reduces energy consumption. This study aims to analyze thermal performance of the envelope in multi-family social housing located in Joinville/SC. The analysis was carried out by simulation method of the new Brazilian regulation for energy efficiency levels in residential buildings. In the first stage, a representative model of the dwellings was determined for computer simulation. Then, simulations were performed by EnergyPlus program and the energy efficiency level of the envelope was determined. Furthermore, the hypercube-latin sampling method was applied, in which 1000 random simulations were generated. A sensitivity analysis was also performed, considering 10 constructive parameters using the SRC and PCC regression methods. At the end, economic analysis was performed for the cases that obtained the best results, considering two scenarios: social and conventional tariff. The results show that the energy efficiency levels obtained were “C” and “D” in all simulated cases, highlighting the low thermal and energy performance of low-income buildings analyzed. Findings also indicated that contact with the ground and roof exposure affect the performance of the envelope, as well as the solar orientation. In the sensitivity analysis, it was found that floor exposure and shading result a greater reduction in the envelope energy consumption. In the other hand, the walls absorptance and roof exposure are the most contribute increasing parameters in energy consumption, taking into account the local climate. Only three cases of the conventional tariff scenario were considered viable from an economic point of view.

Keywords: Social housing. Thermal and energy performance. INI-R.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação setorial no consumo de eletricidade	12
Figura 2 - Modelo de ENCE do RTQ-R e INI-R para unidades habitacionais autônomas	27
Figura 3 – Análise de sensibilidade.....	37
Figura 4 – Organograma da pesquisa.....	42
Figura 5 – Metodologia adotada para determinação do modelo representativo.....	43
Figura 6 – Localização das habitações multifamiliares de interesse social de Joinville/SC.....	44
Figura 7 – Gráfico das temperaturas mínima, média e máxima diária	48
Figura 8 – Histograma da temperatura horária de bulbo seco	49
Figura 9 – Gráfico da radiação direta e difusa média mensal	49
Figura 10 – Padrões de ocupação dos ambientes	52
Figura 11 – Rotinas de uso do sistema de iluminação	53
Figura 12 – Acionamento do sistema de resfriamento	55
Figura 13 – Algoritmo de controle da ventilação híbrida	56
Figura 14 – Planejamento das simulações.....	57
Figura 15 – Escala de classificação da eficiência energética da UH.....	59
Figura 16 - Planta baixa do modelo representativo	73
Figura 17 - Modelagem geométrica no SketchUp	74
Figura 18 – Percentual de redução de carga térmica de resfriamento da sala para os casos simulados.....	78
Figura 19 - Percentual de redução de carga térmica de resfriamento dos dormitórios para os casos simulados.....	79
Figura 20 – Equivalente numérico de eficiência energética da UH para os casos simulados	81
Figura 21 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PCC para consumo de energia da sala.....	83
Figura 22 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PCC para consumo de energia do dormitório 1	84
Figura 23 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PCC para consumo de energia do dormitório 2	85

Figura 24 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PCC para consumo de energia da unidade habitacional	86
Figura 25 – Gráfico de dispersão e histograma do consumo de energia da UH	88
Figura 26 – Custo de implantação de cada caso proposto e seu respectivo caso base	91
Figura 27 – Consumo mensal de energia de cada caso proposto e seu respectivo caso base	92
Figura 28 – Tempo de retorno do investimento (<i>payback</i>) para ambos os cenários e tempo de vida útil do projeto	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura média mensal do solo	50
Tabela 2 – Configurações de cargas internas	51
Tabela 3 – Parâmetros de entrada da ventilação natural	54
Tabela 4 – Parâmetros da análise de sensibilidade	60
Tabela 5 – Limites de propriedades térmicas das superfícies conforme NBR 15220 e NBR 15575.....	61
Tabela 6 – Materiais construtivos da envoltória	62
Tabela 7 – Valores das tarifas convencional e social	66
Tabela 8 - Características das habitações sociais de Joinville/SC	70
Tabela 9 - Estatística descritiva e intervalo de confiança da área dos ambientes e da UH	71
Tabela 10 - Estatística descritiva e intervalo de confiança do percentual de abertura	71
Tabela 11 - Propriedades das aberturas	72
Tabela 12 - Composição da envoltória.....	72
Tabela 13 - Checklist com as especificações de projeto da NBR 9050	74
Tabela 14 – Propriedades térmicas das paredes e cobertura	76
Tabela 15 – Propriedades térmicas e óticas do vidro.....	76
Tabela 16 – Propriedades físicas e térmicas dos materiais	77
Tabela 17 – Caraterísticas das câmaras de ar não ventiladas.....	77
Tabela 18 - Estatística descritiva e coeficiente de determinação do consumo anual de energia	87
Tabela 19 - Configurações dos parâmetros para os casos extremos	89
Tabela 20 - Payback descontado, VPL e TIR para os casos analisados	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
APP - Ambiente de Permanência Prolongada
BNH - Banco Nacional de Habitação
CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO
CEF - CAIXA ECONÔMICA FEDERAL
COFINS - Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
COP – Coeficiente de Performance
DOE - *Department of Energy*
EMS - Energy Management System
ENCE - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
HIS - Habitação de Interesse Social
INI-R - Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
PCC - *Partial Correlation Coefficients*
PRCC - *Partial Rank Correlation Coefficients*
IPCA - Índice de Preços ao Consumidor Amplo
LHS - *Latin Hypercube Sampling*
NBR – Norma Brasileira
PIS - Programa de Integração Social
PMCMV - Programa Minha Casa Minha Vida
RTQ-R - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SRC - *Standardized Regression Coefficients*
SRRC - *Standardized Rank Regression Coefficients*
TIR – Taxa Interna de Retorno
TMA – Taxa Mínima de Atratividade
UH – Unidade Habitacional
VPL – Valor Presente Líquido

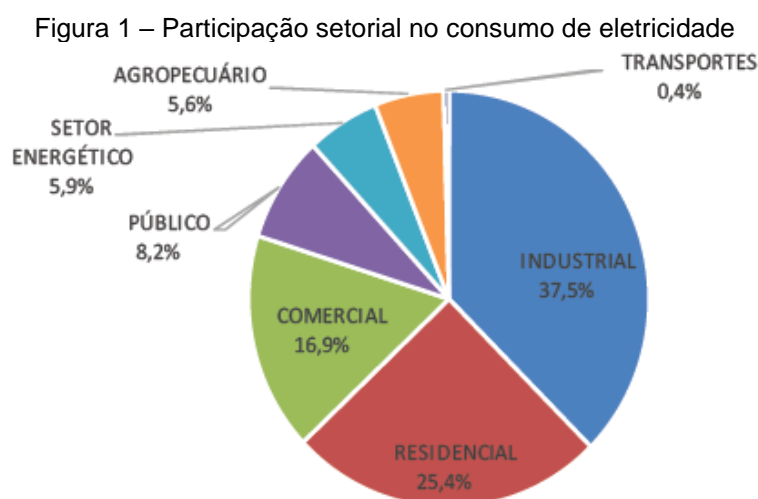
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS.....	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos.....	15
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1	HISTÓRICO DAS POLÍTICAS DE HABITAÇÃO SOCIAL NO BRASIL	17
2.2	DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM HABITAÇÕES SOCIAIS	19
2.3	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL NO BRASIL	24
2.3.1	Regulamento de eficiência energética em edificações residenciais	24
2.3.2	Estudos sobre o RTQ-R aplicado em habitações sociais	27
2.3.3	Normas brasileiras de desempenho térmico em edificações residenciais	31
2.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	37
2.4.1	Métodos de regressão – SRC e PCC.....	39
3	METODOLOGIA.....	42
3.1	DEFINIÇÃO DO MODELO REPRESENTATIVO.....	43
3.1.1	Caracterização das habitações sociais	43
3.1.2	Análise estatística dos dados e definição do caso base	45
3.2	DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA.....	46
3.2.1	Modelagem do caso base	46
3.2.2	Arquivo climático.....	47
3.2.3	Propriedades térmicas da envoltória.....	50
3.2.4	Cargas internas de ocupação, iluminação artificial e equipamentos	51
3.2.5	Padrões de ocupação e uso do sistema de iluminação	52
3.2.6	Ventilação natural.....	53
3.2.7	Sistema de condicionamento de ar.....	54
3.2.8	Controle de integração entre a ventilação natural e o sistema de condicionamento artificial	55
3.2.9	Casos simulados	56
3.2.10	Classificação da eficiência energética da envoltória	57
3.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE GLOBAL	59
3.3.1	Parâmetros da análise de sensibilidade	59
3.3.2	Amostragem pelo método hipercubo-latino.....	62

3.3.3	Análise de sensibilidade pelo método de regressão.....	63
3.4	ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA.....	64
3.4.1	Período de retorno do investimento	65
3.4.2	Valor presente líquido e taxa interna de retorno.....	67
4	RESULTADOS	69
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS HABITAÇÕES SOCIAIS DE JOINVILLE/SC	69
4.2	ESTATÍSTICA DESCRITIVA	70
4.3	DETERMINAÇÃO DO MODELO REPRESENTATIVO PARA USO EM SIMULAÇÃO.....	72
4.4	PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	75
4.5	CLASSIFICAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DA ENVOLTÓRIA.....	77
4.6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	82
4.6.1	Análise de variabilidade e casos extremos	87
4.7	ANÁLISE ECONÔMICA E FINANCEIRA.....	90
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5.1	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	97
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	98
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE A – PROJETO ARQUITETÔNICO DO MODELO REPRESENTATIVO	106
	APÊNDICE B – IMAGEM AÉREA E VISTA DAS HABITAÇÕES SOCIAIS	108
	APÊNDICE C – ORÇAMENTO COM INSUMOS E COMPOSIÇÕES	113

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o setor residencial foi responsável por 25,4% do consumo de energia elétrica em 2018, ocupando a segunda colocação em comparação aos demais setores. Em relação ao ano anterior, foi registrado um aumento de 1,3% no consumo de eletricidade em residências. Ao analisar a participação setorial (Figura 1), percebe-se que os setores residencial, comercial e industrial consumiram aproximadamente 80% da energia elétrica disponibilizada no país, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2018 (EPE, 2019).



Fonte: EPE (2019)

O consumo energético registrado pelo setor residencial vem crescendo consideravelmente, acima da tendência apresentada pelos outros setores, conforme estudo de uma série temporal de 1985 a 2013 (VILLAREAL; MOREIRA, 2016). No período de 2004 a 2013, houve um crescimento contínuo do consumo residencial de energia, superior aos setores industrial, comercial e público. Além disso, alguns fatores como crescimento econômico do país, expansão do acesso à energia elétrica, ampliação do número de domicílios, melhoria de renda e facilitação do crédito financeiro contribuíram para a intensificação do uso de aparelhos eletrodomésticos e condicionadores de ar (ABRAHÃO, 2015).

Diante desse cenário, surgiu a preocupação com a crescente utilização de sistemas de condicionamento artificial e o aumento no consumo de energia pelo setor residencial, que pode gerar uma sobrecarga na matriz energética do país. Sendo assim, a aplicação de medidas de eficiência energética em projetos residenciais torna-

se fundamental no sentido de reduzir o consumo de eletricidade no âmbito residencial e a consequente demanda de energia elétrica no Brasil. Para isso, é necessário o estudo aprofundado das estratégias projetuais considerando as condições climáticas locais, de forma que essas estratégias sejam implementadas com maior efetividade.

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido ao alto déficit habitacional e a crise internacional, o governo federal criou em 2009 o Programa Minha Casa Minha Vida – PMCMV com o intuito de facilitar o acesso à moradia, especialmente entre a população de baixa renda (BRASIL, 2009). No entanto, apesar dessa iniciativa, os problemas relacionados à falta de moradia ainda persistem no país. Segundo o estudo desenvolvido pela Fundação João Pinheiro¹, o déficit habitacional brasileiro superou 6 milhões de moradias em termos absolutos no ano de 2014, com um aumento de 4,7% em 2015. A carência por moradias é ainda mais expressiva entre as famílias com renda mensal inferior a três salários mínimos (consideradas de baixa renda), representando 83,9% do déficit registrado em 2014.

Outro fator relevante é que a provisão de habitações pelo PMCMV teve uma redução significativa devido à recente crise econômica (TUBELO *et al.*, 2018). Além disso, os resultados do programa não são satisfatórios sob o ponto de vista qualitativo, uma vez que o mesmo padrão de construção vem sendo reproduzido em larga escala no país, sem considerar as características climáticas locais (ALMEIDA, 2014). Soma-se ainda o fato de que a maioria dos projetos de Habitação de Interesse Social – HIS prioriza somente os custos iniciais, desprezando o desempenho térmico da edificação a longo prazo (KOWALTOWSKI; GRANJA, 2011; MONTES, 2016).

Nesse contexto, tendo em vista o impacto da habitação social no Brasil, a descontinuidade do PMCMV e a necessidade de melhorar a qualidade das HIS, é indispensável a avaliação das edificações construídas pelo programa no território nacional. Destaca-se que a análise do desempenho térmico dessas habitações deve considerar, entre outros fatores, as particularidades do clima local e os parâmetros construtivos da edificação.

¹ Em parceria com o Ministério das Cidades, Banco Interamericano de Desenvolvimento e Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento.

Tal análise pode ser realizada através do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQ-R, desenvolvido como uma ferramenta para classificação da eficiência energética de residências. No RTQ-R, são analisados o desempenho térmico da envoltória e sistema de aquecimento de água, sendo que o nível de eficiência pode ser determinado mediante dois métodos: prescritivo ou de simulação (BRASIL, 2012). Convém ressaltar que o RTQ-R está em processo de revisão em virtude das suas limitações, cuja nova proposta de classificação energética, conhecida como Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – INI-R, busca aprimorar a metodologia do regulamento existente.

A partir da aplicação do RTQ-R, foram desenvolvidos alguns estudos com a finalidade de avaliar a eficiência energética de habitações sociais no Brasil. Nesses estudos, foram analisadas HIS unifamiliares e multifamiliares, considerando diferentes regiões do país (LIMA; PEDRINI; ALVES, 2012; ALMEIDA *et al.*, 2013; FAGUNDES, 2014; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015; MORENO; MORAIS; SOUZA, 2017; CECHINEL, 2017; DALBEM *et al.*, 2019). No entanto, nenhuma dessas pesquisas considera especificamente a nova proposta do regulamento brasileiro de etiquetagem, denominada INI-R, e o grupo climático de Joinville, constituindo o diferencial da presente pesquisa.

Com base no exposto, a pesquisa irá contribuir no aprimoramento da revisão do RTQ-R pelo fato de ser relativamente nova, bem como na sua consolidação. Por meio da pesquisa, busca-se também implementar medidas de eficiência energética que proporcionem conforto térmico adequado para a população de baixa renda, contribuam com a redução do consumo de energia pelo setor residencial, além de auxiliar na formulação da base de uma política habitacional efetiva.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o desempenho termoenergético da envoltória em habitações multifamiliares de interesse social de Joinville/SC, por meio da Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Definir um modelo representativo das habitações sociais multifamiliares de Joinville/SC para uso em simulação computacional, a partir das características geométricas e construtivas dessas habitações;
- Determinar o nível de eficiência energética da envoltória, conforme o método de simulação da INI-R;
- Identificar os parâmetros mais influentes no desempenho termoenergético da envoltória através da análise de sensibilidade global, considerando o clima de Joinville;
- Analisar a viabilidade financeira dos casos simulados, com base em indicadores econômicos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho está dividida em cinco capítulos, nos quais é apresentado o método utilizado para o desenvolvimento da pesquisa, bem como os resultados obtidos. No primeiro capítulo, é apresentada uma introdução ao tema da pesquisa, contextualizando a justificativa para realização do estudo e os objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo aborda a revisão da literatura nacional e internacional, elaborada com a intenção de discutir os principais temas relacionados à pesquisa, identificar estudos similares e verificar os métodos que vêm sendo adotados. Primeiramente, é mostrado um histórico das políticas de habitação social no país, até o surgimento do Programa Minha Casa Minha Vida. Após isso, são discutidos estudos a nível nacional e internacional que tratam do desempenho térmico e eficiência energética de habitações sociais. São apresentados também as normas e regulamentos brasileiros que tratam da avaliação do desempenho termoenergético de edificações residenciais. Por fim, é definido o conceito e importância da análise de sensibilidade, bem como aspectos referentes aos métodos de regressão.

O terceiro capítulo trata do método adotado na pesquisa, que foi dividido em quatro etapas principais. Na primeira etapa, é identificada a forma como foi realizado o levantamento das características geométricas e construtivas das habitações sociais

de Joinville e análise estatística utilizada para definição do modelo representativo. É definida também a modelagem do caso base no programa EnergyPlus e classificação de eficiência energética conforme os resultados da simulação. Após isso, foi abordado o método de amostragem e análise de sensibilidade global utilizado para verificação da influência dos parâmetros construtivos no desempenho térmico da envoltória. A análise financeira foi descrita ao final do capítulo, realizada através da estimativa do investimento inicial e retorno financeiro com a economia de energia.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos no estudo, identificando o modelo representativo da amostra, os níveis de eficiência energética alcançados para os diferentes casos simulados, os coeficientes de sensibilidade de cada parâmetro analisado, além da viabilidade financeira para os casos que obtiveram os melhores resultados na etapa de análise de sensibilidade. Para melhor visualização e entendimento, os resultados foram mostrados através de gráficos, tabelas e histogramas.

O quinto capítulo traz as conclusões da pesquisa com base nos resultados, apontando as limitações do estudo e sugestões para trabalho futuros, principalmente em relação aos tópicos que não foram abordados no estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, é apresentado um breve histórico do surgimento das políticas de habitação social no Brasil, com destaque para o Programa Minha Casa Minha Vida e os desafios do programa em relação ao déficit habitacional e a qualidade dessas habitações. São discutidos também alguns estudos nacionais e internacionais, em um contexto mais amplo, relacionados à eficiência energética de habitações de interesse social. Foi realizada ainda uma análise crítica das regulamentações nacionais que permitem avaliar o desempenho térmico e eficiência energética de edificações residenciais no Brasil. Por fim, foi apresentado o conceito e finalidade da análise de sensibilidade global, bem como os métodos utilizados na análise de sensibilidade voltada ao desempenho termoenergético de edificações.

2.1 HISTÓRICO DAS POLÍTICAS DE HABITAÇÃO SOCIAL NO BRASIL

Até 1964, a intervenção governamental no enfrentamento das questões habitacionais e os diferentes programas implementados no Brasil não foram bem-sucedidos. Sob o aspecto econômico, a forte aceleração inflacionária aliada a taxas de juros nominais fixas e as leis populistas de congelamento de aluguéis, inibiam o investimento no setor habitacional. Além disso, a intensificação do processo de urbanização, com o crescimento exacerbado da demanda habitacional urbana, gerou um déficit de moradias estimado em oito milhões no país (SANTOS, 2012).

Esse ano também marcou o início da ditadura militar, que só terminou em 1985, sendo que uma das primeiras iniciativas do governo militar para mitigar tais problemas foi a criação do Banco Nacional de Habitação - BNH (Wерна *et al.*, 2004). Nessa época, foi instaurada a primeira política habitacional de abrangência nacional, em que o governo brasileiro coordenava as ações públicas e privadas relacionadas à construção e financiamento de habitações sociais. Contudo, no final da década de 70, os efeitos da crise econômica, desemprego e inflação causaram um desequilíbrio no sistema financeiro de habitação e uma descontinuidade das ações governamentais (CEF, 2011).

A inconsistência da política habitacional no país foi marcada pela extinção do BNH em 1986 e se estendeu até 2002, ano em que foi criado o Ministério das Cidades. É importante destacar que a instabilidade econômica no início dos anos 90

impossibilitou o desenvolvimento de um programa de habitação social, cuja situação só começou a melhorar com a instauração do Plano Real em 1994 (VALENÇA; BONATES, 2010). Essa lacuna na provisão de habitações por parte do governo brasileiro teve como consequência a autoconstrução com recursos próprios, a coabitação e improvisação de moradias em áreas irregulares, favorecendo a disseminação de cortiços e favelas (ARAÚJO, 2013).

Logo após a crise financeira internacional de 2008, o governo federal estabeleceu o Programa Minha Casa Minha Vida. O referido programa tinha como objetivo estimular o crescimento econômico do país através do setor da construção civil e, ao mesmo tempo, reduzir o alto déficit habitacional existente, sobretudo entre as famílias de baixa renda (CBIC, 2016). Até 2015, o governo brasileiro havia investido cerca de 75 bilhões de dólares em projetos de habitação social para atender às necessidades da população de baixa renda (GIANNETTI *et al.*, 2018).

Na opinião de Flach (2016), o PMCMV representou um importante avanço em comparação às políticas habitacionais que o antecederam, devido à sua escala de abrangência, ampliação no volume de recursos e forma de concessão de subsídios. Por outro lado, o programa vem sendo alvo de diversas críticas em torno dos seus resultados, visto que as questões qualitativas são relegadas a um segundo plano.

De acordo com Fortunato (2014), o PMCMV buscou apenas suprir os aspectos quantitativos das habitações sociais, tendo como resultado a produção em massa e baixa qualidade da construção. Conforme Giannetti *et al.* (2018), os projetos de habitação social normalmente levam em consideração apenas as questões econômicas e políticas, desprezando importantes variáveis socioeconômicas, ambientais, climáticas, dentre outras.

Portanto, é imprescindível o estabelecimento de novos critérios com relação às especificações de projeto, em uma perspectiva a longo prazo. Isto significa que os investimentos em programas habitacionais devem considerar o desempenho energético e a vida útil da edificação, além dos benefícios aos usuários e possíveis impactos ambientais, não somente o custo inicial do projeto (MONTES, 2016).

Nota-se que, diversas iniciativas foram estabelecidas pelo governo federal a fim de enfrentar a problemática habitacional e reduzir o elevado déficit de moradias existente no Brasil. Foram criados, em âmbito federal, inúmeros programas e projetos de habitação, com enfoque essencialmente na provisão de habitações sociais em termos quantitativos.

No atual contexto, pode-se afirmar também que as políticas públicas habitacionais não atendem de forma satisfatória a qualidade e o desempenho mínimo esperados para este tipo de habitação. Em vista disso, torna-se de suma importância a atuação do Estado na promoção de programas de subsídio e incentivo fiscal para fomentar a adoção de estratégias de eficiência energética em habitações sociais, visando reduzir o consumo de energia, bem como oferecer melhores condições de conforto e qualidade de vida às famílias de baixa renda.

2.2 DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM HABITAÇÕES SOCIAIS

Quando o assunto é eficiência energética voltada para habitações sociais, é fundamental a busca por soluções que proporcionem maior conforto aos usuários, reduzam o consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, os custos envolvidos no período pós-ocupação, com menor impacto ambiental. Tais estratégias devem ser compatíveis com o perfil da população de baixa renda (FORTUNATO, 2014).

Partindo desse pressuposto, Moore *et al.* (2017) avaliaram os custos e benefícios de medidas de eficiência energética em habitações sociais na Austrália. Para o estudo, foram construídas 4 casas com as seguintes características:

- Estratégias passivas de projeto;
- Orientação otimizada;
- Sistema de ventilação natural;
- Sombreamento externo da janela;
- Isolamento térmico do teto, parede e piso;
- Sistema de aquecimento solar de água;
- Geração de energia elétrica com sistema fotovoltaico;
- Sistema de captação de águas pluviais, com utilização no banheiro e área de serviço.

Foi realizada então uma comparação com 6 edificações que atendiam aos requisitos mínimos de desempenho do sistema australiano de classificação energética de edificações residenciais, chamado *Nationwide House Energy Rating Scheme - NatHERS*. Para melhor entendimento, destaca-se que as habitações convencionais e eficientes possuíam 6 e 9 de 10 estrelas, respectivamente, conforme a classificação *NatHERS*. As edificações eficientes apresentaram reduções significativas no

consumo de energia (45%), gás (15%) e água (22%) comparando-se às edificações convencionais. Outro fator importante, foi a diminuição de 40% no impacto ambiental associado às emissões de gases do efeito estufa, além de geração de energia elétrica com capacidade para suprir de 45 a 56% da demanda. Conclui-se, portanto, que há benefícios claros para as famílias de baixa renda que residem em habitações eficientes, com destaque para a redução na utilização de equipamentos condicionadores de ar, sobretudo em condições climáticas extremas. No estudo, foi destacada ainda a limitação de pesquisas disponíveis na literatura relacionadas às construções sustentáveis, particularmente no que se refere às habitações de interesse social.

Em Portugal, Coimbra e Almeida (2013) realizaram um estudo comparativo entre duas edificações multifamiliares de interesse social, uma convencional e outra sustentável. A edificação convencional foi construída no início da década de 90, com características usuais da época, e possuía aquecedor a gás de 20 anos. A edificação sustentável foi implantada em 2008/2009, com (a) isolamento térmico das paredes externas e (b) sistema de aquecimento de água composto por painéis solares e aquecedores a gás eficientes. O objetivo da pesquisa foi estimar a redução no consumo de energia elétrica, por meio dessas duas estratégias. O isolamento das paredes reduziu 44% do consumo de energia com aquecimento e resfriamento, ao passo que o sistema de aquecimento de água foi responsável pela redução de 83% do consumo energético. Em relação ao custo da construção, o investimento foi de 5,6% e 4,6% para as estratégias citadas, respectivamente. Além disso, a média anual de emissões de CO₂ foi quase três vezes maior na edificação convencional em comparação à edificação sustentável. Segundo os autores, os resultados atingidos apontaram que é possível construir habitações sociais conforme os princípios de construção sustentável, com soluções eficientes e de baixo custo.

Gagliano *et al.* (2013) verificaram a influência de estratégias de eficiência energética no consumo de água e energia em um conjunto habitacional localizado na Itália. A habitação popular analisada foi construída no final dos anos 70, com 54 apartamentos distribuídos em dois blocos. Os edifícios possuíam envoltória com paredes duplas de blocos de concreto e janelas com vidro duplo, além de persianas externas. As estratégias adotadas foram: (1) isolamento térmico nas paredes externas, com poliestireno expandido e adição de partículas de grafite; (2) aquecimento solar composto por painéis solares integrado a um tanque de

acumulação, abrangendo 70% da demanda de energia com aquecimento de água; (3) captação e aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis, fornecendo água a ser utilizada no banheiro e irrigação do jardim; (4) sistema fotovoltaico com 10 “árvores” instaladas, sendo cada “árvore” composta de 5 ramos com painéis fotovoltaicos, os quais produzem energia renovável e iluminam a região em sua volta. A partir das estratégias mencionadas, foi estimada uma redução de 2400m³/ano no consumo de água da concessionária. Em termos de consumo de energia, foi estimada uma redução de 9,5MWh/ano e 2,5MWh/ano com os sistemas de isolamento térmico e aquecimento solar respectivamente, e uma geração de 20MWh/ano de energia renovável com o sistema fotovoltaico. Com os resultados preliminares, os autores afirmam que essas medidas são eficazes no sentido de reduzir o consumo de energia e proporcionar maior conforto aos usuários, mas ressaltam que são necessários estudos mais aprofundados para comparar os resultados estimados com os reais consumo de água e energia.

Pérez e Fotios (2017) realizaram uma análise custo-benefício de medidas de eficiência energética em habitações sociais no México. A pesquisa se deu através de um estudo de caso, em uma região de clima quente e seco, no qual foram adotadas as estratégias de inércia térmica, isolamento térmico e sombreamento das janelas. Além do caso base, foram simuladas três alternativas de projeto: nova habitação com estratégias passivas, habitação aprimorada que mantém as características básicas da edificação modelo e uma proposta de *retrofit* para as habitações existentes. Devido à intensa utilização de condicionadores de ar, especialmente no verão, cada alternativa de projeto foi analisada com três diferentes equipamentos: ar-condicionado, sistema de resfriamento evaporativo e combinação de ambos. Além disso, foram estimados os custos relacionados às diferentes alternativas de projeto, equipamentos de resfriamento e consumo de energia em relação ao caso base. A pesquisa demonstrou que a adoção dessas estratégias nas habitações sociais analisadas é viável economicamente, considerando um período de retorno razoável, uma vez que os investimentos podem ser compensados pela redução no consumo de energia associado ao condicionamento artificial. No estudo, foi verificado que o custo adicional com as estratégias passivas nas novas habitações seria pago em um período de 6 anos pela redução nas contas de energia elétrica. Convém salientar que o período de retorno depende do tipo de equipamento instalado, por exemplo, considerando apenas o sistema de resfriamento evaporativo, nenhuma das alternativas de projeto

resultou em uma melhor opção em termos financeiros do que o caso base. Por outro lado, de acordo com os autores, as habitações eficientes oferecem melhores índices de desempenho térmico e condições de conforto, sendo importante também considerar os benefícios que não podem ser mensurados.

Outro estudo relevante foi o de Carpino, Bruno e Arcuri (2018), no qual foram analisadas alternativas de *retrofit* para habitações sociais construídas na Itália, na década de 70. A análise foi realizada em função do custo e desempenho energético, considerando duas zonas climáticas. Após a definição da habitação de referência e das medidas de eficiência energética, foi realizado o cálculo de energia primária e a estimativa do custo global. As medidas adotadas contemplavam melhoria nas propriedades térmicas das superfícies opacas e transparentes, substituição do sistema de aquecimento de água e condicionamento de ar, incluindo instalação de coletores solares e painéis fotovoltaicos, de forma a atender a legislação local. Através de um algoritmo genético otimizado, foram simuladas 3314 combinações com diferentes níveis para cada estratégia. Em ambas as zonas climáticas, os pesquisadores verificaram que as intervenções impostas pelas regulamentações italianas para reduzir o consumo de energia primária resultaram em um desempenho energético menos satisfatório, com custos extras consideráveis. Segundo os autores, as medidas de eficiência energética envolvendo tecnologias renováveis promovem uma redução significativa no consumo de energia primária, especialmente em relação ao sistema de resfriamento, sendo mais próxima da solução ótima, entendida como aquela que apresenta os melhores resultados quanto aos índices energéticos e respectivos custos. Desse modo, os incentivos fiscais voltados para a obtenção de edifícios “net zero” em habitações sociais devem explorar as fontes renováveis ao invés de estabelecer requisitos limitados de energia, visto que este último não oferece soluções que são de fato economicamente sustentáveis.

No Brasil, Triana, Lamberts e Sassi (2015) analisaram o desempenho termoenergético de projetos de habitações sociais, com base no programa brasileiro de etiquetagem energética. Os autores estabeleceram dois níveis de renda e, conforme essa classificação, caracterizaram as principais tipologias de habitações sociais (unifamiliares e multifamiliares) construídas no país. Por fim, definiram projetos representativos para cada tipologia e analisaram o desempenho desses projetos considerando duas zonas bioclimáticas brasileiras. Os projetos representativos analisados apresentaram baixo desempenho térmico em ambas às zonas

bioclimáticas, especialmente no verão, evidenciando a necessidade de introduzir medidas de eficiência energética. Os autores sugerem medidas que podem ser incorporadas sem grandes esforços, como a adoção de janelas que atendam aos pré-requisitos de ventilação e iluminação natural do programa de etiquetagem, bem como a cor da fachada em relação à absorvância térmica. Outras medidas sugeridas implicam em mudanças significativas no projeto, a saber: sombreamento das janelas, aquecimento solar de água e, até mesmo, geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos. Vale ressaltar que as políticas brasileiras de habitação social devem considerar os impactos dessas medidas de forma holística, sob a perspectiva energética, ambiental e socioeconômica, e não somente o custo inicial da construção.

Observou-se que muitos estudos na literatura abordam a necessidade de verificar quais práticas sustentáveis apresentam os maiores benefícios, considerando as variáveis custo e desempenho termoenergético. Tal análise é fundamental, sobretudo em habitações de interesse social, uma vez que essas habitações normalmente apresentam desempenho ruim, não sendo capazes de oferecer adequadas condições de conforto aos seus usuários. Em consequência, nota-se um crescimento na utilização de equipamentos condicionadores de ar, inclusive em classes sociais menos favorecidas, resultando no aumento do consumo de energia. Por outro lado, muitas famílias de baixa renda não têm condições financeiras de pagar as suas contas de energia elétrica.

Nesse contexto, o governo assume papel crucial no sentido de promover políticas públicas que incentivem a adoção de medidas de eficiência energética e tecnologias sustentáveis, com a finalidade de obter um melhor desempenho na edificação, reduzir o consumo de energia no âmbito residencial, além de proporcionar melhores condições de conforto térmico. Acrescenta-se ainda que a incorporação dessas estratégias nos projetos de habitações sociais é essencial para minimizar os efeitos das mudanças climáticas a longo prazo, desde que adequadas ao clima local.

A partir dessas premissas, é importante considerar os estudos realizados em outros países e investigar como as medidas de eficiência energética foram implementadas de forma bem-sucedida, buscando adaptá-las à realidade brasileira. Cabe salientar também que as soluções de eficiência energética não podem ser generalizadas, pois o custo-benefício de tais soluções é fortemente influenciado pelas condições de projeto e execução, assim como pelo contexto climático no qual está inserida a edificação.

2.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL NO BRASIL

2.3.1 Regulamento de eficiência energética em edificações residenciais

Durante o período de 1999 a 2002, o Brasil enfrentou uma forte crise energética devido ao crescente aumento no consumo de energia e à falta de investimentos no setor, aliado à escassez de chuva. Em consequência dos baixos níveis de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas, a geração e distribuição de energia elétrica foram afetadas em diversas regiões do país, levando ao racionamento de energia pela população (PEROBELLI; OLIVEIRA, 2013; ALMEIDA, 2014).

Diante desse cenário, foi aprovada a Lei nº 10.295 (BRASIL, 2001), também conhecida como Lei de Eficiência Energética, que estabelece a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Na referida lei, foi instituída a necessidade de estabelecer níveis máximos de consumo de energia para equipamentos fabricados ou comercializados no país, bem como promover a eficiência energética em edificações, com base em indicadores técnicos e regulamentações específicas.

Posteriormente, no ano de 2003, foi criado o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações, denominado PROCEL Edifica, a fim de incentivar o uso racional de energia elétrica em edificações residenciais e comerciais, reduzindo desperdícios e impactos sobre o meio ambiente (PROCEL, 2006).

Tratando-se especificamente de edificações residenciais, uma das iniciativas do Inmetro em parceria com o Procel Edifica foi a aprovação do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R, buscando atender ao que dispõem a Lei de Eficiência Energética. O regulamento foi aprovado pela Portaria Inmetro nº 449 em 2010, e atualmente é regido pela Portaria Inmetro nº 18 de 2012 (BRASIL, 2010, 2012). Apesar de voluntário, o regulamento representou um importante avanço para o Brasil, uma vez que não havia um padrão mínimo de eficiência energética para edificações residenciais no país antes de 2010 (FOSSATI *et al.*, 2016).

O referido regulamento, mais conhecido como RTQ-R, estabelece métodos e requisitos técnicos para a classificação da eficiência energética, compreendendo edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares, unidades habitacionais autônomas, bem como áreas de uso comum de edificações multifamiliares. A

classificação de eficiência energética pode ser determinada por dois métodos: prescritivo ou de simulação, em que são analisados o desempenho térmico da envoltória, sistema de aquecimento de água, além do sistema de iluminação artificial, elevadores e equipamentos presentes nas áreas de uso comum. Ambos os sistemas individuais e a classificação geral variam do nível A “mais eficiente” a E “menos eficiente” (BRASIL, 2012).

Na opinião de Scalco *et al.* (2012), a metodologia proposta pelo RTQ-R promove o uso de estratégias bioclimáticas em projetos, como ventilação e iluminação natural, aproveitando as condições climáticas da região e reduzindo o consumo de energia com condicionamento artificial. Isso representa um diferencial em relação à metodologia adotada nos outros países, em que a classificação é baseada no consumo de energia e emissão de gases do efeito estufa dos sistemas de aquecimento e resfriamento. Logo, não há um incentivo para evitar a utilização desses sistemas de condicionamento de ar.

Por outro lado, é necessário mencionar que o RTQ-R possui determinadas limitações. Uma dessas limitações refere-se aos métodos de avaliação de eficiência energética do regulamento, uma vez que podem apresentar resultados distintos. O método prescritivo é baseado em modelos de regressão linear múltipla, configurando um método aproximado. O método de simulação considera a edificação sob duas formas: (1) naturalmente ventilada ao longo do ano; (2) naturalmente ventilada de dia e condicionada artificialmente durante a noite. Contudo, tais considerações na simulação computacional podem não condizer com a realidade, já que o uso do sistema de condicionamento de ar e ventilação natural pode ocorrer em diversos períodos do dia, conforme o tipo de usuário e sua permanência na edificação. Além disso, a avaliação da envoltória no método de simulação deve considerar também o consumo de energia com condicionamento artificial nas horas em que as condições de conforto não são atendidas, e não apenas no período noturno (POUEY; BRANDALISE; SILVA, 2012; SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2013; SORGATO, 2015; FOSSATI *et al.*, 2016). Vale destacar também que o RTQ-R se baseia no zoneamento bioclimático brasileiro da NBR 15.220-3 (ABNT, 2005), em que o território brasileiro de dimensões continentais é dividido somente em oito zonas bioclimáticas.

Diante dessas limitações, foi elaborada uma nova proposta para avaliação do desempenho energético de edificações residenciais, que se encontra descrita na Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações

Residenciais – INI-R. A nova proposta, também conhecida como INI-R, baseia-se no consumo de energia primária, considerando a edificação com suas características reais em comparação a mesma edificação adotando-se características de referência, que equivalem à classe “D” de eficiência energética. A opção por utilizar o consumo de energia primária como indicador de eficiência permite que tanto a energia elétrica, quanto a energia térmica, oriundas de diversas fontes, sejam contabilizadas (INMETRO, 2018).

Além do consumo anual de energia da edificação, a INI-R permite calcular o percentual de horas ocupadas em conforto quando a edificação é ventilada naturalmente, o percentual de redução no consumo de água potável pelas estratégias de uso racional de água, a estimativa das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e potencial de geração local de energia renovável.

Na INI-R, foi realizado um aprimoramento do método prescritivo do RTQ-R através de metamodelos utilizando redes neurais, conferindo maior precisão aos resultados. Em relação ao método de simulação, foi incluído o uso de ventilação híbrida na INI-R, possibilitando a alternância entre ventilação natural e sistema de condicionamento de ar quando a temperatura do ambiente ultrapassa os limites de conforto.

É importante enfatizar que o método de simulação da INI-R aplica-se somente à envoltória da edificação. No caso de edificações multifamiliares, objeto de estudo da presente pesquisa, devem ser analisados os ambientes de permanência prolongada (APPs) das unidades habitacionais autônomas (UHs). São considerados APPs aqueles com ocupação contínua, tais como sala de estar/jantar, dormitórios, incluindo cozinha quando conjugada com a sala. A Unidade Habitacional (UH) deve ser simulada sob as condições: real e de referência. Na condição real, a UH deve ser modelada com suas características reais de geometria, orientação e propriedades térmicas da envoltória. Já na condição de referência, devem ser considerados os parâmetros construtivos definidos na INI-R.

Quanto à classificação climática, a INI-R considera o estudo desenvolvido por Roriz (2014), no qual o território brasileiro é dividido em 24 grupos climáticos, sendo mais coerente com a grande extensão e os diferentes tipos de clima existentes no país.

Na Figura 2, é apresentado o modelo de Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE para unidades habitacionais autônomas do RTQ-R e INI-R. A

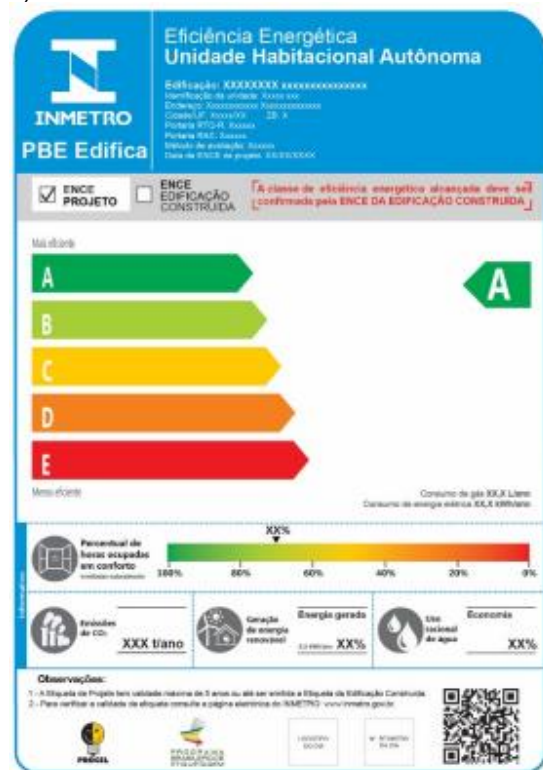
etiqueta da INI-R fornece informações relativas ao consumo anual de energia primária, bem como traz informações complementares como a quantificação das emissões de dióxido de carbono e o potencial de economia de água potável a partir de sistemas que promovem a redução de seu consumo.

Figura 2 - Modelo de ENCE do RTQ-R e INI-R para unidades habitacionais autônomas

a) ENCE atual



b) Nova ENCE



Fonte: Inmetro (2018)

Além das limitações do RTQ-R, a revisão do atual regulamento é necessária para tornar o processo de adesão mais flexível, permitindo o seu estabelecimento de forma compulsória, de modo que a ferramenta possa ser utilizada por projetistas e engenheiros na concepção de projetos de edificações mais eficientes, bem como auxiliar pesquisadores na busca por soluções mais sustentáveis.

2.3.2 Estudos sobre o RTQ-R aplicado em habitações sociais

Alguns estudos foram desenvolvidos no Brasil com a finalidade de avaliar a eficiência energética de habitações sociais, mediante a aplicação do RTQ-R. Nesses estudos, foram analisadas diferentes tipologias de habitações de interesse social (unifamiliares e multifamiliares), considerando diversos climas e regiões do país.

Almeida *et al.* (2013) avaliaram a eficiência energética da envoltória de 22 habitações de interesse social da região de Florianópolis/SC, com base no RTQ-R. A primeira etapa do estudo foi o levantamento das características geométricas das habitações e dos materiais que compõem a sua envoltória, por meio de auditorias e aplicação de questionários. Em seguida, foi aplicado o método prescritivo do RTQ-R, no qual os indicadores de desempenho da envoltória (graus hora para resfriamento e consumo relativo para aquecimento/refrigeração) foram calculados através de equações de regressão linear múltipla para a zona bioclimática 3. Foram analisados também os pré-requisitos de ventilação e iluminação natural, paredes externas e cobertura. A envoltória das HIS atingiu o nível “D” de eficiência energética, sendo que a classificação final máxima obtida foi nível “C” em alguns casos. Cabe destacar que a maior parte das habitações analisadas atingiu nível “E” referente ao indicador de graus hora para resfriamento. Segundo os autores, o baixo desempenho dessas habitações pode ser explicado pelo não atendimento aos pré-requisitos da cobertura (transmitância térmica). Foi destacada ainda a realização de estudos futuros utilizando simulação computacional, sendo possível adotar diferentes cargas internas e padrões de uso e ocupação, bem como analisar quantitativamente soluções específicas para otimização do desempenho térmico.

Lima, Pedrini e Alves (2012) verificaram o desempenho térmico de um modelo de edificação unifamiliar, implantado pelo Programa Social da Habitação no município de Parnamirim/RN. No estudo, foi aplicado o método de simulação computacional do RTQ-R, utilizando o programa *DesignBuilder*. Foram realizadas simulações a partir das características projetuais do caso base e, posteriormente, considerando seis diferentes alternativas de projeto a fim de verificar o impacto dessas alternativas no desempenho térmico da envoltória. Os autores ressaltaram que foram analisados somente os indicadores de graus-hora de resfriamento e consumo relativo para refrigeração, visto que o consumo relativo para aquecimento não se aplica à zona bioclimática 8 (correspondente ao município de Parnamirim/RN). A habitação social unifamiliar obteve nível “E” de eficiência energética, pior classificação do regulamento. Entre as alternativas de projeto, aquela que apresentou melhor resultado foi a redução na absorvância da cobertura, atingindo nível “B” de eficiência. No entanto, nenhuma das alternativas propostas obteve classificação energética nível “A”. Ao final do estudo, os autores concluíram que o modelo de habitação social implantado pelo

programa municipal apresentou baixo desempenho térmico, evidenciando a necessidade de rever as especificações do projeto e sua concepção arquitetônica.

Em outro estudo, Alves (2012) elaborou uma proposta de uma edificação multifamiliar de interesse social, também localizada no município de Parnamirim/RN. A proposta foi elaborada buscando atingir o nível de eficiência energética “A”, conforme o método prescritivo do RTQ-R, assim como atender aos critérios do PMCMV. Algumas medidas adotadas no projeto da edificação foram: orientação solar adequada, com as aberturas das UHs voltadas predominantemente para Norte e Sul; elementos vazados (cobogó) na fachada, proporcionando ventilação natural cruzada; recuo das esquadrias em relação à fachada, possibilitando o sombreamento das aberturas; além de sistema de aquecimento solar de água. Os resultados alcançados pelo autor demonstraram que é possível promover uma habitação social eficiente com classificação final “A”, atendendo as limitações do programa habitacional.

Fagundes (2014) aplicou o método prescritivo do RTQ-R para avaliar a eficiência energética de uma HIS multifamiliar, considerando sua implantação nas oito zonas bioclimáticas brasileiras. A edificação analisada possui 5 pavimentos, com 4 apartamentos por pavimento e geometria em formato H, cujo projeto é semelhante ao implantado pelos programas habitacionais no país. Na pesquisa, foram consideradas duas orientações distintas, sendo avaliados o sistema de aquecimento de água e a envoltória da edificação. Os níveis de eficiência energética obtidos foram baixos, variando entre “D” e “E” em todas as zonas bioclimáticas, principalmente devido ao não atendimento de alguns pré-requisitos da envoltória (percentual de abertura para ventilação e iluminação natural) e à baixa eficiência do sistema de aquecimento de água (instalação de chuveiro elétrico). Caso a edificação atendesse a todos os pré-requisitos da envoltória, o nível máximo obtido seria “B”, e na maioria das zonas bioclimáticas “C”, pelo fato de não existir um sistema de aquecimento de água eficiente. Em virtude disso, foram propostas (i) alterações nas aberturas, (ii) sistema de aquecimento solar nível “A” e (iii) bonificações em relação ao uso racional de água, medição individualizada, equipamentos eficientes, etc. Tais alterações resultaram na classificação máxima de eficiência energética. Ao final, foi verificado que o melhor desempenho da envoltória no verão tende a ser em UHs térreas, enquanto no inverno são em UHs intermediárias. Em contrapartida, os piores níveis de eficiência foram observados nas UHs do último pavimento. Dessa forma, a autora destaca três aspectos projetuais que foram de extrema relevância nos resultados obtidos pela

envoltória das UHs: orientação solar das aberturas e paredes externas; características da cobertura; e posição do piso em relação ao solo.

Silva, Almeida e Ghisi (2013) realizaram um estudo comparativo da eficiência energética da envoltória de habitações sociais pelos métodos de simulação e prescritivo do RTQ-R. Foram analisadas cinco tipologias de HIS de Florianópolis/SC, sendo que as características geométricas e construtivas foram obtidas por meio de auditorias. Na análise, foram utilizados como parâmetro os indicadores de desempenho graus-hora de resfriamento (GHR), consumo relativo com aquecimento (CA) e consumo relativo com refrigeração (CR). Tais indicadores foram calculados para os ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios), a partir dos métodos prescritivo, baseado em equações de regressão linear múltipla, e de simulação com arquivos climáticos TMY e TRY. A simulação com o arquivo TMY resultou em níveis de eficiência inferiores aos demais métodos considerando o indicador GHR. Em relação ao CA, as simulações apresentaram níveis baixos de eficiência, enquanto o método prescritivo apresentou níveis altos. Quanto ao CR, os métodos apresentaram níveis semelhantes. Desse modo, os autores concluíram que os métodos de avaliação do RTQ-R conduzem a diferentes níveis de eficiência energética. Conforme os autores, a discrepância dos resultados obtidos pelo método prescritivo em relação às simulações, sobretudo no CA, pode ser explicada pela regressão linear do método que possivelmente não conseguiu representar satisfatoriamente a população de habitações simuladas.

No que se refere à cidade de Joinville/SC, foco da presente pesquisa, Cechinel (2017) analisou o desempenho térmico de condomínios habitacionais de interesse social existentes no município. Na primeira etapa do estudo, foi analisada a envoltória de 5 habitações multifamiliares pelo método prescritivo do RTQ-R. Após isso, foram realizadas comparações quantitativas com base na pontuação do nível de eficiência energética obtido para cada HIS, e qualitativas considerando as características construtivas das habitações. A partir dessas comparações, foi possível identificar uma habitação representativa da amostra, para posterior simulação computacional no programa EnergyPlus. Com os resultados das simulações, foi determinado o indicador de graus-hora de resfriamento para os ambientes de permanência prolongada da edificação representativa. Foi realizada ainda uma análise de sensibilidade global dos parâmetros construtivos (orientação, tipo de janela, presença de brises, material e absorvância das paredes externas/cobertura), possibilitando verificar as estratégias de

maior impacto no indicador GHR. É importante destacar que, devido à inexistência de um arquivo climático local, foi utilizado o arquivo climático de Itapoá nas simulações pela semelhança entre as condições climáticas de ambos os municípios, como constatado na pesquisa de Cechinel, Henning e Hackenberg (2017). Os resultados do estudo indicaram que as HIS implantadas em Joinville apresentaram baixo desempenho térmico, com classificação da envoltória variando entre “D” e “E”. O autor concluiu também que as propriedades térmicas das vedações externas, estratégias de ventilação e sombreamento das aberturas influenciam de forma significativa no desempenho térmico da edificação, em função do clima local.

Constatou-se que o RTQ-R é amplamente utilizado em estudos disponíveis na literatura como método de avaliação do nível de eficiência energética de uma edificação, ou ainda como subsídio para otimização do desempenho termoenergético de projetos habitacionais por simulação computacional. Convém salientar que ambos os métodos do regulamento, prescritivo e de simulação, devem ser aplicados com cautela devido à existência de limitações associadas a cada método, como visto no Item 2.3.1.

Com base na revisão dos estudos descritos acima, observou-se também que as habitações sociais que vêm sendo construídas pelo PMCMV no país apresentam baixo desempenho termoenergético. Na maioria dos casos, essas habitações não são adequadas ao contexto climático local, tampouco oferecem boas condições de conforto à população de baixa renda. Assim sendo, é importante que essas edificações sejam projetadas de acordo com as características climáticas da região onde são implantadas, buscando reduzir o consumo de energia e a utilização de sistemas de condicionamento artificial.

2.3.3 Normas brasileiras de desempenho térmico em edificações residenciais

Atualmente, no Brasil, há duas normas em vigor que tratam do desempenho térmico de edificações residenciais: NBR 15.220 e NBR 15.575. A NBR 15.220 (ABNT, 2005) estabelece métodos de cálculo e medição das propriedades térmicas dos componentes construtivos das edificações, sendo dividida em cinco partes. A terceira parte da norma trata especificamente do zoneamento bioclimático brasileiro, no qual o território nacional é dividido em oito zonas. Para cada zona bioclimática, são

recomendadas diretrizes construtivas no caso de habitações unifamiliares de interesse social, com base nos seguintes parâmetros:

- Aberturas para ventilação;
- Proteção das aberturas (sombreamento);
- Vedações externas (paredes e cobertura);
- Estratégias de condicionamento térmico passivo.

Segundo a NBR 15.220-3 (ABNT, 2005), as aberturas para ventilação são definidas a partir do percentual de abertura em relação à área do piso. Já as paredes externas e coberturas são caracterizadas mediante os valores de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar. As estratégias bioclimáticas sugeridas referem-se à ventilação, resfriamento evaporativo, massa térmica para resfriamento, aquecimento solar passivo, inércia térmica, entre outras, baseadas na carta bioclimática adaptada de Givoni (1992).

Nesse contexto, destaca-se também a NBR 15.575 (ABNT, 2013), na qual são estabelecidos requisitos e critérios de desempenho aplicáveis às edificações habitacionais. A referida norma é dividida em seis partes, sendo que a quarta e quinta partes tratam exclusivamente dos requisitos para os sistemas de vedações verticais externas e sistemas de coberturas, respectivamente. O método simplificado da NBR 15.575-4 e NBR 15.575-5 define os limites das propriedades térmicas (transmitância térmica, absorptância e capacidade térmica) de paredes externas e coberturas, de forma que esses elementos proporcionem desempenho térmico mínimo aceitável pela norma.

Caso tais sistemas não atendam aos critérios do método simplificado, o desempenho térmico deve ser avaliado pelo método de simulação computacional, de acordo com a NBR 15.575-1. Além disso, podem ser realizadas medições *in loco* de caráter informativo, não se sobrepondo aos outros métodos. No método de simulação, são definidos os limites de temperatura interior do ar para os ambientes de permanência prolongada (salas e dormitórios) em relação à temperatura externa, nas condições de inverno e verão.

A NBR 15.575-1 recomenda adotar, como condição crítica do ponto de vista térmico, pelo menos uma abertura do ambiente voltada para oeste no verão e para sul no inverno, além de considerar os dispositivos de sombreamento previstos na edificação e desconsiderar a obstrução no entorno. Ressalta-se que a avaliação deve ser realizada para um dia típico de projeto (verão e inverno), com taxa de renovação

do ar constante durante as 24 horas do dia, sem considerar as cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos) e condições extremas.

Sorgato (2015) salienta que as diretrizes construtivas da NBR 15.220 são aplicáveis somente para habitações unifamiliares de interesse social, enquanto a NBR 15.575 pode ser aplicada em qualquer tipo de edificação residencial. O autor enfatiza também que as normas apresentam diferenças no percentual de ventilação das aberturas e nos limites das propriedades térmicas de paredes externas e coberturas.

Tratando-se de habitações de interesse social, foram realizados alguns estudos baseados nessas normas para verificar o desempenho térmico e as condições de conforto dessas habitações.

Ferreira e Pereira (2012) avaliaram o desempenho térmico de uma habitação unifamiliar de interesse social, em diferentes condições climáticas. O objetivo do estudo foi verificar se as envoltórias adotadas atendem aos requisitos de desempenho térmico da NBR 15.575, considerando as zonas bioclimáticas brasileiras definidas pela NBR 15.220-3. A avaliação foi realizada por meio de simulação computacional utilizando o programa EnergyPlus, com os arquivos climáticos de oito cidades brasileiras selecionadas em cada zona bioclimática. As autoras optaram por utilizar arquivo climático nas simulações ao invés de dias típicos de verão e inverno, pois os resultados obtidos com dados de dias típicos são insatisfatórios e possuem pouca precisão. Foi destacado também que a HIS simulada possui *layout* e sistemas construtivos (alvenaria de tijolo e paredes de concreto) frequentemente utilizados no setor da construção civil para o tipo de habitação analisada.

No estudo de Ferreira e Pereira (2012), pode-se notar que a utilização de sistemas construtivos em concreto é recomendável para climas amenos a quentes, e no caso de climas mais quentes (zonas 7 e 8), foi sugerido o uso de alvenaria com tijolo cerâmico. As autoras concluíram também que, de modo geral, as envoltórias comumente adotadas em HIS atendem aos requisitos mínimos de desempenho térmico exigidos pela norma, na maioria das zonas bioclimáticas brasileiras. Porém, as autoras ressaltam que não foram consideradas as cargas internas nas simulações, que exercem contribuição significativa na carga térmica e temperatura do ar dos ambientes de permanência prolongada.

Moreno, Morais e Souza (2017) verificaram o desempenho térmico de um modelo de habitação social unifamiliar construída no âmbito do PMCMV, com base na NBR 15.575, NBR 15.220-3, RTQ-R e Selo Casa Azul. Primeiramente, foi realizada

uma análise de diferentes sistemas construtivos, buscando verificar se tais sistemas atendiam aos requisitos das regulamentações mencionadas nas oito zonas bioclimáticas brasileiras. No total, foram analisados sete grupos de paredes externas (com absorvância baixa e alta), bem como cinco sistemas de cobertura (com e sem isolamento térmico). Após isso, foram realizadas simulações computacionais com o programa EnergyPlus para os casos extremos, ou seja, aqueles que obtiveram os melhores e piores resultados. Nessa etapa, foi determinado o nível de eficiência energética da envoltória pelo método de simulação do RTQ-R. Os sistemas construtivos que obtiveram os melhores resultados na primeira etapa do estudo foram paredes externas de alvenaria de tijolo e cobertura de telha cerâmica. No caso das paredes, foram obtidos resultados ainda melhores com a presença de revestimento interno e externo (argamassa) e pintura com cores claras na fachada. Todos os sistemas de cobertura atenderam aos requisitos das regulamentações quando possuíam isolamento térmico com mantas de alumínio. Por outro lado, os piores resultados foram constatados nos elementos que apresentavam cimento em sua composição, como blocos de concreto e telhas de fibrocimento. Sendo assim, foi constatado que os sistemas construtivos com materiais cerâmicos apresentam melhor desempenho térmico em comparação aos materiais cimentícios. No que se refere à eficiência energética, o maior nível alcançado foi “C”, sendo predominante o nível “E” na maioria das zonas bioclimáticas.

Guarda *et al.* (2018) elaboraram propostas para adequação da envoltória de uma HIS unifamiliar, considerando as quatro zonas bioclimáticas (5, 6, 7 e 8) do estado de Mato Grosso. O estudo consistiu em identificar as características construtivas da edificação e propriedades térmicas da envoltória, para fins de comparação com os requisitos previstos no RTQ-R, NBR 15.220 e NBR 15.575. Posteriormente, foi determinada a classificação energética da envoltória para cada zona bioclimática, consoante o método prescritivo do RTQ-R. Na sequência, foram elaboradas propostas de adequação buscando alcançar o melhor nível de eficiência, além de atender aos requisitos mínimos das regulamentações. As adequações propostas ao projeto padrão incluíam: alteração do percentual de ventilação e iluminação natural das aberturas; sombreamento das aberturas por venezianas e redução da absorvância das paredes externas e cobertura (pintura na cor branca). Foram propostas também adequações conforme as zonas bioclimáticas. Para o sistema de vedação vertical, foi considerado material isolante do tipo poliestireno expandindo nas zonas 5 e 8, e aumento na

espessura da argamassa para as demais zonas. Em relação ao sistema de cobertura, as intervenções construtivas foram adoção de forro de madeira na zona 7 e manta isolante de poliuretano com aumento do pé-direito para as zonas 5 e 8. A análise da envoltória pelo RTQ-R indicou classificação energética “C” (zonas 6 e 7) e “D” (zonas 5 e 8) para a HIS padrão. Com as adequações propostas, foi possível atingir nível de eficiência “A” nas zonas bioclimáticas analisadas. Portanto, as estratégias construtivas em questão promovem uma edificação mais eficiente em termos de consumo energético e são passíveis de serem implementadas nos projetos de habitação social.

Com relação à Joinville/SC, Grunberg (2014) buscou determinar as estratégias bioclimáticas de condicionamento térmico passivo para o clima local, por meio da elaboração de carta bioclimática e análise das recomendações indicadas na NBR 15220-3. A análise da carta bioclimática de Joinville indicou que as estratégias de condicionamento passivo mais relevantes são alta inércia térmica e ventilação. Além disso, a autora destaca que há necessidade de condicionamento artificial em apenas 6,77% do período anual. As estratégias bioclimáticas recomendadas na NBR 15220-3 para a zona bioclimática de Joinville são:

- Aberturas médias para ventilação;
- Sombreamento das aberturas;
- Vedação externa leve e refletora;
- Cobertura leve e isolada;
- Ventilação cruzada no verão;
- Vedações internas pesadas (inércia térmica).

Na pesquisa de Grunberg (2014), foi realizada também a avaliação do desempenho térmico de um projeto residencial unifamiliar popular, de acordo com o método de simulação computacional descrito pela NBR 15575. Foram considerados sete modelos, incluindo o modelo de referência, com diferentes estratégias (proteção solar, isolamento térmico, ventilação natural, telhado verde), configurações de ocupação e taxa de ventilação. Ao final dessa etapa, a pesquisadora concluiu que as estratégias indicadas na carta bioclimática e aquelas recomendadas pela NBR 15220-3 são eficientes para reduzir o desconforto por calor, porém produzem menor efeito em dias frios. Foi observada ainda que a composição construtiva da cobertura exerce maior influência no desempenho térmico da edificação, considerando o clima de Joinville. Este fato foi verificado através dos modelos com isolamento térmico e cobertura verde, os quais apresentaram menor horas de desconforto, tanto por calor

quanto por frio. Vale ressaltar que, como o esperado, há um aumento nas horas de desconforto por calor ao considerar a ocupação.

Grigoletti e Linck (2014) avaliaram as condições de conforto de cinco HIS unifamiliares térreas, situadas em Santa Maria/RS, a partir da percepção dos usuários. A pesquisa foi realizada mediante a aplicação de questionários e medição das temperaturas internas e externas às habitações no momento da entrevista. Foi analisado também o desempenho térmico dessas habitações por meio de parâmetros térmicos, a saber: coeficientes globais de ganhos e perdas de calor, condensação sobre superfícies internas e assimetria da radiação térmica. Na análise, foram calculados os valores de resistência térmica total, transmitância térmica, fator solar e atraso térmico dos elementos construtivos da edificação, conforme a NBR 15220. Os resultados obtidos pelo coeficiente global de ganhos de calor vão ao encontro daqueles obtidos com medições *in loco* para o período analisado. No interior das habitações, foram registradas temperaturas em torno de 39°C no verão e 8°C no inverno. Durante as entrevistas, os usuários relataram maior desconforto no verão, mostrando-se mais tolerantes às condições de frio. Em virtude de condições financeiras, todos os entrevistados relataram não possuir outro equipamento para amenizar a sensação de calor além do ventilador. Com a pesquisa, foi verificada a importância das esquadrias com dispositivos (venezianas, por exemplo) que permitam a ventilação noturna no verão e com ausência de frestas para impedir as perdas de calor no inverno. A cobertura foi apontada como o elemento que mais contribui no baixo desempenho térmico da edificação.

Nesse tópico, verificou-se que as normas citadas anteriormente são bastante utilizadas como referência para avaliar o desempenho térmico de habitações sociais, apesar de apresentarem incoerências ou serem omissas. No caso da NBR 15.220, é incoerente que o território brasileiro com grandes extensões e diferentes climas seja dividido somente em oito zonas bioclimáticas. A NBR 15575, por sua vez, não considera as cargas internas de ocupação, iluminação artificial e equipamentos, as quais atuam como fontes de calor no ambiente. Tal omissão pode distorcer os resultados obtidos com o método de simulação computacional. Ambas as normas são divergentes entre si no que diz respeito à ventilação natural das aberturas e propriedades térmicas dos componentes construtivos da envoltória. Portanto, torna-se necessária uma padronização das normas e regulamentos existentes no país que tratam do desempenho térmico de edificações, permitindo a definição de uma única normativa

para auxiliar construtores e projetistas na elaboração de projetos mais eficientes, bem como orientar pesquisadores com uma metodologia de análise confiável.

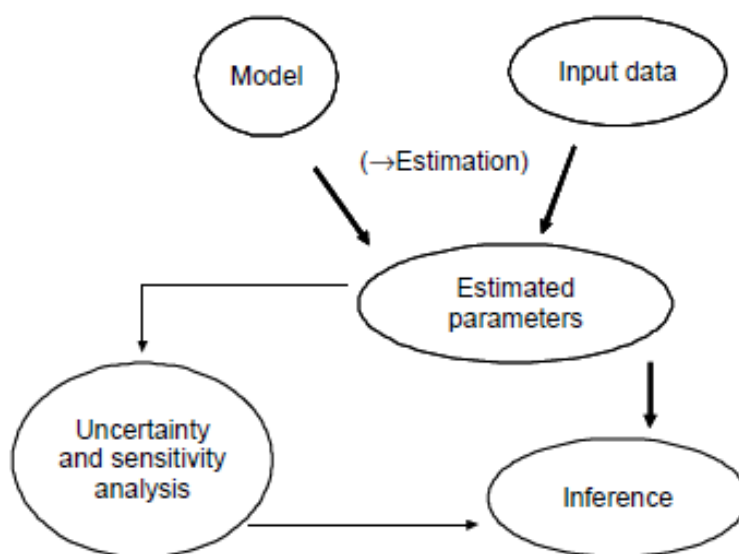
Por fim, constatou-se ainda que as estratégias bioclimáticas de condicionamento passivo são eficientes no sentido de melhorar o desempenho térmico da edificação, desde que adequadas ao clima local e adotadas preferencialmente na concepção do projeto de habitações sociais. Dessa maneira, é possível reduzir o consumo de energia e propiciar condições de conforto satisfatórias aos usuários, sobretudo em habitações destinadas à população de baixa renda.

2.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é uma ferramenta muito aplicada em pesquisas voltadas a avaliação do desempenho térmico e energético de edificações. Esta análise é realizada com o intuito de quantificar o impacto das variáveis no desempenho de edificações, auxiliando na tomada de decisão e otimização de projeto.

Em termos estatísticos, a análise de sensibilidade pode ser definida como estudo do efeito da variação dos parâmetros de entrada do modelo na variável resposta, como esquematizado na Figura 3. Desse modo, segundo Saltelli *et al.* (2008), é possível obter inferências a partir dos resultados, identificar fontes de incertezas e verificar quais parâmetros exigem uma pesquisa mais aprofundada.

Figura 3 – Análise de sensibilidade



Fonte: Saltelli *et al.* (2008)

Existem dois tipos de análise de sensibilidade: global e local. A análise de sensibilidade local baseia-se na abordagem “*one-at-a-time*”, na qual ocorre a variação de um parâmetro em específico, enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. O método é simples em comparação com a análise global, de fácil aplicação e interpretação dos resultados, sendo útil para análises preliminares. Entretanto, apresenta limitações já que os parâmetros de entrada são variados individualmente e, portanto, não considera possíveis interações entre os fatores (SALTELLI *et al.*, 2008).

A análise de sensibilidade global refere-se à variação de todos os parâmetros simultaneamente, sendo mais completa e complexa. O método global permite estimar com maior precisão a influência de cada variável de entrada na variável resposta, bem como determinar os parâmetros responsáveis pela maior parte da variabilidade do modelo (SALTELLI; TARANTOLA; CAMPOLONGO, 2000; SILVA, 2016).

Atualmente, há uma ampla variedade de métodos para análise de sensibilidade, cada qual com suas vantagens, limitações e aplicações. Os métodos mais conhecidos são: Morris, Sobol, Teste de amplitude de sensibilidade de Fourier (sigla FAST em inglês), análise de variância (ANOVA), Coeficientes de regressão padronizados e coeficientes de correlações parciais (sigla SRC e PCC em inglês).

A escolha do método de análise de sensibilidade mais adequado requer conhecimento da variável resposta do modelo, número de variáveis de entrada e suas distribuições de probabilidade, esforço computacional, precisão desejada, dentre outros fatores. O uso das técnicas globais é indicado para modelos complexos e que envolvem muitas variáveis, como a simulação computacional de edificações (NGUYEN; REITER, 2015; SILVA; GHISI, 2013).

Tian (2013) realizou uma revisão da literatura dos principais métodos de análise de sensibilidade e verificou a aplicabilidade de cada um no desempenho energético de edificações. Os métodos globais analisados foram divididos em quatro grupos: métodos de regressão, métodos baseados na variância, métodos de triagem e metamodelos. Segundo o autor, o método de sensibilidade local possui baixo custo computacional, é simples para implementar e fácil de entender, porém considera somente os efeitos de primeira ordem, além de explorar um reduzido espaço amostral dos parâmetros de entrada. Os métodos globais de regressão podem ser aplicados em modelos lineares (coeficientes de regressão padronizados, SRC em inglês) e não lineares, mas monotônicos (coeficientes de regressão ordenados padronizados, SRRC em inglês), apresentam custo computacional moderado, são relativamente

fáceis de implementar/interpretar e permitem quantificar a variância dos dados de saída que pode ser explicada pelo modelo. Já os métodos de triagem (Morris) são adequados quando há um grande número de fatores e modelos computacionais robustos, análise independente do modelo, utiliza medidas qualitativas para classificar os fatores e não é indicado para análise de incertezas. Os métodos baseados na variância (Sobol e FAST) decompõem a variância do modelo para cada parâmetro de entrada, análise também independente do modelo, considera efeitos principais e interações entre parâmetros, mas possui como desvantagem alto custo computacional, sendo que o método FAST não pode ser aplicado para distribuições discretas. Os metamodelos são adequados para modelos computacionais robustos com alto nível de complexidade, quantifica a variação da saída devido a diferentes entradas e a precisão do método depende do metamodelo. No estudo, o autor destaca ainda que é necessário cuidado ao implementar a análise de sensibilidade na presença de parâmetros correlacionados (multicolinearidade), pois nem todos os métodos podem ser aplicados neste caso.

Ainda no que diz respeito à análise de sensibilidade voltada para edificações, Nguyen e Reiter (2015) realizaram uma comparação de nove métodos com base em modelos computacionais de simulação termoenergética. Na pesquisa, verificou-se que a aplicação dos métodos Sobol e FAST apresentam resultados semelhantes e confiáveis, porém possuem um alto custo computacional. Da mesma forma, o custo computacional dos métodos baseados em variância torna-se um obstáculo para sua utilização em análise de sensibilidade de edificações. Os métodos baseados em regressão, como SRC e PCC, fornecem índices de sensibilidade consistentes havendo equilíbrio entre precisão e custo computacional.

Com base no exposto, verifica-se que existem diversas técnicas para análise de sensibilidade em edificações, com destaque para os métodos globais baseados em regressão como SRC e PCC. Tais métodos serão abordados de forma detalhada a seguir.

2.4.1 Métodos de regressão – SRC e PCC

Os métodos de regressão podem ser utilizados para análise de sensibilidade em edificações quando o modelo é monotômico e possui um comportamento linear,

sendo que os mais comuns neste tipo de abordagem são os coeficientes de regressão padronizados (SRC) e os coeficientes de correlação parcial (PCC).

O método SRC é baseado num modelo de regressão linear multivariada, na qual os coeficientes de regressão são calculados por meio do método dos mínimos quadrados. No método SRC, as unidades das variáveis independentes são removidas por meio da normalização, e seus valores são comparados quanto à importância relativa de cada parâmetro de entrada. Destaca-se que quanto maior o valor do coeficiente SRC, mais influente é a variável no modelo, lembrando que o método em questão é aplicável apenas em modelos lineares (YANG *et al.*, 2016).

Os coeficientes de sensibilidade do método PCC são calculados com base em correlações completas e correlações parciais de Pearson, os quais indicam a correlação linear entre duas variáveis, excluindo-se todos os efeitos das variáveis independentes entre si. Se o modelo é monotônico e não linear, podem ser utilizados os métodos de transformação de ordem, conhecidos como coeficientes de regressão ordenados padronizados e coeficientes de correlação parcial ordenados (SRRC e PRCC em inglês) (SILVA; GHISI, 2013).

Na análise de sensibilidade aplicada ao desempenho de edificações, os parâmetros de entrada mais frequentes são geometria da edificação, envoltória (parede, cobertura e janelas), ventilação e infiltração, sistemas de condicionamento artificial e comportamento do usuário. Já as variáveis de saída mais comuns são consumo de energia da edificação e conforto térmico do usuário (PANG *et al.*, 2020).

É importante salientar que, na maioria dos casos, antes de implementar a análise de sensibilidade faz-se necessário primeiramente aplicar um método de amostragem. Para os métodos baseados em regressão, o método de amostragem hipercubo-latino é bastante utilizado devido às suas propriedades de estratificação, especialmente no âmbito da avaliação do desempenho em edificações. O método hipercubo-latino gera uma matriz de dados através de amostragem aleatória estratificada, com o mesmo número de pontos gerados em intervalos predefinidos de cada distribuição. Silva (2016), em sua tese, realizou uma revisão bibliométrica sistemática de artigos científicos publicados em periódicos, disponíveis nas principais bases de dados. Constatou-se que a maior parte dos artigos relacionados ao desempenho térmico de edificações utilizou o método hipercubo latino para seleção da amostra e análise de sensibilidade baseada nos métodos de regressão ou correlação.

Yildiz e Arsan (2011) verificaram a sensibilidade dos parâmetros de uma edificação residencial multifamiliar localizada em Izmir-Turquia, de clima quente e úmido. Os parâmetros foram variados conforme distribuição uniforme contínua, com intervalo de 95% de confiabilidade, e são relacionados às propriedades térmicas dos materiais, ao comportamento do usuário e à geometria dos ambientes. Para a amostragem e análise de sensibilidade, foram utilizados os métodos hipercubo-latino e SRRC, respectivamente. Dessa forma, foram gerados 400 casos para cada pavimento (térreo, intermediário e cobertura), totalizando 1200 simulações. Os resultados obtidos demonstraram que, no geral, a orientação solar e infiltração do ar têm impacto na sensibilidade dos parâmetros da edificação para as cargas de aquecimento e resfriamento. As propriedades térmicas do vidro e área das janelas são variáveis com grande representatividade no modelo analisado. Outros parâmetros como temperaturas de *setpoint* do sistema de condicionamento de ar, propriedades térmicas dos vidros, área das janelas e a forma da edificação também apresentaram representatividade.

Silva e Ghisi (2013) analisaram a sensibilidade global de parâmetros termofísicos considerados pelo RTQ-R, a partir de um estudo de caso de uma habitação em Florianópolis/SC. No total, foram amostrados 500 casos pelo método hipercubo-latino, considerando 15 parâmetros. A análise de sensibilidade foi realizada utilizando-se os métodos SRC e PCC, considerando três variáveis dependentes: graus-hora de resfriamento, consumo relativo com aquecimento e com refrigeração. Os resultados mostraram que os parâmetros mais influentes diferem para cada variável dependente, o que dificulta a proposta de soluções de desempenho que atendam às condições de verão e inverno simultaneamente. Segundo os autores, os parâmetros que apresentaram maiores índices de sensibilidade foram as variáveis absorvância solar e emissividade da cobertura.

Além dos estudos citados, percebeu-se que há muitas pesquisas disponíveis na literatura que utilizam os métodos de regressão SRC e PCC para análise de sensibilidade da eficiência energética de edificações, em conjunto com o método de amostragem hipercubo-latino. Esses métodos fornecem resultados com boa precisão e menor custo computacional, permitindo uma análise mais confiável (ASSERIN *et al.*, 2011; BREESCH; JANSSENS, 2010; HOPFE; HENSEN, 2011; CHEN; YANG; ZHANG 2015; HWANG; SHIH; HUANG, 2020).

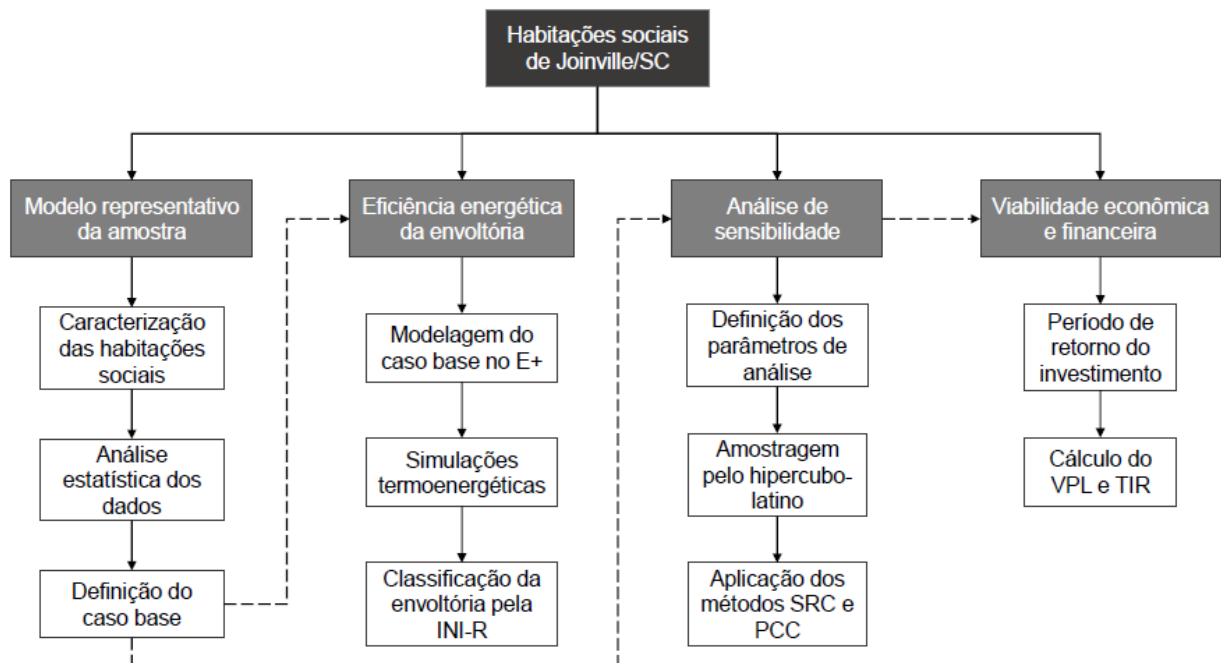
3 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentado o método adotado na pesquisa para alcançar o objetivo de analisar o desempenho térmico e energético da envoltória em habitações sociais da cidade de Joinville/SC. A metodologia aplicada foi dividida em quatro etapas, sendo:

- Definição de um modelo representativo das habitações sociais multifamiliares de Joinville/SC, para uso em simulação computacional;
- Determinação do nível de eficiência energética da envoltória pelo método de simulação da INI-R;
- Avaliação da influência dos parâmetros geométricos e construtivos no desempenho termoenergético da edificação, considerando o clima de Joinville;
- Análise da viabilidade econômica e financeira dos casos simulados.

Na Figura 4, é apresentado o organograma da pesquisa para melhor entendimento da metodologia. Destaca-se que o modelo representativo da amostra, definido como caso base, foi utilizado em todas as análises posteriores deste estudo.

Figura 4 – Organograma da pesquisa

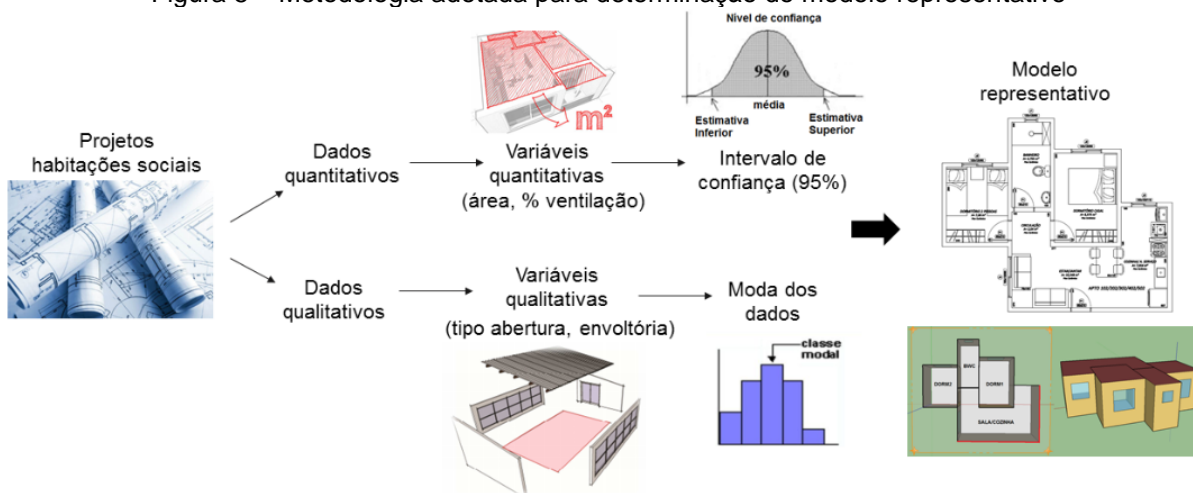


Fonte: A autora (2020)

3.1 DEFINIÇÃO DO MODELO REPRESENTATIVO

Na presente pesquisa, adotou-se a técnica de amostragem não probabilística por julgamento, que consiste na seleção intencional de elementos para pertencer à amostra, com base no julgamento de que tais elementos sejam representativos da população (KELLEY *et al.*, 2003; REIS, 2008). Partindo dessa concepção, foi definido um modelo representativo das habitações sociais da cidade de Joinville, mediante a caracterização dessas habitações e análise estatística dos dados coletados. Na Figura 5, é esquematizada a metodologia aplicada neste trabalho para determinação do modelo representativo.

Figura 5 – Metodologia adotada para determinação do modelo representativo



Fonte: A autora (2020)

3.1.1 Caracterização das habitações sociais

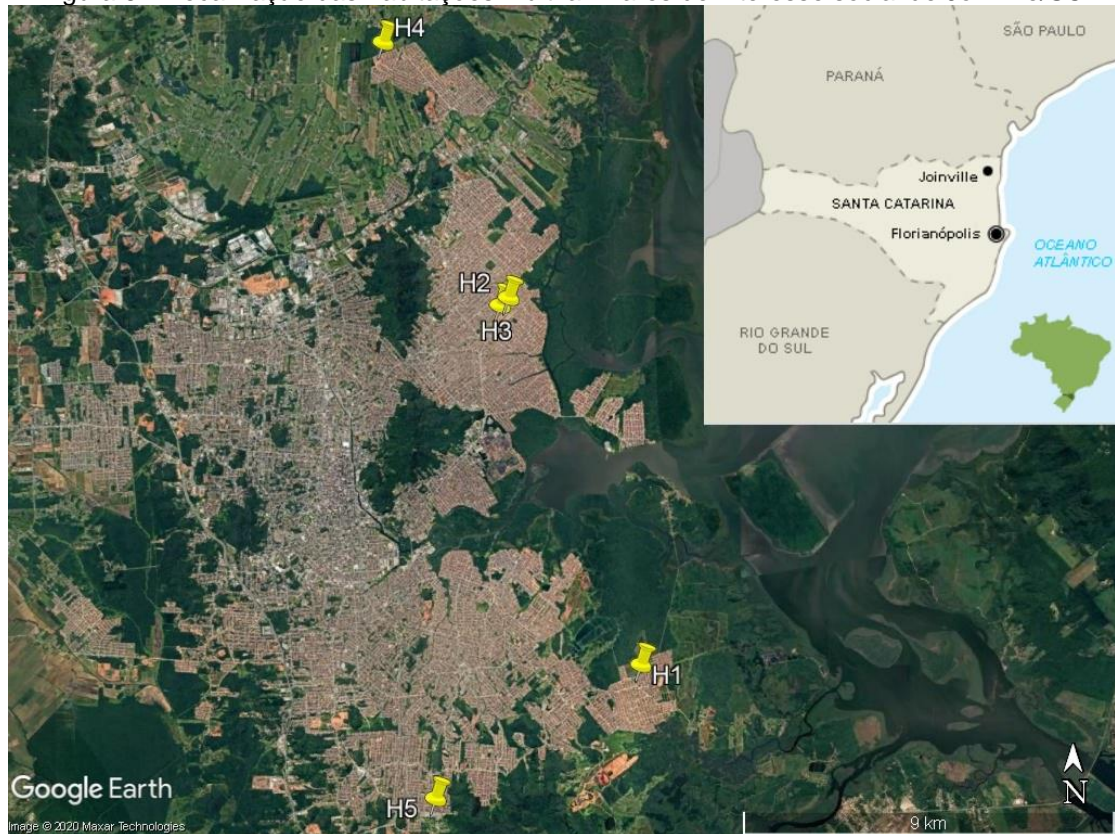
Primeiramente, realizou-se um levantamento das características geométricas e construtivas das cinco HIS multifamiliares existentes em Joinville. Tal caracterização foi realizada a partir dos projetos e memorial descritivo de cada habitação (Figura 5), os quais foram fornecidos pela instituição financeira Caixa Econômica Federal.

As edificações analisadas são condomínios habitacionais do PMCMV Faixa I, voltado para famílias com renda mensal de até três salários mínimos, consideradas de baixa renda pelo governo federal. A tipologia dessas edificações é definida como multifamiliar, pois são constituídas de inúmeras unidades habitacionais em cada

condomínio. Na Figura 6, é apresentada a localização das habitações sociais analisadas.

Como trata-se de regiões periféricas da cidade, há altos níveis de criminalidade e violência nos condomínios do MCMV Faixa I em Joinville. Devido à essas condições, optou-se por não fazer vistorias *in loco*.

Figura 6 – Localização das habitações multifamiliares de interesse social de Joinville/SC



Fonte: Adaptado de Google Earth (2020)

Nessa etapa, foram coletados os seguintes dados:

- Geometria da edificação;
- Número total de blocos e unidades habitacionais (apartamentos);
- Área útil dos ambientes e área total da UH;
- Tipo e dimensões das aberturas;
- Materiais que compõem a envoltória (piso, paredes e cobertura).

A seleção intencional das variáveis acima descritas se justifica pelo fato de que são utilizadas como parâmetro para a classificação do nível de eficiência energética da envoltória pela INI-R.

3.1.2 Análise estatística dos dados e definição do caso base

Após a coleta de dados mencionada anteriormente, foi realizada uma análise estatística por meio do software R versão 3.5.1 com interface RStudio. Optou-se por utilizar o programa R, pois é um software livre que permite a manipulação, análise e visualização gráfica de dados, entre outras funcionalidades (R CODE TEAM, 2018).

Na análise estatística, os dados foram previamente classificados em:

- a) Variáveis quantitativas, que podem ser medidas numa escala numérica;
- b) Variáveis qualitativas/categóricas, definidas por categorias como o próprio nome indica.

As variáveis quantitativas do presente estudo referem-se à área útil dos ambientes, área total da unidade habitacional e percentual de abertura² para ventilação, enquanto as variáveis qualitativas são tipologia das aberturas e composição da envoltória, como demonstrado na Figura 5.

Para a definição do modelo representativo, considerou-se duas abordagens distintas conforme o tipo de variável. No caso das variáveis quantitativas, foi realizada uma análise descritiva dos dados, na qual foram calculados a média e o desvio padrão. Após isso, verificou-se a aderência dos dados à distribuição normal por meio do teste de Shapiro-Wilk, que fornece uma estatística de teste para avaliar se determinada amostra possui distribuição normal. Utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk, pois em termos estatísticos este teste é mais “poderoso” em comparação a outros testes de normalidade, tais como Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, Anderson-Darling e D’Agostino-Pearson (RAZALI; WAH, 2011; KESKIN, 2006). Caso a suposição de normalidade fosse aceita, aplicou-se a aproximação pela distribuição t de *Student* a fim de obter o intervalo de confiança de 95% para a média.

Quanto às variáveis qualitativas, determinou-se a moda do conjunto de dados, ou seja, as características das aberturas e envoltória mais frequentes na amostra. Por fim, verificou-se dentre as habitações pertencentes à amostra, aquela que atendia simultaneamente ambos os critérios: (1) intervalo de confiança de 95% para a média dos dados quantitativos e (2) moda dos dados qualitativos, como esquematizado na Figura 5.

² O percentual de abertura para ventilação é a relação entre a área das aberturas e a área de piso do ambiente, cujo valor foi calculado apenas para os ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios).

Outro critério utilizado para a definição do caso base foi a NBR 9050 (ABNT, 2015), mais conhecida como norma de acessibilidade. Considerou-se tal critério haja vista que, segundo o Art. 73 da Lei federal nº 11.977, parágrafo único, no mínimo 3% das unidades habitacionais construídas no âmbito do PMCMV devem ser adaptadas ao uso por pessoas com deficiência (BRASIL, 2009). Foi elaborado então um *checklist* com os requisitos de projeto contidos na norma, os quais deveriam ser atendidos pelo modelo representativo da amostra.

O método de amostragem descrito acima foi aplicado nos estudos de Schaefer *et al.* (2012) e Triana, Lamberts e Sassi (2015) para amostras pequenas, em que o número de elementos é inferior a 30 (MONTGOMERY; RUNGER, 2016). Desse modo, foi possível definir um modelo para uso em simulação computacional que representasse adequadamente a população analisada, com um nível de significância de 5%, possibilitando determinar a classificação energética da envoltória e avaliar o seu desempenho. O modelo representativo é apresentado no Item 4.3.

3.2 DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA

Este item descreve os procedimentos adotados na pesquisa para classificar a eficiência energética da envoltória, baseado no método de simulação da nova proposta do regulamento brasileiro de etiquetagem de edificações residenciais, chamada INI-R.

As simulações termoenergéticas foram realizadas por meio do programa *EnergyPlus*, versão 8.9.0. O *EnergyPlus* é um programa computacional de simulação energética de edificações, que permite modelar o consumo de energia para aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação da edificação, sendo bastante utilizado por engenheiros, arquitetos e pesquisadores (DOE, 2018). Optou-se também por utilizar o referido programa, pois atende os requisitos estabelecidos na INI-R.

3.2.1 Modelagem do caso base

Para realizar as simulações, foi necessário primeiramente modelar a geometria do caso base, definir a orientação das paredes e aberturas, bem como as condições de contorno das superfícies (adiabática ou em contato com o exterior).

Nessa fase, utilizou-se o programa *SketchUp* 2017, com o auxílio do plug-in Euclid 0.9.3. Esse plug-in gera um arquivo com a extensão “.idf” (sigla para *input data file*) do programa *EnergyPlus*, permitindo a identificação das zonas térmicas, superfícies e aberturas pelo programa. Assim, não é necessária a inserção manual das coordenadas cartesianas de cada componente construtivo no *EnergyPlus*.

Cabe ressaltar que todos os ambientes da UH foram modelados como zonas térmicas, porém a análise da envoltória foi realizada apenas para os ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios), conforme determina a INI-R.

Os demais parâmetros de entrada da simulação computacional, como propriedades térmicas da envoltória, cargas internas, padrões de ocupação e iluminação, ventilação natural e sistema de condicionamento de ar foram inseridos no próprio *EnergyPlus*, incluindo as configurações do arquivo climático.

3.2.2 Arquivo climático

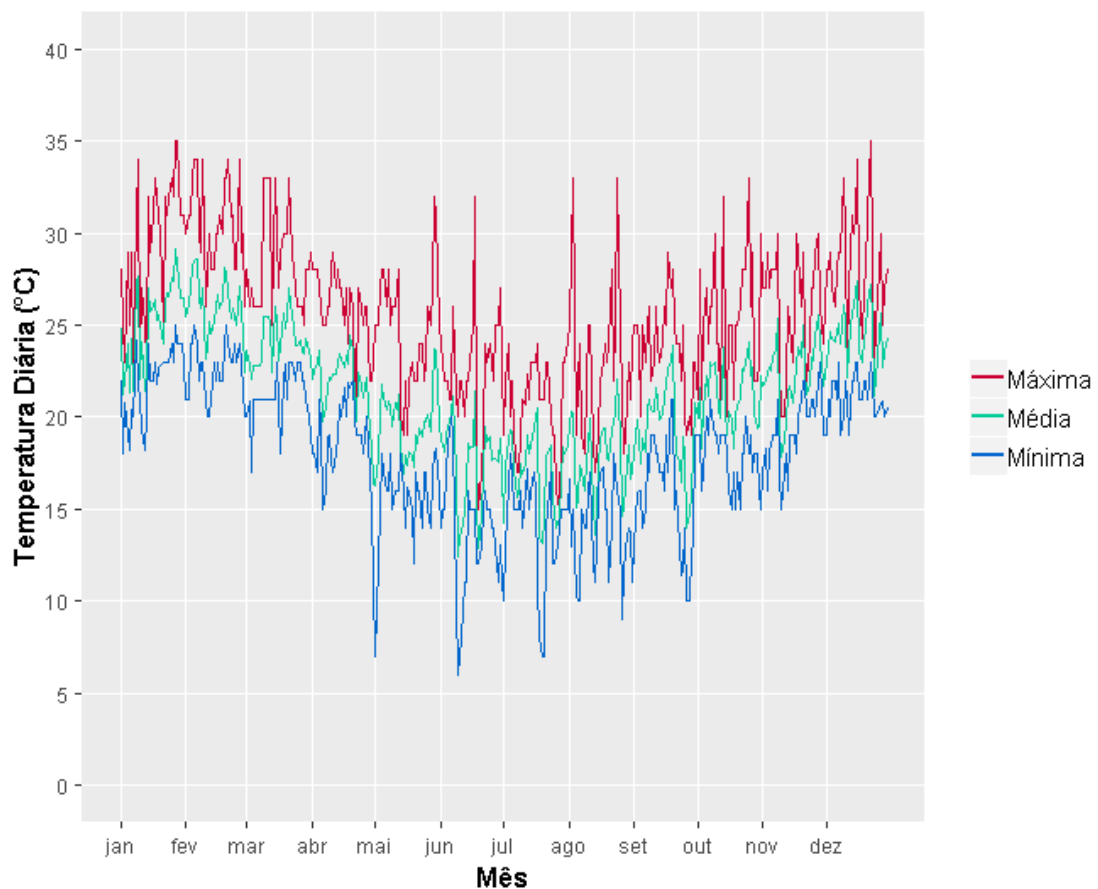
Para que o programa *EnergyPlus* execute as simulações e forneça os resultados do desempenho termoenergético da edificação, faz-se necessário definir as informações relacionadas ao arquivo climático da região em análise.

No desenvolvimento da pesquisa, adotou-se o arquivo climático³ da cidade de Joinville (LAWRIE; CRAWLEY, 2019). O arquivo climático utilizado é do tipo TMY (sigla para *Typical Meteorological Year*), com dados de 2010 a 2017, obtidos por meio de uma estação meteorológica localizada no aeroporto do município (latitude de 26,2° S; longitude de 48,8° O e altitude de 4,6m).

O clima da cidade de Joinville é quente e úmido, caracterizado por altas temperaturas e elevada umidade no verão (GRUNBERG, 2014). Ao analisar a Figura 7, percebe-se que Joinville apresenta temperatura máxima diária em torno de 30°C a 35°C nos meses mais quente do ano, com picos de temperatura atingindo essa faixa inclusive no inverno. Constata-se também que os picos de temperatura mínima nas estações mais amenas se aproximam de 5°C.

³ Disponível para acesso na plataforma <<http://climate.onebuilding.org/default.html>>.

Figura 7 – Gráfico das temperaturas mínima, média e máxima diária



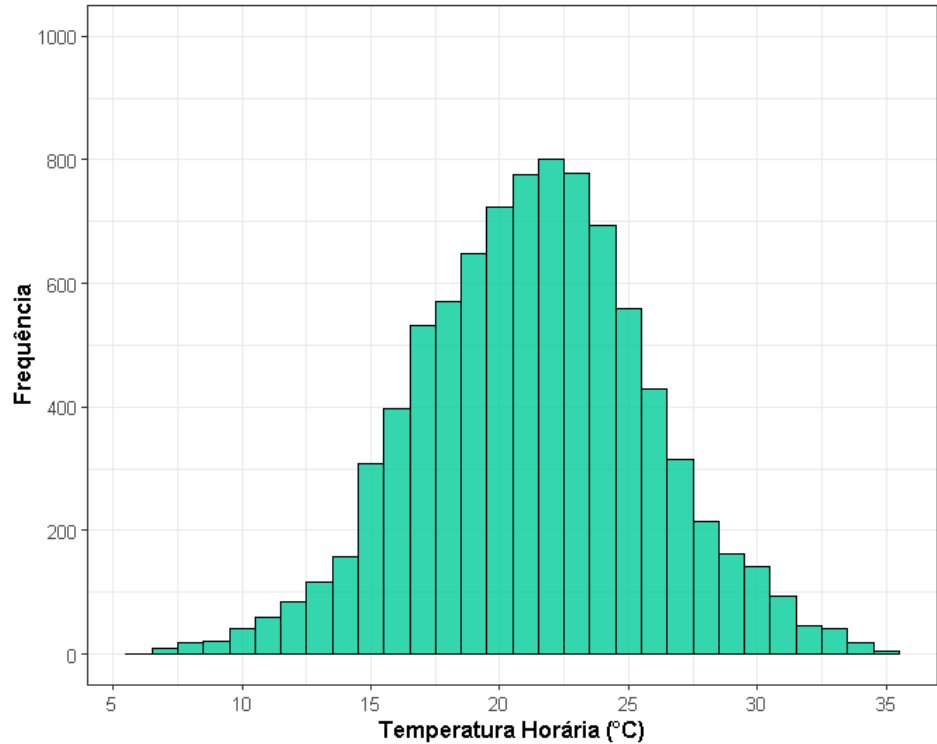
Fonte: Lawrie e Crawley (2019)

A cidade de Joinville apresenta maiores frequências de ocorrência de temperatura horária de bulbo seco na faixa de 20°C a 25°C, com predominância de 22°C, como pode ser visto na Figura 8.

Quanto à radiação solar (Figura 9), nota-se que os valores médios mensais de radiação direta e difusa são coerentes, atingindo a marca de 500 e 400 Wh/m², respectivamente.

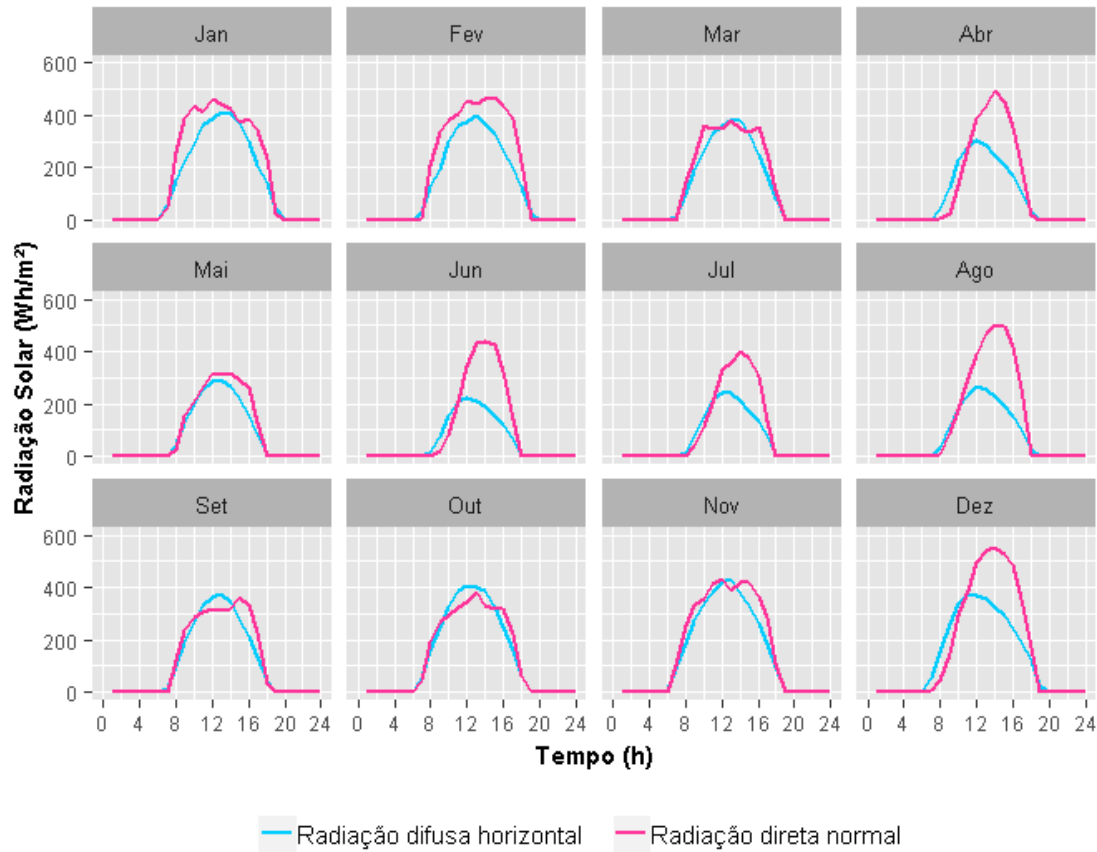
Outro parâmetro de entrada definido com base no arquivo climático foi a temperatura média mensal do solo. Esse parâmetro é importante para as unidades habitacionais localizadas no pavimento térreo, em que há troca de calor entre o piso e o solo.

Figura 8 – Histograma da temperatura horária de bulbo seco



Fonte: Lawrie e Crawley (2019)

Figura 9 – Gráfico da radiação direta e difusa média mensal



Fonte: Lawrie e Crawley (2019)

A modelagem da transferência de calor através do solo no programa *EnergyPlus* pode ser realizada a partir da média das temperaturas mensais do arquivo climático ou utilizando o pré-processador *Slab*, que requer uma simulação prévia do modelo para o cálculo das temperaturas mensais médias do ar no interior da edificação, depois é realizada a simulação efetiva com as devidas iterações para a convergência da temperatura do solo. Na pesquisa, foi considerado o primeiro método, com temperaturas médias mensais do solo para uma profundidade de 0,5m (Tabela 1).

Tabela 1 - Temperatura média mensal do solo

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura do solo (°C)	25,46	24,68	23,16	21,74	19,05	17,65	17,28	18,01	19,68	21,76	23,79	25,12

Fonte: Lawrie e Crawley (2019)

Após a configuração dos parâmetros relacionados ao arquivo climático, prosseguiu-se com a modelagem das propriedades térmicas dos elementos construtivos da envoltória.

3.2.3 Propriedades térmicas da envoltória

Os elementos construtivos da envoltória (piso, paredes, cobertura e aberturas) influenciam nos ganhos e perdas de calor entre o exterior e o ambiente interno. Por isso, é fundamental conhecer os materiais que compõem esses elementos, uma vez que influenciam na transferência de calor e desempenho térmico da envoltória.

O programa *EnergyPlus* considera os componentes opacos da envoltória formados por camadas, sendo necessário definir as propriedades físicas e térmicas de cada material que constitui essas camadas. As propriedades em questão referem-se à espessura, à condutividade térmica, ao peso específico aparente, ao calor específico e à absorvância a radiação solar.

Além disso, foram definidas também as propriedades dos componentes transparentes (vidro) na simulação computacional, os quais contribuem no desempenho da envoltória e iluminação natural do ambiente.

Neste trabalho, as propriedades termofísicas das superfícies foram obtidas a partir de bibliotecas de componentes construtivos brasileiros (WEBER *et al.*, 2017;

ORDENES *et al.*, 2003) e norma de desempenho térmico em edificações - NBR 15220 (ABNT, 2005). Já os valores de absorvância das paredes externas e cobertura foram obtidos, respectivamente, no Anexo V da portaria Inmetro nº 50/2013 (atualizado em 2017) e trabalho de Silveira, Marinoski e Lamberts (2012).

3.2.4 Cargas internas de ocupação, iluminação artificial e equipamentos

A ocupação, iluminação artificial e utilização de equipamentos contribuem para os ganhos internos de calor do ambiente. Portanto, devem ser considerados na simulação computacional.

As configurações de cargas internas foram modeladas conforme os padrões fixados na INI-R. Na Tabela 2, é apresentado um resumo dos parâmetros de entrada da simulação relacionados às cargas internas.

Tabela 2 – Configurações de cargas internas		
Parâmetro	APP	
	Sala	Dormitórios
Ocupação (nº pessoas)	4	2
Taxa metabólica (W/pessoa)	108	81
Iluminação (W/m²)	5	5
Equipamentos (W)	120	-

Fonte: Inmetro (2018)

No que se refere à ocupação, foram adotadas taxas metabólicas de 108W/pessoa na sala e 81W/pessoa nos dormitórios, considerando uma área de pele média de 1,80m². Quanto ao número de usuários, adotou-se 2 pessoas por dormitório, totalizando 4 pessoas na sala.

A densidade de potência de iluminação foi considerada a mesma para ambos os ambientes com valor de 5W/m², fração radiante de 0,42 e fração visível de 0,18. Essa densidade de potência de iluminação é significativamente inferior ao valor indicado pela NBR 5410 (ABNT, 2004) para projeto elétrico, lembrando que a referida norma é de 2004, sendo que atualmente existem lâmpadas mais eficientes e com consumo de energia reduzido.

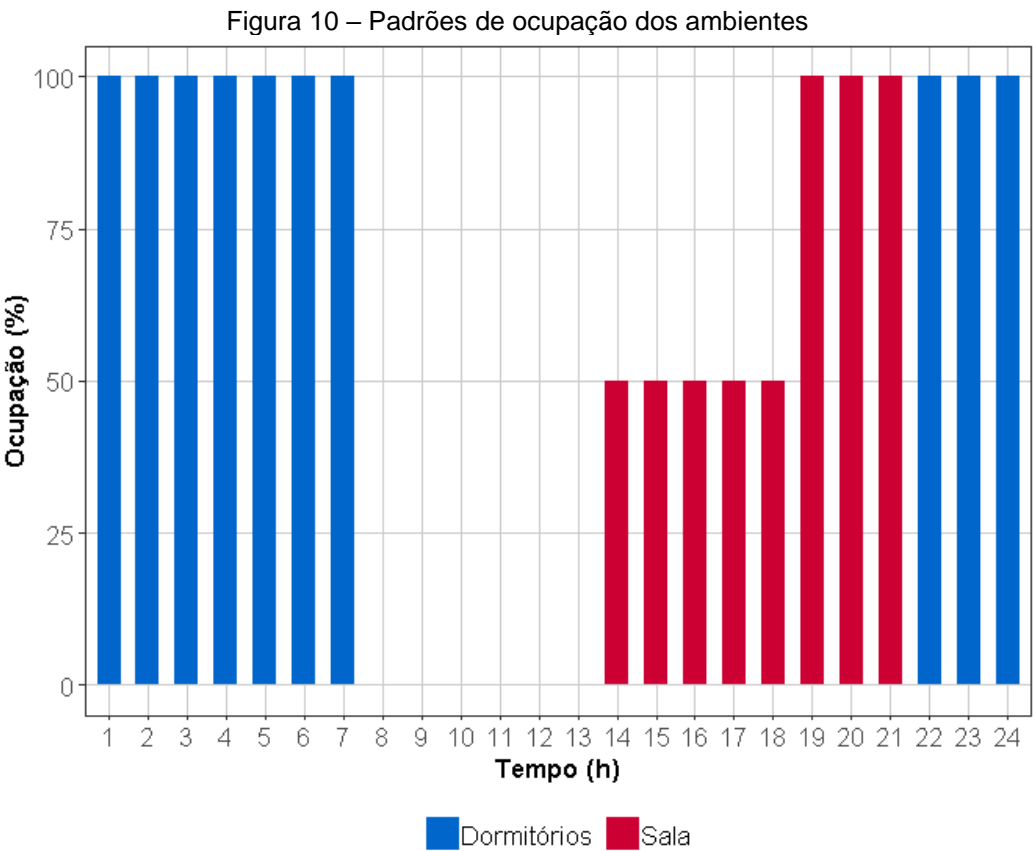
A INI-R especifica o uso de equipamentos somente na sala, com potência absoluta de 120W, que permanece ligado enquanto o ambiente encontra-se ocupado. Para todos os equipamentos, considerou-se uma fração radiante de 0,5.

3.2.5 Padrões de ocupação e uso do sistema de iluminação

Além das cargas internas, devem ser definidos os padrões de ocupação e uso do sistema de iluminação para os ambientes de permanência prolongada. Esses parâmetros foram modelados de acordo com a INI-R, que considera o mesmo padrão de ocupação e iluminação nos dias de semana e finais de semana.

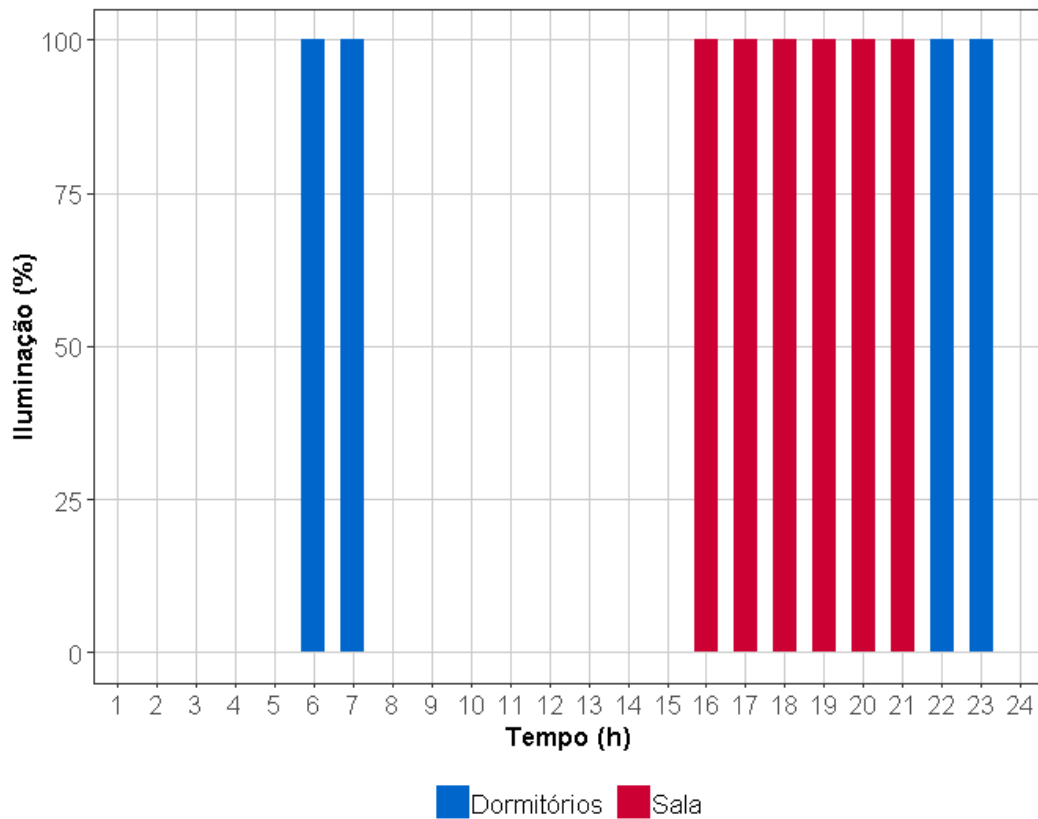
A Figura 10 apresenta os padrões de ocupação da sala (14:00 às 22:00 variando entre 50% e 100%) e dos dormitórios (22:00 às 08:00), destacando-se que não há ocupação na unidade habitacional das 08:00 às 14:00. As rotinas de uso do sistema de iluminação para a sala (16:00 às 22:00) e dormitórios (22:00 às 24:00 e 06:00 às 08:00) são ilustrada na Figura 11.

Após as configurações de cargas internas, foram modelados os sistemas de ventilação natural e condicionamento de ar, bem como a integração entre ambos os sistemas conforme os limites definidos da INI-R.



Fonte: Inmetro (2018)

Figura 11 – Rotinas de uso do sistema de iluminação



Fonte: Inmetro (2018)

3.2.6 Ventilação natural

O uso da ventilação natural em edificações pode proporcionar conforto térmico adequado aos usuários, sobretudo em regiões de clima quente, pois ameniza as temperaturas internas e mantém a renovação do ar. Tal estratégia também minimiza a utilização de sistemas de condicionamento artificial e, consequentemente, reduz o consumo de energia elétrica (PEREIRA *et al.*, 2013).

No *EnergyPlus*, o módulo de simulação referente à ventilação natural calcula o fluxo de ar entre zonas e o exterior através de frestas e aberturas. São consideradas aberturas para ventilação as portas e janelas da edificação. A modelagem do sistema de ventilação natural deve ser realizada considerando as características do entorno da edificação, condições de abertura das portas e janelas, além dos coeficientes relacionados à ventilação.

Esses parâmetros foram modelados de acordo com a INI-R, que fixa os valores de coeficiente de descarga, coeficiente e expoente de fluxo de ar pelas frestas e coeficiente de rugosidade do entorno (Tabela 3). A rugosidade superficial do entorno especificada pela INI-R se refere à edificação situada em centro urbano.

Tabela 3 – Parâmetros de entrada da ventilação natural

Parâmetro	Valores adotados
Coeficiente de descarga	0,60
Coeficiente (c) e expoente (n) de frestas quando a janela/porta está fechada	c = 0,001; n = 0,66
Coeficiente de rugosidade do entorno	0,33

Fonte: Inmetro (2018)

Com relação ao controle das aberturas, adotou-se o controle automático por temperatura para as janelas. Esse controle habilita a abertura das janelas quando a temperatura do ar no ambiente é superior a 19°C e quando a temperatura interna é superior à externa.

Na modelagem, as portas permanecem sempre fechadas e a janela do banheiro se mantém aberta, com ventilação constante. Se a temperatura interna dos APPs ultrapassa os limites de conforto térmico para ambientes ventilados naturalmente (18°C a 26°C), o sistema de condicionamento de ar é acionado.

3.2.7 Sistema de condicionamento de ar

Através dos sistemas de condicionamento de ar, é possível manter constantes as condições de conforto (temperatura) no ambiente. Em virtude disso, há um crescente aumento na utilização de sistemas de condicionamento artificial, seja para aquecimento ou resfriamento. Sendo assim, é importante que tais sistemas sejam considerados na simulação computacional. Além disso, podem ser utilizados como uma ferramenta capaz de quantificar a carga térmica necessária para manter constantes as temperaturas de conforto e, dessa maneira, verificar o nível de eficiência energética da edificação.

Optou-se por modelar o sistema de condicionamento artificial do tipo *Ideal Loads*, já que este sistema é capaz de atender a qualquer magnitude de carga térmica, como o próprio nome indica.

Vale lembrar que, como a cidade de Joinville pertence ao grupo climático 9 segundo a classificação de climas brasileiros proposta por Roriz (2014), deve-se considerar apenas o resfriamento dos APPs. Nesse caso, o sistema de resfriamento é acionado quando a temperatura operativa do ambiente é superior a 26°C e o ambiente encontra-se ocupado. Uma vez acionado, o sistema permanecerá ligado até finalizada a ocupação do ambiente e a temperatura de *setpoint* será de 23°C.

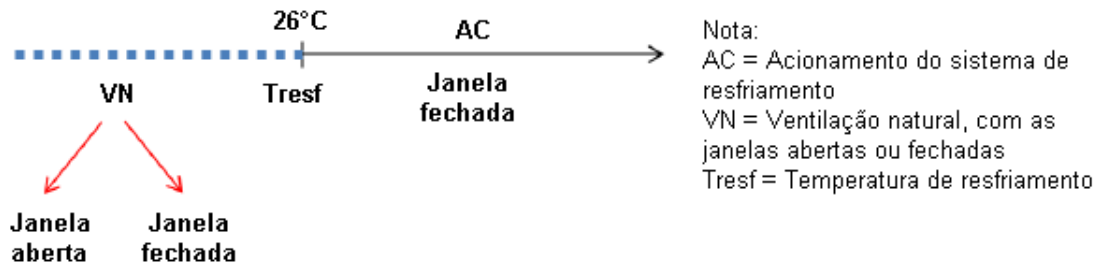
3.2.8 Controle de integração entre a ventilação natural e o sistema de condicionamento artificial

Na proposta da INI-R, foi incluído o uso de ventilação híbrida, que consiste na integração entre a ventilação natural e o sistema de condicionamento artificial. Através dessa estratégia, as aberturas utilizadas para ventilação natural e o sistema de condicionamento de ar foram automatizados, com funcionamento alternado, buscando reproduzir o comportamento do usuário (DEBIASI, 2016).

A alternância entre ambos os sistemas (ventilação natural e condicionamento artificial) é controlada conforme (i) temperatura interna do ambiente analisado e (ii) limites da zona de conforto térmico. As condições de conforto térmico são baseadas nos limites de 18°C a 26°C para ambientes naturalmente ventilados.

Desse modo, quando a temperatura interna ultrapassa os limites descritos anteriormente, o uso da ventilação natural é interrompido e o sistema de condicionamento de ar é acionado. No estudo, considerou-se apenas as situações de desconforto por calor, em que o sistema de resfriamento é acionado a partir da temperatura de 26°C (Figura 12), tal como determina a INI-R para o GC 9.

Figura 12 – Acionamento do sistema de resfriamento



Fonte: Adaptado de Debiasi (2016)

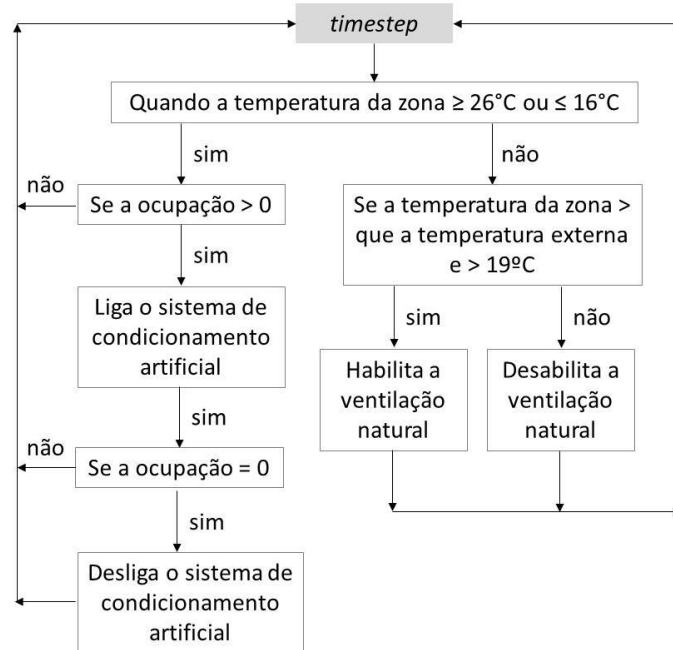
Outro aspecto relevante é que o acionamento do sistema de resfriamento está vinculado à ocupação do ambiente, sendo permitido o uso da ventilação natural ou sistema de condicionamento de ar somente nos períodos de ocupação dos APPs. No caso dos dormitórios, pode ser adotado o uso da ventilação natural quando o ambiente não está ocupado, desde que a sala esteja.

Para modelar essas condições no programa de simulação computacional, é necessário utilizar recursos de controle avançado. O algoritmo de controle da ventilação híbrida, cujo diagrama de funcionamento é ilustrado na Figura 13, foi

implementado por meio do recurso *Energy Management System* (EMS) disponível no *EnergyPlus*.

O EMS permite a leitura e troca de informações das variáveis de controle a cada *timestep*, durante o processamento da simulação. Foram considerados 6 *timesteps*, ou seja, o algoritmo é processado a cada 10 minutos por hora ao longo das 8760 horas simuladas. Adotou-se esse valor como sugerido pelo *Input-Output Reference* do *EnergyPlus* (DOE, 2018) para simulações com sistema de condicionamento artificial.

Figura 13 – Algoritmo de controle da ventilação híbrida



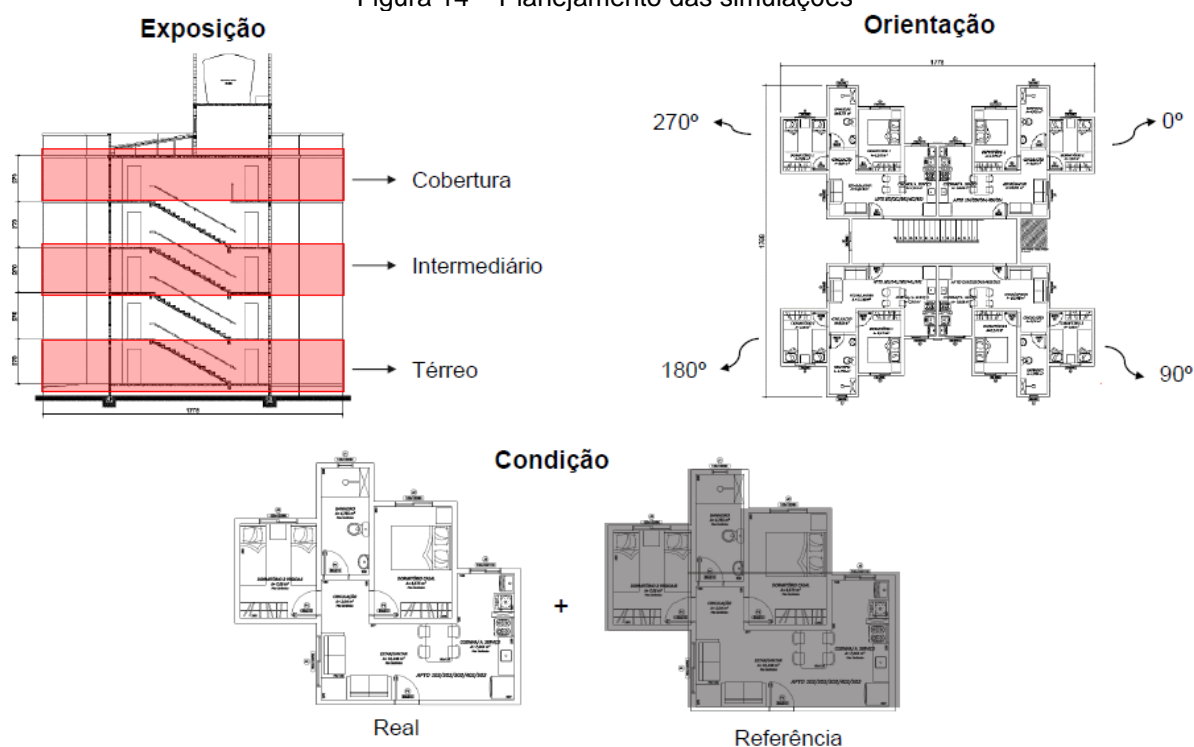
Fonte: Inmetro (2018)

Após a configuração de todos os parâmetros de entrada da simulação, foram definidos os casos a serem simulados com o intuito de analisar a classificação energética da envoltória, para diferentes orientações e níveis de exposição da UH.

3.2.9 Casos simulados

Como trata-se de edificações multifamiliares, o modelo computacional representativo foi simulado considerando três níveis de exposição (térreo, intermediário e cobertura), com quatro orientações (0°, 90°, 180° e 270°) e na condição real e de referência, totalizando 24 simulações. A Figura 14 apresenta o planejamento das simulações realizadas.

Figura 14 – Planejamento das simulações



Fonte: A autora (2020)

Nos casos simulados, o modelo possui a mesma geometria, composição de piso e laje entre os pavimentos da UH e tipologia das aberturas. Foram modeladas duas composições de envoltória, a primeira refere-se ao modelo representativo e a segunda conforme os parâmetros construtivos estabelecidos na INI-R.

Nessa etapa, foi utilizado o programa R para gerar os arquivos “.idf” dos casos simulados, permitindo a simulação em grupo no *EnergyPlus*. Para cada caso, foram definidos os valores das variáveis de entrada do modelo computacional. Os dados de saída foram então exportados para um único arquivo de extensão “.csv” contendo os resultados das simulações. Dessa forma, foi possível obter a carga térmica anual de resfriamento e classificar a eficiência energética da envoltória para os diferentes casos simulados.

3.2.10 Classificação da eficiência energética da envoltória

A classificação da eficiência energética da envoltória foi determinada para cada ambiente de permanência prolongada, assim denominados os ambientes de ocupação contínua como sala e dormitórios, em função da carga térmica obtida por

meio das simulações. Posteriormente, determinou-se o nível de eficiência da envoltória da UH, com base nos resultados individuais dos APPs.

Na determinação da classe energética da envoltória, foi necessário inicialmente calcular o percentual de redução da carga térmica de cada APP. Esse percentual é obtido pela diferença relativa entre os valores de carga térmica do APP analisado na condição real e de referência, conforme a Equação (1).

$$\%RedCgTR = \frac{(CgTR_{APPref} - CgTR_{APPreal})}{(CgTR_{APPref})} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

$\%RedCgTR$ - Percentual de redução da carga térmica para resfriamento do ambiente de permanência prolongada (%);

$CgTR_{APPref}$ - Carga térmica para resfriamento do ambiente de permanência prolongada da edificação de referência (kWh/m².ano);

$CgTR_{APPreal}$ - Carga térmica para resfriamento do ambiente de permanência prolongada da edificação real (kWh/m².ano).

A classificação energética dos APPs foi determinada comparando-se o percentual de redução da carga térmica de resfriamento do respectivo ambiente com o limite inferior de cada classe de eficiência da INI-R. Na sequência, foi calculado o equivalente numérico de eficiência energética do APP para resfriamento. É importante destacar que quanto maior o percentual de redução da carga térmica para resfriamento, mais eficiente será o APP e maior será o seu equivalente numérico.

Na INI-R, há quatro classes de eficiência energética (“A” a “D”), sendo que a carga térmica da condição de referência equivale à classe “C”. Nos casos em que o valor do percentual de redução da carga térmica é negativo (ou seja, a carga térmica real é superior à de referência), a classe de eficiência será “D” e o equivalente numérico do APP igual a 0.

Calculou-se também o equivalente numérico de eficiência energética da UH, obtido pela ponderação dos equivalentes numéricos dos APPs e suas respectivas áreas úteis, de acordo com a Equação (2). Desconsiderando-se o aquecimento dos APPs, tem-se que o equivalente numérico global da UH é igual ao seu equivalente numérico para resfriamento.

Ao final, foi determinado o nível de eficiência energética da envoltória da UH com base no seu equivalente numérico global comparando-se à escala de classificação energética da UH contida na INI-R (Figura 15). Para melhor visualização dos resultados, todos os gráficos foram elaborados através do pacote *ggplot2* disponível no programa R.

$$EqNumUH = EqNumUHR = \frac{(EqNum_{APP1} \cdot AU_{APP1} + \dots + EqNum_{APPn} \cdot AU_{APPn})}{(AU_{APP1} + \dots + AU_{APPn})} \quad (2)$$

Em que:

$EqNumUH$ - Equivalente numérico da unidade habitacional autônoma;

$EqNumUHR$ - Equivalente numérico da unidade habitacional autônoma para resfriamento;

$EqNum_{APP1...n}$ - Equivalente numérico dos ambientes de permanência prolongada para resfriamento;

$AU_{APP1...n}$ - Área útil dos ambientes de permanência prolongada (m²).

Figura 15 – Escala de classificação da eficiência energética da UH

A	B	C	D
$EqNumUH \geq 3$	$3 > EqNumUH \geq 2$	$2 > EqNumUH \geq 1$	$EqNumUH < 1$

Fonte: Inmetro (2018)

3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE GLOBAL

Nessa etapa, foram avaliados os parâmetros mais influentes no consumo energético da envoltória, através da análise de sensibilidade global desses parâmetros. A análise de sensibilidade tem sido amplamente utilizada para avaliar o desempenho térmico e energético de edificações, como já discutido no Item 2.4.

3.3.1 Parâmetros da análise de sensibilidade

Nessa etapa, primeiramente foram determinados os parâmetros a serem analisados e seus respectivos níveis, com base nas variáveis consideradas pela INI-R e as diretrizes construtivas da NBR 15220-3 para a zona bioclimática da cidade de

Joinville. Além disso, considerou-se também a NBR 15575 partes 4 e 5, que trata especificamente do desempenho dos sistemas de parede e cobertura da edificação.

No total, foram definidos 10 parâmetros construtivos relacionados às propriedades térmicas das superfícies, de modo a atender o nível mínimo de desempenho estabelecido em norma, e estratégias recomendadas para o clima de Joinville, como ventilação natural e sombreamento das aberturas. Os parâmetros da análise de sensibilidade e seus respectivos valores encontram-se descritos na Tabela 4.

A orientação solar refere-se ao azimuth, que foi variado de 90° em 90°, totalizando quatro diferentes orientações. Quanto à exposição do piso e cobertura, “0” significa que não há transferência de calor (superfície adiabática) e “1” que a superfície está em contato com o exterior.

Sobre o fator de ventilação das aberturas, considerou-se “0,5” para janela do tipo correr e “1” para janelas de abrir, que proporcionam maior ventilação ao ambiente. No caso do sombreamento das aberturas, “1” corresponde a existência de veneziana nos ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios) e “0” não há veneziana.

Tabela 4 – Parâmetros da análise de sensibilidade

Parâmetro	Abreviação	Unidade	Níveis	Valores
Orientação solar	OrientSolar	graus	4	0° / 90° / 180° / 270°
Exposição do piso	ExpPiso	adm	2	0 / 1
Exposição da cobertura	ExpCob	adm	2	0 / 1
Transmitância térmica da parede	UPar	W/(m².K)	3	1,24 / 2,45 / 2,69
Transmitância térmica da cobertura	UCob	W/(m².K)	3	0,55 / 1,52 / 2,06
Transmitância térmica do vidro	UVid	W/(m².K)	3	5,56 / 5,78 / 5,89
Absortância térmica da parede	αPar	adm	4	0,2 / 0,4 / 0,6 / 0,8
Absortância térmica da cobertura	αCob	adm	4	0,2 / 0,4 / 0,6 / 0,8
Fator de ventilação das aberturas	FVent	adm	2	0,5 / 1
Sombreamento nas aberturas	Somb	adm	2	0 / 1

Fonte: A autora (2020)

Os valores de transmitância térmica do vidro referem-se às aberturas com vidros de espessura 3mm, 6mm e 12mm. Quanto maior a espessura do vidro, menor a sua transmitância térmica.

Os parâmetros transmitância e absortância térmica estão relacionados às propriedades térmicas das superfícies. Os valores de absortância “0,2 e 0,4” são equivalentes a cores claras, enquanto que “0,6 e 0,8” equivalem a cores escuras.

Os materiais construtivos da envoltória foram definidos conforme as suas propriedades térmicas, atendendo simultaneamente aos limites estabelecidos na norma do zoneamento bioclimático brasileiro (NBR 15220) e norma de desempenho (NBR15575). Na Tabela 5, é mostrado um resumo dos limites admitidos para as propriedades térmicas das paredes e cobertura, de acordo com a zona bioclimática da cidade de Joinville.

Tabela 5 – Limites de propriedades térmicas das superfícies conforme NBR 15220 e NBR 15575

Superfície	NBR 15220	NBR 15575
Parede	$U \leq 3,6$	$\alpha \leq 0,6$ $U \leq 3,6$ $CT \geq 130$
		$\alpha > 0,6$ $U \leq 2,5$ $CT \geq 130$
Cobertura	$U \leq 2,0$	$\alpha \leq 0,6$ $U \leq 2,3$
		$\alpha > 0,6$ $U \leq 1,5$

* U – transmitância térmica (W/m^2K), CT – Capacidade térmica (kJ/m^2K), α – absortância (adm)

Fonte: ABNT (2005; 2013)

Na escolha dos materiais que compõem a envoltória, buscou-se utilizar aqueles que são mais empregados em habitações sociais e que atendessem aos limites definidos acima. A Tabela 6 apresenta as três configurações de envoltória para parede e cobertura utilizadas na análise de sensibilidade dos parâmetros termofísicos. Assim, foi possível definir diferentes combinações de envoltória para a análise de sensibilidade.

Destaca-se que os parâmetros da análise de sensibilidade foram considerados como variáveis discretas com distribuição de frequência uniforme, ou seja, todos os níveis de cada parâmetro têm a mesma probabilidade de ocorrência.

Considerando o planejamento fatorial completo com todas as possíveis combinações entre os fatores, seriam necessárias 27.648 simulações. Em razão disso, foi aplicado um método de amostragem com a finalidade de reduzir o número de simulações e, conseqüentemente, o esforço computacional exigido.

Tabela 6 – Materiais construtivos da envoltória

Envoltória	Descrição		
Parede	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (14,0x19x29,5cm) Argamassa externa (2,5cm) $U = 2,45 \text{ W/m}^2\text{K}$ $CT = 203 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Argamassa interna (2,5cm) Bloco concreto (14x19x39cm) Argamassa externa (2,5cm) $U = 2,69 \text{ W/m}^2\text{K}$ $CT = 272 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Concreto (10cm) Lã de rocha (2,5cm) Argamassa externa (2,5cm) $U = 1,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ $CT = 281 \text{ kJ/m}^2\text{K}$
Cobertura	Laje maciça (10cm) Câmara de ar (> 5cm) Telha fibrocimento $U = 2,06 \text{ W/m}^2\text{K}$ $CT = 233 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Laje pré-moldada (12cm, sendo concreto 4cm + EPS 7cm + argamassa 1cm) Câmara de ar (> 5cm) Telha fibrocimento $U = 1,52 \text{ W/m}^2\text{K}$ $CT = 145 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Laje maciça (10cm) Câmara de ar (> 5cm) Telha metálica (0,1cm) Poliuretano (4cm) Telha metálica (0,1cm) $U = 0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$ $CT = 230 \text{ kJ/m}^2\text{K}$

Fonte: A autora (2020)

3.3.2 Amostragem pelo método hipercubo-latino

No presente trabalho, foi realizada uma amostragem aleatória pelo método hipercubo-latino, por meio do programa R utilizando o pacote “LHS” (sigla em inglês para *Latin Hypercube Sampling*). Desse modo, foram amostrados 1000 casos pelo hipercubo-latino possibilitando uma ampla análise do impacto dos parâmetros construtivos sobre o consumo energético da envoltória, sem alterar a confiabilidade dos resultados finais.

Ressalta-se que poucos estudos na literatura abordam recomendações e estimativas do tamanho da amostra para aplicação do método hipercubo-latino, constituindo-se uma lacuna a ser pesquisada e analisada no âmbito da simulação computacional em edificações. Alguns autores recomendam que o número de simulações computacionais seja maior que 80 (MACDONALD; STRACHAN, 2001), outros recomendam que seja superior a 3/2 do número de parâmetros (BREESCH; JANSSENS, 2010). Em ambos os casos, o número escolhido neste estudo é suficientemente satisfatório.

Na amostragem pelo hipercubo-latino, foram observados os limites para as propriedades térmicas da envoltória - mais precisamente, transmitância e absorptância térmica – como indicado na Tabela 5. Utilizou-se também o programa “R” para gerar os arquivos “.idf” dos 1000 casos conforme os valores obtidos por amostragem de cada parâmetro, permitindo a sua simulação em grupo.

A partir dos resultados das simulações, foi possível verificar a sensibilidade de cada parâmetro, bem como analisar os casos que obtiveram melhor desempenho frente às medidas de eficiência energética adotadas.

3.3.3 Análise de sensibilidade pelo método de regressão

Como foi escolhido um método de amostragem aleatória, não podem ser utilizados os métodos baseados na variância para verificar a sensibilidade dos parâmetros (SILVA; GHISI, 2013; SORGATO, 2015). Assim sendo, a análise de sensibilidade global foi realizada pelo método dos coeficientes de regressão padronizados e coeficientes de correlação parcial, mais conhecidos como SRC e PCC (sigla em inglês). Tais métodos, baseados em regressão, são os mais utilizados para análise de sensibilidade em simulações termoenergéticas de edificações, como mencionado no Item 2.4.1 da revisão da literatura.

O SRC é baseado em um modelo de regressão linear multivariada, expresso na Equação (3), e possibilita mensurar a força de correlação entre as variáveis dependentes e independentes do modelo.

O uso da técnica de regressão permite que a análise de sensibilidade seja realizada com base na magnitude dos coeficientes de regressão, determinados com o método dos mínimos quadrados. Esse valor indica o poder de influência que o parâmetro tem no modelo como um todo (HAMBY, 1994).

$$y_i = \beta_0 + \sum_j \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (3)$$

Onde:

y_i - Valor de cada variável dependente;

x_{ij} - Valor de cada variável independente;

β_j - Coeficientes de cada variável independente;

$i = 0, 1, \dots, m$;

$j = 0, 1, \dots, n$;

m - Número de dados da amostra;

n - Número de variáveis independentes.

Em muitos casos, devido às unidades e magnitude relativa dos parâmetros, deve ser aplicado um processo de padronização para remover a influência das unidades e colocar todos os parâmetros no mesmo nível (GÁLVEZ; CAPUZ-RIZO, 2016).

A diferença entre SRC e PCC é que o PCC é calculado com base em correlações completas e correlações parciais, permitindo determinar a força de correlação linear entre dois parâmetros, excluindo-se todos os efeitos das variáveis independentes entre si. A confiabilidade da análise de sensibilidade utilizando esses métodos depende fortemente do R^2 do modelo linear (NGUYEN; REITER, 2015).

Na pesquisa, utilizou-se o pacote *sensitivity* do programa R para a determinação dos coeficientes SRC e PCC, com nível de confiança de 95%. Ambos os coeficientes foram determinados para cada ambiente de permanência prolongada (sala e dormitórios) e para a unidade habitacional.

No total, foram analisadas 10 variáveis independentes descritas no Item 3.3.1 e uma variável dependente que é consumo energético anual da envoltória, calculado por meio da Equação (4).

Dessa forma, os valores referentes à carga térmica de resfriamento obtidos nas 1000 simulações são convertidos em consumo energético por meio da eficiência do sistema de condicionamento de ar. Utilizou-se o valor de 3,24 como coeficiente de performance da máquina, conforme especifica a INI-R.

$$C_{UH} = CR_{UH} = \frac{(CgTR_{APP_1} + \dots + CgTR_{APP_n})}{COP} \quad (4)$$

Em que:

C_{UH} - Consumo energético da edificação (kWh/ano);

CR_{UH} - Consumo energético anual para resfriamento (kWh/ano);

$CgTR_{APP_{1...n}}$ - Carga térmica para resfriamento dos ambientes de permanência prolongada (kWh/ano);

COP - Coeficiente de performance do sistema de condicionamento de ar (W/W).

3.4 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA

Na engenharia, apesar da preocupação com a viabilidade técnica de um projeto, é importante também analisar a sua viabilidade econômica e financeira. Na presente pesquisa, a análise de viabilidade econômico-financeira foi realizada para 5 dentre os 1000 casos simulados que obtiveram melhor desempenho energético.

Através dessa análise, foi possível verificar se o investimento é viável em termos financeiros, assim como prever o tempo mínimo para retorno de tal investimento em um comparativo com outras alternativas de mercado.

3.4.1 Período de retorno do investimento

Um dos principais cálculos para análise da viabilidade econômico-financeira de um projeto é o período de retorno do investimento, mais conhecido como *payback*. Trata-se de um indicador que permite identificar o tempo necessário para que um investimento comece a apresentar efetivamente lucro (balanço positivo), após o pagamento do capital investido.

Considerando que houve uma economia de energia nos casos analisados, e que essa economia pode ser transformada em unidade monetária, utilizou-se a seguinte fórmula para o cálculo do *payback*:

$$Payback = \frac{Investimento\ inicial}{Economia\ mensal} \quad (5)$$

O Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI disponibiliza mensalmente um relatório com referências de preços de insumos e de custos de composições de serviços da construção civil (CAIXA, 2020). Desse modo, para cada caso simulado, foi estimado o investimento inicial conforme a base de referência de preços do SINAPI, referente ao mês de fevereiro de 2020 e com encargos sociais desonerados.

No cálculo da economia mensal, considerou-se o valor da tarifa de energia elétrica incluindo os tributos federais e estaduais, de acordo com a Equação (6). Os tributos federais referem-se ao Programa de Integração Social – PIS e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social – COFINS, com alíquota de 1,19% e 5,48% em fevereiro de 2020. Outro tributo incidente é o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços – ICMS, com alíquota variando entre 12% para consumo residencial de até 150 kWh e 25% para consumo acima de 150 kWh em Santa Catarina.

$$Tarifa\ final = \frac{Tarifa_{ANEEL}}{1 - (PIS + COFINS + ICMS)} \quad (6)$$

Além da tarifa convencional, existe também a tarifa social na qual são concedidos descontos para famílias de baixa renda até o limite de consumo de 220kWh. Para ter direito a esse benefício do governo federal, é necessário comprovar determinados requisitos instituídos pela ANEEL. Nessa fase da pesquisa, foram analisados dois cenários considerando ambos os tipos de tarifa, descritos a seguir:

Tabela 7 – Valores das tarifas convencional e social

Cenário	Classificação Subgrupo B1 - Residencial	Desconto	Tarifa (R\$/kWh)
1	Normal	-	0,46978
2	Baixa renda até 30kWh	65%	0,16442
	Baixa renda de 31 a 100Wh	40%	0,28187
	Baixa renda de 101 a 220Wh	10%	0,42280

Fonte: ANEEL (2019)

Após a aplicação das alíquotas dos tributos e obtenção dos valores finais das tarifas, foi calculada a economia mensal pela Equação (7), com base na diferença do consumo de energia dos cinco casos analisados em relação ao caso base.

$$Economia\ mensal = Tarifa\ final * Diferença\ de\ consumo \quad (7)$$

Por fim, foi calculado o *payback* através da Equação (5), sendo possível determinar o período em meses necessário para recuperação do investimento inicial e comparar com a vida útil de projeto. No caso em apreço, considerou-se uma vida útil de projeto de 20 anos, como especificado na norma de desempenho (NBR 15.575-1) para os sistemas de vedação vertical e cobertura. Assim sendo, o projeto é viável se o seu *payback* for inferior a 20 anos, que equivale a 240 meses.

O *payback* é um método bastante utilizado, pois apresenta um cálculo simples e resultado de fácil compreensão, porém não considera uma importante variável na análise econômico-financeira: a desvalorização da moeda. Por isso, foi calculado também o *payback* descontado, que é o período na qual a soma dos fluxos de caixa descontados é igual ao investimento inicial. Ambos possuem os mesmos critérios para análise de viabilidade de um projeto.

Nessa etapa, calculou-se mês a mês o valor presente das economias mensais de energia, bem como o fluxo de caixa descontado. Utilizou-se como taxa de inflação

o Índice de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA, o qual tem por objetivo medir a inflação de um conjunto de produtos e serviços comercializados no varejo, sendo considerado o índice oficial de inflação do país e reflete as estratégias de controle inflacionário aplicadas pelo estado. Como a economia é muito variável e depende de inúmeros fatores, utilizou-se como referência para o IPCA a média dos últimos 10 anos, com valor de 0,49%a.m. e 5,85%a.a.

3.4.2 Valor presente líquido e taxa interna de retorno

A economia no âmbito nacional e global é influenciada por diversas variáveis que afetam diretamente a análise econômico-financeira de finanças e podem até mesmo inviabilizar determinado investimento. Por isso, é importante realizar uma análise baseada em critérios bem definidos e confiáveis, que considerem, dentre outros fatores, a taxa de inflação e os riscos de um investimento. Sob o ponto de vista prático quanto à viabilidade econômico-financeira de um projeto, é fundamental considerar os aspectos do cotidiano que podem influenciar a aplicabilidade do investimento - como inflação, risco e taxa de retorno.

Diante disso, foram utilizados outros indicadores econômicos como VPL e TIR com o intuito de verificar se o projeto é de fato viável. Esses indicadores foram calculados para os cinco casos analisados, considerando dois cenários da pesquisa: tarifa de energia elétrica convencional e social.

O Valor Presente Líquido – VPL considera o valor do dinheiro no tempo e traz para o valor presente os fluxos de caixa futuros, utilizando-se como taxa de desconto a taxa mínima de atratividade. Nessa forma de cálculo, objetiva-se trazer para valores atuais todos os retornos com o projeto, descontando-se o investimento inicial. Consequentemente, o projeto é viável se o VPL for superior a zero. O cálculo do VPL encontra-se descrito na Equação (8).

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} - FC_0 \quad (8)$$

Onde:

VPL - Valor presente líquido;

FC_t - Fluxo de caixa no período t ;

FC_0 - Investimento inicial;

TMA - Taxa mínima de atratividade;

n - Duração total do projeto.

No caso específico, o fluxo de caixa inicial refere-se ao valor investido na edificação, os fluxos de caixa ao longo do tempo são as economias mensais da redução no consumo de energia e *n* é a vida útil do projeto estimada em 20 anos.

Outra forma eficaz e muito utilizada para analisar a viabilidade econômico-financeira de um projeto é a Taxa Interna de Retorno – TIR. A TIR é a taxa que iguala o valor presente das entradas ao valor presente das saídas no fluxo de caixa, ou seja, é a taxa de juros que resulta em VPL zero como indicado na Equação (9). Considera-se que o projeto é viável se a TIR for maior que o retorno exigido para o investimento, devendo ser superior a Taxa Mínima de Atratividade - TMA.

Na presente pesquisa, utilizou-se como TMA o Certificado de Depósito Interbancário - CDI considerando a média dos últimos 10 anos, da mesma forma que o indicador inflacionário IPCA. A escolha da taxa CDI deve-se ao fato de que, embora a poupança seja o investimento mais tradicional no Brasil, esta não é indicada devido a sua baixa rentabilidade.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - FC_0 \quad (9)$$

Onde:

TIR - Taxa interna de retorno do investimento;

FC_t - Fluxo de caixa no período *t*;

FC₀ - Investimento inicial;

n - Duração total do projeto.

Atualmente, há outras opções de investimentos em renda fixa disponíveis no cenário nacional, sendo que o CDI é uma das principais referências nesta modalidade de investimento. Dessa forma, foi considerada a taxa de rentabilidade real, que é a rentabilidade absoluta descontado o valor da inflação, chegando em um valor de TMA igual a 0,095% a.m.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos na pesquisa mediante a aplicação do método de simulação da INI-R, para análise do desempenho termoenergético da envoltória de habitações multifamiliares de interesse social localizadas na cidade de Joinville.

Primeiramente, realizou-se a caracterização das habitações sociais em termos quantitativos e qualitativos. Logo após, são mostrados os resultados da definição do modelo representativo dessas habitações para uso em simulação computacional. Em seguida, é indicada a classificação de eficiência energética da envoltória para os ambientes de permanência prolongada e unidade habitacional, considerando os diferentes casos simulados.

Depois disso, são apresentados os resultados da análise de sensibilidade, na qual são elencados os parâmetros mais influentes no consumo de energia da envoltória. Ao final, é discutida a viabilidade econômico-financeira dos casos que obtiveram melhor desempenho termoenergético na etapa de análise de sensibilidade.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS HABITAÇÕES SOCIAIS DE JOINVILLE/SC

Na etapa de coleta dos dados, foi possível levantar as características das habitações sociais localizadas na cidade de Joinville, necessárias para a determinação do modelo representativo e sua configuração computacional. Destaca-se que foram encontradas divergências entre os projetos e memoriais descritivos dessas habitações, principalmente no que trata das características construtivas. Nesses casos, foram consideradas as informações contidas nos projetos.

Quanto à caracterização das habitações analisadas, pode-se dizer que são conjuntos habitacionais de grande porte, pois juntos somam 2124 apartamentos com número de blocos de até 49, como mostra a Tabela 8. Para melhor visualização, no Apêndice B são apresentadas imagens aéreas e vistas externas das edificações.

As habitações possuem em torno de 4 e 5 pavimentos por bloco, com 4 apartamentos em cada pavimento. Os apartamentos contam com sala, cozinha, banheiro, dois dormitórios e, em sua maioria, área de circulação entre os dormitórios. A sala e cozinha são ambientes integrados na maioria dos casos, não havendo divisória entre esses ambientes.

Tabela 8 - Características das habitações sociais de Joinville/SC

Habitação social	Apartamentos	Blocos	Pavimentos por bloco	Apartamentos por pavimento
H1	100	3	5	8
				4
H2	280	14	5	4
H3	320	20	4	4
H4	640	40	4	4
H5	784	49	4	4
Total	2124	-	-	-

Fonte: A autora (2020)

As informações levantadas nessa primeira etapa permitiram caracterizar o objeto de estudo, além de auxiliar nas etapas seguintes de análise descritiva dos dados e definição do modelo representativo para uso em simulação computacional.

4.2 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Como visto no Item 3.1.2, os dados levantados foram divididos em variáveis quantitativas e qualitativas. Após isso, realizou-se uma análise descritiva dos dados em questão, por meio das medidas de tendência central (média, moda) e dispersão (desvio padrão). Foi definido também o intervalo de confiança de 95% para a média dos dados quantitativos.

Na Tabela 9 e Tabela 10, são apresentados os resultados do teste de Shapiro-Wilk, estatística descritiva e intervalos de confiança das variáveis quantitativas. Analisando-se o desvio padrão, nota-se que em geral não houve uma alta variabilidade do conjunto de dados. Em outras palavras, observa-se que na maioria dos casos, o desvio padrão está com um valor abaixo de 10% em relação a média dos valores, indicando que não há uma dispersão muito elevada.

Com relação ao teste de Shapiro-Wilk, a probabilidade de significância foi superior ao nível de significância adotado ($p\text{-valor} > 0,05$) em todas as variáveis consideradas. Consequentemente, não há evidências para rejeitar a hipótese nula de que os dados são normalmente distribuídos e, portanto, a aproximação pela distribuição *t* de *Student* pode ser aplicada. Desse modo, foram determinados os limites inferior e superior do intervalo para cada variável quantitativa, com nível de confiança de 95%. Lembrando que as variáveis quantitativas se referem a área dos

ambientes, área total da unidade habitacional e percentual de abertura dos ambientes de permanência prolongada, como descrito no Item 3.1.2.

Tabela 9 - Estatística descritiva e intervalo de confiança da área dos ambientes e da UH

Área (m²)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	P-valor ($\alpha=0.05$)	Intervalo de confiança (95%)		Valores adotados
						Inferior	Superior	
Sala	10,25	12,40	11,43	1,06	0,07	10,12	12,74	10,25
Cozinha	5,82	7,87	6,84	0,96	0,24	5,65	8,04	7,02
Dormitório 1	8,40	9,28	8,69	0,36	0,18	8,25	9,13	8,58
Dormitório 2	6,72	7,62	7,24	0,37	0,64	6,78	7,69	7,08
Banheiro	2,88	5,04	4,15	0,84	0,75	3,10	5,20	4,76
Circulação	1,23	2,04	1,51	0,46	0,06	0,37	2,65	2,04
Área total da UH	38,01	40,43	39,25	0,90	0,89	38,14	40,37	39,71

Fonte: A autora (2020)

Tabela 10 - Estatística descritiva e intervalo de confiança do percentual de abertura

Percentual de abertura (%)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	P-valor ($\alpha=0,05$)	Intervalo de confiança (95%)		Valores adotados
						Inferior	Superior	
Sala	5,57	17,59	13,42	0,05	0,29	7,40	19,43	15,13
Dormitório 1	15,52	17,14	16,60	0,01	0,23	15,79	17,41	16,79
Dormitório 2	18,90	21,43	19,94	0,01	0,62	18,66	21,22	20,34

Fonte: A autora (2020)

A moda dos dados qualitativos, ou seja, características mais frequentes na amostra estão relacionadas na Tabela 11 e Tabela 12. Cabe destacar que as propriedades das aberturas e composições dos componentes construtivos da envoltória são semelhantes nas habitações sociais analisadas, diferenciando-se entre si em poucos aspectos.

No que diz respeito às propriedades das aberturas (Tabela 11), foram encontradas predominantemente janelas de correr com duas folhas nos ambientes de permanência prolongada e cozinha, bem como janela maxim-ar no banheiro. Ambos os tipos de janela possuem esquadria de alumínio e vidro simples de 3mm.

Em relação à composição da envoltória (Tabela 12), observou-se de forma mais recorrente piso em contato direto com solo, paredes de alvenaria estrutural com bloco cerâmico, revestimento interno/externo nas paredes e cobertura composta por laje maciça de concreto e telha de fibrocimento.

Tabela 11 - Propriedades das aberturas

Aberturas (janela)	Dimensões (cm)	Área (m²)	Tipo	Material
Sala	160x120	1,92	correr (2 folhas)	esquadria de alumínio e vidro simples (3mm)
Dormitórios	120x120	1,44	correr (2 folhas)	esquadria de alumínio e vidro simples (3mm)
Cozinha	100x100	1,00	correr (2 folhas)	esquadria de alumínio e vidro simples (3mm)
Banheiro	60x60	0,36	maxim-ar	esquadria de alumínio e vidro simples (3mm)

Fonte: A autora (2020)

Tabela 12 - Composição da envoltória

Envoltória	Composição
Piso	contato com o solo, laje e piso cerâmico
Parede	alvenaria estrutural de bloco cerâmico (14x19x29cm), com revestimento interno/externo (2cm) e pintura
Cobertura	laje maciça de concreto (10cm) e telha de fibrocimento (6mm)

Fonte: A autora (2020)

4.3 DETERMINAÇÃO DO MODELO REPRESENTATIVO PARA USO EM SIMULAÇÃO

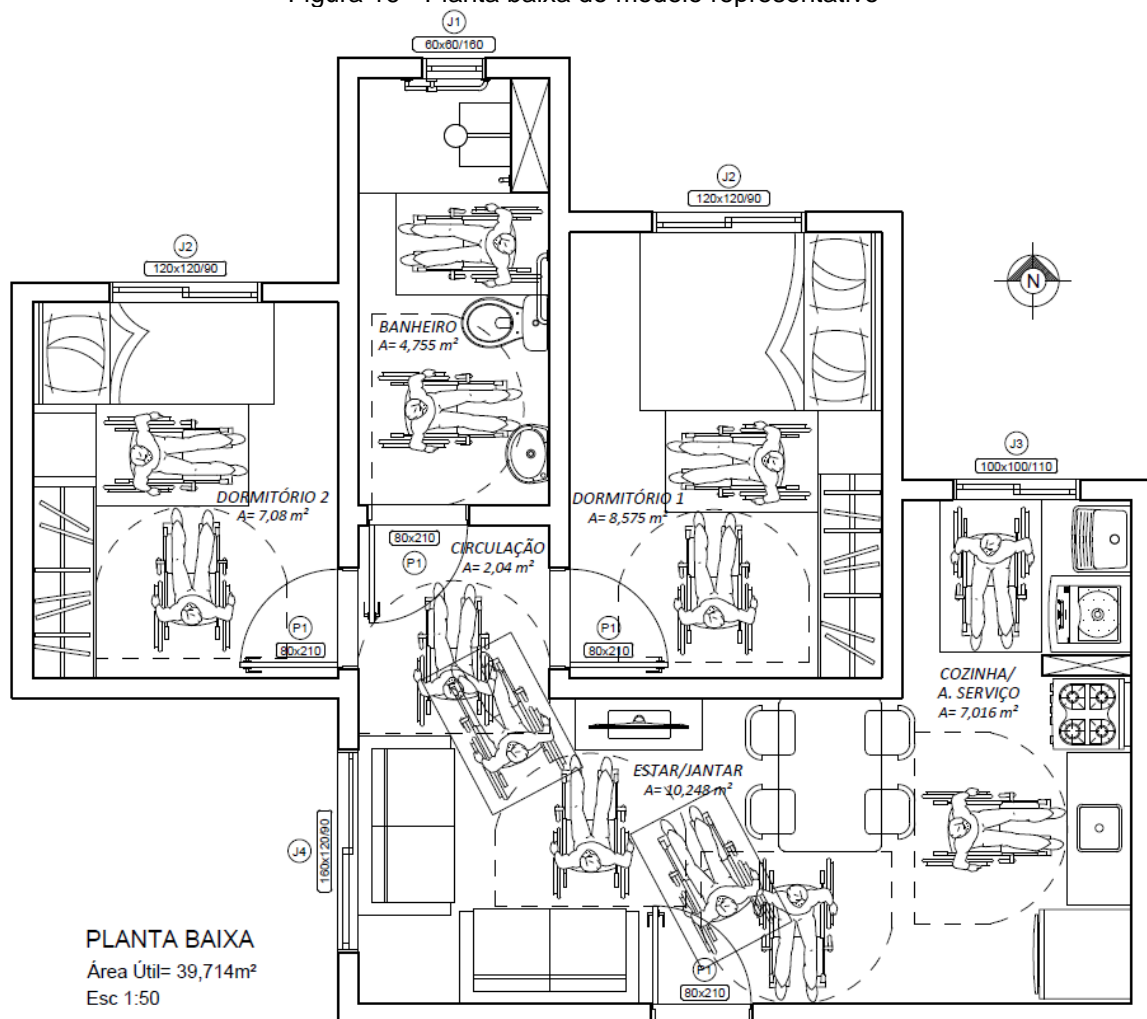
A partir dos critérios explicitados no Item 3.1.2, determinou-se o modelo representativo das habitações sociais de Joinville, que foi utilizado como caso base nas análises posteriores. Os valores da última coluna da Tabela 9 e Tabela 10 referem-se à habitação de interesse social definida como modelo representativo, cujas características atendem aos limites do intervalo de confiança dos dados quantitativos e a moda dos dados qualitativos, assim como a exigência do PMCMV para acessibilidade das unidades habitacionais e atendimento da NBR 9050 (2015).

É importante reforçar que nessa etapa foi escolhida uma habitação da amostra que atendia simultaneamente esses critérios, ou seja, o modelo não foi criado e sim escolhido dentre as habitações analisadas. O modelo representativo possui 39,71m² de área total e 3 ambientes de permanência prolongada (sala e dois dormitórios), sendo que as dimensões dos ambientes são indicadas na Tabela 9. O percentual de abertura dos ambientes de permanência prolongada atende ao limite mínimo de 14% exigido pela INI-R para o caso localizado na cidade de Joinville, como pode ser visto na Tabela 10.

A planta baixa e modelagem geométrica do modelo representativo são apresentadas na Figura 16 e Figura 17, respectivamente. O projeto arquitetônico do modelo representativo, com planta baixa e cortes longitudinal/transversal pode ser visualizado no Apêndice A.

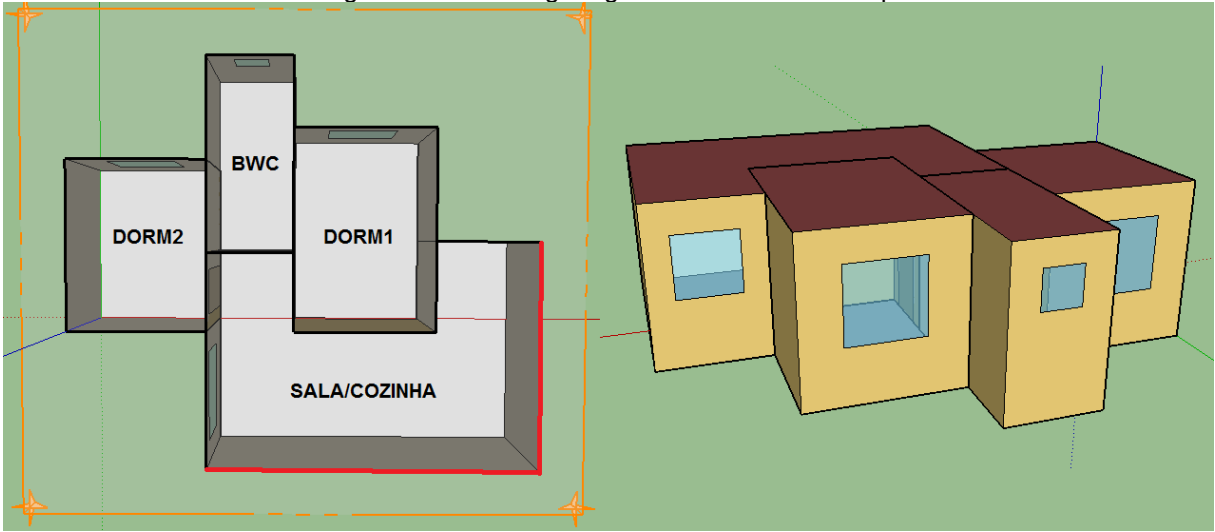
Vale mencionar que a planta baixa da unidade habitacional representativa atende às especificações da norma de acessibilidade, sendo acessível a pessoas em cadeira de rodas. Para verificar as exigências de projeto contidas na referida norma, elaborou-se um lista considerando os seguintes itens: módulo de referência, áreas de aproximação, manobra e transferência, circulação interna, entre outros, conforme Tabela 13.

Figura 16 - Planta baixa do modelo representativo



Fonte: A autora (2020)

Figura 17 - Modelagem geométrica no SketchUp



Fonte: A autora (2020)

Tabela 13 - Checklist com as especificações de projeto da NBR 9050

Portas	Portas com largura mínima de 0,80m e altura livre de 2,10m
	Largura mínima de 1,50m (sentido da abertura) e 1,20m (sentido contrário da abertura) em frente à porta
	Espaço lateral à porta de 0,60m (sentido da abertura) e 0,30m (sentido contrário da abertura) que possibilite a aproximação à maçaneta
Janelas	Altura do peitoril permite o alcance visual do usuário de cadeira de rodas (1,15m)
Sanitário	Dimensões permitem circulação com giro de 360° (Ø 1,50m)
Bacia sanitária	Área de transferência (0,80m x 1,20m) lateral, diagonal e perpendicular
Chuveiro	Boxe com dimensão mínima de 0,90m x 0,95m
	Área de transferência (0,80m x 1,20m) externa ao boxe, permitindo a aproximação paralela da pessoa em cadeira de rodas
Lavatório	Área de aproximação frontal (0,80m x 1,20m) para usuários em cadeiras de rodas

Fonte: ABNT (2015)

O modelo representativo mostrado na Figura 17 possui quatro zonas térmicas, em que três são ambientes de permanência prolongada e uma de ocupação transitória. A sala e cozinha são considerados ambientes integrados, uma vez que não há separação por parede ou divisória. Há cinco aberturas para ventilação natural, das quais quatro pertencem à mesma fachada. A parede de divisória entre as UHs e aquela voltada para o corredor de acesso (com destaque em vermelho na Figura 17) foram considerados como superfícies adiabáticas na simulação computacional, além do piso e laje da UH nos pavimentos intermediários.

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com a pesquisa de Cechinel (2017), descrita no Item 2.3.2, nota-se uma diferença no modelo representativo

encontrado para simulação computacional. As habitações sociais analisadas em ambos os estudos foram as mesmas, porém essa diferença pode ser explicada pelo fato de que foram utilizados métodos distintos para definição do modelo representativo. Neste estudo, foi realizado um levantamento das características físicas e construtivas das habitações e, baseado no intervalo de confiança de 95% e moda do conjunto de dados, definiu-se o modelo representativo da amostra. No estudo de Cechinel (2017), primeiramente foi aplicado o método prescritivo do RTQ-R e com base na pontuação obtida para cada edificação, foi definido então o modelo representativo. Sendo assim, pode-se perceber que é muito importante a definição da metodologia a ser adotada, pois influencia diretamente no delineamento da pesquisa e resultados encontrados.

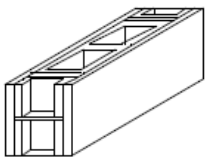
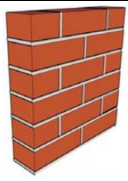
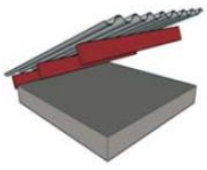

4.4 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os parâmetros da simulação referentes à envoltória foram definidos com base nas propriedades das aberturas e composição dos elementos construtivos da envoltória. Desse modo, foram modeladas duas composições de paredes externas e cobertura. A primeira refere-se ao modelo representativo, enquanto a segunda diz respeito aos parâmetros construtivos da condição de referência definidos na INI-R. As propriedades térmicas e composição construtiva dessas superfícies são indicadas na Tabela 14.

É importante mencionar que, a INI-R estabelece para a condição de referência um fator de abertura para ventilação dos ambientes de permanência prolongada de 0,5 (abertura de 50%) e os vidros das aberturas devem ser considerados vidros simples de 3 mm, com fator solar de 0,87 e transmitância térmica de 5,7 W/m².K (INMETRO, 2018). Tais características são encontradas no modelo representativo e, portanto, foi considerada uma única composição de vidro em todos os casos simulados, com as propriedades térmicas e óticas da Tabela 15.

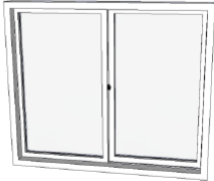

No programa EnergyPlus, a modelagem dos elementos construtivos da envoltória é realizada através da inserção de materiais com camadas paralelas entre si e perpendiculares ao fluxo de calor. Assim, para modelar as composições da envoltória do modelo representativo, cujos valores de transmitância e capacidade térmica constam na Tabela 14, foi necessário desmembrá-las em camadas com diferentes materiais.

Tabela 14 – Propriedades térmicas das paredes e cobertura

Superfície	Composição construtiva		Transmitância térmica (W/m ² .K)	Capacidade térmica (kJ/m ² .K)	Absortância
Parede		<u>Condição real</u> Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico de 2 furos (14,0x19,0x29,0cm) Argamassa externa (2,5cm) Pintura externa	2,45	203	0,4
		<u>Condição referência</u> Sem revestimento interno Tijolo maciço (9,0x6,0x19,0cm) Sem revestimento externo	3,65	158	0,6
Cobertura		<u>Condição real</u> Laje maciça (10,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha fibrocimento	2,06	233	0,8 ⁴
		<u>Condição referência</u> Forro madeira (1,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha cerâmica	2,02	26	0,4 ⁵

Fonte: A autora (2020)

Tabela 15 – Propriedades térmicas e óticas do vidro

Ambiente	Tipo de janela		Fator de abertura	Composição	Transmitância térmica (W/m ² .K)	Fator solar (adm)
Sala, cozinha e dormitórios		<u>Condição real e referência</u> De correr (2 folhas)	0,5	Vidro simples 3mm	5,70	0,87
Banheiro		<u>Condição real e referência</u> Maxim-ar (abertura 90°)	0,8	Vidro simples 3mm	5,70	0,87

Fonte: A autora (2020)

⁴ Foi considerado o valor de absortância à radiação solar para a telha de fibrocimento na condição “suja”, baseado no estudo de Silveira, Marinoski e Lamberts (2012).

⁵ O valor médio de absortância adotado equivale à tons claros de amarelo (ex. palha, pérola, marfim), obtido segundo o anexo V da portaria Inmetro nº 50/2013 (atualizado em 2017).

Na Tabela 16 e Tabela 17, são elencadas as propriedades termofísicas de cada material e características das câmaras de ar utilizados na simulação computacional.

Tabela 16 – Propriedades físicas e térmicas dos materiais

Material	Espessura (cm)	Condutividade térmica (W/m.K)	Peso específico aparente (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Absortância (adm)
Tijolo maciço	9,00	0,90	1800	920	0,60
Bloco cerâmico	1,50	0,90	3732	920	0,70
Argamassa reboco	2,00	1,15	2000	1000	0,40
Laje maciça de concreto	10,00	1,75	2200	1000	0,70
Forro de madeira	1,00	0,15	600	1340	0,40
Telha cerâmica	1,00	1,05	2000	920	0,40
Telha de fibrocimento	6,00	0,95	1900	840	0,80
Piso cerâmico	0,75	1,05	2000	920	0,70
Porta de madeira	3,00	0,15	614	2300	0,40

Fonte: A autora (2020)

Tabela 17 – Características das câmaras de ar não ventiladas

Câmara de ar	Natureza da superfície	Espessura (cm)	Fluxo de calor	Resistência térmica (m ² K/W)
Parede	Alta emissividade	2,0 – 5,0	Horizontal	0,16
Cobertura	Alta emissividade	> 5,0	Descendente	0,21

Fonte: A autora (2020)

Finalizadas as configurações dos parâmetros de entrada do programa *EnergyPlus*, foram executadas as simulações termoenergéticas e obtidos os dados de saída. Em seguida, determinou-se a classificação de eficiência energética da envoltória conforme o método de simulação da INI-R, como detalhado no Item 3.2.10.

4.5 CLASSIFICAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DA ENVOLTÓRIA

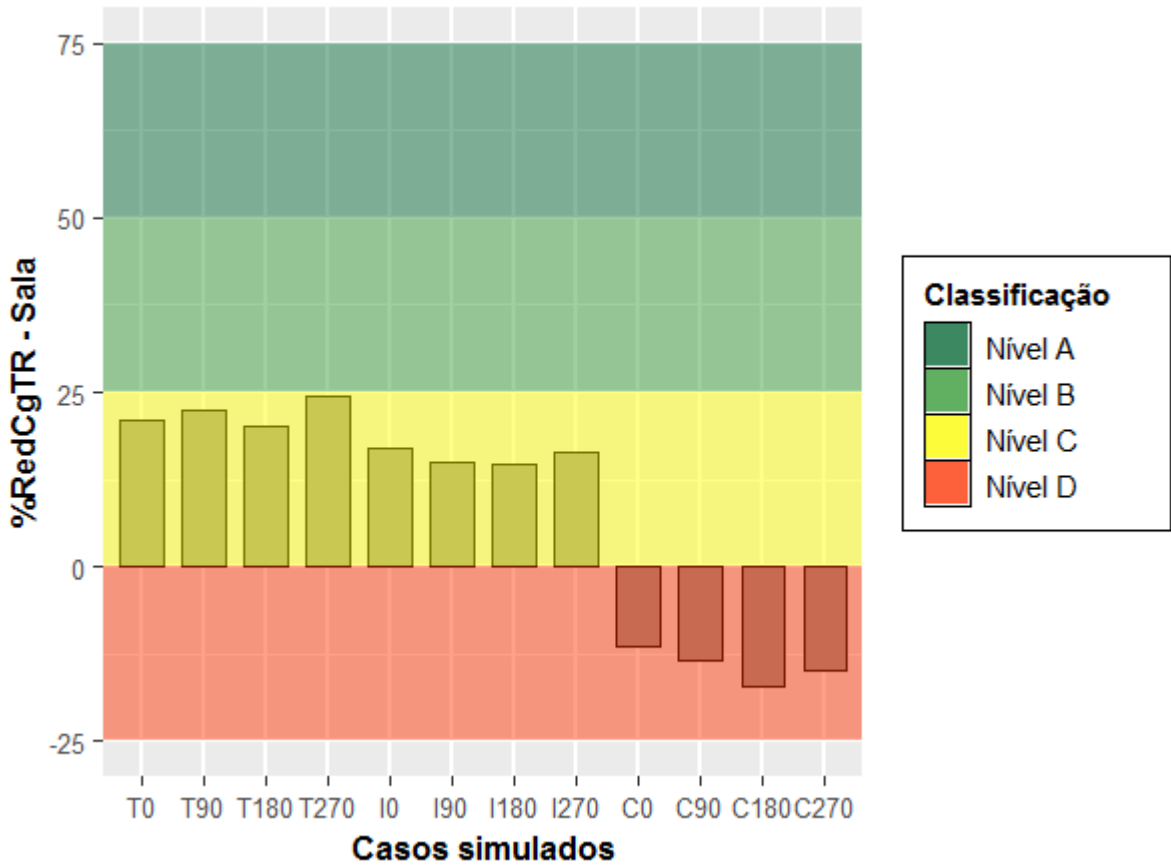
Neste item, é apresentada a classificação de eficiência energética da envoltória para os diferentes casos simulados. Os resultados foram obtidos em função do percentual de redução de carga térmica para cada APP e equivalente numérico de eficiência energética para a UH. Quanto maior o percentual de redução da carga térmica e o equivalente numérico de eficiência energética, mais eficiente será o APP analisado assim como a UH. Convém salientar que há quatro classes de eficiência

energética na INI-R (“A” a “D”), sendo que a carga térmica da condição de referência equivale à classe “C”.

Na análise, adotou-se a nomenclatura “letra” + “número” correspondente aos níveis de exposição e orientação, respectivamente. Por exemplo, “T0” refere-se à UH no térreo, com orientação 0°; “I90” refere-se à UH no pavimento intermediário, com orientação 90°, e assim por diante.

O percentual de redução de carga térmica de resfriamento do APP sala, calculado a partir da Equação (1), pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 – Percentual de redução de carga térmica de resfriamento da sala para os casos simulados



* T - térreo, I – intermediário, C - cobertura
Fonte: A autora (2020)

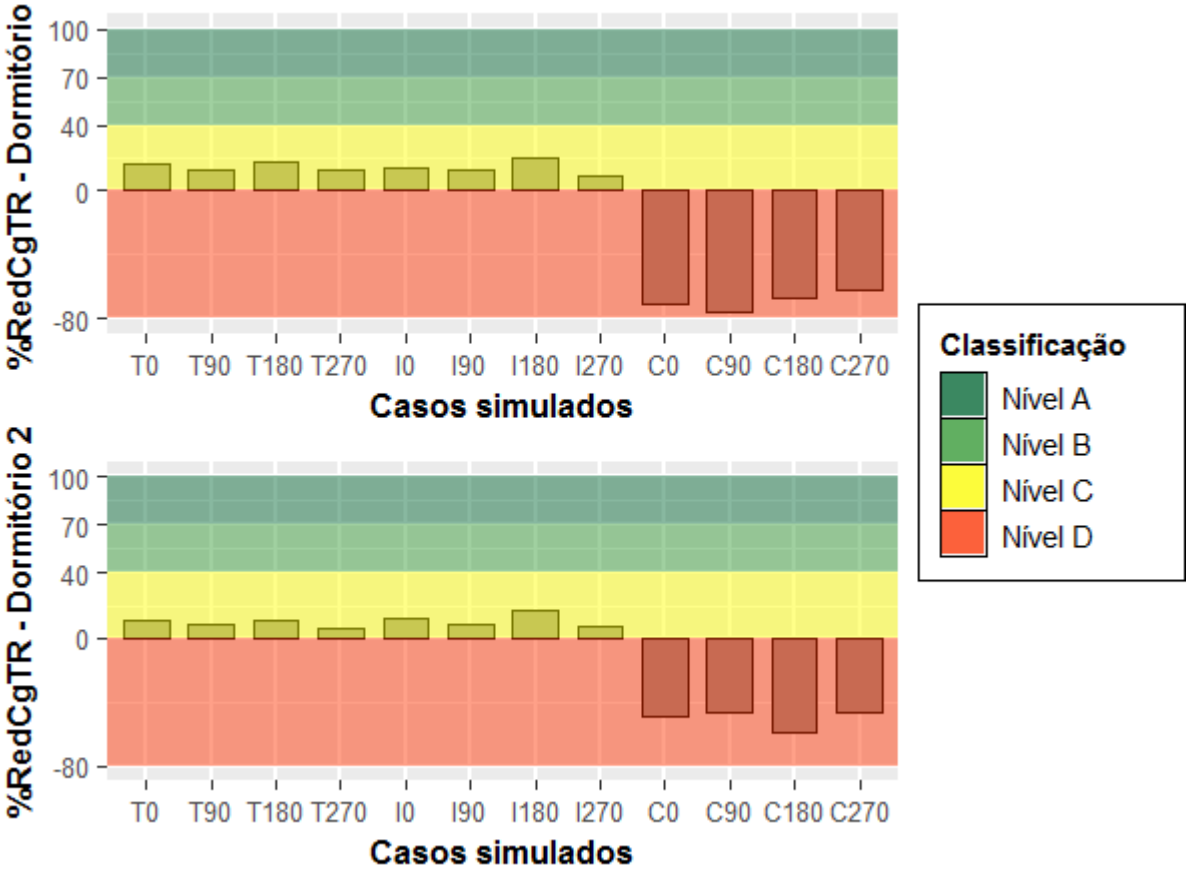
Quanto à exposição, pode-se notar que os casos do pavimento térreo obtiveram um desempenho melhor, devido ao contato com o solo. Em contrapartida, a cobertura apresentou o pior desempenho, com percentual de redução da carga térmica negativo em todas as orientações. Isto significa que a carga térmica real foi superior à da condição de referência, que equivale ao nível C de eficiência. Esse fato

pode ser atribuído à alta absorção solar e transmitância térmica da cobertura, constituída de telhas de fibrocimento.

O ambiente analisado obteve desempenho levemente inferior na orientação 180°, com a abertura principal orientada a leste e secundária a sul, possivelmente devido ao fato de que não há ocupação na sala no período da manhã. Consequentemente, as aberturas (portas e janelas) do ambiente permanecem fechadas, não sendo permitida a ventilação natural, que contribui para reduzir as temperaturas internas.

Os resultados do percentual de redução de carga térmica de resfriamento dos dormitórios encontram-se na Figura 19. Sobre a exposição, as mesmas considerações mencionadas anteriormente no caso da cobertura são também válidas para os dormitórios. Entretanto, verifica-se que os pavimentos térreo e intermediário obtiveram resultados semelhantes.

Figura 19 - Percentual de redução de carga térmica de resfriamento dos dormitórios para os casos simulados



* T - térreo, I – intermediário, C - cobertura
Fonte: A autora (2020)

A respeito da orientação, não há uma relação clara entre os casos simulados e o respectivo desempenho da envoltória. Aparentemente, pode-se dizer que ambos os dormitórios obtiveram desempenho inferior na orientação 270°, em que as aberturas estão orientadas a oeste, havendo maior ganho de calor pela envoltória no período da tarde.

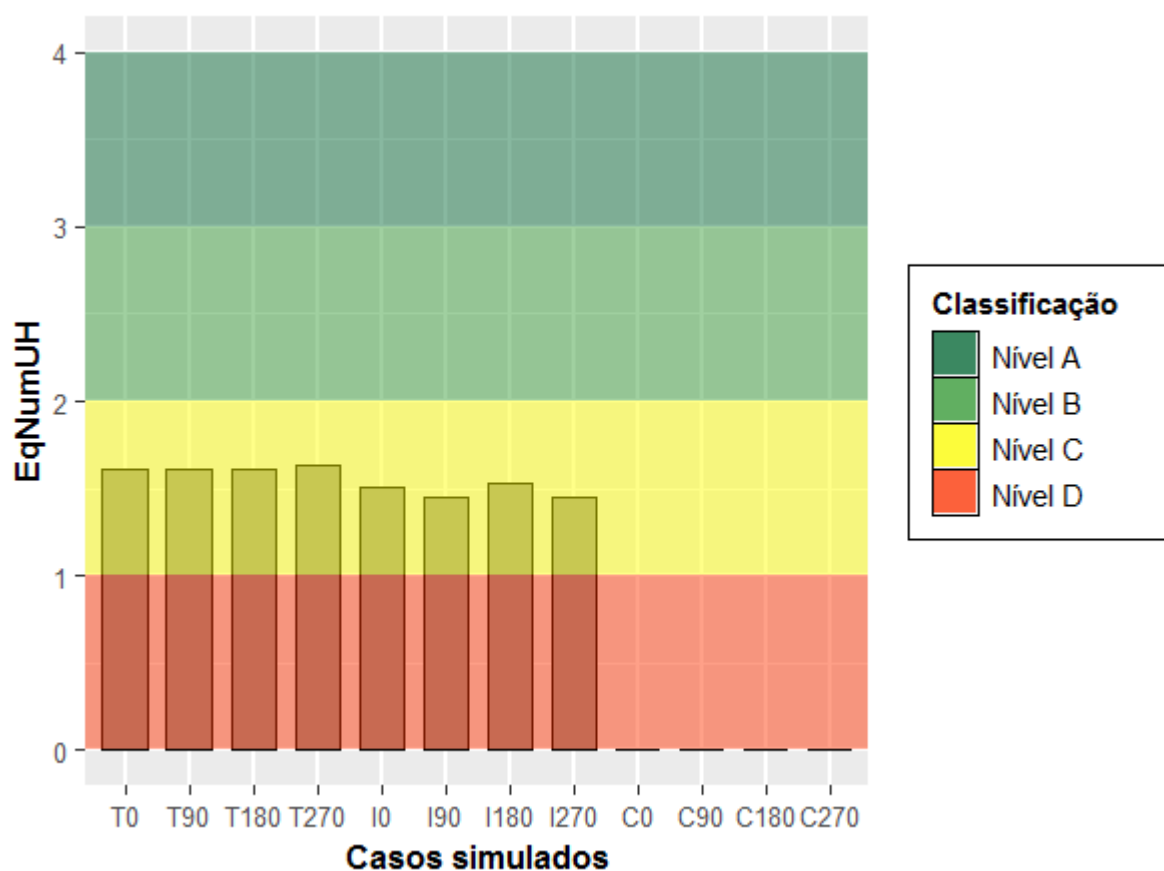
Embora os limites inferiores das classes de eficiência energética não sejam os mesmos para os ambientes de permanência prolongada, observou-se que os dormitórios obtiveram valores de percentual de redução de carga térmica consideravelmente superiores aos da sala. Isto pode ser explicado pela área das superfícies em contato com o exterior desconsiderando as superfícies adiabáticas, sendo maior nos dormitórios.

O equivalente numérico de eficiência energética da UH, calculado por meio da Equação (2), é indicado na Figura 20. Analisando-se os resultados da UH, torna-se evidente o baixo desempenho térmico obtido na cobertura em todas as orientações consideradas. Nota-se que os melhores resultados estão associados ao pavimento térreo, no qual há contribuição do contato com o solo no desempenho da envoltória.

Em linhas gerais, pode-se afirmar que o desempenho da envoltória nas orientações consideradas foi semelhante. Além disso, os níveis de eficiência obtidos foram “C” e “D” em todos os casos simulados, evidenciando o baixo desempenho termoenergético do modelo representativo analisado.

Os resultados obtidos na presente pesquisa são condizentes com estudos similares, nos quais foi avaliada a eficiência energética da envoltória de habitações sociais unifamiliares e multifamiliares em diferentes regiões do país, por meio do RTQ-R. Nesses estudos, constatou-se que a envoltória das habitações em questão possui baixo desempenho termoenergético, com níveis de eficiência variando entre “C”, “D” e “E”. Conforme os autores, as propriedades térmicas das superfícies e níveis de exposição no caso de habitações multifamiliares, afetam de forma significativa o desempenho da envoltória, como verificado neste trabalho (LIMA; PEDRINI; ALVES, 2012; ALMEIDA *et al.*, 2013; FAGUNDES, 2014; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015; MORENO; MORAIS; SOUZA, 2017; DALBEM *et al.*, 2019).

Figura 20 – Equivalente numérico de eficiência energética da UH para os casos simulados



* T - térreo, I – intermediário, C - cobertura

Fonte: A autora (2020)

No contexto da cidade de Joinville, foi possível observar que a classificação energética encontrada é coerente com os resultados do estudo de Cechinel (2017), descrito no Item 2.3.2. Em ambas os estudos, foram obtidos níveis de eficiência energética baixos, denotando que essas habitações não oferecem condições mínimas de desempenho térmico e qualidade requeridos para este tipo de edificação.

É importante enfatizar que, comparando-se a metodologia da presente pesquisa com a de Cechinel (2017), há significativas diferenças em relação ao método de classificação adotado. Cechinel (2017) utilizou como base o método prescritivo do RTQ-R, que conta com equações, tabelas e parâmetros limites, obtendo uma pontuação indicativa do nível de eficiência da edificação. O método de simulação, utilizado na presente pesquisa, compara o desempenho da edificação analisada ao desempenho de edifícios referenciais para classificação da eficiência energética. Além do método de simulação ser mais preciso e apresentar resultados mais confiáveis, utilizou-se como referência nessa pesquisa a INI-R (novo regulamento brasileiro de

etiquetagem), cuja metodologia de classificação foi aperfeiçoada devido às limitações do RTQ-R.

Por fim, verifica-se que os resultados da pesquisa apontam não apenas para o baixo desempenho termoenergético das habitações sociais localizadas em Joinville, mas também evidenciam a necessidade de rever os projetos que vêm sendo implementados na cidade. Nesse sentido, torna-se necessário identificar os parâmetros que mais influenciam no desempenho da edificação, assim como verificar as medidas de eficiência energética que sejam adequadas ao clima local e compatíveis com a população de baixa renda, buscando proporcionar conforto térmico aos usuários e reduzir o consumo de energia.

4.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A seguir, são apresentados os coeficientes de sensibilidade SRC e PCC perante o consumo de energia da envoltória dos ambientes de permanência prolongada e unidade habitacional. Para cada caso, foi discutida a influência das variáveis de entrada do modelo na variável resposta, com base na magnitude dos coeficientes de regressão.

Ambos os coeficientes variam de -1 a 1, sendo que valores positivos indicam um aumento na variável resposta (dependente) conforme acréscimo da variável de entrada (independente). Por outro lado, valores negativos indicam que quando há uma redução na variável independente, consequentemente há um aumento na variável dependente. As variáveis independentes referem-se aos parâmetros construtivos da edificação e a variável dependente é o consumo anual de energia.

Ao analisar a Figura 21, percebe-se que os parâmetros mais influentes no ambiente sala foram exposição do piso (ExpPiso) e sombreamento (Somb), com coeficientes de magnitude relevante. O valor negativo indica que o contato do piso com o solo e a presença de veneziana nas janelas reduzem consideravelmente o consumo de energia. Já os parâmetros que mais contribuíram com as variações positivas, ou seja, que aumentam o consumo energético da envoltória, foram exposição da cobertura (ExpCob) e absorvância da parede (α Par).

Figura 21 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PCC para consumo de energia da sala



Fonte: A autora (2020)

Assim como no ambiente sala, constatou-se que os parâmetros exposição do piso (ExpPiso) e sombreamento (Somb) são os que apresentaram maior coeficiente negativo de sensibilidade em ambos os dormitórios, como demonstrado na Figura 22 e Figura 23. Entretanto, houve uma inversão dos parâmetros com coeficientes positivos perante o consumo de energia, destacando-se a absorvância da parede (α Par), seguida da exposição da cobertura (ExpCob).

Essa constatação também foi observada na análise de sensibilidade da unidade habitacional, na qual foram constatadas as mesmas variáveis independentes que exercem maior influência nas variações positivas e negativas da variável dependente. Os coeficientes de sensibilidade da unidade habitacional podem ser visualizados na Figura 24.

De um modo geral, os métodos SRC e PCC apontaram uma tendência nos parâmetros mais influentes sobre o consumo de energia da envoltória na maior parte dos casos. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) foi superior a 0,8 em todos

os casos analisados, validando a hipótese de linearidade do modelo proposto e indicando um bom ajuste do modelo de regressão à amostra de dados.

Figura 22 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PCC para consumo de energia do dormitório 1



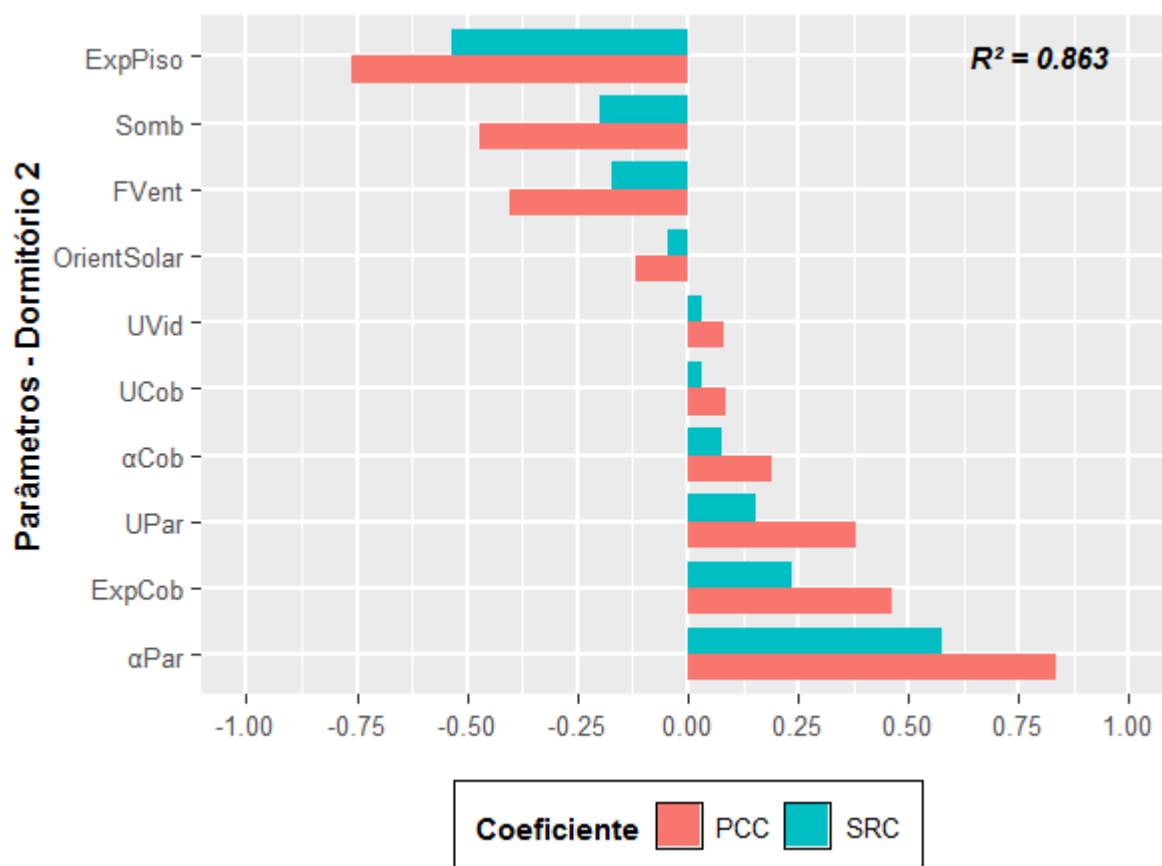
As variáveis relativas à exposição e absorção, tanto do piso quanto da cobertura, foram as mais significativas em termos de sensibilidade. Tais parâmetros são considerados pela INI-R na classificação de eficiência energética e, de fato, influenciam no consumo de energia da envoltória.

O sombreamento das aberturas pela utilização de venezianas também se mostrou uma importante variável para a redução do consumo de energia. Esse resultado é condizente com as diretrizes construtivas contidas na NBR 15220-3 para o zoneamento bioclimático de Joinville, descrito no Item 2.3.3.

Os coeficientes de sensibilidade obtidos para o fator de ventilação demonstram que este parâmetro promove uma diminuição do consumo de energia, porém em menor escala quando comparado aos parâmetros mencionados anteriormente. Acreditava-se que essa variável teria maior influência na variável resposta, visto que

a estratégia de ventilação é indicada para o clima de Joinville conforme as normas de desempenho e zoneamento climático brasileiro discutidas no Item 2.3.3.

Figura 23 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PCC para consumo de energia do dormitório 2

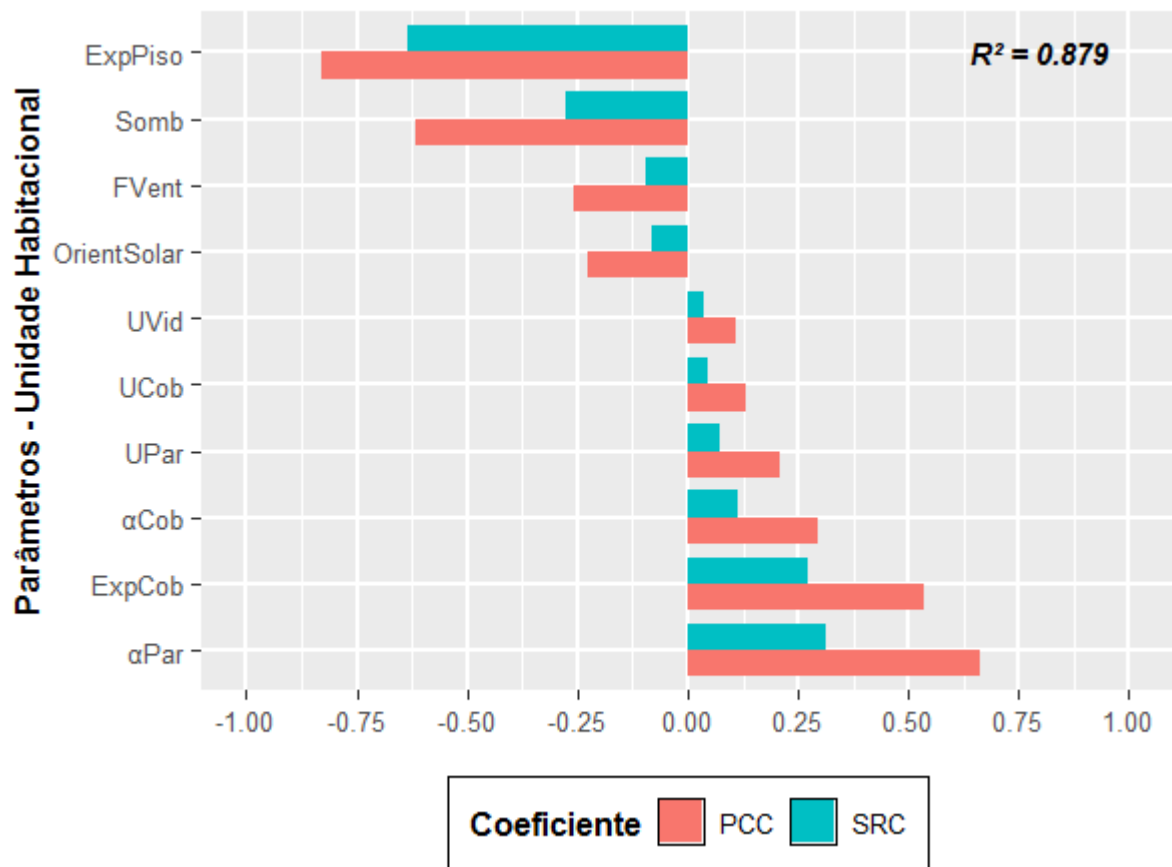


Fonte: A autora (2020)

Outro aspecto relevante é a baixa sensibilidade dos parâmetros transmitância térmica e orientação solar, os quais se mostraram pouco significativos no presente estudo. Como a pesquisa limitou-se a apenas um modelo representativo das habitações sociais localizadas na cidade de Joinville, é importante destacar que os resultados obtidos na análise de sensibilidade podem ter sido afetados por esse motivo.

Ao fazer um comparativo com o trabalho de Cechinel (2017), detalhado no Item 2.3.2, verificou-se em ambos os estudos que o sombreamento das aberturas e as estratégias de ventilação afetam o desempenho térmico da edificação. Entretanto, foram analisados outros parâmetros na presente pesquisa que se mostraram mais significativos, como por exemplo exposição do piso e cobertura, os quais não foram considerados no estudo de Cechinel (2017).

Figura 24 – Coeficientes de sensibilidade SRC e PCC para consumo de energia da unidade habitacional



Fonte: A autora (2020)

Destaca-se que as diferenças encontradas nos resultados da análise de sensibilidade podem ser provenientes da metodologia adotada. No estudo de Cechinel (2017), foi utilizado o método de análise de variância (ANOVA) com planejamento fatorial completo, ou seja, foram consideradas todas as possíveis combinações entre os parâmetros. Neste estudo, foi aplicado o método de amostragem hipercubo latino para reduzir o número de combinações e, posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade pelo método dos coeficientes de regressão padronizados e coeficientes de correlações parciais (SRC e PCC), tendo em vista que tais métodos vêm sendo bastante utilizados para análise do desempenho em edificações, como discutido anteriormente no Item 2.4.1.

Foram aplicadas metodologias distintas também para determinação do modelo representativo das habitações, resultando em diferentes edificações de referência entre um estudo e outro. Além disso, foi considerado o método de simulação do RTQ-R no estudo de Cechinel (2017) e INI-R na presente pesquisa, lembrando que o RTQ-R possui limitações no que diz respeito à modelagem do sistema de condicionamento

artificial e zoneamento climático, descritas no Item 2.3.1 da revisão da literatura. Outro fator relevante é que foi utilizado o arquivo climático de Itapoá no estudo de Cechinel (2017), haja vista que até então a cidade de Joinville não possuía um arquivo climático próprio. Itapoá é uma cidade próxima de Joinville, cujas características climáticas são semelhantes e pertence à mesma zona bioclimática da NBR 15.220-3. Mediante o exposto, verifica-se que foram obtidos resultados diferentes comparando-se minuciosamente ambas as pesquisas, possivelmente em decorrência dos fatos acima elencados.

4.6.1 Análise de variabilidade e casos extremos

Para complementar a análise de sensibilidade, foi realizada uma análise de variabilidade dos dados, em que foi calculada média e desvio padrão do consumo anual de energia para os ambientes de permanência prolongada e unidade habitacional. Foram identificadas também as combinações de parâmetros que geraram os melhores e piores resultados em termos de consumo de energia da unidade habitacional.

Conforme a Tabela 18, percebe-se que a sala consome em média 725,27 kWh/ano de energia, enquanto que os dormitórios 1 e 2 possuem valores médios de 231,50 kWh/ano e 251,74 kWh/ano, respectivamente. Isso significa que o consumo de energia na sala é maior como o esperado, pois trata-se de um ambiente conjugado (sala, cozinha e área de serviço) de área superior aos dormitórios. Na unidade habitacional, o consumo anual de energia foi em média 1208,51 kWh, o que representa mais 100 kWh de consumo ao mês. Em todos os casos, o coeficiente de determinação do modelo de regressão foi superior a 0,8, demonstrando que o método adotado foi eficaz no sentido de determinar os parâmetros mais influentes na sensibilidade da envoltória.

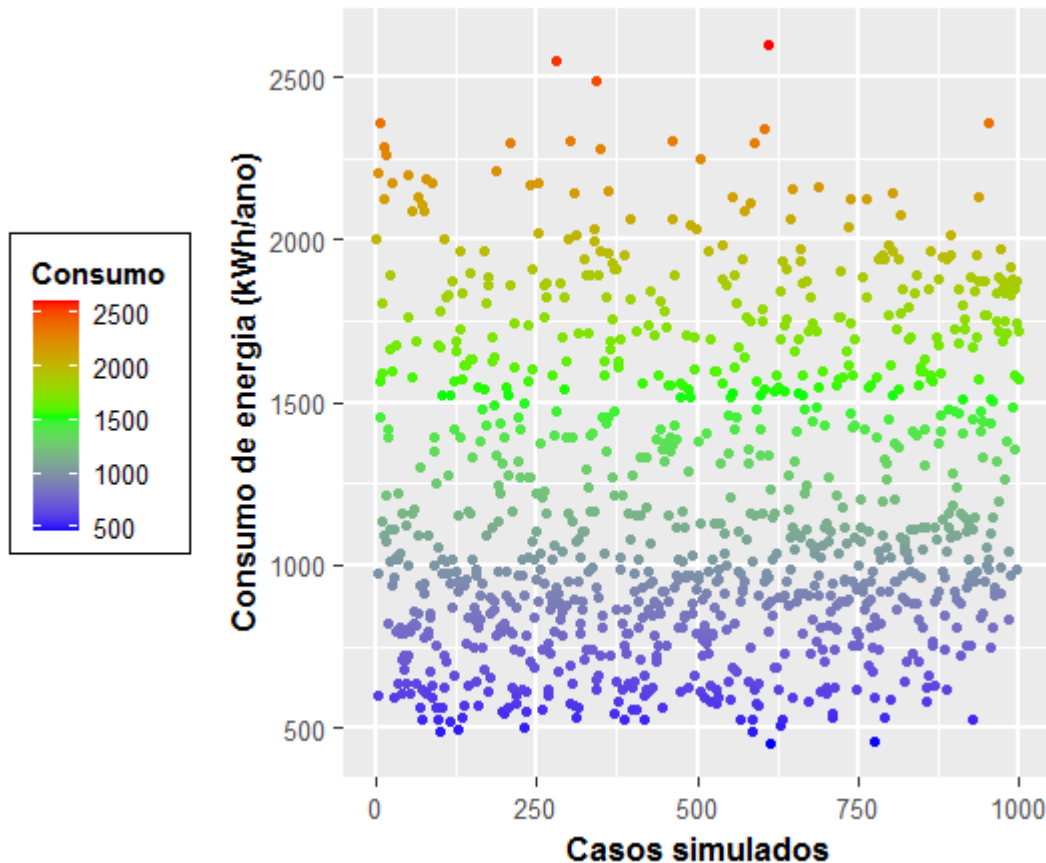
Tabela 18 - Estatística descritiva e coeficiente de determinação do consumo anual de energia

APP	Média (kWh/ano)	Desvio padrão (kWh/ano)	Coeficiente de determinação – R ²
Sala	725,27	277,33	0,887
Dorm1	231,50	103,81	0,842
Dorm2	251,74	91,42	0,863
UH	1208,51	460,35	0,879

Fonte: A autora (2020)

Analisando-se o desvio padrão, pode-se dizer que houve uma alta variabilidade dos dados, pois em todos os casos a magnitude do desvio padrão é considerada alta em relação ao valor médio. Isto pode ser verificado na Figura 25, que mostra o gráfico de dispersão do consumo anual de energia da unidade habitacional.

Figura 25 – Gráfico de dispersão e histograma do consumo de energia da UH



Fonte: A autora (2020)

A Tabela 19 mostra as configurações das variáveis independentes para os casos extremos e o respectivo valor da variável dependente. É possível observar que as combinações dos parâmetros de entrada das simulações são semelhantes entre si, diferenciando-se em um ou outro aspecto. Sendo assim, pode-se afirmar que tais configurações realmente influenciam no consumo de energia da edificação, seja de forma positiva ou negativa.

A orientação solar predominante nos melhores e piores resultados foram 180° e 0°, respectivamente. Nessas orientações, a maior parte das aberturas do modelo representativo estão direcionadas a sul e norte, justificando os ganhos e perdas de calor e consequente variação na carga térmica. O contato do piso com o solo gerou

os melhores resultados nas simulações, enquanto o contato da cobertura com o exterior mostrou-se a pior opção em comparação à condição adiabática, na qual não há transferência de calor. Isso significa que a configuração das unidades térreas de habitações multifamiliares contribui para o desempenho da envoltória, como já apontado no Item 4.5 dos resultados.

Tabela 19 - Configurações dos parâmetros para os casos extremos

Caso	OrientSolar (adm)	ExpPiso (adm)	ExpCob (adm)	UPar (W/m ² .K)	UCob (W/m ² .K)	Uvid (W/m ² .K)	αPar (adm)	αCob (adm)	FVent (adm)	Somb (adm)	Consumo energia UH (kWh/ano)
615	180	1	0	1,275	1,426	5,778	0,2	0,8	1	1	454,75
776	180	1	0	1,275	1,426	5,894	0,2	0,2	1	1	458,95
587	90	1	0	1,275	0,575	5,559	0,2	0,2	1	1	491,70
100	180	1	0	1,275	1,426	5,559	0,2	0,4	0,5	1	492,23
127	180	1	0	1,275	0,575	5,894	0,2	0,2	0,5	1	496,13
...
7	0	0	1	2,587	1,426	5,894	0,4	0,8	0,5	0	2.356,21
952	0	0	1	2,587	2,422	5,778	0,6	0,6	1	0	2.357,83
342	90	0	1	2,829	1,426	5,559	0,6	0,8	0,5	0	2.490,66
279	0	0	1	2,829	1,426	5,559	0,6	0,8	0,5	0	2.551,89
611	0	0	1	1,275	1,426	5,894	0,6	0,8	0,5	0	2.601,62

Fonte: A autora (2020)

De um modo geral, os melhores resultados para o parâmetro transmitância térmica da parede e cobertura foram atingidos com isolamento térmico através de lã de rocha e telha sanduíche. Contudo, não foi constatado um comportamento padrão para a transmitância térmica dos vidros, sendo que as três configurações apresentaram resultados variados.

Um parâmetro com significativa importância foi a absorptância térmica da parede, na qual ficou nítida a influência do parâmetro no consumo de energia. Nesse caso, quanto menor o valor de absorptância, menor é o consumo energético. Em relação à absorptância da cobertura, pode-se dizer que valores mais altos aumentam o consumo de energia, porém essa afirmação não é válida para todos os casos extremos, pois depende da combinação dos fatores.

Os parâmetros relacionados às aberturas, como fator de ventilação e sombreamento com veneziana também se mostraram significativos. Percebe-se na Tabela 19 que os casos com os menores consumos de energia possuem veneziana nas aberturas e janelas de abrir ao invés de correr, cujo fator de ventilação é mais alto.

Comparando-se os casos que obtiveram o melhor e pior resultado na Tabela 19, há uma diferença considerável no consumo de energia da unidade habitacional. Essa diferença resultou no valor de 2146,87 kWh/ano, o que representa 178,91 kWh/mês. Assim, conclui-se que a adoção de estratégias de eficiência energética adequadas às condições climáticas locais pode melhorar o desempenho térmico da edificação e diminuir significativamente o consumo de energia. Essas medidas proporcionam também a redução das despesas de energia e, portanto, tornam-se ainda mais relevantes no caso de habitações sociais, sobretudo para as famílias com vulnerabilidade econômica e social.

4.7 ANÁLISE ECONÔMICA E FINANCEIRA

Após a avaliação técnica dos parâmetros mais influentes no consumo de energia da edificação, abordada no Item 4.6, foi realizada uma análise econômica e financeira dos casos que obtiveram melhor desempenho termoenergético. Inicialmente, foram estimados os custos das configurações dos parâmetros construtivos a partir da tabela de referência de preços do SINAPI e, na ausência destas, utilizou-se cotações de mercado.

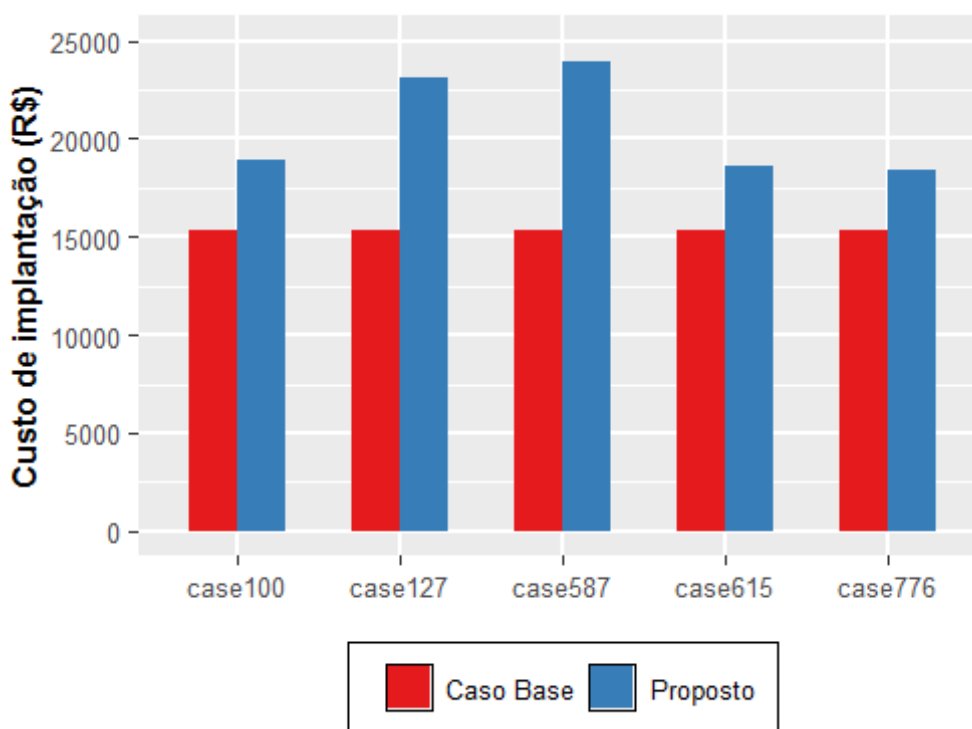
Os valores dos insumos e composições utilizados no orçamento são indicados no Apêndice C. Ressalta-se que foram necessárias certas simplificações nas estimativas dos custos, a saber:

- Não foram considerados todos os serviços exigidos para a construção das habitações sociais. Foi realizado o levantamento de custos tão somente para os insumos e serviços referentes às configurações da envoltória;
- No quantitativo dos itens relacionados aos elementos estruturais, foram consideradas estimativas haja vista que não se teve acesso aos projetos complementares do caso base, apenas ao projeto arquitetônico;
- No custo unitário de alguns itens do orçamento, foi necessário considerar referência de preços de composições semelhantes, pois tais serviços não foram encontrados na tabela do SINAPI (por exemplo, instalação de lâ de rocha em paredes *drywall* que na verdade foi considerado como isolamento em paredes de concreto).

Partindo dos valores totais, calculou-se o custo para implantação dos 5 casos que apresentaram menor consumo anual de energia na etapa de análise de

sensibilidade e amostragem hipercubo latino. A configuração dos parâmetros de cada caso é detalhada na Tabela 19, denominados daqui em diante de “casos propostos”. Foi calculado ainda o custo em relação ao caso base para fins de comparação e cálculo do valor a ser investido, como apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Custo de implantação de cada caso proposto e seu respectivo caso base



Fonte: A autora (2020)

Verificou-se também o consumo mensal de energia para cada caso analisado e seu respectivo caso base, conforme Figura 27, a fim de calcular a redução de consumo energético. Com base nesses valores, estimou-se a economia mensal de energia considerando a tarifa da concessionária em dois cenários: tarifa de energia convencional e social, como explicado no Item 3.4.1. Ao final, com o investimento inicial e economia mensal de energia, foi calculado o *payback* para cada caso (Figura 28).

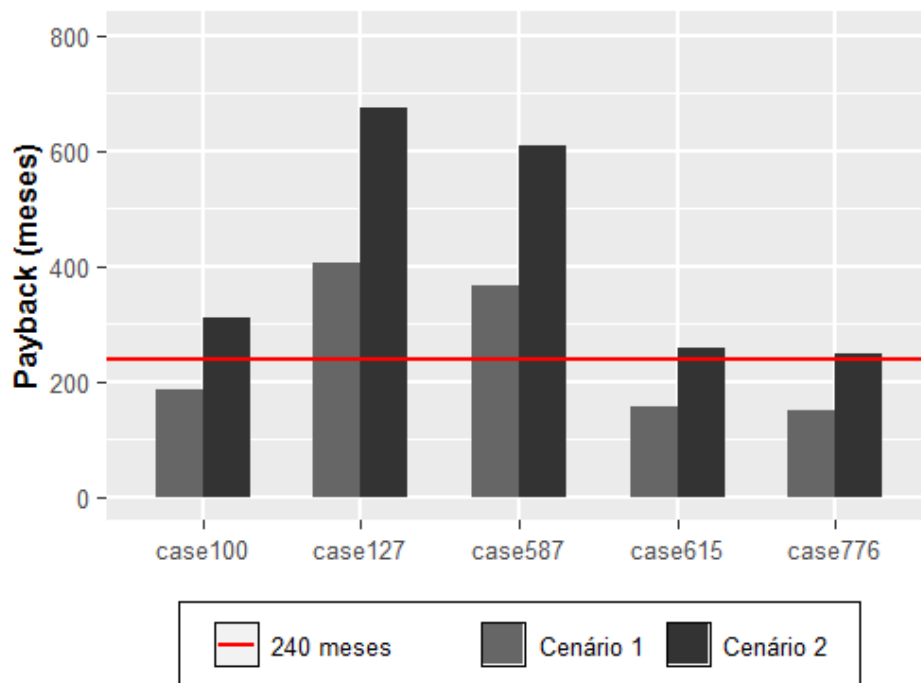
O resultado do *payback* foi obtido através de um cálculo simplificado para se ter uma noção do tempo de retorno do investimento e se esse tempo é inferior à vida útil do projeto. Embora não tenha sido considerada a inflação nessa primeira etapa da análise de viabilidade, foi possível verificar se o projeto é viável de acordo com esse indicador. Na etapa posterior, cálculos mais complexos foram realizados considerando variáveis econômicas e financeiras.

Figura 27 – Consumo mensal de energia de cada caso proposto e seu respectivo caso base



Fonte: A autora (2020)

Figura 28 – Tempo de retorno do investimento (*payback*) para ambos os cenários e tempo de vida útil do projeto



* Cenário 1 - tarifa convencional, Cenário 2 - tarifa social

** Valores da tarifa convencional e social por kWh: R\$0,46978 e R\$0,28187

Fonte: A autora (2020)

Na Figura 28, observa-se que o *payback* em ambos os cenários e na maioria dos casos é superior à vida útil de projeto, especificada em 240 meses conforme norma. Portanto, apenas três casos do cenário 1 (tarifa normal) justificam o investimento, sendo que nenhum caso do cenário 2 (tarifa para baixa renda) se mostraram viáveis economicamente.

Isso pode ser explicado pelo fato de que a tarifa social teve um desconto de 60% em relação ao valor da tarifa convencional, considerando que o consumo mensal de energia dos casos analisados foi inferior a 100 kWh. Outro fato relevante é que os casos 587 e 127, cuja cobertura é de laje maciça com telha sanduíche (ver Tabela 19), apresentaram maior tempo de retorno do investimento nos dois cenários. Essa configuração de cobertura, apesar de apresentar bom desempenho térmico, possui um custo consideravelmente elevado em comparação aos outros tipos de cobertura, como pode ser verificado no Apêndice C.

Para uma análise mais aprofundada, levando-se em conta a desvalorização da moeda ao longo do tempo, foram calculados também os seguintes indicadores financeiros: *payback* descontado, VPL e TIR (Tabela 20). Os resultados desses indicadores confirmam as constatações apontadas acima de que apenas três casos analisados possuem viabilidade econômica.

O valor total investido nos casos analisados variou de R\$ 3.126,40 a R\$ 8.613,25. O caso 776 apresentou menor tempo de retorno do investimento, com *payback* descontado de 157 meses, seguido dos casos 615 e 100. Nesses casos, o VPL foi positivo num horizonte de 20 anos e a TIR foi superior à TMA adotada, que corresponde ao valor de 0,095% a.m, como é possível perceber na Tabela 20.

Isso significa que o tempo necessário para obter retorno do investimento inicial é inferior à vida útil do projeto e, a partir do momento em que o valor investido foi liquidado, o investimento passará a ser rentável. Além disso, os três casos terão balanço positivo em um período de 20 anos, descontando-se o investimento inicial, e serão também mais rentáveis que as atuais opções de investimentos em renda fixa.

Apesar de as medidas de eficiência energética adotadas na pesquisa, como materiais com isolamento térmico e sombreamento com venezianas, não serem economicamente viáveis na maioria dos casos analisados, é importante salientar que tais medidas são necessárias para reduzir o consumo de energia em habitações sociais. Na presente pesquisa, por exemplo, verificou-se uma redução de quase 50% no consumo de eletricidade da edificação, como mostra a Figura 27.

Tabela 20 - Payback descontado, VPL e TIR para os casos analisados

Caso	Total investido	Payback descontado (meses)		VPL (20 anos)		TIR (a.m.)		Viabilidade	
		Cenário							
		1	2	1	2	1	2	1	2
case615	R\$ 3.298,34	164	> 240	R\$ 1.574,44	-R\$ 375,24	0,351%	-0,099%	Viável	Não viável
case776	R\$ 3.126,40	157	> 240	R\$ 1.699,99	-R\$ 230,81	0,394%	-0,063%	Viável	Não viável
case587	R\$ 8.613,25	> 240	> 240	-R\$ 3.214,62	-R\$ 5.373,76	-0,363%	-0,713%	Não viável	Não viável
case100	R\$ 3.612,53	196	> 240	R\$ 846,61	-R\$ 937,04	0,183%	-0,239%	Viável	Não viável
case127	R\$7.795,31	> 240	> 240	-R\$ 3.379,20	-R\$ 5.145,64	-0,435%	-0,778%	Não viável	Não viável

* Cenário 1 - tarifa convencional, Cenário 2 - tarifa social

Fonte: A autora (2020)

Convém enfatizar que a redução no consumo energético promove a longo prazo uma economia financeira nas despesas com tarifa de energia, auxiliando as famílias com dificuldades financeiras e problemas de inadimplência.

O uso eficiente da energia elétrica em habitações de interesse social não significa apenas uma redução nas despesas, mas também redução dos impactos ao meio ambiente, que podem ser avaliados por meio da emissão de dióxido de carbono.

Além desses, há outros benefícios provenientes do uso de estratégias de eficiência energética em habitações sociais, os quais não podem ser mensurados, como a melhoria na qualidade de vida da população de baixa renda por residirem em um ambiente agradável e que oferece boas condições de conforto térmico.

Levando-se em consideração esses aspectos, é imprescindível repensar a forma de atuação das políticas públicas no país, a exemplo do programa MCMV, no sentido de suprir o déficit habitacional brasileiro, tendo como base o tripé da sustentabilidade em uma perspectiva social, ambiental e econômica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou o desempenho termoenergético da envoltória em habitações multifamiliares de interesse social de Joinville/SC. Para tanto, foi definido um modelo representativo das habitações sociais analisadas e, com base nesse modelo, foi determinada a classificação de eficiência energética da envoltória conforme o novo regulamento brasileiro de etiquetagem de edificações residenciais, denominado INI-R. Foi realizada também uma análise da influência dos parâmetros construtivos da INI-R no consumo de energia da edificação, considerando as características climáticas locais e, por fim, verificou-se a viabilidade econômico-financeira dos casos que obtiveram os melhores resultados.

Na fase de levantamento dos dados, observou-se que os projetos das habitações sociais construídas em Joinville seguem o mesmo padrão, apresentando poucas diferenças nas características construtivas e especificações dos materiais. Foi possível constatar também que as HIS multifamiliares existentes na cidade de Joinville são conjuntos habitacionais de grande porte. Portanto, é de extrema importância analisar o desempenho termoenergético da edificação, visto que inúmeras famílias de baixa renda são afetadas pelo conforto térmico proporcionado por essas habitações.

Na definição do modelo representativo, o método estatístico adotado permitiu escolher uma habitação da amostra que representasse adequadamente a população alvo da pesquisa, com intervalo de confiança de 95%. É preciso mencionar que os resultados obtidos nessa etapa podem ter sido afetados devido à certas limitações, como o tamanho da amostra.

A partir do modelo representativo utilizado em simulações computacionais, foi possível determinar a classificação energética da envoltória dessa tipologia pelo método de simulação da INI-R, com auxílio do programa *EnergyPlus*. O nível de eficiência energética obtido em todos os casos simulados foi “C” e “D”, evidenciando que as características das habitações sociais não contribuem para um bom desempenho da envoltória.

Ao comparar os resultados encontrados, observou-se que a exposição da UH afeta consideravelmente o desempenho da envoltória, sendo que as unidades do pavimento térreo apresentaram melhores resultados em relação ao pavimento intermediário e cobertura. Verificou-se ainda que a orientação também influencia o desempenho termoenergético da edificação, porém em menor escala. Deve-se

salientar que os resultados das simulações e classificação energética da envoltória podem ter sido afetados pela configuração do modelo representativo. Assim sendo, é importante estudar outras tipologias de habitações sociais a fim de validar os resultados e tornar a análise mais fidedigna.

Através da análise de sensibilidade global pelos métodos SRC e PCC, foi possível determinar os parâmetros construtivos mais influentes no consumo de energia da envoltória, bem como sua magnitude, considerando a variação de todos os parâmetros simultaneamente. Para tal análise, inicialmente foram definidas 10 variáveis com seus respectivos níveis e uma variável resposta do modelo de regressão. Foi realizada então a amostragem aleatória pelo método hipercubo-latino, na qual foram amostrados 1000 casos, e após isso foram calculados os índices de sensibilidade de cada parâmetro com base nos resultados das simulações.

Cabe destacar que o método de amostragem foi aplicado considerando as especificações das normas NBR 15220 (2005) e NBR 15575 (2013). Nessa etapa, observou-se que os limites estabelecidos em ambas as normas são diferentes entre si, reforçando a necessidade de uma padronização das normativas e regulamentos técnicos relacionados ao desempenho térmico de edificações.

Quanto à análise de sensibilidade, os coeficientes indicaram que a exposição do piso e sombreamento das aberturas promovem uma maior redução no consumo de energia para resfriamento em comparação aos demais parâmetros analisados. Por outro lado, os parâmetros de absorvância das paredes e exposição da cobertura são os que mais contribuem com o aumento do consumo de energia da envoltória, levando-se em consideração as características climáticas de Joinville.

No presente estudo, a aplicação dos métodos de regressão SRC e PCC mostrou-se eficaz para verificar a sensibilidade dos parâmetros, a um nível de confiança de 95%. A eficácia do método foi validada pelo coeficiente de determinação da regressão múltipla, cujo valor foi superior a 0,8 em todos os casos. Isso significa que pelo menos 80% da variância dos dados da amostra é explicada pelo modelo linear.

Analisando-se a viabilidade econômico-financeira dos casos que obtiveram menor consumo de energia na etapa anterior, foi constatado que apenas três casos podem ser considerados viáveis. Ademais, verificou-se que nenhum dos casos analisados no cenário 1, com aplicação da tarifa social, possuem viabilidade financeira. Essa constatação deve-se ao fato de que a tarifa social para famílias de

baixa renda apresenta um valor bem inferior à tarifa convencional e, portanto, o período de retorno do investimento é superior à vida útil de projeto, tornando o projeto inviável sob o ponto de vista econômico.

Para finalizar, é necessário mencionar que o presente estudo contribui para o enriquecimento da literatura em relação à aplicação do método de simulação da INI-R, uma vez que se trata de um método recente e que se encontra em fase de aprimoramento. Contribuiu também para a utilização de métodos estatísticos na determinação da influência de diferentes variáveis no desempenho termoenergético de edificações. Acrescenta-se ainda que a abordagem adotada na pesquisa é fundamental, tendo em vista que ao realizar uma análise conjunta dos aspectos técnicos e econômicos, é possível prever soluções mais eficazes na concepção do projeto de habitações sociais, bem como destinar de forma adequada os recursos das políticas habitacionais no país.

5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As limitações encontradas no desenvolvimento da pesquisa foram:

- Imprecisão dos dados coletados, devido à divergência das informações contidas no projeto e memorial descritivos das habitações sociais;
- Os resultados obtidos na definição do modelo representativo podem ter sido afetados pelo tamanho da amostra;
- Considerou-se somente um modelo representativo para as habitações sociais multifamiliares de Joinville;
- As simulações termoenergéticas possuem limitações referentes aos dados do arquivo climático e algoritmos do programa de simulação (transferência de calor, convecção de superfícies, rede de ventilação natural, entre outros);
- Nas simulações computacionais, foram consideradas as cargas internas, padrões de ocupação e iluminação da INI-R, que podem não refletir a realidade de habitações sociais;
- As habitações multifamiliares foram simuladas como uma unidade habitacional isolada, sem considerar as áreas comuns do condomínio e sombreamento de edificações vizinhas;

- A classificação de eficiência energética da envoltória e análise de sensibilidade dos parâmetros construtivos podem ter sido afetados pela configuração do modelo representativo;
- Foram realizadas simplificações no cálculo dos quantitativos do orçamento, pois não se teve acesso aos projetos complementares do caso base;
- Para os itens do orçamento que não foram encontrados na tabela do SINAPI, foi necessário considerar referência de preços de composições semelhantes ou cotações de mercado;
- Todos os resultados da pesquisa são válidos somente para a envoltória da tipologia de habitação analisada e clima de Joinville/SC.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para complementação da pesquisa e possíveis trabalhos futuros, sugere-se:

- Ampliar o escopo do estudo para outras tipologias de habitações sociais, levando-se em consideração diferentes climas do contexto brasileiro;
- Aprimorar a análise de sensibilidade aplicando outros métodos estatísticos na amostragem dos dados e verificação da sensibilidade dos parâmetros;
- Estabelecer medidas passivas de eficiência energética para a envoltória das habitações sociais, a partir dos resultados da análise de sensibilidade;
- Fazer um levantamento das rotinas de ocupação, uso do sistema de iluminação e equipamentos;
- Aplicar questionários com os moradores das habitações sociais para verificar a percepção do usuário em relação ao conforto térmico;
- Realizar medições de consumo de energia *in loco* e monitorar as temperaturas internas/externas para efetuar a calibração do modelo de simulação computacional.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, K. C. F. J. **Avaliação dos pesos regionais do RTQ-R a partir da análise da estrutura do consumo residencial de energia elétrica por região geográfica**. 2015. 242f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

ALMEIDA, L. S. S. **Influência de parâmetros físicos e geométricos no desempenho termoenergético de habitações unifamiliares**. 2014. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ALMEIDA, L. S. S.; SILVA, A. S.; SCHNEIDER, K.; GHISI, E. Avaliação da envoltória de habitações de interesse social de Florianópolis de acordo com o método prescritivo do RTQ-R. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC, XII, 2013, Brasília. **Anais...** Brasília: ANTAC, 2013. p. 1-10.

ALVES, A. F. M. **Todo Brasileiro merece nível “A”**: habitação multifamiliar para o programa minha casa minha vida energeticamente eficiente. 2012. 126f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

ARAUJO, A. C. S. **Programa Minha Casa Minha Vida**: antigos e novos dilemas da habitação de interesse social e o caso de Marília/SP. 2013. 255f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ASSERIN, O.; LOREDO, A.; PETELET, M.; LOOSSS, B. Global sensitivity analysis in welding simulations—What are the material data you really need? **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 47, n. 9, p. 1004-1016, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5.410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15.220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15.575**: Edificações habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 9.050**: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro, 2015.

BRASIL. **Lei Federal nº 10.295, de 17 de outubro de 2001**. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília, 2001.

_____. **Lei Federal nº 11.977, de 7 de julho de 2009**. Dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida – PMCMV e a regularização fundiária de assentamentos localizados em áreas urbanas. Brasília, 2009.

BRASIL. **Portaria Inmetro nº 449, de 25 de novembro de 2010.** Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. **Portaria Inmetro nº 18, de 16 de janeiro de 2012.** Aprova a revisão do Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro, 2012.

_____. **Portaria Inmetro nº 50, 01 de fevereiro de 2013.** Anexo geral V – Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros. Rio de Janeiro, 2013.

BREESCH, H.; JANSSENS, A. Performance Evaluation of Passive Cooling in Office Buildings Based on Uncertainty and Sensitivity Analysis. **Solar Energy**, v. 84, n. 8, p. 1453-1467, 2010.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL - CEF. **Demanda habitacional no Brasil.** Brasília: Caixa, 2011. 170 p.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO - CBIC. **Perenidade dos programas habitacionais.** Brasília: CBIC, 2016. 79 p.

CARPINO, C.; BRUNO, R.; ARCURI, N. Social housing refurbishment in Mediterranean climate: Cost-optimal analysis towards the n-ZEB target. **Energy & Buildings**, v. 174, p. 642–656, 2018.

CECHINEL, R. J. **Avaliação dos requisitos mínimos do programa minha casa minha vida para habitações multifamiliares em Joinville.** 2017. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.

CECHINEL, R. J.; HENNING, E.; HACKENBERG, A. M. Uso do R para comparação de arquivos climáticos: uma análise da aplicação do arquivo climático de Itapoá na cidade de Joinville. In: Seminário Internacional de Estatística com R, II, 2017, Niterói. **Anais...** Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2017. p. 109-117.

CHEN, X.; YANG, H.; ZHANG, W. A comprehensive sensitivity study of major passive design parameters for the public rental housing development in Hong Kong. **Energy**, v. 93, p. 1804-1818, 2015.

COIMBRA, J.; ALMEIDA, M. Achieving cost benefits in sustainable cooperative housing. **Buildings**, v. 3, p. 1-17, 2013.

DALBEM, R.; CUNHA, E. G.; VICENTE, R.; FIGUEIREDO, A.; OLIVEIRA, R.; SILVA, A. C. S. B. Optimisation of a social housing for south of Brazil: from basic performance standard to passive house. **Energy**, v. 167, p. 1278-1296, 2019.

DEBIASI, R. **Análise da Estratégia de Ventilação Híbrida para a Redução do Consumo de Energia Elétrica em Edificações Comerciais para o Clima de Florianópolis.** 2016. 228f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

DEPARTMENT OF ENERGY – DOE. **Energyplus**. 2018. Disponível em: <<https://energyplus.net>>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco energético nacional: ano base 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. 303p.

FAGUNDES, R. M. **Aplicação do RTQ-R na avaliação da eficiência energética de edificações multifamiliares de interesse social para as zonas bioclimáticas brasileiras**. 2014. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

FEDRIGO, S. N.; GONÇALVES, G.; LUCAS, P. F.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**. Florianópolis: LabEEE, 2009. 94p.

FERREIRA, C. C.; PEREIRA, I. M. Avaliação do desempenho térmico de habitação de interesse social de acordo com a NBR 15575, para as diversas zonas bioclimáticas. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, XIV, 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012. p. 3590-3595.

FLACH, A. A. **O papel da municipalidade no Programa Minha Casa Minha Vida em Porto Alegre**. 2016. 114f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

FORTUNATO, R. A. **A sustentabilidade na habitação de interesse social: estudos de caso em reassentamentos do Programa Minha Casa Minha Vida no núcleo urbano central da região metropolitana de Curitiba – municípios de Curitiba e Fazenda Rio Grande**. 2014. 402f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

FOSSATI, M.; SCALCO, V. A.; LINCZUCK, V. C. C.; LAMBERTS, R. Building energy efficiency: an over view of the Brazilian residential labeling scheme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 1216-1231, 2016.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit habitacional no Brasil 2013-2014**. Belo Horizonte, 2016.

GAGLIANO, A.; NOCERA, F.; PATANIA, F.; CAPIZZI, G. A case study of Energy Efficiency Retrofit in social housing units. **Energy Procedia**, v. 42, p. 289-298, 2013.

GIANNETTI, B. F.; DEMÉTRIO, J. C. C.; AGOSTINHO, F.; ALMEIDA, C. M. V. B.; LIU, G. Towards more sustainable social housing projects: recognizing the importance of using local resources. **Building and Environment**, v. 127, p. 187-203, 2018.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n.1, p. 11-23, 1992.

GOOGLE EARTH PRO. Versão 7.3.1. Google, 2018. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/download>>.

GRIGOLETTI, G. C.; LINCK, G. I. Análise de comportamento térmico de HIS térreas unifamiliares em Santa Maria, RS. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 109-123, 2014.

GRUNBERG, P. R. M. **Avaliação das estratégias bioclimáticas de projeto para clima quente e úmido através de simulação: estudo de caso de edificação unifamiliar em Joinville/SC**. 2014. 184f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GUARDA, E. L. A.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A.; JORGE, S. H. M.; BRANDÃO, R. P. Estratégias construtivas para adequação da envoltória de uma habitação de interesse social às zonas bioclimáticas Mato-Grossenses. **Engineering and Science**, v. 7, n. 1, 2018.

HOPFE, C. J.; HENSEN, J. L. M. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2798-2805, 2011.

HWANG, R.; SHIH, W.; HUANG, K. Performance-rating-based approach to formulate a new envelope index for commercial buildings in perspective of energy efficiency and thermal comfort. **Applied Energy**, v. 264, p. 114725, 2020.

INMETRO. **Proposta de Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Florianópolis: Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações - CB3E, set. 2018.

KELLEY, K.; CLARK, B.; BROWN, V.; SITZIA, J. Good practice in the conduct and reporting of survey research. **Internacional Journal for Quality in Health Care**, v. 15, n. 3, p. 261-266, 2003.

KESKIN, S. Comparison of several univariate normality tests regarding type I error rate and power of the test in simulation based small samples. **Journal of Applied Science Research**, v. 2, n. 5, p. 296-300, 2006.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; GRANJA, A. D. The concept of desired value as a stimulus for change in social housing in Brazil. **Habitat International**, v. 35, p. 435-446, 2011.

LAWRIE, L. K.; CRAWLEY, D. B. **Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx)**. 2019. Disponível em: <http://climate.onebuilding.org>

LIMA, G.; PEDRINI, A.; ALVES, A. Avaliação do desempenho térmico de uma habitação de interesse social localizada no clima quente e úmido da cidade de Parnamirim/RN com base no método de simulação do RTQ-R. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, XIV, 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012. p. 2748-2757.

MACDONALD, I.; STRACHAN, P. Practical Application of Uncertainty Analysis. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 3, p. 219-227, 2001.

MELO, A. P.; MAZZAFERRO, L.; ELI, L. G.; OLINGER, M. S.; MACHADO, R. M. S.; LAMBERTS, R. **Manual de uso do objeto Energy Management System do programa EnergyPlus**. Florianópolis: LabEEE, 2018. 8p.

MONTES, M. A. T. **Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climáticas**. 2016. 473f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Wiley: Brasil, 2016.

MOORE, T.; NICHOLLS, L.; STRENGERS, Y.; MALLER, C.; HORNE, R. Benefits and challenges of energy efficient social housing. **Energy Procedia**, v. 121, p. 300-307, 2017.

MORENO, A. C. R.; MORAIS, I. S.; SOUZA, R. V. G. Thermal performance of social housing— a study based on brazilian regulations. **Energy Procedia**, v. 111, p. 111-120, 2017.

NGUYEN, A.; REITER, S. A performance comparison of sensitivity analysis methods for building energy models. **Building Simulation**, v. 8, p. 651–664, 2015.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no VisualDOE-3.1**. Florianópolis: LabEEE, 2003. 19p.

PANG, Z.; O'NEILL, Z.; LI, Y.; NIU, F. The role of sensitivity analysis in the building performance analysis: A critical review. **Energy and Buildings**, v. 209, p. 109659, 2020.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. Calibração de um modelo computacional de uma residência unifamiliar localizada em Florianópolis. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, XII, 2008, Juiz de Fora. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2008.

PEREIRA, H. A. C.; MELO, A. P.; VERSAGE, R.; SORGATO, M.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de Edifícios naturalmente ventilados No programa EnergyPlus – Versão 8.0**. Florianópolis: LabEEE, 2013. 56p.

PÉREZ, O. A.; FOTIOS, S. Comprehensive cost-benefit analysis of energy efficiency in socialhousing. Case study: northwest Mexico. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 279–289, 2017.

PEROBELLI, F. S.; OLIVEIRA, C. C. C. Energy development potential: an analysis of Brazil. **Energy Policy**, v. 59, p. 683-701, 2013.

POUEY, J. A.; BRANDALISE, M. P.; SILVA, A. C. S. B. Determinação da eficiência energética da envoltória de projeto residencial unifamiliar comparando os resultados a partir da aplicação dos métodos prescritivo e de simulação do RTQ-R. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, XIV, 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012. p. 2849-2857.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL. **PROCEL EDIFICA - Eficiência Energética nas Edificações**. 2006. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acesso em: 22 jun. 2018.

RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**, v. 2, n.1, p. 21-33, 2011.

R CODE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing and graphics. Version 3.4.3**. Nova Zelândia: The R Foundation, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.

REIS, M. M. **Estatística aplicada à administração**. UFSC: Florianópolis, 2008.

RORIZ, M. **Classificação de climas do Brasil**. Versão 3.0. ANTAC: São Carlos, 2014. 5p.

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. **Global sensitivity analysis**. John Wiley & Sons, 2008.

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F.; RATTO, M. Sensitivity analysis as na ingredient of modeling. **Statistical Science**, v. 15, n. 4, p. 377-395, 2000.

SANTOS, L. F. P. **Uma avaliação das políticas federais de habitação no Brasil – 1964/2011: déficit, demanda e habitação de interesse social**. 2012. 126f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2012.

SCALCO, V. A.; FOSSATI, M.; VERSAGE, R. S.; SORGATO, M. J.; LAMBERTS, R.; MORISHITA, C. Innovations in the Brazilian regulations for energy efficiency of residential buildings. **Architectural Science Review**, v. 55, n. 1, p. 71–81, 2012.

SCHAEFER, A.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E.; FREITAS, M.N.; DUARTE, E. Determinação de modelos de habitação de interesse social da grande Florianópolis para uso em simulação computacional. In: Workshop - Rede de Pesquisa: Uso racional de água e eficiência energética em habitações de interesse social, IV, 2012, Aracaju. **Anais...** Aracaju: UFS, 2012. p. 259-280.

SILVA, A. S. **Desenvolvimento de um método para avaliação do desempenho térmico e energético de edificações aplicando análise de incertezas e sensibilidade**. 2016. 459f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 135-148, 2013.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Comparação da eficiência energética da envoltória de habitações de interesse social pelos métodos prescritivo e simulação do RTQ-R. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC, XII, 2013, Brasília. **Anais...** Brasília: ANTAC, 2013. p. 1-10.

SILVEIRA, R.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Avaliação da absorvência à radiação solar e Temperatura superficial de telhas de Fibrocimento utilizadas nas coberturas de Edificações do campus da UFSC. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, XIV, 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012. p. 1166-1170.

SORGATO, M. J. **A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais**. 2015. 260f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 411-419, 2013.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, v. 87, p. 524-541, 2015.

TUBELO, R.; RODRIGUES, L.; GILLOTT, M.; SOARES, J. C. G. Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil's moderate climates zones. **Building and Environment**, v. 133, p. 213-227, 2018.

VALENÇA, M.M.; BONATES, M.F. The trajectory of social housing policy in Brazil: from the National Housing Bank to the Ministry of the Cities. **Habitat International**, v. 34, p. 165-173, 2010.

VILLAREAL, M. J. C.; MOREIRA, J. M. L. Household consumption of electricity in Brazil between 1985 and 2013. **Energy Policy**, v. 96, p. 251-259, 2016.

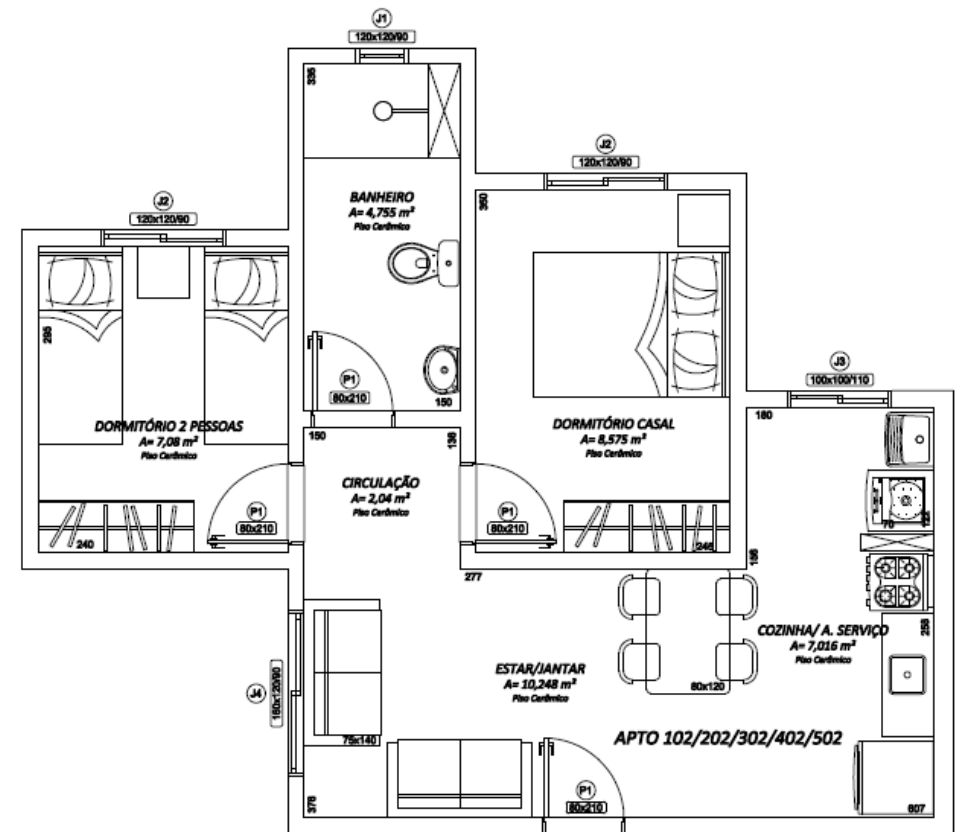
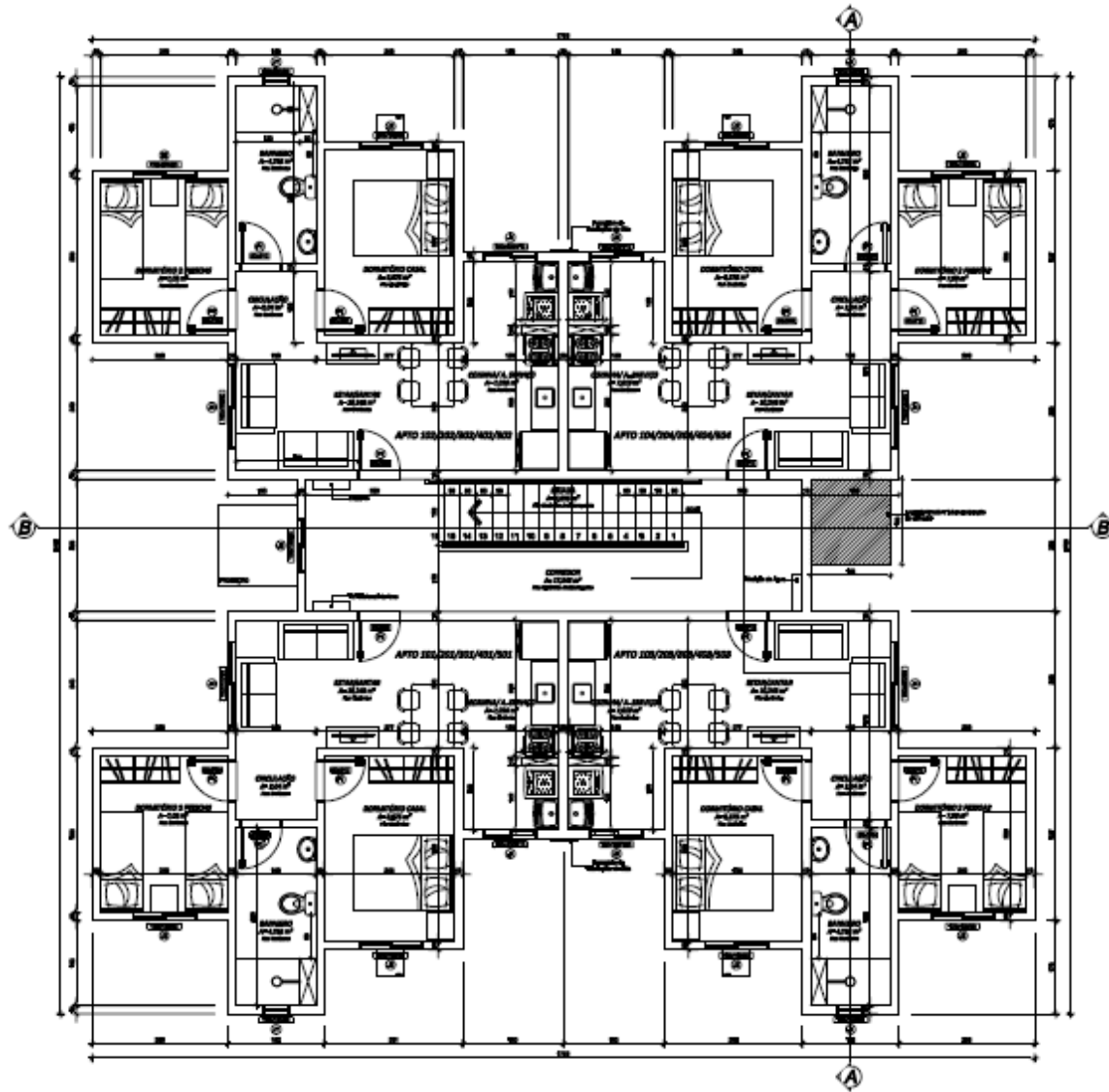
WEBER, F. S.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: LabEEE, 2017. 52p.

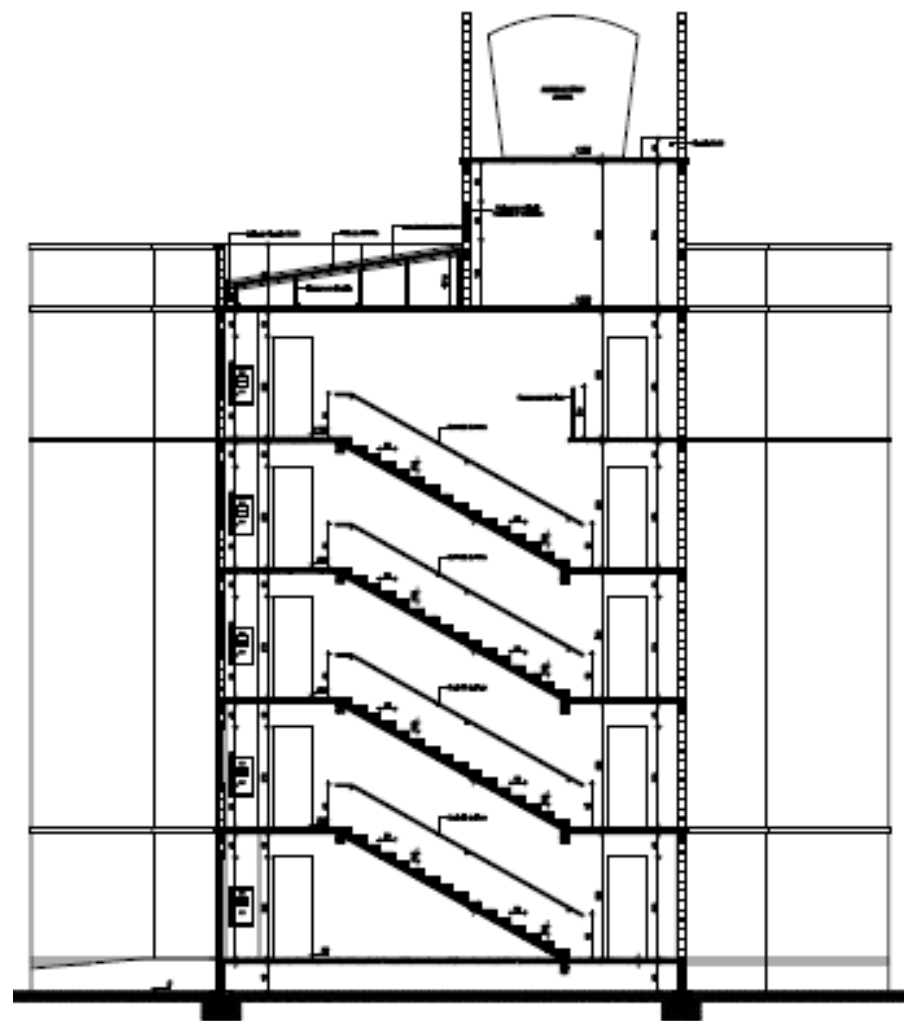
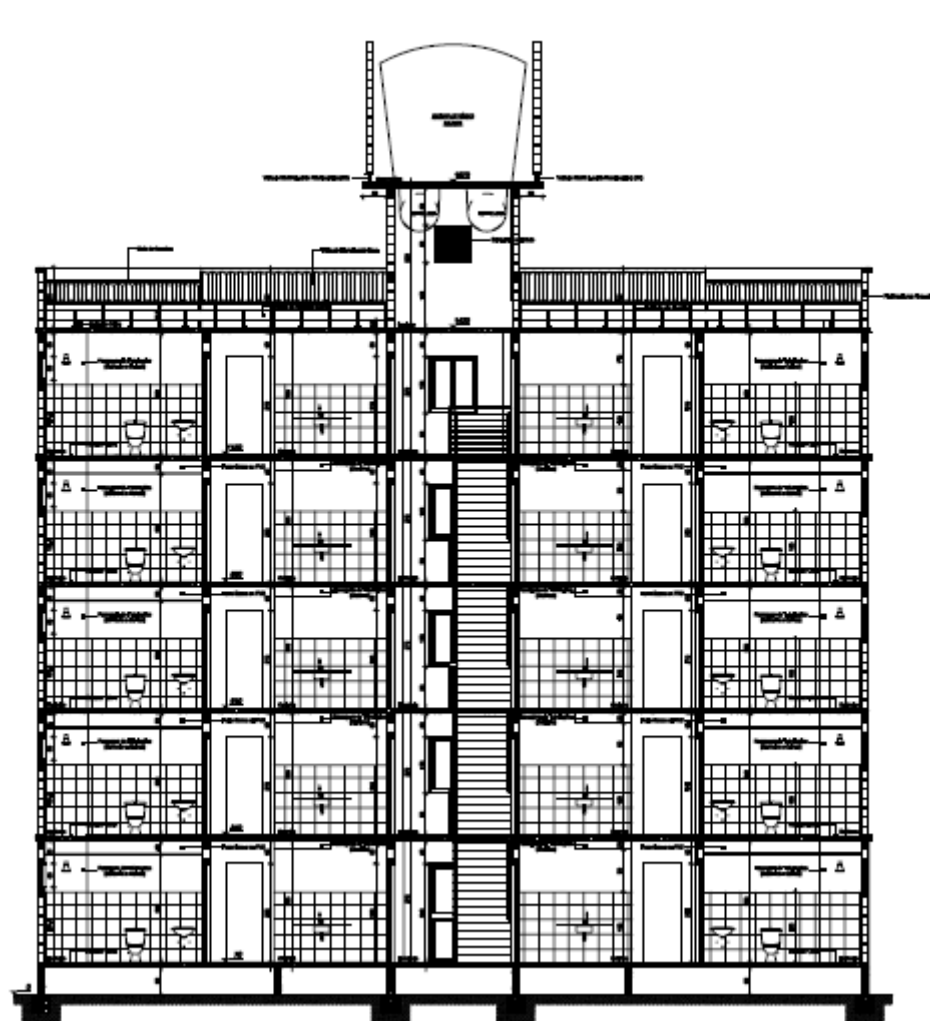
WERNER, E.; ABIKO, A. K.; COELHO, L. O.; SIMAS, R.; KEIVANI, R.; HAMBURGUER, D. S.; ALMEIDA, M. A. P. **Pluralismo na habitação**. 2. ed. São Paulo: Annablume, 2004. 300 p.

YANG, S.; TIAN, W.; CUBI, E.; MENG, Q.; LIU, Y.; WEI, L. Comparison of Sensitivity Analysis Methods in Building Energy Assessment. **Procedia Engineering**, v. 146, p.174-181, 2016.

YILDIZ, Y.; ARSAN, Z. D. Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates. **Energy**, v. 36, p. 4287-4296, 2011.

APÊNDICE A – PROJETO ARQUITETÔNICO DO MODELO REPRESENTATIVO





APÊNDICE B – IMAGEM AÉREA E VISTA DAS HABITAÇÕES SOCIAIS

Habitação 1

a) Imagem aérea



a) Vista da habitação social



Habitação 2

a) Imagem aérea



a) Vista da habitação social



Habitação 3

a) Imagem aérea



a) Vista da habitação social



Habitação 4

a) Imagem aérea

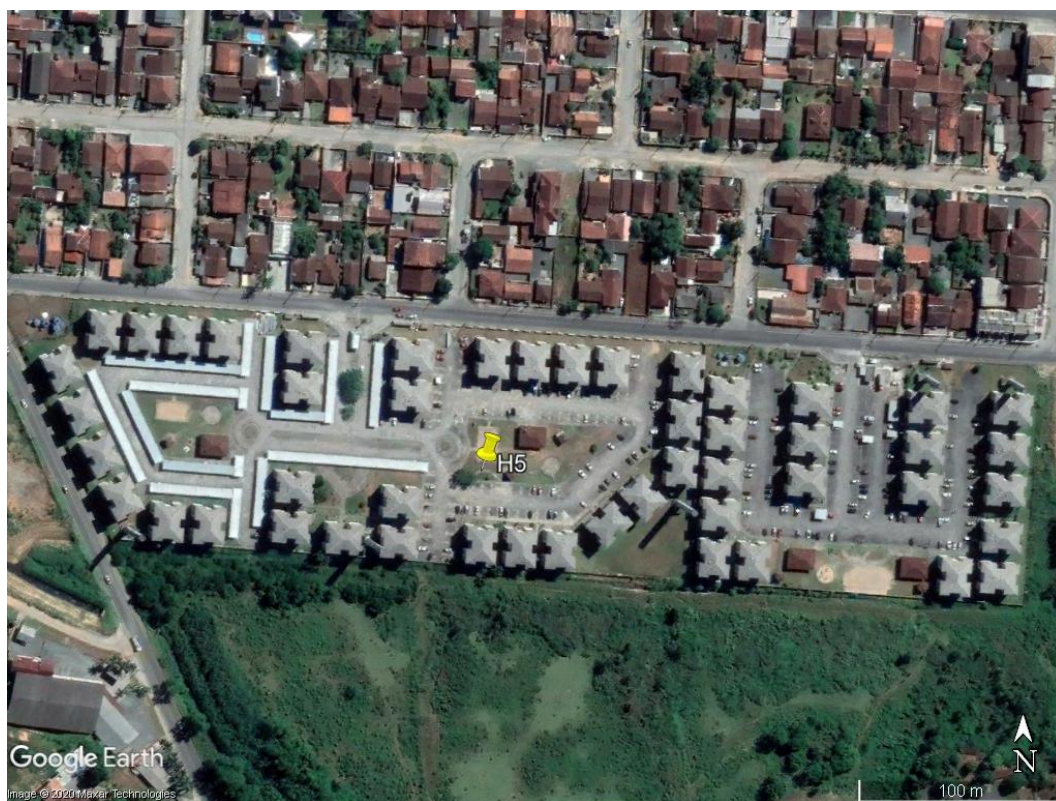


a) Vista da habitação social



Habitação 5

a) Imagem aérea



a) Vista da habitação social



APÊNDICE C – ORÇAMENTO COM INSUMOS E COMPOSIÇÕES

Item	Tipo	Código SINAPI	Descrição	Un	Quant	Valor unitário	Valor total	Valor total (item)
Parede								
Bloco cerâmico	Composição	89296	Alvenaria estrutural de blocos cerâmicos 14x19x29, (espessura de 14 cm), para paredes com área líquida maior ou igual a 6m², com vãos, utilizando palheta e argamassa de assentamento com preparo em betoneira.	m²	99,25	R\$ 59,23	R\$ 5.878,58	R\$ 7.486,43
	Composição	87547	Massa única, para recebimento de pintura, em argamassa traço 1:2:8, preparo mecânico com betoneira 400l, aplicada manualmente em faces internas de paredes, espessura de 10mm, com execução de taliscas.	m²	99,25	R\$ 16,20	R\$ 1.607,85	
Bloco concreto	Composição	89458	Alvenaria de blocos de concreto estrutural 14x19x39 cm, (espessura 14 cm), fbk = 4,5 mpa, para paredes com área líquida maior ou igual a 6m², com vãos, utilizando palheta.	m²	99,25	R\$ 57,18	R\$ 5.675,12	R\$ 7.282,97
	Composição	87547	Massa única, para recebimento de pintura, em argamassa traço 1:2:8, preparo mecânico com betoneira 400l, aplicada manualmente em faces internas de paredes, espessura de 10mm, com execução de taliscas.	m²	99,25	R\$ 16,20	R\$ 1.607,85	
Concreto e lâ de rocha	Composição	91000	Formas manuseáveis para paredes de concreto moldadas in loco, de edificações de múltiplos pavimentos, em panos de fachada com vãos.	m²	99,25	R\$ 16,63	R\$ 1.650,53	R\$ 9.251,39
	Composição	91593	Armação do sistema de paredes de concreto, executada em paredes de edificações de múltiplos pavimentos, tela q-138.	kg	198,50	R\$ 6,42	R\$ 1.274,37	
	Composição	90857	Concretagem de paredes em edificações multifamiliares feitas com sistema de fôrmas manuseáveis, com concreto usinado bombeável fck 20 mpa - lançamento, adensamento e acabamento.	m³	9,93	R\$ 372,33	R\$ 3.695,38	
	Composição	96372	Instalação de isolamento com lâ de rocha em paredes drywall.	m²	99,25	R\$ 19,49	R\$ 1.934,38	
	Composição	91515	Estucamento de panos de fachada com vãos do sistema de paredes de concreto em edificações de múltiplos pavimentos.	m²	99,25	R\$ 7,02	R\$ 696,74	

Cobertura

Telha fibrocimento e laje maciça	Composição	94207	Telhamento com telha ondulada de fibrocimento e = 6 mm, com recobrimento lateral de 1/4 de onda para telhado com inclinação maior que 10°, com até 2 águas, incluso içamento.	m²	39,71	R\$ 32,23	R\$ 1.279,85	R\$ 5.744,89
	Composição	92538	Montagem e desmontagem de fôrma de laje maciça com área média maior que 20 m², pé-direito simples, em chapa de madeira compensada plastificada, 18 utilizações.	m²	39,71	R\$ 18,05	R\$ 716,77	
	Composição	92769	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço ca-50 de 6,3 mm – montagem.	kg	277,97	R\$ 8,41	R\$ 2.337,73	
	Composição	92726	Concretagem de vigas e lajes, fck=20 mpa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m² - lançamento, adensamento e acabamento.	m³	3,97	R\$ 355,21	R\$ 1.410,54	
Telha fibrocimento e laje mista	Composição	94207	Telhamento com telha ondulada de fibrocimento e = 6 mm, com recobrimento lateral de 1/4 de onda para telhado com inclinação maior que 10°, com até 2 águas, incluso içamento.	m²	39,71	R\$ 32,23	R\$ 1.279,85	R\$ 6.264,97
	Composição	97736	Peça retangular pré-moldada, volume de concreto acima de 100 litros, taxa de aço aproximada de 30kg/m³.	m³	4,77	R\$ 1,046,15	R\$ 4.985,11	
Telha sanduiche	Composição	94216	Telhamento com telha metálica termoacústica e = 30 mm, com até 2 águas, incluso içamento.	m²	39,71	R\$ 167,08	R\$ 6.634,75	R\$ 11.099,78
	Composição	92538	Montagem e desmontagem de fôrma de laje maciça com área média maior que 20 m², pé-direito simples, em chapa de madeira compensada plastificada, 18 utilizações.	m²	39,71	R\$ 18,05	R\$ 716,77	
	Composição	92769	Armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço ca-50 de 6,3 mm - montagem, Af_12/2015	kg	277,97	R\$ 8,41	R\$ 2.337,73	
	Composição	92726	Concretagem de vigas e lajes, fck=20 mpa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes maior que 20 m² - lançamento, adensamento e acabamento.	m³	3,97	R\$ 355,21	R\$ 1.410,54	

Pintura

Parede α =0,2	Insumo	7356	Tinta acrílica premium, cor branco fosco	L	23,82	R\$ 21,49	R\$ 511,89	R\$ 511,89
Parede α =0,4	Cotação	-	Tinta acrílica premium, cor areia	L	23,82	R\$ 24,95	R\$ 594,31	R\$ 594,31

Cobertura $\alpha=0,2$ e $0,4$	Insumo	7353	Resina acrilica base água - cor branca	L	6,35	R\$ 24,90	R\$ 158,20	R\$ 158,20
Vidro								
Vidro simples (3mm)	Insumo	10490	Vidro liso incolor 2 a 3 mm - sem colocacao	m²	4,80	R\$ 77,38	R\$ 371,42	R\$ 371,42
Vidro simples (6mm)	Insumo	10491	Vidro liso incolor 6 mm - sem colocacao	m²	4,80	R\$ 146,16	R\$ 701,57	R\$ 701,57
Vidro simples (12mm)	Insumo	34385	Vidro liso incolor 8mm - sem colocacao	m²	4,80	R\$ 213,22	R\$ 1.023,46	R\$ 1.023,46
Janela								
Janela de correr	Insumo	34362	Janela de correr em aluminio, 120 x 120 cm (a x l), 2 fls, sem bandeira, acabamento acet ou brilhante, batente/requadro de 6 a 14 cm, com vidro, sem guarnicao/alizar	un	3,00	R\$ 376,81	R\$ 1.130,43	R\$ 1.130,43
Janela de correr com Veneziana	Insumo	34370	Janela de correr em aluminio, veneziana, 120 x 120 cm (a x l), 3 fls (2 venezianas e 1 vidro), sem bandeira, acabamento acet ou brilhante, batente/requadro de 6 a 14 cm, com vidro, sem guarnicao/alizar	un	3,00	R\$ 576,70	R\$ 1.730,10	R\$ 1.730,10
Janela de abrir com veneziana	Insumo	3428	Janela de abrir em madeira imbuia/cedro arana/cedro rosa ou equivalente da regioao, caixa do batente/marco *10* cm, 2 folhas de abrir tipo veneziana e 2 folhas de abrir para vidro, com guarnicao/alizar, com ferragens, (sem vidro e sem acabamento)	m²	4,80	R\$ 395,00	R\$ 1.896,00	R\$ 1.896,00

* Referência SINAPI 02/2020 desonerado.