UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Dissertação

Desempenho de edificação residencial no Sul do Brasil sob a ótica energética e econômica: da NBR 15575 à *Passive House*

Renata Dalbem

Pelotas, 2018

Renata Dalbem

Desempenho de edificação residencial no Sul do Brasil sob a ótica energética e econômica: da NBR 15575 à *Passive House*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Linha de Pesquisa: Conforto e Sustentabilidade do Ambiente Construído

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha

Co-Orientador: Prof. Dr. Romeu Vicente

Pelotas, 2018

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

D137d Dalbem, Renata

Desempenho de edificação residencial no Sul do Brasil sob a ótica energética e econômica : da NBR 15575 à Passive House / Renata Dalbem ; Eduardo Grala da Cunha, orientador ; Romeu Vicente, coorientador. — Pelotas, 2018.

122 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

1. Eficiência energética. 2. Habitações de interesse social. 3. NBR 15575. 4. Otimização. 5. Passive House. I. Cunha, Eduardo Grala da, orient. II. Vicente, Romeu, coorient. III. Título.

CDD : 720

Elaborada por Kênia Moreira Bernini CRB: 10/920

Renata Dalbem

Desempenho de edificação residencial no Sul do Brasil sob a ótica energética e econômica: da NBR 15575 à *Passive House*

Dissertação aprovada, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 27 de fevereiro de 2018

Banca examinadora:

_____

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (Orientador)
Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

_____

Prof. Dr. Romeu Vicente (Co-Orientador)
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de Aveiro

_____

Prof. Dr. Antônio Cesar Silveira Baptista da Silva
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

_____

Profa. Dra. Isabel Salamoni
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

_____

Prof. Dr. Aldomar Pedrini
Doutor em arquitetura pela University of Queensland

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Leni e Irio, pelo amor, incentivo e por me proporcionarem todas as condições necessárias para que eu concluísse mais esta etapa.

Aos meus orientadores, Prof. Eduardo Grala e Prof. Romeu Vicente, por todo o conhecimento transmitido e por confiarem na minha capacidade de trabalho.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Márcia, Rui, António, Rita, Cláudia, Tiago, Flávio, e aos os colegas do Laboratório de Conforto e Eficiência Energética – LABCEE, Julye, Carol, Rodrigo e Isabel pela troca de conhecimentos e convivência diária.

Obrigada.

“A gente tem que sonhar, senão as coisas não acontecem”

Oscar Niemeyer

Resumo

A necessidade de reduzir custos e de acelerar o processo construtivo em habitações de interesse social apoia-se em sistemas construtivos racionalizados e de baixa qualidade, gerando edificações ineficientes em muitos aspectos, entre eles o desempenho térmico e energético. A partir de 2013, com a publicação da NBR 15575 (Norma Brasileira de Edifícios habitacionais – Desempenho), passou a ser obrigatório o atendimento de uma série de critérios e requisitos, a fim de melhorar a qualidade das edificações no país. No entanto essa norma é pouco exigente e não garante o adequado desempenho das edificações. Nesse contexto, o objetivo do trabalho é melhorar o desempenho de uma habitação de interesse social, atendendo à NBR 15575, através da definição de diferentes soluções de envelope, a fim de atender à classificação Nível A do regulamento brasileiro RTQ-R (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais) e ao *standard* alemão *Passive House*, para o contexto climático do Sul do Brasil (zonas bioclimáticas 1, 2 e 3). Os resultados foram analisados sob dois enfoques: energético e econômico. A metodologia divide-se em 5 etapas, em que se utilizou o *software EnergyPlus*® para a configuração e simulação dos modelos: 1) análise do desempenho térmico e energético do modelo com envelope térmico, atendendo a NBR 15575; 2) análise de sensibilidade, variando parâmetros no envelope térmico do modelo, a fim de atender à classificação Nível A, de acordo com RTQ-R; 3) otimização do envelope térmico do modelo configurado de acordo com o RTQ-R, através de um algoritmo evolutivo multiobjetivo; 4) otimização do envelope térmico do modelo configurado de acordo com o *standard Passive House*; e 5) otimização do envelope térmico e sistemas do modelo configurado de acordo com o *standard Passive House*. Realizou-se a análise do desempenho térmico e energético e a viabilidade econômica das soluções obtidas. Conclui-se que as soluções atendendo ao RTQ-R e ao *standard Passive House* proporcionam uma grande redução no consumo de energia em relação à solução atendendo à NBR 15575, nas três zonas bioclimáticas. Porém, verificou-se um elevado investimento adicional para a aplicação das regulamentações. As soluções atendendo ao RTQ-R apresentaram um investimento adicional entre 26% e 27% e as soluções atendendo ao *standard Passive House* apresentaram um investimento adicional entre 39% e 42%, nas três zonas bioclimáticas. As soluções atendendo ao RTQ-R foram consideradas viáveis nas zonas bioclimáticas 1 e 2, onde o *payback* foi inferior à vida útil da edificação. As soluções *Passive House* foram consideradas viáveis somente na zona bioclimática 2, no entanto, apresentaram um *payback* longo, devido ao alto custo do sistema de ventilação com recuperação de calor.

Palavras-chave: Eficiência energética. Habitações de interesse social. NBR 15575. Otimização. *Passive House*. RTQ-R. Viabilidade econômica.

Abstract

The need to reduce costs and to accelerate the construction process in social housing is based on rationalized and low quality building systems, generating inefficient buildings in many aspects, including thermal and energy performance. From 2013, with the publication of NBR 15575 (Brazilian Standard of Housing Buildings - Performance), it became mandatory to meet a series of criteria and requirements, to improve the quality of buildings in the country. However, this standard is not very demanding, and does not guarantee the proper performance of the buildings. In this context, the objective of the work is to improve the performance of social housing, considering the NBR 15575, through the definition of different envelope solutions, to meet the Level A classification of the Brazilian regulation RTQ-R (Technical Regulation of the Quality of the Energy Efficiency Level of Residential Buildings), and the German Passive House standard, to the climate context of Southern Brazil (bioclimatic zones 1, 2 and 3). Results were analyzed under two approaches: energy and economics. Methodology is divided in 5 steps, in which the EnergyPlus® software was used for the configuration and simulation of the models: 1) analysis of thermal and energetic performance of the model with thermal envelope according to NBR 15575; 2) sensitivity analysis, varying parameters in the thermal envelope of the model, in order to meet the A-level classification, according to RTQ-R; 3) optimization of the thermal envelope of the model configured according to the RTQ-R, through an evolutionary multi-objective algorithm; 4) optimization of the thermal envelope of the model configured according to the standard Passive House; and 5) optimization of the thermal envelope and systems of the model configured according to the Passive House standard. The analysis of the thermal and energetic performance was carried out to analyze the economic viability of the solutions obtained. Conclusion was that the solutions according to the RTQ-R and the Passive House standard provide a great reduction in energy consumption in relation to the solution according to NBR 15575 in the three bioclimatic zones. However, there was a high additional investment for the application of the regulations, with solutions for RTQ-R presenting an additional investment between 26% and 27% and solutions according to the Passive House standard showing an additional investment between 39% and 42%, in the three bioclimatic zones. The RTQ-R solutions were considered viable in bioclimatic zones 1 and 2, where payback was lower than the useful life of the building. Passive House solutions were considered feasible only in bioclimatic zone 2, however, they presented a long payback due to the high cost of the ventilation system with heat recovery.

Keywords: Energy efficiency. Social housing. NBR 15,575. Optimization. Passive House. RTQ-R. Economic viability.

Lista de Figuras

Figura 1: Cronograma de implementação para otimização de custos e exigências de edificações nZEB 27
Figura 2: Protótipo *Passive House* em Darmstadt na Alemanha.....28
Figura 3: Cinco princípios da *Passive House* 31
Figura 4: Execução do *blower door test* em uma *Passive House* em Aveiro-PT.....34
Figura 5: Esquema de funcionamento do sistema recuperador de calor 35
Figura 6: Etapas do método de pesquisa.....41
Figura 7: Perspectiva do estudo de caso 42
Figura 8: Planta baixa do estudo de caso 42
Figura 9: Modelo do estudo de caso no *SketchUp* – fachadas leste e sul 44
Figura 10: Modelo do estudo de caso no *SketchUp* – fachadas oeste e norte 44
Figura 11: Ocupação – dias de semana.....44
Figura 12: Ocupação – finais de semana.....45
Figura 13: Iluminação – dias de semana.....45
Figura 14: Iluminação – finais de semana.....46
Figura 15: Classificação do nível eficiência energética da envoltória de acordo com o método de simulação do RTQ-R.....60
Figura 16: Tratamento tributário e administrativo da importação do sistema MVHR.65
Figura 17: Resultados de desempenho das soluções base 70
Figura 18: Relação entre graus-hora de resfriamento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 1.....75
Figura 19: Relação entre o consumo de aquecimento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 1.....75
Figura 20: Relação entre graus-hora de resfriamento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 2.....76
Figura 21: Relação entre o consumo de aquecimento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 2.....76
Figura 22: Relação entre graus-hora de resfriamento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 3.....77
Figura 23: Relação entre o consumo de aquecimento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 3.....77

Figura 24: Resultados de desempenho das soluções nível A conforme o RTQ-R....79
Figura 25: *Pareto front* para a zona bioclimática 1 – modelo RTQ-R.....80
Figura 26: *Pareto front* para a zona bioclimática 2 – modelo RTQ-R.....80
Figura 27: *Pareto front* para a zona bioclimática 3 – modelo RTQ-R.....80
Figura 28: Resultados de desempenho das soluções otimizadas atendendo ao RTQ-R.....82
Figura 29: *Pareto front* para a zona bioclimática 1 – modelo *Passive House* 85
Figura 30: *Pareto front* para a zona bioclimática 2 – modelo *Passive House* 85
Figura 31: *Pareto front* para a zona bioclimática 3 – modelo *Passive House* 85
Figura 32: Resultados do desempenho das soluções atendendo aos limites da *Passive House* 86
Figura 33: Resultados de desempenho das soluções otimizadas da *Passive House* 88
Figura 34: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 1.....89
Figura 35: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 2.....91
Figura 36: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 3.....92
Figura 37: *Pareto-front* das otimizações 1 e 2 dos modelos *Passive House* na ZB1 94
Figura 38: *Pareto-front* das otimizações 1 e 2 dos modelos *Passive House* na ZB2 95
Figura 39: *Pareto-front* das otimizações 1 e 2 dos modelos *Passive House* na ZB3 96
Figura 40: Investimento total das soluções nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3.....102
Figura 41: Comparação do investimento entre as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 103
Figura 42: Custo dos serviços na zona bioclimática 1.....103
Figura 43: Custo dos serviços na zona bioclimática 2.....104
Figura 44: Custo dos serviços na zona bioclimática 3.....104
Figura 45: Custo total da energia nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3.....106
Figura 46: Comparação do custo total da energia entre as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 106
Figura 47: *Payback* simples nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3.....109
Figura 48: *Payback* descontado nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 110
Figura 49: *Payback* simples da solução 4 considerando a redução do custo do MVHR.....112
Figura 50: *Payback* simples da solução 5 considerando a redução do custo do MVHR.....113

Figura 51: *Payback* simples da solução 4 considerando o aumento na tarifa de energia 114
Figura 52: *Payback* simples da solução 5 considerando o aumento na tarifa de energia 115

Lista de Tabelas

Tabela 1: Diretrizes construtivas para as 8 zonas bioclimáticas brasileiras 24
Tabela 2: Estratégias de condicionamento térmico passivo 24
Tabela 3: Requisitos para os fechamentos opacos 25
Tabela 4: Área mínima de ventilação em dormitórios e sala de estar 25
Tabela 5: Área do envelope opaco, translúcido e percentual de abertura na fachada 43
Tabela 6: Percentual de abertura na fachada em relação a área de piso 43
Tabela 7**:** Características das zonas térmicas.....44
Tabela 8: Temperaturas médias mensais do solo da solução base nas ZB1, ZB2 e ZB3.....47
Tabela 9: Principais características climáticas 49
Tabela 10: Requisitos de desempenho térmico do envelope opaco para as ZB1, ZB2 e ZB3.....50
Tabela 11: Composição das paredes externas 51
Tabela 12: Composição das paredes internas 51
Tabela 13: Composição da cobertura 51
Tabela 14: Composição da laje de piso 52
Tabela 15: Parâmetros simulados na análise de sensibilidade.....53
Tabela 16: Lista de parâmetros otimizados – otimização 1.....54
Tabela 17: Lista de parâmetros otimizados – otimização 2.....55
Tabela 18: Descrição das soluções analisadas nas etapas 1 a 4 56
Tabela 19: Descrição das soluções analisadas na etapa 5.....57
Tabela 20: Pré-requisitos de absortância solar, transmitância térmica e capacidade térmica para as ZB 1, 2 e 3 57
Tabela 21: Classificação de acordo com o RTQ-R 59
Tabela 22: Descrição das soluções para a análise da viabilidade econômica 61
Tabela 23: Relação dos serviços orçados – NBR 12721 (ABNT, 2006) 62
Tabela 24: Levantamento quantitativo de materiais 63
Tabela 25: Percentuais representativo dos serviços 64
Tabela 26: Evolução das tarifas de energia 67
Tabela 27: Descrição das soluções analisadas no cenário 1.....68

Tabela 28: Descrição das soluções analisadas no cenário 2 68
Tabela 29: Resultados de desempenho da solução base 70
Tabela 30: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas 71
Tabela 31: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura 71
Tabela 32: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação para as ZB 1, 2 e 3 71
Tabela 33: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação cruzada 71
Tabela 34: Verificação do atendimento ao pré-requisito de iluminação natural 72
Tabela 35: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória de acordo com o RTQ-R – solução base 74
Tabela 36: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas 77
Tabela 37: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura 78
Tabela 38: Soluções definidas na análise de sensibilidade 78
Tabela 39: Soluções definidas na otimização multiobjetivo do modelo RTQ-R 82
Tabela 40: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas 83
Tabela 41: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura 83
Tabela 42: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória de acordo com o RTQ-R – solução nível A otimizada 84
Tabela 43: Resultados das soluções que atendem aos requisitos mínimos da *Passive House* 86
Tabela 44: Resultados da solução otimizada da *Passive House* 87
Tabela 45: Descrição da configuração da climatização dos modelos 88
Tabela 46: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 1 90
Tabela 47: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 2 91
Tabela 48: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 3 92
Tabela 49: Comparação das soluções obtidas nas otimizações 1 e 2 na zona bioclimática 1 94
Tabela 50: Comparação das soluções obtidas nas otimizações 1 e 2 na zona bioclimática 2 95
Tabela 51: Comparação das soluções obtidas nas otimizações 1 e 2 na zona bioclimática 3 97
Tabela 52: Descrição das soluções para análise da viabilidade econômica 98
Tabela 53: Orçamento dos serviços para a zona bioclimática 1 99
Tabela 54: Orçamento dos serviços para a zona bioclimática 2 100

Tabela 55: Orçamento dos serviços para a zona bioclimática 3 101
Tabela 56: Resultados de consumo e economia de energia.....105
Tabela 57: Resultados do cálculo do custo da energia conservada.....107
Tabela 58: *Payback* simples nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3.....109
Tabela 59: *Payback* descontado nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3.....110
Tabela 60: *Payback* simples da solução 4 considerando a redução do custo do MVHR.....111
Tabela 61: *Payback* simples da solução 5 considerando a redução do custo do HR 112
Tabela 62: *Payback* simples da solução 4 considerando o aumento na tarifa de energia 114
Tabela 63: *Payback* simples da solução 5 considerando o aumento na tarifa de energia 115

Abreviaturas e Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning*

BEN – Balanço Energético Nacional

CEC – Custo da Energia Conservada

CEPHEUS – *Cost Efficient Passive Houses as European Standards*

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EqNumEnv – equivalente numérico da envoltória

EqNumEnvA – equivalente numérico da envoltória para aquecimento

EqNumEnvResfr – equivalente numérico da envoltória para resfriamento

FS – Fator Solar

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

MCE – Medida de Conservação de Energia

MME – Ministério de Minas e Energia

NBR – Norma Brasileira

nZEB – *Nearly Zero Energy Building*

PAFT – Percentual de Abertura na Fachada Total

PH: *Passive House*

PHI – *Passive House Institute*

PMCMV – Programa “Minha Casa, Minha Vida”

RCCTE – Regulamento das Caraterísticas de Comportamento Térmico de Edifícios

RTQ-C – Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos

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

TCPO – Tabela de Composições e Preços para Orçamentos

ZB – Zona bioclimática

ZT – Zona Térmica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 18
1.1. Apresentação do tema 18
1.2. Justificativa 20
1.3. Objetivos 20
1.3.1. Objetivo geral 20
1.3.2. Objetivos específicos 20
1.4. Estrutura do trabalho 21
2. REVISÃO DE LITERATURA 23
2.1. Contexto brasileiro 23
2.2. Edificações de energia zero e políticas para implementação na União Europeia 26
2.3. O *standard Passive House* 27
2.3.1. Diretrizes 31
2.3.2. Requisitos 36
2.3.3. Viabilidade econômica 38
2.4. Otimização 38
3. MÉTODO 40
3.1. Etapas da pesquisa 40
3.2. Estudo de caso 42
3.3. Modelagem e configuração do modelo numérico 43
3.4. Arquivos climáticos 49
3.5. Definição da solução base 50

3.6. Análise de sensibilidade para atender aos limites para classificação Nível A (RTQ-R) 52

3.7. Otimização do envelope térmico com algoritmo evolutivo multiobjetivo 53

3.8. Otimização do envelope térmico e sistemas com algoritmo evolutivo multiobjetivo 54

3.9. Métodos de análise do desempenho 56

3.9.1. Classificação do nível de eficiência energética da envoltória (RTQ-R) 57

3.10. Método para a análise da viabilidade econômica 60

3.10.1. Método para orçamentação 61

3.10.2. Custo da energia elétrica 65

3.10.3. Método de cálculo do custo da energia conservada 65

3.10.4. Método de cálculo para o p*ayback* simples e descontado 66

3.10.5. Cenários para viabilizar o *standard Passive House* 67

4. ANÁLISE DE RESULTADOS 69

4.1. Solução Base 69

4.2. Análise de sensibilidade para atender ao RTQ-R 74

4.3. Otimização do envelope térmico do modelo RTQ-R com algoritmo evolutivo multiobjetivo 79

4.4. Otimização do envelope térmico do modelo *Passive House* com algoritmo evolutivo multiobjetivo 84

4.5. Análise comparativa do desempenho 88

4.6. Otimização do envelope térmico e sistemas do modelo *Passive House* com algoritmo evolutivo multiobjetivo 92

4.7. Viabilidade econômica 97

4.7.1. Orçamentação 98

4.7.2. Balanço energético 104

4.7.3. Resultados do custo da energia conservada 107

4.7.4. *Resultados de payback* simples e descontado 107

4.7.5. Resultados dos cenários para viabilizar o *standard Passive House* 111

5. CONCLUSÕES 116

5.1. Limitações do trabalho 117

5.2. Trabalhos futuros 117

REFERÊNCIAS 118

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do tema

Um dos graves problemas enfrentados no Brasil é a falta do acesso à moradia por uma parcela considerável da população, principalmente famílias de baixa renda. De acordo com Fundação João Pinheiro (2016), com base nos dados da PNAD (Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios), em 2014 o déficit habitacional estimado foi de 6,068 milhões de domicílios, com uma incidência notadamente urbana de, aproximadamente 87,6%. A maior parcela de déficit habitacional está concentrada na região Sudeste do país, que corresponde a 40% do total.

Visando a redução do déficit habitacional, foram criadas muitas políticas sociais, para o incentivo da construção de habitações de interesse social, entre elas o Programa Minha Casa, Minha Vida – PMCMV (BRASIL, 2009). O Programa foi criado pelo Governo Federal, através da Lei 11.977, em julho de 2009, a fim de facilitar o acesso à casa própria para famílias de baixa renda e, ao mesmo tempo, contribuir para a geração de emprego e de renda por meio do aumento do investimento no setor da construção civil.

Devido à alta demanda e o baixo valor de aquisição, as habitações de interesse social são projetadas com materiais de baixa qualidade e sem haver uma preocupação com as especificidades climáticas regionais. Esse procedimento gera edificações de baixa qualidade, que não respondem adequadamente às condições climáticas onde estão inseridas, fazendo necessário o uso de sistemas artificiais de condicionamento de ar e, consequentemente, aumentando o seu consumo de energia elétrica.

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), considerando a região Sul do Brasil, os sistemas de condicionamento de ar são responsáveis pela maior parte do consumo de energia elétrica em uma edificação residencial, cerca de 32%, os sistemas de aquecimento por 25%, os equipamentos de refrigeração (geladeira, *freezer*) por 23%, a iluminação por 8% e outros equipamentos por 12,5%.

Na maioria das vezes, os usuários de habitações de interesse social possuem baixo poder aquisitivo e não possuem condições para arcar com despesas de climatização artificial para compensar o desconforto térmico, potencializando, portanto, a necessidade de um bom desempenho térmico e redução do consumo de energia neste tipo de edificação.

Para aprovação junto ao órgão financiador, dentre outras recomendações, as habitações de interesse social devem obrigatoriamente atender aos requisitos mínimos de desempenho estabelecidos pela NBR 15575 – Edificações Habitacionais: Desempenho (ABNT 2013). No entanto, os requisitos estabelecidos por essa norma são pouco exigentes, e não garantem o conforto térmico e a eficiência energética das edificações.

A fim de promover a eficiência energética em edificações residenciais no Brasil, em 2012, foi publicado o RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INMETRO, 2012). O regulamento possui caráter voluntário, porém é essencial tornar-se obrigatório para reduzir efetivamente o consumo de energia no país.

Em nível mundial, as regulamentações de eficiência energética estão em um nível mais avançado, e indicam um caminho a ser seguido para a evolução dos regulamentos brasileiros, observando aspectos relacionados a edificações com consumo de energia próximo de zero (nZEB- *Nearly Zero Energy Buildings*).

Um caminho para alcançar edificações nZEB é a aplicação do s*tandard Passive House,* que é um conceito de construção que possui o objetivo de proporcionar edificações com elevado conforto e qualidade do ar interior, com baixo consumo de energia. O *standard* foi concebido em 1988, na Alemanha, e apresenta requisitos de desempenho altamente exigentes, os quais são atingidos com estratégias passivas, no que diz respeito ao isolamento térmico do envelope opaco e transparente, à minimização de pontes térmicas, à estanqueidade da edificação e à garantia da qualidade do ar interior.

Nesse contexto, o *standard Passive House* é visto como uma alternativa para melhorar o desempenho térmico e energético em habitações de interesse social no

Brasil, porém é necessário verificar a sua viabilidade técnica, econômica e energética para o contexto climático brasileiro.

1.2. Justificativa

Tendo em vista a baixa eficiência da NBR 15575, que é a norma de desempenho atualmente exigida no Brasil, o trabalho visa o estudo de soluções que possibilitem melhorar a eficiência energética das edificações.

O tema proposto visa contribuir para a obtenção de conhecimentos a respeito da aplicação do *standard Passive House* no clima do sul do Brasil, abordando as soluções construtivas, o seu desempenho térmico e energético e a sua viabilidade econômica.

O *standard Passive House* foi originalmente concebido para o clima frio (Europa central), no entanto, o trabalho busca apoiar a sua disseminação no clima brasileiro, através do estudo da aplicação do *standard* nas zonas bioclimáticas brasileiras 1, 2 e 3.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O principal objetivo do trabalho é analisar a aplicação do *standard Passive House* em uma habitação de interesse social, sob a ótica energética e econômica, no contexto climático do sul do Brasil, zonas bioclimáticas 1, 2 e 3.

1.3.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos do trabalho, aplicados para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, destacam-se:

I. Definir diferentes soluções de envelope térmico para o estudo de caso, a fim de melhorar progressivamente o desempenho térmico e energético, para atender as regulamentações: NBR 15575, RTQ-R e *standard Passive House*;

II. Verificar as melhorias no desempenho térmico e energético entre as diferentes soluções de envelope térmico definidas no estudo;

III. Verificar a economia de energia através do atendimento da classificação Nível A, conforme o RTQ-R e do *standard Passive House*, comparando seu consumo de energia em relação a solução regulamentar brasileira (NBR 15575);

IV. Verificar o investimento adicional para o atendimento da classificação nível A, conforme o RTQ-R e para o *standard Passive House,* comparando seus investimentos em relação a solução regulamentar brasileira (NBR 15575);

V. Avaliar o tempo de retorno do investimento para o atendimento da classificação Nível A, conforme o RTQ-R, e do *standard Passive House,* considerando a vida útil das edificações.

1.4. Estrutura do trabalho

O trabalho foi estruturado em cinco capítulos, onde, no primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução sobre o tema principal, a justificativa da necessidade do trabalho, os objetivos geral e específicos, e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada a revisão de literatura, abordando temas referentes ao consumo de energia e às legislações de desempenho no contexto brasileiro, às edificações de energia zero e as políticas para a sua implementação na União Europeia, ao *standard Passive House* e à otimização de simulação computacional.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia aplicada ao estudo, que se divide em 5 etapas: Etapa 1: definição da solução base, atendendo a NBR 15575 (ABNT,2013); Etapa 2: análise de sensibilidade para atender ao RTQ-R (INMETRO, 2012); Etapa 3: otimização do envelope do modelo configurado de acordo com o RTQ-R (INMETRO, 2012); Etapa 4: otimização do envelope do modelo configurado de acordo com o *standard Passive House*; Etapa 5: otimização do envelope e sistemas do modelo configurado de acordo com o *standard Passive House*. Também são apresentados o método de análise de resultados e o método para a análise econômica.

No quarto capítulo são apresentados os resultados das soluções encontradas nas 5 etapas do trabalho, em relação às soluções construtivas definidas, ao desempenho térmico e energético, ao nível de eficiência energética da envoltória de acordo com o RTQ-R (INMETRO, 2012), como também, à viabilidade econômica.

No quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas, as limitações e sugestões para futuros trabalhos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Contexto brasileiro

No Brasil, as edificações representam 51,1% do consumo de energia elétrica, sendo o setor residencial o maior consumidor, responsável por 25,6%, seguido do setor comercial, com 17,2%, e do setor público, com 8,3% (MME, EPE, 2017). De acordo com o Plano Nacional de Energia há uma tendência de crescimento do consumo de energia elétrica no setor residencial, onde estima-se que o setor alcance 28% do consumo total de energia elétrica no país, até 2030 (MME, EPE, 2007).

A preocupação com a conservação de energia ganhou destaque no Brasil após a crise no setor energético ocorrida em 2001, obrigando o governo a implantar políticas em relação a eficiência energética de edificações. Nesse contexto, em outubro de 2001 foi aprovada a Lei 10.295, dispondo sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia (BRASIL, 2001b) e, em dezembro do mesmo ano, foi publicado o Decreto nº 4.059, regulamentando a Lei 10.295, estabelecendo níveis mínimos de eficiência energética a serem atendidos por equipamentos produzidos ou comercializados no país, bem como as edificações (BRASIL, 2001a).

Em 2005 foi aprovada a primeira norma de desempenho térmico para habitações de interesse social – NBR 15220 (ABNT, 2005), contendo também o zoneamento bioclimático brasileiro, diretrizes construtivas e estratégias passivas para as 8 zonas bioclimáticas, apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Diretrizes construtivas para as 8 zonas bioclimáticas brasileiras

	Aberturas		Paredes			Cobertura		
	Área (% do piso)	**Sombreamento**	**U (W/m^2K)**	**φ (h)**	**FS (%)**	**U (W/m^2K)**	**φ (h)**	**FS (%)**
ZB1	15<A<25	Permitir sol durante o período frio	≤ 3,00	≤ 4,3	≤ 5,0	≤ 2,00	≤ 3,3	≤ 6,5
ZB2	15<A<25	Permitir sol durante o período frio	≤ 3,00	≤ 4,3	≤ 5,0	≤ 2,00	≤ 3,3	≤ 6,5
ZB3	15<A<25	Permitir sol durante o período frio	≤ 3,60	≤ 4,3	≤ 4,0	≤ 2,00	≤ 3,3	≤ 6,5
ZB4	15<A<25	Sombrear aberturas	≤ 2,20	≥ 6,5	≤ 3,5	≤ 2,00	≤ 3,3	≤ 6,5
ZB5	15<A<25	Sombrear aberturas	≤ 3,60	≤ 4,3	≤ 4,0	≤ 2,00	≤ 3,3	≤ 6,5
ZB6	15<A<25	Sombrear aberturas	≤ 2,20	≥ 6,5	≤ 3,5	≤ 2,00	≤ 3,3	≤ 6,5
ZB7	10<A<15	Sombrear aberturas	≤ 2,20	≥ 6,5	≤ 3,5	≤ 2,00	≥ 6,5	≤ 6,5
ZB8	A>40	Sombrear aberturas	≤ 3,60	≤ 4,3	≤ 4,0	≤ 2,30.FT	≤ 3,3	≤ 6,5

U= Transmitância térmica; φ= Atraso térmico; FS= Fator solar; FT= Fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da ZB8.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005

Tabela 2: Estratégias de condicionamento térmico passivo

	Estação	**Estratégia**
ZB1	Inverno	- Aquecimento solar da edificação - Vedações internas pesadas (inércia térmica)
ZB2	Verão	- Ventilação cruzada
	Inverno	- Aquecimento solar da edificação - Vedações internas pesadas (inércia térmica)
ZB3	Verão	- Ventilação cruzada
	Inverno	- Aquecimento solar da edificação - Vedações internas pesadas (inércia térmica)
ZB4	Verão	- Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento - Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa)
	Inverno	- Aquecimento solar da edificação - Vedações internas pesadas (inércia térmica)
ZB5	Verão	- Ventilação cruzada
	Inverno	- Vedações internas pesadas (inércia térmica)
ZB6	Verão	- Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento - Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa)
	Inverno	- Vedações internas pesadas (inércia térmica)
ZB7	Verão	- Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento - Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa)
ZB8	Verão	- Ventilação cruzada permanente

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005

Em 2008, foi publicada a NBR 15575 – Edifícios Habitacionais – Desempenho, que passou a vigorar efetivamente em 2013, após a sua atualização (ABNT, 2013). Ela estabeleceu 13 aspectos a serem considerados durante a análise da edificação,

entre eles o desempenho térmico. A NBR 15575 apresenta dois métodos para analisar o nível de desempenho térmico de edificações residenciais: método simplificado e de simulação. No método simplificado, são estabelecidos os requisitos para os fechamentos opacos, descritos na Tabela 3. Também é definida uma proporção de área efetiva de ventilação (janela/piso), descritas na Tabela 4, para cada zona bioclimática (ABNT,2013). Se o desempenho mínimo não for obtido pelo método simplificado pode-se proceder ao método de simulação computacional.

Tabela 3: Requisitos mínimos para os fechamentos opacos

<table>
<tr><th rowspan="2">ZB</th><th colspan="2">Paredes externas</th><th>Paredes internas</th><th>Cobertura</th></tr>
<tr><th>U (W/m²K)</th><th>CT (kJ/m²K)</th><th>CT (kJ/m²K)</th><th>U (W/m²K)</th></tr>
<tr><td>1</td><td rowspan="2">U ≤ 2,5</td><td rowspan="5">CT ≥130</td><td rowspan="6">CT ≥130</td><td rowspan="2">U ≤ 2,3</td></tr>
<tr><td>2</td></tr>
<tr><td>3</td><td rowspan="5">U ≤ 3,7 se α ≤ 0,6
Ou
U ≤ 2,5 se α > 0,6</td><td rowspan="3">U ≤ 2,3 se α ≤ 0,6, ou
U ≤ 1,5 se α > 0,6</td></tr>
<tr><td>4</td></tr>
<tr><td>5</td></tr>
<tr><td>6</td></tr>
<tr><td>7</td><td>U ≤ 2,3 se α ≤ 0,4 ou
U ≤ 1,5 se α > 0,4</td></tr>
<tr><td>8</td><td>Sem exigência</td><td>Sem exigência</td><td>U ≤ 2,3 FV se α ≤ 0,4 ou
U ≤ 1,5 FV se α > 0,4</td></tr>
</table>

U= Transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Adaptado de ABNT 2013

Tabela 4: Área mínima de ventilação em dormitórios e sala de estar

Nível de desempenho	Aberturas para ventilação (A)	
	ZB 1 a 7 – Aberturas médias	ZB 8 – Aberturas grandes
Mínimo	A ≥ 7% da área do piso	A ≥ 12% da área do piso – região norte do Brasil A ≥ 8% da área do piso – região nordeste do Brasil

Fonte: Adaptado de ABNT 2013

Em 2009, foi publicado o RTQ-C – Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (INMETRO,2013), que especifica requisitos técnicos, bem como os métodos para classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto à eficiência energética. O RTQ-C avalia o desempenho térmico da envoltória e a eficiência dos sistemas de iluminação e ar condicionado da edificação, além de eventuais

bonificações. A avaliação pode ser feita pelo método de simulação ou pelo método prescritivo.

Em 2012, foi aprovado e publicado o RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (INMETRO, 2012), que especifica os requisitos técnicos, bem como os métodos para a classificação de edificações residenciais quanto a eficiência energética. O RTQ-R avalia o desempenho térmico da envoltória e a eficiência do sistema de aquecimento de água da edificação, além de eventuais bonificações. A avaliação da eficiência da envoltória pode ser realizada através do método prescritivo, utilizando equações de acordo com a zona bioclimática, ou através do método de simulação (apresentado no item 3.9.1).

Os regulamentos RTQ-C e RTQ-R classificam as edificações em uma escala que varia de "A" (maior eficiência) para "E" (menor eficiência). Em 2014, o governo brasileiro publicou uma instrução normativa, que estabeleceu a obrigatoriedade da etiqueta nível A, para edificações públicas em nível federal com 500m² ou mais, ou abastecidas por alta tensão, em obras novas ou *retrofits* (BRASIL, 2014).

Embora nos últimos anos os regulamentos de eficiência energética tenham avançado no Brasil, ainda devem ser feitas revisões para que o país obtenha resultados significativos na redução do consumo de energia das edificações.

2.2. Edificações de energia zero e políticas para implementação na União Europeia

Em nível mundial, considerando a necessidade de reduzir o consumo de energia, começam a surgir políticas para a disseminação do conceito *ZEB – Zero Energy Buildings*. Em 2010, a União Europeia publicou a Diretiva 2010/31/EU - *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD), estabelecendo que os Estados Membros devem garantir que, após 31 de dezembro de 2018, as novas edificações públicas sejam nZEB – *Nearly Zero Energy Buildings*, e a partir de 31 de dezembro de 2020 essa regra valerá para todas as novas edificações (EUROPEAN PARLAMENT, 2010).

A diretiva europeia tem conduzido os países europeus a adotarem definições *Nearly*-ZEB e a formarem políticas nacionais para sua implementação. Cada país deve definir suas metodologias conforme as suas condições nacionais, regionais ou locais. Os passos que são necessários para atender as datas para 2018 e 2020 são apresentados no cronograma da Figura 1 (BPIE, 2013).

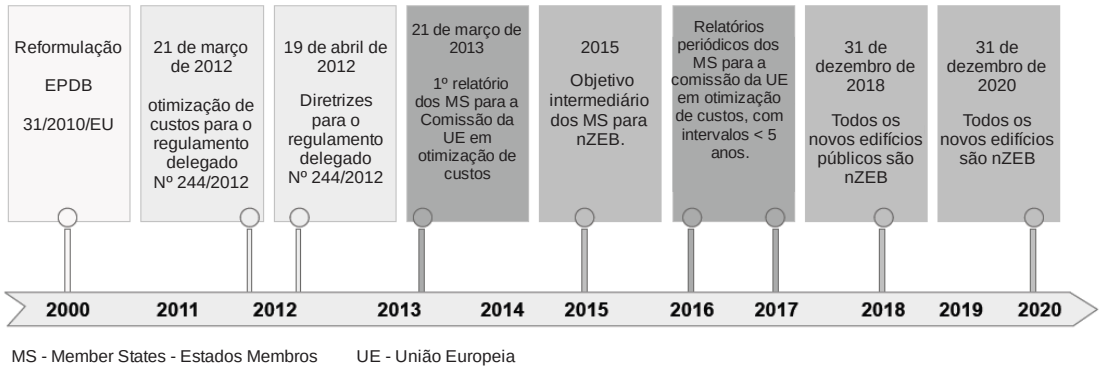


Figura 1: Cronograma de implementação para otimização de custos e exigências de edificações nZEB

Fonte: Adaptado de BPIE, 2013

Para alcançar essas exigências todos os estados membros europeus devem adotar requisitos baseados no desempenho e critérios que agora estão incorporados em seus regulamentos de construção, para edificações novas ou reformadas (ENTRANZE, 2012). O Relatório de Progresso da Comissão Europeia pelos Estados Membros define que embora o EPBD estabeleça o quadro para a definição de nZEBs (*Nearly Zero Energy Buildings)*, a aplicação final detalhada em prática desta definição é responsabilidade dos Estados Membros (EUROPEAN COMISSION, 2013).

2.3. O *standard Passive House*

O *standard Passive House* é um conceito de construção que possui o objetivo de proporcionar uma edificação com conforto e qualidade do ar interior com consumo mínimo de energia. O *standard* foi desenvolvido por Bo Adamson e Wolfgang Feist, em 1988, na Alemanha. O primeiro protótipo foi construído em 1991, na cidade alemã Darmstadt (Figura 2). A edificação foi monitorada de modo a verificar seu desempenho

e com isso registrou-se uma economia de 90% no consumo de energia, em comparação à construção tradicional (PASSIPEDIA, 2018b).

Figura 2: Protótipo *Passive House* em Darmstadt na Alemanha

Fonte: Wikipédia, 2018

O *standard Passive House* é reconhecido internacionalmente por ser a base para edificações nZEB – *Nearly Zero Energy Building*, exigidas na União Europeia. Estima-se que existem cerca de 20 mil edificações *Passive House* construídas no mundo, sendo que a maior parte se encontra na Alemanha, Áustria e Suíça (WASSOUF, 2014).

A eficiência do *standard Passive House* já foi comprovada e possui grande disseminação na Europa. Muitos estudos apresentam a eficiência do *standard* em climas frios. Rojas et al. (2015) monitoraram a temperatura interna, a concentração de CO_2 e a umidade relativa em 18 apartamentos de interesse social na Áustria, construídos de acordo com o *standard Passive House*. Além disso, realizaram uma pesquisa usando questionários onde os ocupantes indicaram um alto nível de satisfação com o ambiente interno. Com base nos resultados, os autores concluem que o *standard* é altamente eficiente em termos de energia e destacam a importância da sua aplicação em habitações sociais de baixa renda da União Europeia. Os autores

afirmam que a aplicação do *standard Passive House* fornece um ambiente interior muito confortável e saudável, com custos de investimento razoáveis na Europa.

O *standard Passive House* foi originalmente concebido para o clima frio, da Europa Central, no entanto, muitas pesquisas foram desenvolvidas para apoiar a aplicação do *standard* em climas quentes. Entre 2005 e 2007, foi desenvolvido o projeto *Passive-on*, promovido e coordenado pelo grupo de pesquisa *Efficiency Research Group,* do politécnico de Milão, que estudou a aplicabilidade do *standard Passive House* nos climas do Sul da Europa (PASSIVE-ON PROJECT, 2018). Entre 2008 e 2012 foi realizado o Projeto CEPHEUS (*Cost Efficient Passive Houses as European Standards*) dentro do programa THERMIE da Comissão Européia, que promoveu a construção de 250 unidades habitacionais *Passive House*, e comprovou a viabilidade do *standard* em 5 países europeus. Em um estudo, Schnieders e Hermelink (2006) avaliaram mais de 100 unidades de habitação, financiados pelo projeto CEPHEUS, e registraram que o consumo de energia primária foi 50%inferior, em relação à energia de novas edificações convencionais. O estudo também mostrou que as edificações oferecem condições internas confortáveis durante o verão e inverno. Em uma segunda etapa do estudo os autores verificaram uma alta satisfação dos inquilinos.

Schnieders, Feist e Rongen (2015), através de simulação dinâmica, avaliaram a aplicabilidade do *standard Passive House* em zonas bioclimáticas relevantes do mundo, representadas por Yekaterinburg, Tóquio, Xangai, Las Vegas, Abu Dhabi e Cingapura. O consumo anual de energia resultante para o condicionamento das edificações foi de 75% a 95% inferior a uma edificação tradicional, de mesma geometria. Os autores concluem o *standard Passive House* pode ser aplicado em qualquer lugar do mundo, sem afetar a liberdade de *design* do arquiteto.

Badescu, Laaser e Crutescu (2010) analisaram os requisitos de climatização da estação quente para a aplicação do *standard Passive House* em uma edificação de escritórios na Romênia. Foi verificado que a taxa de sobreaquecimento e a carga de resfriamento são maiores para a edificação *Passive House*, em relação à uma edificação padrão. Entre abril e setembro é necessário o resfriamento da edificação. O trocador de calor pelo solo e o uso de persianas reduzem o sobreaquecimento na edificação, no entanto, não conseguem garantir um conforto térmico controlado

durante o verão. Com isso conclui-se que um sistema de refrigeração ativo é necessário para a implementação do *standard Passive House* no clima romeno.

Fokaides et al. (2016) monitoraram o desempenho da primeira *Passive House* no Chipre, país com clima subtropical, localizado no Sudeste da Europa. Inicialmente, foram verificados problemas de sobreaquecimento no verão, em todos os ambientes analisados. No entanto, ao adaptar a estratégia de ventilação natural e utilizar a ventilação natural noturna as condições melhoraram. Através de simulação dinâmica, foi investigado o desempenho de uma única zona, considerando um dia quente, onde foi verificada a redução de 1,4°C da temperatura do ar interior, aplicando uma estratégia otimizada de ventilação noturna, enquanto que, o aumento da capacidade de refrigeração do condicionador de ar (HVAC – *Heating, ventilation and air conditioning*) foi significativamente melhorada para o desempenho térmico da zona.

Figueiredo et al*.* (2016a) realizaram um estudo a fim de contribuir com a implementação do *standard Passive House* em Portugal. A partir de um modelo original, foram realizadas análises de sensibilidade de modo a satisfazer ao *standard Passive House*. Os melhores resultados levaram a uma redução de 62% no consumo de aquecimento, 72% no consumo por refrigeração e de 4,4% na taxa de sobreaquecimento nos modelos em que não foi usado sistema de climatização para refrigeração.

Na América do Sul, estudos analisaram a aplicabilidade do *standard Passive House* no Chile, HATT et al*.* (2012). No Brasil ainda há pouca informação sobre a aplicabilidade do *standard Passive House*. Tubelo, Rodrigues e Gillott (2014) compararam o regulamento brasileiro, RTQ-R, com o *standard Passive House*, através de uma revisão de literatura, discutindo os benefícios e barreiras para a aplicação do *standard* no país. Dalbem et al. (2017) avaliaram o desempenho da envoltória de uma *Passive House*, especificamente para a cidade de Pelotas/RS, zona bioclimática brasileira 2. Os autores concluíram que é possível a aplicação do *standard Passive House* no clima analisado e obtiveram uma economia de energia de 56,3% utilizando o sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor em relação ao uso do condicionar de ar. Em outro estudo Dalbem et al*.* (2016) verificaram e comprovaram a aplicabilidade do *standard Passive House* na zona bioclimática brasileira 2, através da ferramenta PHPP (*Passive House Planning Pakage*).

2.3.1. Diretrizes

Uma edificação *Passive House* é projetada e construída empregando os cinco princípios de projeto (Figura 3), que são: elevado isolamento térmico do envelope, esquadrias eficientes, ventilação mecânica com recuperador de calor, estanqueidade e redução de pontes térmicas.

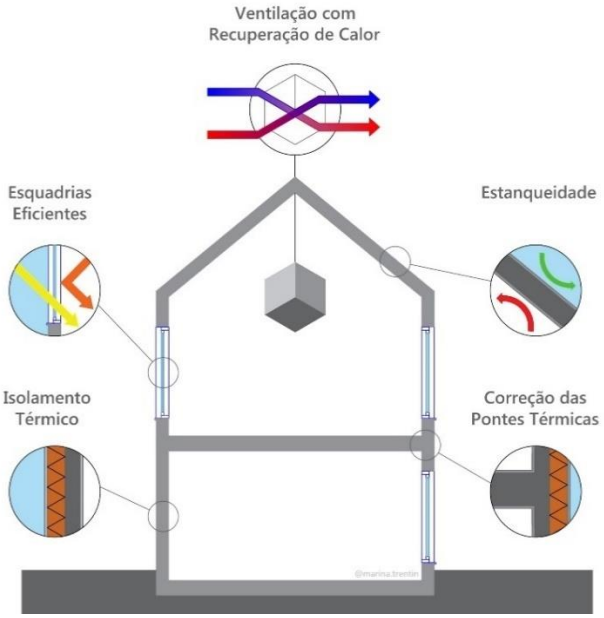


Figura 3: Cinco princípios da *Passive House*

Fonte: Casa Passiva Brasil

2.3.1.1. Isolamento térmico

O elevado isolamento térmico do envelope evita as trocas de calor entre o interior e o exterior da edificação, consequentemente, evitando consumos energéticos excessivos para a climatização dos ambientes. De acordo com o *standard Passive House,* todos os elementos do envelope opaco devem ter baixa transmitância térmica, sendo recomendado um valor inferior a 0,15 W/m²K (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2015). Segundo o projeto *Passive-On* (2007b), dependendo das condições climáticas e do projeto de construção, a necessidade do nível de isolamento térmico pode variar. Em climas mais amenos, a transmitância térmica pode ser acima de 0,30 W/m²K, como é o caso do sul da Itália, Espanha e Portugal.

Todos os métodos construtivos podem ser utilizados em edificações *Passive House*, como por exemplo alvenaria, estrutura em madeira, elementos pré-fabricados entre outros (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2015).

2.3.1.2. Pontes térmicas

A transferência de calor ocorre espontaneamente, do ambiente mais quente para o mais frio, seguindo o caminho de menor resistência. Pontes térmicas são áreas do envelope da edificação que possuem menor resistência térmica em relação às áreas adjacentes. Nessas áreas o fluxo de calor é maior, quando há uma diferença de temperatura entre o ambiente interior e o exterior (PASSIPEDIA, 2018c).

Existem dois tipos de pontes térmicas: pontuais (tridimensionais) e lineares (bidimensionais). É mais comum, em edificações, a presença de pontes térmicas lineares (bidimensionais) que resultam basicamente da ligação entre dois elementos, variação entre os materiais ou variação da espessura dos elementos construtivos (WASSOUF, 2014).

O fluxo de calor nas áreas de pontes térmicas lineares é quantificado pelo coeficiente de transmissão térmica linear – Ψ (w/mK), que depende de uma diferença de temperatura e traduz a taxa de transferência de calor por ela originada (LABRINCHA, 2006). As pontes térmicas pontuais (tridimensionais) surgem nas extremidades tridimensionais, como é o caso dos cantos, ou no caso de uma parede isolada que é perfurada por outro elemento com condutividade térmica mais elevada. Estes tipos de pontes térmicas caracterizam-se por um coeficiente de transmissão térmica pontual – χ (W/ºC) (LABRINCHA, 2006).

Além do aumento das perdas de calor da edificação, nas áreas onde ocorrem as pontes térmicas, a temperatura superficial interna tende a ser menor, causando a incidência de umidade nos componentes de construção ocasionando o crescimento de fungos (PASSIPEDIA, 2018c). Cunha et al. (2015), analisaram o impacto das pontes térmicas no desempenho energético de uma edificação hoteleira para quatro zonas bioclimáticas brasileiras, e observaram que em edificações com PAFT (percentual de abertura na fachada total) entre 30% e 45% o consumo de energia foi

até 10% inferior. Já em edificações com PAFT de 60% o consumo de energia aumentou em até 4%.

Para evitar ou minimizar o fenômeno pontes térmicas o isolamento térmico deve ser aplicado de forma contínua em todo o envelope. Nos pontos de ruptura, deve-se utilizar um elemento com condutividade térmica baixa (WASSOUF, 2014). É recomendado que qualquer ponte térmica linear tenha um coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ) inferior ou igual a 0,01 W/mK (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2015).

2.3.1.3. Estanqueidade

Em edificações *Passive House* deve-se garantir a estanqueidade do envelope da edificação, evitando a entrada de ar indesejado nos ambientes internos, que ocorre pela ação do vento ou pelas variações de temperatura.

A estanqueidade deve ser medida na edificação construída, através do *blower door test* (Figura 4). Este procedimento que cria uma diferença de pressão entre o interior e o exterior da edificação de 50 Pa, que equivale aproximadamente a uma velocidade do vento de 30Km/h. Em edificações *Passive House* o resultado do teste de pressurização não deve superar $0{,}6h^{-1}$ (renovações de ar por hora) (WASSOUF, 2014). O *blower door test* é obrigatório para qualquer norma de baixo consumo energético e está definido na norma EN 13829 (2002).

As infiltrações podem aumentar significativamente a exigência de aquecimento em edificações, causam desconforto devido a correntes de ar e possivelmente podem causar umidade dentro da estrutura da edificação, reduzindo o seu desempenho e vida útil (MEAD, BRYLEWSKI, 2012).

De modo a alcançar o nível de estanqueidade exigida pelo *standard Passive House*, deve-se utilizar membranas estanques ao ar, compatibilizadas com cada elemento construtivo. Dependendo do tipo de construção, estas membranas podem ser em madeira, chapa de alumínio, membranas de vapor ou qualquer outro material que possua uma boa impermeabilização. Quando a membrana de estanqueidade é interrompida deve ser utilizada uma fita isoladora, de modo a criar uma barreira estanque contínua (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2015).

Figura 4: Execução do *blower door test* em uma *Passive House* em Aveiro-PT

Fonte: Autora

2.3.1.4. Ventilação mecânica com recuperador de calor

A ventilação de uma *Passive House* deve ser feita através de um sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor (*Mechanical ventilation with heat recovery* – MVHR). O princípio desse sistema, apresentado na Figura 5, consiste em reaproveitar o calor contido no ar de exaustão e transferi-lo para o ar que é introduzido na edificação, através de um permutador de calor, misturando o ar fresco que entra com o ar de exaustão, simplesmente efetuando a troca de calor para reduzir a necessidade de aquecimento (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2015). O mesmo processo pode ser utilizado para refrigeração (PACHECO, 2013).

Existem dois tipos de recuperadores de calor, o recuperador entálpico, que recupera parte da temperatura e reduz a umidade do ar, e o recuperador estático, que recupera apenas a temperatura, mais comum em edificações *Passive House*. Em climas quentes e úmidos devem ser usados sistemas com recuperador entálpico. Reduzir a umidade do ar de entrada reduz o calor armazenado no vapor de água (carga térmica latente), o que resulta na redução do consumo energético com climatização (PACHECO, 2013).

Para garantir o bom desempenho do sistema é aconselhável a utilização de recuperadores com certificação *Passive House*. O rendimento nominal mínimo de um recuperador deve ser de 75%. Os recuperadores mais eficientes conseguem rendimentos nominais de até 90%. Além disso, esse sistema apresenta baixo consumo de energia, sendo que em equipamentos certificados pelo *Passive House Institute*, o consumo dos ventiladores não deve superar 0,45 Wh/m³ (WASSOUF, 2014).

O sistema garante a renovação do ar interior, necessária por questões de salubridade do ar interno, para evitar o acúmulo de poluentes internos em concentrações tóxicas (PACHECO, 2013). O sistema deve ser dimensionado de forma a assegurar um fluxo de ar mínimo de 30 m³/h de ar por pessoa, para residências, garantindo o conforto higiênico (WASSOUF, 2014).

Vários estudos a respeito dos sistemas MVHR vêm sendo realizados nos últimos anos. Gustafsson et al. (2014) realizaram um estudo através de simulação dinâmica, verificando que o sistema MVHR e micro bomba de calor obteve menor consumo de energia para aquecimento em todos os climas analisados. Em um clima frio, Estocolmo e Gdansk, a economia de energia foi de 36% em relação ao sistema de referência. El Fouih et al. (2012) também comprovaram a eficiência de um sistema MVHR.

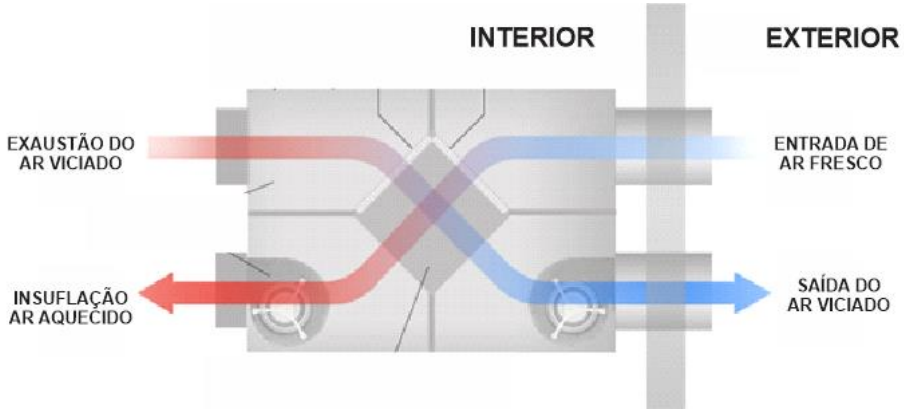


Figura 5: Esquema de funcionamento do sistema recuperador de calor

Fonte: Adaptado de QUBO, 2017

2.3.3.5. Esquadrias de alta eficiência

Em uma *Passive House*, a diferença máxima entre a temperatura do ambiente interno e a temperatura da superfície interna das vedações não deve ser maior que 4,2ºC. Em consequência disso, o *Passive House Institute* estabeleceu uma série de critérios muito rigorosos em relação às esquadrias, que constituem o elemento construtivo energicamente mais frágil das vedações da edificação (WASSOUF, 2014).

Para cumprir as condições de conforto, a transmitância térmica de uma esquadria – que inclui a perda através do vidro, do caixilho e dos espaçadores das chapas de vidro – não podem superar 0,8 W/m²K. Recomenda-se que as janelas tenham fator solar alto, maior que 0,5 (WASSOUF, 2014).

A transmitância térmica de uma esquadria, levando em conta as características do vidro, da caixilharia e da instalação, deve ser inferior a 0,85 W/m²K.

Para climas frios, as esquadrias devem possuir vidro triplo com capas de baixa emissividade e caixilharia com isolamento térmico incorporado. Em climas mais quentes o uso de um vidro duplo com capa de baixa emissividade e a caixilharia com corte térmico será suficiente para atender ao *standard* (IPHA, 2010).

2.3.2. Requisitos

Uma *Passive House* deve atender a requisitos muito rigorosos referentes à sua concepção e construção e é certificada baseada em uma verificação de qualidade do seu projeto. Os requisitos exigidos consistem em (PHI, 2013):

I. Critério de aquecimento: o consumo de aquecimento não deve ser superior à 15 kWh/m²a, ou, a carga de aquecimento não deve ser superior a 10 W/m²;

II. Critério de refrigeração: o consumo de refrigeração não deve ser superior à 15 kWh/m²a, ou, a carga de refrigeração não deve ser superior a 10 W/m²;

III. Critério de energia primária: o consumo de energia primária de todos os serviços energéticos, incluindo o aquecimento e refrigeração dos ambientes, água quente e equipamentos elétricos, não deve ser superior à 120 kWh/m²a;

IV. Estanqueidade do ar: o resultado do teste de pressurização (EN 13829) não deve ser superior a 0,6 h^{-1} (renovações de ar por hora);

V. Sobreaquecimento: o conforto térmico deve ser atendido para todas as áreas de permanência durante o inverno, bem como no verão, não ultrapassando 10% das horas do ano à temperatura de 25°C.

A certificação estabelece que os critérios devem ser verificados utilizando a versão mais recente do PHPP – *Passive House Planning Package* (PHI, 2016), que é o *software* específico da certificação.

Para a aplicação do *standard Passive House* em climas quentes da Europa, o projeto *Passive-on* elaborou uma proposta de revisão dos requisitos, levando em consideração as variações climáticas (PASSIVE-ON PROJECT, 2007a):

I. Critério de aquecimento: o consumo de energia para aquecimento não deve ser superior à 15kWh/m²a;

II. Critério de refrigeração: o consumo de refrigeração deve ser superior à 15kWh/m²a;

III. Critério de energia primária: o consumo de energia primária não deve ser superior à 120 kWh/m²a;

IV. Estanqueidade ao ar: em localizações com condições de projeto com temperaturas acima de 0°C, o teste de pressurização (EN 13829) com um limite de 1,0 h^{-1} (renovações de ar por hora) é suficiente para atingir o critério de aquecimento;

V. Sobreaquecimento: o conforto térmico deve ser atendido para todas as áreas de permanência durante o inverno, bem como no verão, não ultrapassando 10% das horas do ano à temperatura de 26°C.

Porém, esta definição, será revista quando for adquirida maior experiência com edificações *Passive House* em climas quentes (PASSIVE-ON PROJECT, 2007a).

De acordo com a demanda de energia primária e a geração de energia renovável, as edificações *Passive House* podem alcançar diferentes categorias: *classic, plus* ou *premium.* A *Passive House Classic* é a certificação tradicional, com

baixo consumo energético, descrita anteriormente. Em uma *Passive House Plus* a energia gerada a partir de fontes renováveis (fotovoltaica) deve ser equivalente a energia consumida e, em uma *Passive House Premium* a energia produzida a partir de fontes renováveis deve ser superior a energia consumida (PASSIPEDIA, 2018a).

2.3.3. Viabilidade econômica

A aplicação do *standard Passive House* é um investimento que resulta em benefícios econômicos, considerando que os gastos com climatização serão mínimos ou desnecessários. O investimento efetuado com materiais, esquadrias, isolamento térmico e sistema de ventilação, atendendo aos requisitos que o *standard* estabelece, promove a redução do consumo de energia e consequentemente a redução de custos ao longo da vida útil da edificação (PASSIPEDIA, 2012).

A avaliação econômica é essencial para a obtenção de dados concretos sobre os custos, consumos e ganhos da aplicação do *standard.* Também é importante a avaliação do *payback,* que é o período em que o investimento inicial é recuperado, através da economia de energia.

Na Europa, edificações *Passive House*, em relação a edificações convencionais, possuem um custo adicional de 10%, em edificações unifamiliares isoladas ou geminadas, 8% em edificações multifamiliares e cerca de 5% em edificações de serviços (escolas, escritórios, etc.) (IPHA, 2010).

Grangeia (2013) verificou que em Portugal o investimento adicional de uma *Passive House* foi cerca de 15.000 €, e permitiu poupar em um ano 1.100 €, em relação a mesma edificação com classe energética A, de acordo com o regulamento português RCCTE – Regulamento das Caraterísticas de Comportamento Térmico de Edifícios. O trabalho revelou que o custo adicional para obter uma *Passive House* é de 10% a 12%.

2.4. Otimização

A otimização é um processo contínuo de busca e comparação de soluções viáveis para um determinado problema, até que nenhuma melhor solução possa ser

encontrada. A otimização multiobjetivo é um problema onde há duas ou mais funções objetivo conflitantes, que devem ser minimizados ou maximizados. Para cada problema há um conjunto de soluções eficientes, também conhecidas, como soluções *Pareto-front* (KALYANMOY, 2001).

Neste trabalho foi utilizada uma abordagem de otimização multiobjetivo utilizando um algoritmo evolutivo híbrido com base em algoritmos evolutivos CMA-ES (algoritmo de adaptação de matriz de covariância) e HDE (evolução diferencial híbrida) (KÄMPF, 2009; KÄMPF, ROBINSON, 2009;). Este algoritmo foi utilizado por Figueiredo et al. (2016b), que realizaram uma otimização em uma edificação residencial, a fim de cumprir aos requisitos da *Passive House*, através da definição de soluções de envelope externo e sistemas de aquecimento e refrigeração. Comparando uma das melhores soluções alcançadas com o estudo original, foi conseguida uma redução de 42% do consumo de energia de aquecimento e a redução de 64% do consumo de energia de refrigeração.

Em outro estudo, Figueiredo et al. (2018), utilizaram este algoritmo a fim de desenvolver um método de calibração para recursos de simulação dinâmica de edificações, identificando os melhores desempenhos simulados que revelam a melhor concordância com os dados reais monitorados, alterando as entradas pré-identificadas como variáveis.

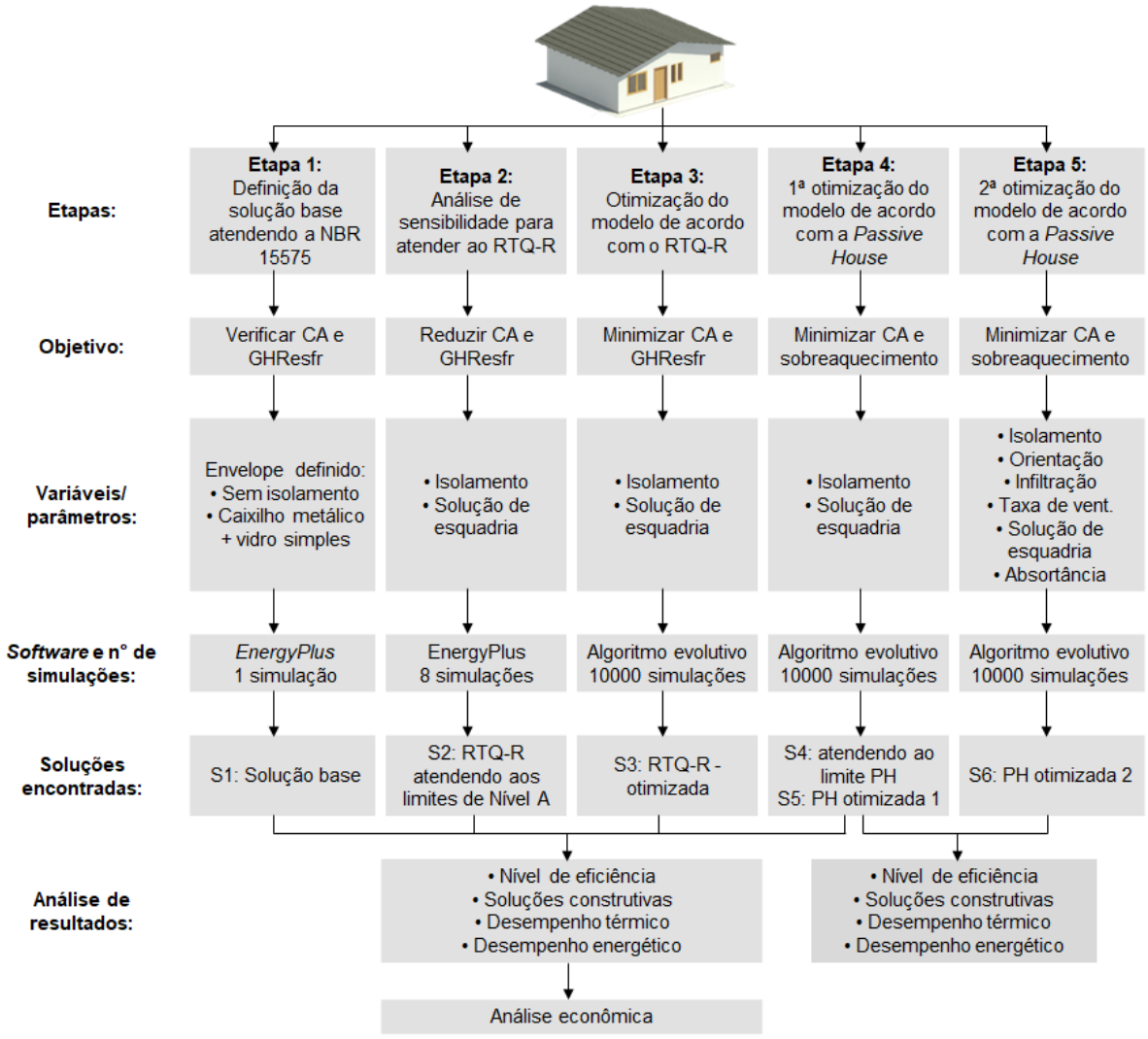
Nos últimos anos, o uso de técnicas de otimização na área de eficiência energética de edificações cresceu. Bre e Fachinotti (2017) desenvolveram e validaram um código computacional para a otimização multiobjetivo do desempenho de edificações, utilizando como objeto de estudo uma edificação residencial unifamiliar, localizada na Argentina. Foram variados o tipo de telhado, tipo de paredes externas e internas, orientação e absortância solar, tamanho, tipo e sombreamento de esquadrias, entre outras, a fim de obter o melhor *Pareto-front* entre o desempenho de aquecimento e refrigeração. Os resultados ótimos indicaram que é possível melhorar até 95% o conforto térmico das salas com ventilação natural e até 82% do desempenho energético em salas climatizadas.

3. MÉTODO

3.1. Etapas da pesquisa

Foi utilizado como objeto de estudo o projeto de uma habitação de interesse social unifamiliar, inserida nas zonas bioclimáticas brasileiras 1, 2 e 3. A metodologia foi dividida em 5 etapas, ilustrada esquematicamente na Figura 6. Na Etapa 1, utilizando o *software EnergyPlus*®, realizou-se a simulação da solução base, definida com uma solução de envelope atendendo aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 15575, com o objetivo de verificar o seu desempenho térmico e energético. Na Etapa 2, realizou-se uma análise de sensibilidade variando dois parâmetros no envelope da solução base: espessura do isolamento térmico e solução de esquadria. O objetivo desta etapa foi definir um modelo que atendesse à classificação nível A, de acordo com o RTQ-R (regulamento brasileiro de eficiência energética). Na Etapa 3, através de um algoritmo evolutivo multiobjetivo, realizou-se a otimização do modelo numérico configurado conforme o RTQ-R, variando os mesmos parâmetros da Etapa 2: espessura do isolamento térmico e solução de esquadria. Usando este algoritmo evolutivo, cada simulação multiobjetivo foi realizada em aproximadamente 10 horas, com um Intel Core i7 4770 K com 4 núcleos trabalhando a 3,5 GHz com 16 GB de RAM. Foram realizadas 10.000 simulações com a dupla função objetivo de minimizar o consumo de energia de aquecimento e os graus-hora de resfriamento, requisitos para atender ao RTQ-R. Na Etapa 4, realizou-se a otimização do modelo numérico configurado conforme o *standard Passive House*, variando os mesmos parâmetros das Etapas 2 e 3: espessura do isolamento térmico e solução de esquadria, com a dupla função objetivo de minimizar o consumo de aquecimento e o sobreaquecimento, requisitos para atender ao *standard Passive House*. Na Etapa 5, realizou-se uma segunda otimização do modelo *Passive House*, variando um maior número de parâmetros: isolamento térmico, orientação solar, infiltração, taxa de ventilação, tipo de vidro e absortância solar, com a dupla função objetivo de minimizar o consumo de aquecimento e sobreaquecimento. Realizou-se uma análise comparativa entre as soluções construtivas, desempenho térmico e energético das soluções encontradas,

separadamente para as etapas de 1 a 4 e para as etapas 4 e 5. Por fim analisou-se a viabilidade econômica das soluções atendendo ao RTQ-R (Etapas 2 e 3) e ao *standard Passive House* (Etapa 4) em relação à edificação regulamentar brasileira, acordando com a NBR 15575 (Etapa 1). Foram analisados 3 indicadores econômicos: custo da energia conservada, *payback* simples e *payback* descontado.



CA= Consumo de aquecimento, GHResfr= Graus-hora de resfriamento.

Figura 6: Etapas do método de pesquisa

Fonte: Autora

3.2. Estudo de caso

A edificação escolhida como estudo de caso, apresentada nas Figuras 7 e 8, é uma habitação de interesse social unifamiliar (OLIVEIRA, 2012), que atende às especificações mínimas da segunda fase do PMCMV - Programa “Minha Casa, Minha Vida” (MINCIDADES, 2009).

A edificação possui 45,86 m² e é constituída por 4 ambientes (zonas térmicas – ZT), os quais são dois dormitórios (ZT1 e ZT2), sala de estar e cozinha integradas (ZT3) e banheiro (ZT4).

O estudo de caso é um projeto representativo do Programa “Minha Casa, Minha Vida”. Foi escolhido sem levar em consideração a “qualidade do projeto”, e não possui preocupações com as características dos climas analisados no trabalho, embora esteja implantado no eixo leste/oeste, com a maior área de esquadrias voltada para o norte.

Figura 7: Perspectiva do estudo de caso

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2012

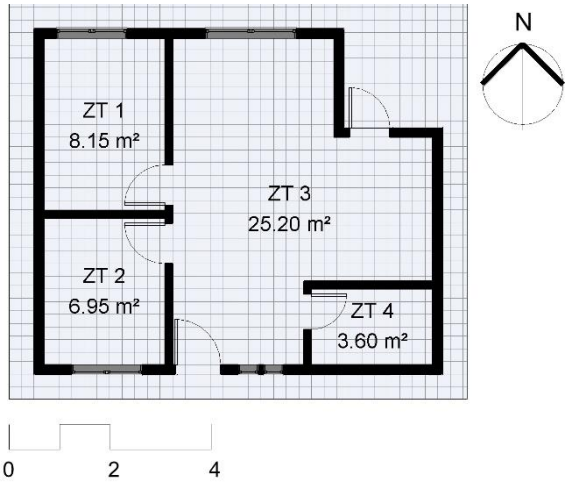


Figura 8: Planta baixa do estudo de caso

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2012

O fator forma da edificação é de 1,39, que é a razão entre a área do envelope (165,30 m²) e o volume total da edificação (119,24m³). A edificação possui aberturas orientadas para norte e sul, sendo que o percentual de aberturas na fachada norte é de 19,18% e na fachada sul é de 15,58%. A área total envidraçada corresponde a 9,45% da área opaca da edificação, conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Área do envelope opaco, translúcido e percentual de abertura na fachada

	Total	Norte	Leste	Sul	Oeste
Envelope opaco (m^2)	66,63	16,18	16,77	16,74	16,77
Envelope translúcido (m^2)	6,96	3,84	0,00	3,28	0,00
Área total do envelope (m^2)	73,58	20,02	16,77	20,02	16,77
Percentual de abertura (%)	9,46	19,18	0,00	15,58	0,00

Fonte: Autora

O percentual de abertura para ventilação em relação a área de piso é de 19,53% na ZT1, 22,83% na ZT2, 12,62% na ZT3 e 12,31% na ZT4, conforme descrito na Tabela 6. Todos os valores ficam acima de 7%, valor exigido pela NBR 15575 para os ambientes de permanência prolongada (ABNT, 2013).

Tabela 6: Percentual de abertura na fachada em relação a área de piso

Zona térmica	Ambiente	Área de piso (m^2)	Área de abertura (m^2)	Abertura em relação a área de piso (%)
ZT1	Dormitório 1	8,60	1,68	19,53
ZT2	Dormitório 2	7,36	1,68	22,83
ZT3	Estar/cozinha	26,00	3,28	12,62
ZT4	Banheiro	3,90	0,48	12,31

Fonte: Autora

3.3. Modelagem e configuração do modelo numérico

Para a modelagem da edificação utilizou-se a interface gráfica do *software SketchUp*® 2015 com o *plugin Legacy Open Studio* 1.0.13 e a simulação dos modelos foi realizada utilizando o *software Energy Plus*®, versão 8.5.0 (DOE, 2017). Após a modelagem, realizou-se a configuração do modelo numérico de acordo com os valores padrão apresentados no RTQ-R, para ocupação, iluminação, equipamentos, ventilação natural e sistema de ar condicionado (INMETRO, 2012).

3.3.1. Modelagem

Nas Figuras 9 e 10 é apresentada a modelagem da edificação de estudo de caso, onde cada ambiente foi modelado como uma zona térmica (ZT). A Tabela 7 apresenta as características das zonas térmicas do modelo: área, pé-direito e volume.

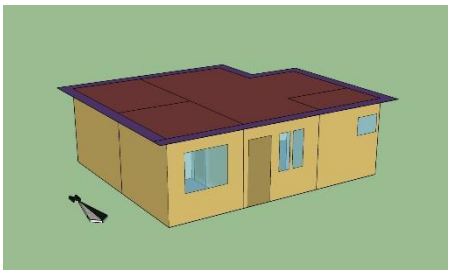


Figura 9: Modelo do estudo de caso no *SketchUp* – fachadas leste e sul

Fonte: Autora

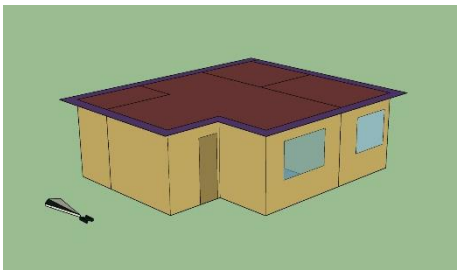


Figura 10: Modelo do estudo de caso no *SketchUp* – fachadas oeste e norte

Fonte: Autora

Tabela 7**:** Características das zonas térmicas

Zona térmica	Ambiente	Área (m²)	Pé-direito (m)	Volume (m³)
ZT 1	Dormitório 1	8,60	2,60	22,36
ZT 2	Dormitório 2	7,36	2,60	19,14
ZT 3	Estar/cozinha	26,00	2,60	67,60
ZT 4	Banheiro	3,90	2,60	10,14
Total	Edificação HIS	45,86	2,60	119,24

Fonte: Autora

3.3.2. Configuração de ocupação, iluminação e equipamentos

Foi adotado o padrão mínimo de ocupação, sendo duas pessoas por dormitório e quatro pessoas no ambiente de estar e cozinha. As agendas de ocupação foram modeladas separadamente para os dias de semana e finais de semana, conforme as Figuras 11 e 12, respectivamente (INMETRO, 2012).

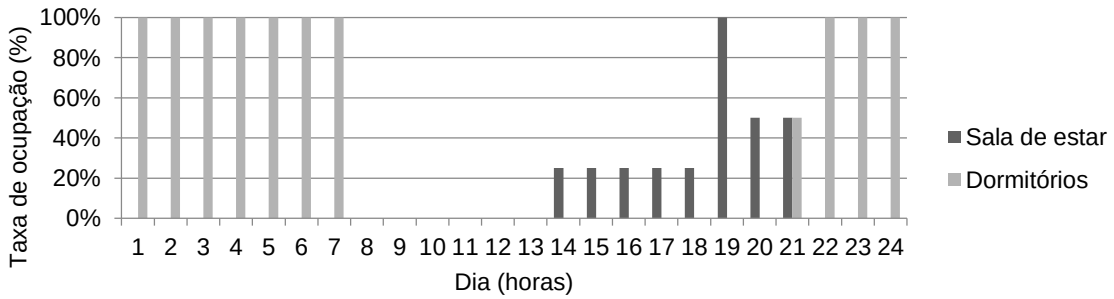


Figura 11: Ocupação – dias de semana

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012

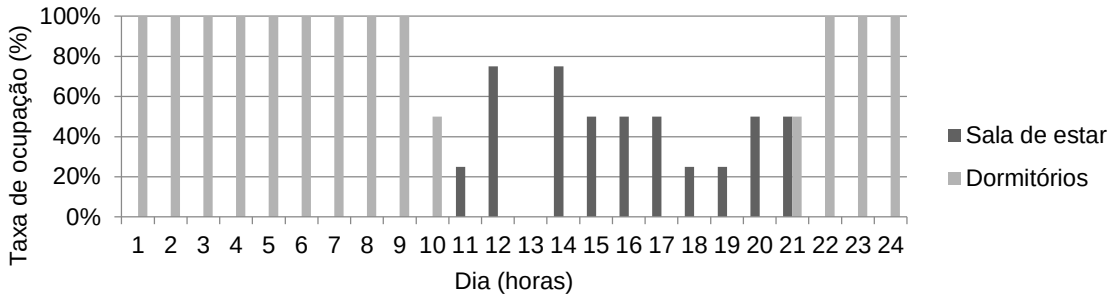


Figura 12: Ocupação – finais de semana

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012

A taxa metabólica foi adotada de acordo com o tipo de atividade desempenhada em cada ambiente que é de 81 W por pessoa nos dormitórios e de 108 W por pessoa na sala de estar/cozinha.

O padrão de iluminação foi modelado apenas para os ambientes de permanência prolongada, separadamente para os dias de semana e final de semana, conforme apresentado nas Figuras 13 e 14, respectivamente. A densidade de potência instalada (DPI) de iluminação foi de 6 W/m² nas salas e de 5 W/m² nos dormitórios (INMETRO, 2012).

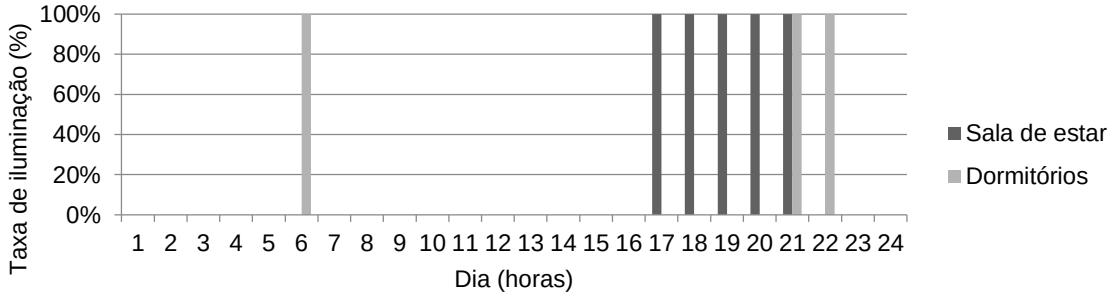


Figura 13: Iluminação – dias de semana

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012

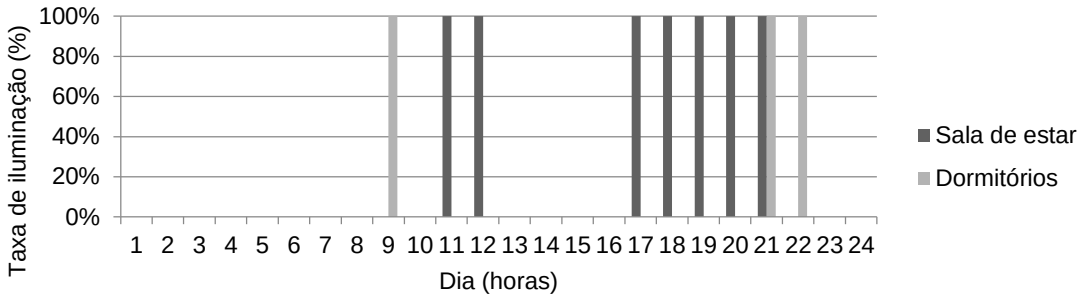


Figura 14: Iluminação – finais de semana

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012

A densidade de carga interna com equipamentos adotada foi de 1,5 W/m² para a sala, considerada no período de 24 horas (INMETRO, 2012).

Foi configurado o sombreamento das janelas através de persianas externas, que funcionam através de uma agenda, onde foi definido o período de sombreamento durante a primavera e o verão, de 21 de setembro até 20 de março, entre as 8:00h às 18:00h. Foi utilizada uma persiana com aletas horizontais com refletância de 0,8, condutividade de 0,90 W/mK e espessura de 0,001m. O sombreamento das janelas não é exigido pela NBR 15575, porém foi definido para beneficiar o desempenho da edificação.

3.3.3. Configuração da temperatura do solo

Determinou-se a temperatura do solo utilizando o programa *Slab,* vinculado ao *EnergyPlus*®. Para isso realizou-se uma simulação inicial para a verificação das temperaturas médias mensais do ar interno, em que o solo foi considerado sob uma condição adiabática. Em seguida, as temperaturas médias mensais do ar interno obtidas foram configuradas e simuladas com o pré-processador *Slab*, que corrige as temperaturas médias mensais do solo. Os resultados obtidos foram configurados no *software EnergyPlus*®. Calculou-se as temperaturas do solo para a solução base, dos modelos condicionado artificialmente (CA) e ventilado naturalmente (VN), para as três zonas bioclimáticas, como mostra a Tabela 8. Nas simulações seguintes a temperatura do solo foi mantida a mesma da solução base.

Segundo Oliveira (2012), a alteração dos valores de transmitância térmica das paredes e cobertura, mantendo-se os demais parâmetros de entrada do programa, como padrões de utilização e ocupação, ventilação, fechamentos transparentes, sombreamento, entre outros, não influiu significativamente nos valores obtidos para a temperatura do solo obtida pelo programa *Slab*, permitindo que todas as demais configurações do envelope da edificação que serão simuladas possam utilizar os mesmos valores de temperatura do solo.

Tabela 8: Temperaturas médias mensais do solo da solução base nas ZB1, ZB2 e ZB3

Mês	ZB1: Curitiba-PR		ZB2: Santa Maria-RS		ZB3: Florianópolis-SC	
	CA (ºC)	VN (ºC)	CA (ºC)	VN (ºC)	CA (ºC)	VN (ºC)
Janeiro	21,44	20,28	25,25	24,74	24,28	24,04
Fevereiro	22,18	21,13	25,01	24,87	24,40	24,18
Março	21,85	20,76	23,55	22,97	23,96	23,53
Abril	20,85	19,58	21,41	20,28	23,13	22,51
Maio	19,39	17,07	19,89	17,83	21,31	20,31
Junho	18,63	15,82	18,79	16,08	20,23	18,95
Julho	19,15	16,79	18,29	14,97	19,64	17,90
Agosto	19,37	17,01	18,42	15,00	19,64	17,82
Setembro	19,22	16,67	19,48	17,01	20,07	18,59
Outubro	20,30	18,33	21,25	19,88	21,67	20,86
Novembro	20,62	19,25	22,63	21,64	22,73	22,13
Dezembro	21,69	20,48	22,92	22,01	23,54	23,12

CA: Modelo com condicionamento artificial; VN: Modelo com ventilação natural; ZB: Zona bioclimática

Fonte: Autora

3.3.4. Configuração do sistema de climatização artificial e ventilação natural dos modelos configurados conforme o RTQ-R

Conforme estabelece RTQ-R, foram criados dois modelos-base: 1) modelo ventilado naturalmente; 2) modelo condicionado artificialmente. Os modelos ventilados naturalmente são configurados com ventilação natural durante as 24 horas diárias. A abertura de janelas ocorre quando a temperatura do ar do ambiente é igual ou superior à temperatura de termostato, 20°C ($T_{int} \geq T_{setpoint}$), e quando houver condições favoráveis, ou seja, quando a temperatura do ar externo é inferior à temperatura do ar interno ($T_{ext} \leq T_{int}$).

No modelo condicionado artificialmente é definido um sistema de ar condicionado para os ambientes de permanência prolongada no período noturno, das

21:00h as 8:00h, com *setpoint* de 22°C para aquecimento e 24°C para refrigeração. O sistema de aquecimento tem um coeficiente de performance (COP) de 2,75, e o sistema de refrigeração, de 3,00. A taxa de fluxo de ar por pessoa é de 0,00944 m^3/s. A eficiência do motor é de 0,90, e a do ventilador é de 0,70. No período diurno é definida a ventilação natural, das 8:00h às 21:00h, controlada da mesma forma que o modelo ventilado naturalmente.

3.3.5. Configuração do sistema de climatização conforme a *Passive House*

Em edificações *Passive House* deve ser configurado um sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor (*Mechanical Ventilation with Heat Recovery* – MVHR). Esse sistema é configurado para todas as zonas térmicas. O sistema foi configurado no objeto *IdealLoadsAirSystem*, do *Energy Plus*®, com um fluxo de ar constante de 0,4 h^{-1} (renovações de ar por hora). A recuperação de calor possui eficiência de 80%, e é ativa durante as 24 horas do dia com um *setpoint* de temperatura 20ºC para aquecimento e de 26ºC para refrigeração, que são os limites de conforto térmico definidos pelo projeto *Passive-on*, para a aplicação do *standard* em climas quentes. Neste modelo não é considerada a ventilação por abertura de janelas, apenas infiltração de ar na envolvente de 1 h^{-1} (renovações de ar por hora), valor máximo permitido pelo projeto *Passive-on*.

O objeto *IdealLoadsAirSystem* considera que, quando a temperatura está fora dos limites de *setpoint*, a climatização é realizada com um sistema de condicionador de ar com coeficiente de performance (COP) igual a 1. Esta condição é uma limitação do trabalho, imposta pelo objeto *IdealLoadsAirSystem*, do *Energy Plus*®. Embora no caso de climatização artificial, considerando o RTQ-R, haja um sistema de condicionador de ar com um COP de 2,75 W/W para aquecimento e de 3,0 W/W para refrigeração, a baixa eficiência do sistema de climatização do condicionador de ar na simulação da *Passive House* é uma condição de contorno prejudicial à eficiência do sistema. Essa desvantagem do sistema de climatização artificial na análise do MVHR foi assumida no trabalho.

3.4. Arquivos climáticos

Para representar as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, foram utilizados os arquivos climáticos das cidades de Curitiba-PR, Santa Maria-RS e Florianópolis-SC, respectivamente. Alguns parâmetros climáticos das três cidades estão apresentados nas Tabela 9 (LABEEE, 2018). A cidade de Curitiba-PR, zona bioclimática 1, apresenta temperaturas mais baixas durante o ano, com média anual de 17,4°C. Fevereiro é o mês mais quente, com temperatura média de 20,9°C e junho é o mês mais frio, com temperatura média de 14,7°C. A cidade de Santa Maria-RS, zona bioclimática 2, apresenta maior amplitude de temperaturas no ano, com verão e inverno muito rigorosos. A temperatura média anual é de 19,1°C, onde janeiro é o mês mais quente, com temperatura média de 24,9°C, e agosto é o mês mais frio, com temperatura média de 13,4°C. A cidade de Florianópolis-SC, zona bioclimática 3, apresenta temperaturas mais quentes, com média anual de 20,9°C, onde janeiro é o mês mais quente, com temperatura média de 24,3°C e agosto é o mês mais frio, com temperatura média de 16,4°C.

Tabela 9: Principais características climáticas

Mês	Temperatura de bulbo seco (ºC)									Umidade relativa (%)			Radiação solar global (W/m²)		
	Média			Máxima			Mínima			Média			Média		
	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3
Jan	19,6	24,9	24,3	30,5	36,1	31,1	14,2	14,2	16,7	81	72	75	4117	6580	5218
Fev	20,9	24,8	24,2	29,1	35,9	31,9	13,9	13,7	16,9	77	74	74	4911	4998	5608
Mar	19,9	22,2	23,6	29,2	32,8	29,8	13,7	12,3	16,8	77	82	74	4431	4219	4606
Abr	17,9	18,6	22,3	28,2	30,1	31,2	8,3	6,9	12,3	81	79	75	3816	3658	3841
Mai	15,0	16,5	19,4	26,6	30,2	28,4	6,2	3,9	8,2	78	76	74	3414	3015	3222
Jun	14,7	15,6	18,7	23,9	27,7	28,3	3,7	6,0	12,5	83	86	82	2608	1868	2358
Jul	15,4	14,4	17,5	26,5	29,7	30,0	5,2	1,1	5,1	71	81	80	3735	2234	2172
Ago	15,7	13,4	16,4	27,9	33,1	23,6	6,2	2,0	6,2	78	73	71	3386	3496	3772
Set	14,6	16,0	17,8	29,6	33,9	25,7	5,1	3,9	6,7	78	73	75	3948	3937	4022
Out	17,6	19,8	21,3	31,0	35,5	27,5	9,0	7,7	14,9	83	72	74	3974	5263	4726
Nov	18,0	21,3	22,2	28,0	38,3	31,9	12,7	7,5	12,4	82	69	71	4932	6060	5304
Dez	19,4	21,2	23,4	32,2	31,8	31,5	10,2	10,2	16,3	76	72	72	5790	6263	4911

ZB= Zona bioclimática

Fonte: Adaptado de LABEEE, 2018

3.5. Definição da solução base

Para a definição da solução base, foram adotados materiais tradicionais da construção de habitações de interesse social no Brasil, de modo a atender aos requisitos da transmitância e capacidade térmica exigidos para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 pelo método simplificado da NBR 15575, conforme a Tabela 10 (ABNT, 2013).

Tabela 10: Requisitos de desempenho térmico do envelope opaco para as ZB1, ZB2 e ZB3

<table>
<tr><th rowspan="2">Zona bioclimática</th><th colspan="2">Paredes externas</th><th>Paredes internas</th><th>Cobertura</th></tr>
<tr><th>U (W/m²K)</th><th>CT (kJ/m²K)</th><th>CT (kJ/m²K)</th><th>U (W/m²K)</th></tr>
<tr><td>1</td><td rowspan="2">U ≤ 2,5</td><td rowspan="2">CT ≥130</td><td rowspan="2">CT ≥130</td><td rowspan="2">U ≤ 2,3</td></tr>
<tr><td>2</td></tr>
<tr><td>3</td><td>U ≤ 3,7 se α ≤ 0,6, ou
U ≤ 2,5 se α > 0,6</td><td>U ≤ 2,3 se α ≤ 0,6, ou
U ≤ 1,5 se α > 0,6</td></tr>
</table>

U= Transmitância térmica; CT= Capacidade térmica; α= Absortância térmica.

Fonte: Adaptado de ANBT, 2013

As Tabelas de 11, 12, 13 e 14 apresentam as propriedades dos materiais e o resultado do cálculo da transmitância e capacidade térmica dos elementos construtivos, calculados de acordo com o método apresentado na NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

As paredes externas são executadas em alvenaria cerâmica, com blocos de 6 furos da linha *Light* da marca Pauluzzi nas dimensões 14x19x29cm. As características do bloco foram disponibilizadas pelo fabricante. As paredes recebem reboco de 2 cm de espessura em ambas as faces. As paredes internas são compostas por tijolos maciços, com 2 cm de reboco em ambas as faces. A cobertura é composta por telhas de fibrocimento de 0,8 cm fixadas sobre estrutura de madeira. Todos os ambientes possuirão forro de madeira de 2 cm, fixado sobre uma estrutura de madeira. A laje de piso é composta por *radier* de concreto armado com 10 cm de espessura. Sobre o *radier* será executada a argamassa de assentamento e o piso cerâmico. Foi configurada a absortância térmica (α) de 0,2 nas paredes externas e de 0,6 na cobertura. Todo o envelope opaco foi configurado com emissividade (ε) de 0,9.

Tabela 11: Composição das paredes externas

Paredes externas						
Composição	**e (m)**	**λ (W/mK)**	**p (kg/m³)**	**c (kJ/kgK)**	**R (m²/WK)**	**CT (kJ/m²K)**
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00
Bloco cerâmico 6 furos - 14x19x29	0,14	0,70	609,28	0,92	0,20	78,48
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00
Resistência térmica total - Rsi+∑R+Rsi ((m².K)/W)						0,40
Transmitância térmica – U (W/(m².K))						2,47
Capacidade térmica total (kJ/(m².K))						150,48

e= Espessura; λ= Condutividade térmica; p= Densidade de massa aparente; R= Resistência térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Autora

Tabela 12: Composição das paredes internas

Paredes internas						
Composição	**e (m)**	**λ (W/mK)**	**p (kg/m³)**	**c (kJ/kgK)**	**R (m²/WK)**	**CT (kJ/m²K)**
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Tijolo maciço	0,11	1	1800	0,92	0,11	182,16
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Resistência térmica total - ((m².K)/W)						0,31
Transmitância térmica (W/(m².K))						3,18
Capacidade térmica total (kJ/(m².K))						254,16

e= Espessura; λ= Condutividade térmica; p= Densidade de massa aparente; R= Resistência térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Autora

Tabela 13: Composição da cobertura

Cobertura						
Composição	**e (m)**	**λ (W/mK)**	**p (kg/m³)**	**c (kJ/kgK)**	**R (m²/WK)**	**CT (kJ/m²K)**
Telha fibrocimento	0,008	0,65	1800	0,84	0,01	12,10
Câmara de ar	> 0,05	-	-	-	0,14	0
Forro de madeira	0,02	0,12	450	1,34	0,17	12,06
Resistência térmica total ((m².K)/W)						0,46
Transmitância térmica (W/(m².K))						2,18
Capacidade térmica total (kJ/(m².K))						24,16

e= Espessura; λ= Condutividade térmica; p= Densidade de massa aparente; R= Resistência térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Autora

Tabela 14: Composição da laje de piso

Laje de piso						
Composição	**e (m)**	**λ (W/mK)**	**p (kg/m³)**	**c (kJ/kgK)**	**R (m²/WK)**	**CT (kJ/m²K)**
Radier - concreto	0,10	1,75	2200	1	0,06	220,00
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36,00
Revestimento cerâmico	0,01	1,30	2300	0,965	0,01	22,20
Resistência térmica total - ((m².K)/W)						0,29
Transmitância térmica (W/(m².K))						3,42
Capacidade térmica total (kJ/(m².K))						278,20

e= Espessura; λ= Condutividade térmica; p= Densidade de massa aparente; R= Resistência térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Autora

Na configuração das janelas da solução base foram utilizados vidros simples de 3 mm, padrão do *EnergyPlus*, que possuem transmitância térmica de 5,89 (W/m²K) e fator solar (FS) de 0,86.

A solução base foi configurada sob duas condições, para análise conforme o RTQ-R: 1) ventilada naturalmente e 2) condicionada artificialmente, como descrito no item 3.3.4.

3.6. Análise de sensibilidade para atender aos limites para classificação Nível A (RTQ-R)

Para atender o nível A conforme o RTQ-R, efetuaram-se 8 variações a partir da solução base, apresentadas na Tabela 15. A estratégia foi melhorar o isolamento térmico do envelope, substituindo a esquadria com vidros simples por uma esquadria com caixilho de PVC e vidros duplos no envelope transparente, e incrementando em 1 cm o isolamento térmico no envelope opaco em cada simulação. O isolante térmico utilizado foi o poliestireno expandido – EPS, com condutividade térmica de 0,04 (W/m.K), densidade de 350 (Kg/m³) e calor específico de 1,42 (kJ/(kg.K) (NBR 15220, 2005).

Os vidros utilizados foram do tipo insulado de 24 mm (CEBRACE), que possuem fator solar de 0,45 e transmitância térmica de 1,98 W/(m²K), considerando a caixilharia em PVC da linha EuroDur 3S – Kömmerling®. As características dos vidros e caixilhos foram disponibilizadas pelos respectivos fabricantes.

As soluções foram modeladas sob duas condições, para análise conforme o RTQ-R: 1) ventilada naturalmente e 2) condicionada artificialmente, conforme o item 3.3.4.

Tabela 15: Parâmetros simulados na análise de sensibilidade

Soluções	Espessura do isolamento térmico (m)	Solução de esquadria	U_{pis} (W/m²K)	U_{par} (W/m²K)	U_{cob} (W/m²K)	$U_{esq.}$ (W/m²K)
Solução base	0,00	Caixilho metálico + vidro monolítico 3mm	4,09	2,60	2,19	5,90
Solução 1	0,00	Caixilho PVC + vidro insulado	4,09	2,60	2,19	1,98
Solução 2	0,01	Caixilho PVC + vidro insulado	2,02	1,58	1,42	1,98
Solução 3	0,02	Caixilho PVC + vidro insulado	1,34	1,13	1,05	1,98
Solução 4	0,03	Caixilho PVC + vidro insulado	1,01	0,88	0,83	1,98
Solução 5	0,04	Caixilho PVC + vidro insulado	0,80	0,72	0,69	1,98
Solução 6	0,05	Caixilho PVC + vidro insulado	0,67	0,61	0,59	1,98
Solução 7	0,06	Caixilho PVC + vidro insulado	0,57	0,53	0,51	1,98
Solução 8	0,07	Caixilho PVC + vidro insulado	0,50	0,47	0,45	1,98

U= Transmitância térmica.

Fonte: Autora

3.7. Otimização do envelope térmico com algoritmo evolutivo multiobjetivo.

Nesta etapa, foram variados 4 parâmetros, descritos na Tabela 16. Os parâmetros definidos como variáveis contínuas (x0, x1 e x2) podem assumir qualquer valor definido no intervalo dos limites. Variáveis discretas (x3) representam os parâmetros onde é obtida uma solução entre um conjunto de soluções pré-definidas.

Os valores de isolamento térmico foram variados entre 0,001 m e 0,12 m, onde a espessura máxima definida, de 0,12 m, resulta em uma transmitância térmica do envelope 0,30 W/m²K, que é o valor recomendado pelo projeto *Passive-on* para a aplicação do *standard* em climas quentes. Foram definidas 4 soluções de esquadrias, onde foi utilizado um sistema de caixilharia de PVC em todos os casos e variadas as soluções de vidro entre: insulado, laminado, monolítico 4 mm e monolítico 3 mm. Os valores de transmitância térmica e fator solar (FS) das soluções de esquadrias são descritos na Tabela 16.

Tabela 16: Lista de parâmetros otimizados – otimização 1

Variáveis contínuas		
Parâmetro id.	**Designação**	**Limites**
x0	Espessura do isolamento térmico – paredes externas (m)	0,001 – 0,12
x1	Espessura do isolamento térmico – cobertura (m)	0,001 – 0,12
x2	Espessura do isolamento térmico – laje de piso (m)	0,001 – 0,12
Variáveis discretas		
x3	Soluções de esquadrias	Caixilho de PVC + vidro insulado U=1,98 W/m²K – FS=0,45
		Caixilho de PVC + vidro laminado U=4,13 (W/m²K) – FS=0,5
		Caixilho de PVC + vidro monolítico 3 mm U=4,24 (W/m²K) – FS=0,38
		Caixilho de PVC + vidro monolítico 3 mm U=4,30 (W/m²K) – FS=0,86

U= Transmitância térmica; FS= Fator solar.

Fonte: Autora

Os modelos foram otimizados para atender as duas situações: nível A (RTQ-R) e ao *standard Passive House.* Na etapa 3 da metodologia, foi realizada a otimização para atender o nível A, de acordo com o RTQ-R, utilizando o modelo configurado com condicionador de ar, conforme o item 3.3.4. Foram otimizadas duas funções objetivo, a fim de minimizar o consumo de energia para aquecimento e graus-hora de resfriamento. Na etapa 4 da metodologia, foi realizada a otimização para atender ao *standard Passive House*, utilizando um modelo configurado com ventilação mecânica com recuperador de calor, conforme o item 3.3.5. As funções objetivo foram minimizar o consumo de energia para aquecimento e o sobreaquecimento.

3.8. Otimização do envelope térmico e sistemas com algoritmo evolutivo multiobjetivo

Nesta etapa foram variados 15 parâmetros (Tabela 17), para a otimização do envelope e sistemas do modelo *Passive House*, configurado de acordo com o item 3.3.5.

Tabela 17: Lista de parâmetros otimizados – otimização 2

Variáveis contínuas		
Parâmetro id.	**Designação**	**Limites**
x0	Espessura do isolamento térmico – paredes externas (m)	0,001 – 0,12
x1	Espessura do isolamento térmico – cobertura (m)	0,001 – 0,12
x2	Espessura do isolamento térmico – laje de piso (m)	0,001 – 0,12
x3	Orientação solar (º)	0 – 360
x4	Infiltração (h^{-1})	0,015 – 0,05
x5	Taxa de ventilação resfriamento- ZT 1 (h^{-1})	0,3 – 0,9
x6	Taxa de ventilação resfriamento- ZT 2 (h^{-1})	0,3 – 0,9
x7	Taxa de ventilação resfriamento- ZT 3 (h^{-1})	0,3 – 0,9
x8	Taxa de ventilação resfriamento- ZT 4 (h^{-1})	0,3 – 0,9
x9	Taxa de ventilação aquecimento – ZT1 (h^{-1})	0,3 – 0,9
x10	Taxa de ventilação aquecimento – ZT2 (h^{-1})	0,3 – 0,9
x11	Taxa de ventilação aquecimento – ZT3 (h^{-1})	0,3 – 0,9
x12	Taxa de ventilação aquecimento – ZT4 (h^{-1})	0,3 – 0,9
Variáveis discretas		
x13	Soluções de esquadrias	Caixilho de PVC + vidro insulado U=1,98 W/m²K – FS=0,45
		Caixilho de PVC + vidro laminado U=4,13 (W/m²K) – FS=0,5
		Caixilho de PVC + vidro monolítico 3 mm U=4,24 (W/m²K) – FS=0,38
		Caixilho de PVC + vidro monolítico 3 mm U=4,30 (W/m²K) – FS=0,86
x14	Absortância térmica das paredes externas	Branco= 0,20
		Amarelo= 0,30
		Verde claro= 0,4
		Vermelho=0,74
		Preto= 0,97
x15	Absortância térmica da cobertura	Branco= 0,20
		Amarelo= 0,30
		Verde claro= 0,4
		Vermelho=0,74
		Preto= 0,97

U= Transmitância térmica; FS= Fator solar.

Fonte: Autora

Realizou-se a otimização a fim de atender ao *standard Passive House*, utilizando um modelo configurado com ventilação mecânica com recuperador de calor, conforme o item 3.3.5. As funções objetivo foram minimizar o consumo de energia para aquecimento e sobreaquecimento.

3.9. Métodos de análise do desempenho

Primeiramente são definidas as soluções de envelope em cada etapa da metodologia, atendendo sua respectiva regulamentação, descritas na Tabela 18:

Tabela 18: Descrição das soluções analisadas nas etapas 1 a 4

Etapas	**Soluções**	**Descrição:**
Etapa 1	Solução 1	Solução regulamentar brasileira, atendendo à NBR 15575;
Etapa 2	Solução 2	Solução com classificação Nível A, de acordo com o RTQ-R
Etapa 3	Solução 3	Solução nível A otimizada
Etapa 4	Solução 4	Solução que atente aos requisitos mínimos da *Passive House*
	Solução 5	Solução *Passive House* otimizada

Fonte: Autora

Verificou-se o desempenho de cada solução nas diferentes zonas bioclimáticas, durante o período anual, em relação ao consumo de energia para aquecimento, refrigeração e taxa de sobreaquecimento. O sobreaquecimento é definido como o número de horas em que a temperatura ultrapassa o limite definido em 26°C, estabelecido pelo *Passive-on* (climas quentes). Nas etapas 1, 2 e 3, que utilizam os modelos configurados de acordo com o RTQ-R é realizada a análise do nível de eficiência energética da envoltória, de acordo com o método de simulação do RTQ-R, descrito no item 3.9.1. Realizou-se também uma análise comparativa entre o desempenho das diferentes soluções, verificando a melhor solução em cada clima.

Por fim, verificou-se o potencial de melhoria da otimização do modelo *Passive House*, variando um maior número de parâmetros (etapa 5). Conforme descrito na Tabela 19, comparou-se os resultados da solução obtida na otimização 1 do modelo *Passive House* (etapa 4), com os resultados da solução obtida na otimização 2 (etapa 5), para as três zonas bioclimáticas.

Tabela 19: Descrição das soluções analisadas na etapa 5

Etapas	Soluções	Descrição:
Etapa 4	Solução 1	Solução *Passive House* otimizada obtida na otimização do envelope – otimização 1
Etapa 5	Solução 2	Solução *Passive House* otimizada obtida na otimização do envelope e sistemas – otimização 2

Fonte: Autora

3.9.1. Classificação do nível de eficiência energética da envoltória (RTQ-R)

A Figura 15 apresenta esquematicamente o método de simulação computacional para a classificação do nível de eficiência energética da envoltória, de acordo com o RTQ-R. Primeiramente, deve-se verificar o atendimento dos pré-requisitos específicos da envoltória, separadamente para cada ambiente de permanência prolongada, referentes a características térmicas de absortância, transmitância e capacidade térmica das superfícies e a características físicas relativas a iluminação e ventilação natural.

A Tabela 20 apresenta os pré-requisitos de transmitância térmica, capacidade térmica e absortância solar das paredes externas e coberturas de acordo com a zona bioclimática. O não atendimento a estes pré-requisitos implica em no máximo nível C, nos equivalentes numéricos para resfriamento, aquecimento e refrigeração.

Tabela 20: Pré-requisitos de absortância solar, transmitância térmica e capacidade térmica para as ZB 1, 2 e 3

Zona bioclimática	Componente	α (adimensional)	U (W/m²K)	CT (kJ/m²K)
ZB1 e ZB2	Parede	Sem exigência	$U \leq 2,50$	$CT \geq 130$
	Cobertura	Sem exigência	$U \leq 2,30$	Sem exigência
ZB3	Parede	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 3,70$	$CT \geq 130$
		$\alpha > 0,6$	$U \leq 2,50$	$CT \geq 130$
	Cobertura	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 2,30$	Sem exigência
		$\alpha > 0,6$	$U \leq 1,50$	Sem exigência

α= Absortância solar; U= transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Autora

Para atender o pré-requisito de ventilação natural, nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, os ambientes de permanência prolongada devem possuir percentual de áreas mínimas de aberturas para ventilação maior ou igual a 8% em relação a área de piso.

Nas zonas bioclimáticas 2 a 8, a edificação deve possuir ventilação cruzada proporcionada por sistema de aberturas compreendido pelas aberturas externas e internas, sem considerar as portas de acesso principal e de serviço. As aberturas devem atender à proporção indicada na Equação 1. Caso não possua ventilação cruzada, a edificação atingirá no máximo nível C no equivalente numérico da envoltória para resfriamento. O pré-requisito de ventilação cruzada é analisado para a edificação como um todo e não para cada ambiente individualmente.

$$\frac{A2}{A1} \geq 0{,}25 \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

A_1: somatório das áreas efetivas de aberturas para ventilação localizadas nas fachadas da orientação com maior área de abertura para ventilação (m²);

A_2: somatório das áreas efetivas de aberturas para ventilação localizadas nas fachadas das demais orientações (m²).

Para atender o pré-requisito de iluminação natural a soma das áreas de abertura para iluminação de cada ambiente deve corresponder a no mínimo 12,5% da área útil do ambiente. O não atendimento deste pré-requisito implica em no máximo nível C nos equivalentes numéricos da envoltória para resfriamento, aquecimento e refrigeração.

Após verificar o atendimento dos pré-requisitos da envoltória, deve-se modelar a geometria da edificação e realizar simulações para duas condições: ventilada naturalmente e condicionada artificialmente. Para a avaliação da edificação ventilada naturalmente, comparam-se os indicadores de graus-hora de resfriamento, calculados com temperatura base de 26°C, dos ambientes de permanência prolongada com os níveis de eficiência das tabelas de classificação (Tabela 21) (PBE EDIFICA, 2017). Para a avaliação da edificação condicionada artificialmente comparam-se os consumos de aquecimento e de refrigeração dos ambientes de permanência prolongada com os níveis de eficiência das tabelas de classificação (Tabela 21) (PBE EDIFICA, 2017).

Tabela 21: Classificação do nível de eficiência energética de acordo com o RTQ-R

Nível	EqNum	Graus-hora de resfriamento (°Ch)			Consumo de refrigeração (kWh/m².a)			Consumo de aquecimento (kWh/m².a)		
		ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3
A	5	≤ 143	≤ 2.310	≤ 822	≤ 0,713	≤ 5,849	≤ 6,890	≤ 16,700	≤ 15,591	≤ 6,429
B	4	≤ 287	≤ 4.396	≤ 1.643	≤ 1,426	≤ 11,288	≤ 12,284	≤ 33,400	≤ 31,182	≤ 12,858
C	3	≤ 430	≤ 6.481	≤ 2.465	≤ 2,138	≤ 16,727	≤ 17,677	≤ 50,099	≤ 46,772	≤ 19,287
D	2	≤ 574	≤ 8.567	≤ 3.286	≤ 2,851	≤ 22,166	≤ 23,071	≤ 66,799	≤ 62,363	≤ 25,716
E	1	> 574	> 8.567	> 3.286	> 2,851	> 22,166	>23,071	>66,799	>62,363	>25,716

Fonte: Adaptado de PBE EDIFICA, 2017

A determinação do nível de eficiência energética da envoltória é realizada por meio de equações estabelecidas para cada zona bioclimática. Para a ZB1, ZB2 e ZB3 o equivalente numérico da envoltória da edificação ($EqNum_{Env}$) é obtido por meio das Equações 2, 3 e 4, respectivamente (INMETRO, 2018):

$$EqNumEnv = 0{,}08 \times EqNumEnvResfr + 0{,}92 \times EqNumEnvA \quad \text{Equação 2}$$

$$EqNumEnv = 0{,}44 \times EqNumEnvResfr + 0{,}56 \times EqNumEnvA \quad \text{Equação 3}$$

$$EqNumEnv = 0{,}64 \times EqNumEnvResfr + 0{,}36 \times EqNumEnvA \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

EqNumEnv: equivalente numérico da envoltória (caracteriza o nível de eficiência energética da envoltória);

EqNumEnvResfr: equivalente numérico da envoltória para resfriamento; e

EqNumEnvA: equivalente numérico da envoltória para aquecimento.

De acordo com a pontuação final obtida no equivalente numérico da envoltória (EqNumEnv) é atribuída uma classificação que varia do nível A (mais eficiente) ao E (menos eficiente).

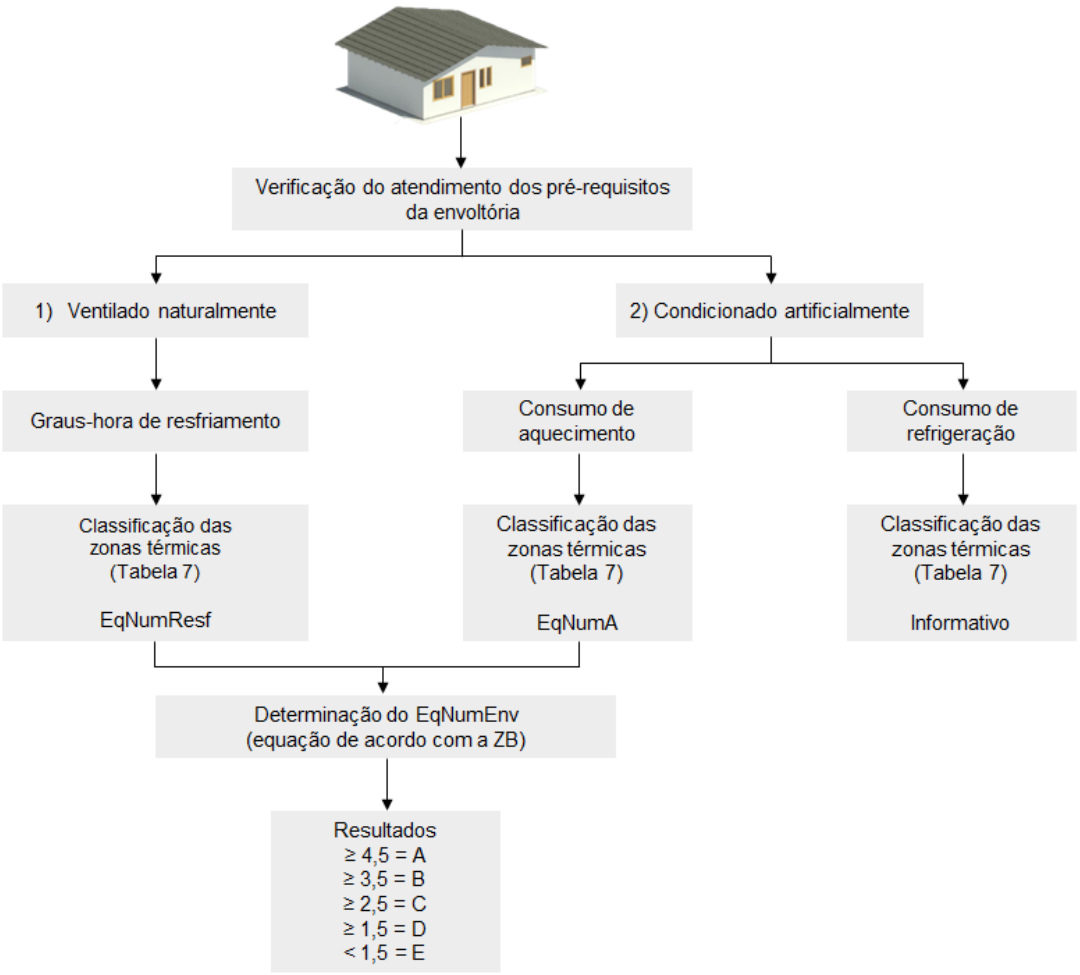


Figura 15: Classificação do nível eficiência energética da envoltória de acordo com o método de simulação do RTQ-R

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012

3.10. Método para a análise da viabilidade econômica

O objetivo desta etapa é analisar a viabilidade econômica das soluções atendendo Nível A, conforme o RTQ-R (soluções 2 e 3) e ao *standard Passive House* (soluções 4 e 5) nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3. Para isso, utilizou-se como base comparativa a solução regulamentar brasileira, de acordo com a NBR 15575 (solução 1). As soluções analisadas são descritas na Tabela 22.

Tabela 22: Descrição das soluções para a análise da viabilidade econômica

Etapas	**Soluções**	**Descrição**
Etapa 1	Solução 1	Solução regulamentar brasileira, atendendo à NBR 15575;
Etapa 2	Solução 2	Solução com classificação Nível A, de acordo com o RTQ-R
Etapa 3	Solução 3	Solução nível A otimizada
Etapa 4	Solução 4	Solução que atente aos requisitos mínimos da *Passive House*
	Solução 5	Solução *Passive House* otimizada

Fonte: Autora

Para igualar as condições de contorno entre as soluções analisadas, foram necessárias algumas alterações na configuração dos modelos. Nas soluções 1, 2 e 3, alterou-se a configuração do *setpoint* de ar condicionado, de forma a manter as temperaturas internas entre 20°C e 26°C, durante as 24 horas diárias. Nas soluções 3 e 4 os resultados dos consumos de energia foram divididos pelo coeficiente de performance (COP) do ar condicionado, que é de 2,75 para aquecimento e 3,00 para refrigeração, de acordo com o RTQ-R.

Para a análise econômica, primeiramente, efetuou-se a orçamentação e em seguida analisou-se o balanço energético das diferentes soluções para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3. Assim, foram obtidos o investimento adicional e a economia de energia das soluções atendendo à classificação Nível A (RTQ-R) e ao *standard Passive House,* em relação à solução base. Para avaliar a viabilidade econômica foram definidos 3 indicadores: custo da energia conservada, *payback* simples e *payback* descontado.

3.10.1. Método para orçamentação

Um orçamento é determinado somando-se os custos diretos (mão de obra, material e equipamento) e os custos indiretos (equipes de supervisão e de apoio, despesas gerais do canteiro de obras, taxas, etc.) e por fim adicionando-se impostos e lucro para se chegar ao preço de venda (MATTOS,2006). Neste trabalho foram considerados apenas os custos diretos.

A composição de custos é o processo de estabelecimento dos custos para a execução de um serviço ou atividade, individualizado por insumo e de acordo com certos requisitos pré-estabelecidos. A composição lista todos os insumos que entram

na execução do serviço, com suas respectivas quantidades e seus custos unitários e totais (MATTOS, 2006). A composição de custos foi elaborada em 4 etapas: 1) Identificação dos serviços; 2) levantamento de quantitativos; 3) discriminação dos custos diretos; 4) cotação de preços.

A Tabela 23 apresenta a relação dos serviços orçados, com base na discriminação orçamentária apresentada na NBR 12721 (ABNT, 2006):

Tabela 23: Relação dos serviços orçados – NBR 12721

B.1. Serviços iniciais:	**B.1.3 Instalações provisórias**
	B. 1.8 Trabalhos em terra - Escavações manuais;
B.2 Infra-estrutura e obras complementares:	- Fundações superficiais/rasas;
B.3 Supra-estrutura:	- concreto armado;
B.4 Paredes e painéis:	**B.4.1 Alvenarias e divisórias** - Alvenarias de tijolos maciços; - Alvenarias de tijolos furados;
	B.4.2 Esquadrias e ferragens - Esquadrias de alumínio; - Esquadrias plásticas;
B.5 Coberturas e proteções:	**B.5.1 Cobertura** - Estrutura de madeira para cobertura; - Cobertura com telhas fibrocimento; - Funilaria;
	B.5.2 Impermeabilizações - Impermeabilização de fundações;
	B.5.3 Tratamentos especiais - Tratamento térmico;
B.6 Revestimentos, forros, marcenaria e serralheria, pinturas e tratamentos especiais:	**B-6.1 Revestimentos (interno e externo)** - Revestimentos de argamassa; - Revestimentos cerâmicos/azulejos; - Peitoris;
	B.6.2 Forros e elementos decorativos - Forros de madeira;
	B.6.4 Pintura - Selador paredes; - Selador portas e madeiras; - Pintura acrílica;
B.7 Pavimentações:	**B.7.1 Pavimentações** - Contra piso; - Pisos cerâmicos;
	B.7.2 Rodapés, soleiras - Rodapé cerâmico;
B.8 Instalações e aparelhos:	**B.8.1 Aparelhos e metais**
	B.8.2 Instalações elétricas
	B.8.3 Instalações hidráulica, sanitária e gás
	B.8.4 Prevenção e combate a incêndio
B.9 Complementação da obra:	**B.9.1 Calafete e limpeza**

Fonte: Adaptado de ABNT, 2006

O levantamento quantitativo de materiais, apresentado na Tabela 24, foi realizado com base nas dimensões especificadas no projeto arquitetônico e características técnicas.

Tabela 24: Levantamento quantitativo de materiais

Descrição dos serviços		**Qtde.**	**Unid.**
B.1 Serviços iniciais	Aterro mecanizado	51,09	m³
	Compactação do aterro	51,09	m²
B.2 Infra-estrutura e obras complementares	Fôrmas (radier)	2,97	m²
	Lastro de brita (radier)	3,58	m³
	Armadura de tela de aço CA 60 (radier)	51,09	m²
	Concreto C25 (radier)	5,11	m³
	Bombeamento do concreto (radier)	5,11	m³
	Aplicação e adensamento (radier)	5,11	m³
B.3 Supra-estrutura	Fôrmas (cintas de amarração)	25,24	m²
	Armadura de aço CA 60 (cintas de amarração)	6,59	Kg
	Concreto preparado na obra (cintas de amarração)	1,68	m³
	Vergas e contravergas	0,60	m³
B.4. Paredes e paineis	Alvenaria de vedação - paredes externas	74,76	m²
	Alvenaria de vedação - paredes internas	29,67	m²
	Esquadrias de aluminio	6,48	m²
	Maxim-air	0,48	m²
	Porta de madeira (0,80x2,10)	2,00	un
	Porta de madeira (0,70x2,10)	3,00	un
B.5 Coberturas e proteções	Estruturade madeira	66,95	m²
	Telha de fibrocimento	66,95	m²
	Cumeeira	9,06	m
	Calha de chapa de aço galvanizado	18,12	m
	Impermeabilização - emulsão asfáltica	51,09	m²
	Isolamento térmico do piso	51,08	m²
	Isolamento térmico das paredes	74,76	m²
	Isolamento térmico da cobertura	51,08	m²
B.6 Revestimento, forro, marcenaria e serralheria, pinturas e tratamentos especiais	Chapisco - externo	83,68	m²
	Emboço - externo	83,68	m²
	Reboco - externo	83,68	m²
	Chapisco - interno	138,06	m²
	Emboço - interno	138,06	m²
	Reboco - interno	138,06	m²
	Peitoril	6,20	m²
	Forro de madeira	47,73	m²
	Pintura com tinta látex acrílica - paredes externas	83,68	m²
	Pintura com tinta látex PVA - paredes internas	138,06	m²
	Pintura com verniz - esquadrias de madeira	15,54	m²
B.7 Pavimentações	Regularização sarrafeada	47,73	m²
	Piso cerâmico esmaltado	47,73	m²
	Rejuntamento de piso cerâmico	47,73	m²
	Rodapé cerâmico	53,20	m
	Soleira	1,60	m

Fonte: Autora

Realizou-se apenas a discriminação dos custos diretos, que são diretamente associados ao serviço de campo. Representam o custo dos serviços levantados. As categorias de custo envolvidas em um serviço são: mão-de-obra, material e equipamento. A composição dos custos e serviços foi realizada através da base de dados online do TCPO – Tabela de Composições e Preços para Orçamentos (PINI, 2017), que possui mais de 8.500 composições de Serviços, Preços de Referência calculados pelo departamento de Engenharia da PINI.

Para os serviços de instalações provisórias, aparelhos e metais, instalações elétricas e instalações hidráulicas, sanitárias e gás, foram utilizados percentuais representativos do serviço, com base no custo total da obra. A Tabela 25 apresenta os percentuais representativos dos serviços recomendados pela Caixa Econômica Federal, e os valores adotados no trabalho (valor médio).

Tabela 25: Percentuais representativo dos serviços

Serviços		**Intervalo recomendado (%)**	**Valor adotado (%)**
B.1 Serviços iniciais	B.1.3 Instalações provisórias	0,1 a 0,55	0,33
B.8 Instalações e aparelhos	B.8.1. Aparelhos e metais	2 a 6	4
	B.8.2. Instalações elétricas	5 a 12	8,5
	B.8.3 Instalações hidráulica, sanitária e gás	5 a 12	8,5
B.9 Complementação da obra	B.9.1 Calafete e limpeza	0,50 a 2,50	1,5

Fonte: Autora

Em alguns casos os preços foram cotados junto aos fornecedores, sem considerar os custos de transporte do material. As esquadrias de PVC com o vidro monolítico de 4 mm e vidro insulado foram orçadas com a empresa Profine (São José dos Pinhais – PR), as esquadrias de alumínio com vidro monolítico de 3 mm foram orçadas com a Metalúrgica Bez LTDA (Farroupilha – RS) e o isolamento térmico em EPS foi orçado com a empresa Isolef (Porto Alegre – RS).

O sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor (MVHR) foi cotado pela empresa Climacom, localizada em Portugal, devido a inexistência de fabricantes desse sistema no Brasil. Foi necessário o acréscimo das taxas para a importação do sistema, apresentadas na Figura 16, que foi obtido através do

Simulador do Tratamento Tributário e Administrativo das Importações (RECEITA FEDERAL, MINISTÉRIO DA FAZENDA ,2017). Considerou-se o valor do euro (€) de R$ 3,8648, referente ao mês de novembro de 2017.

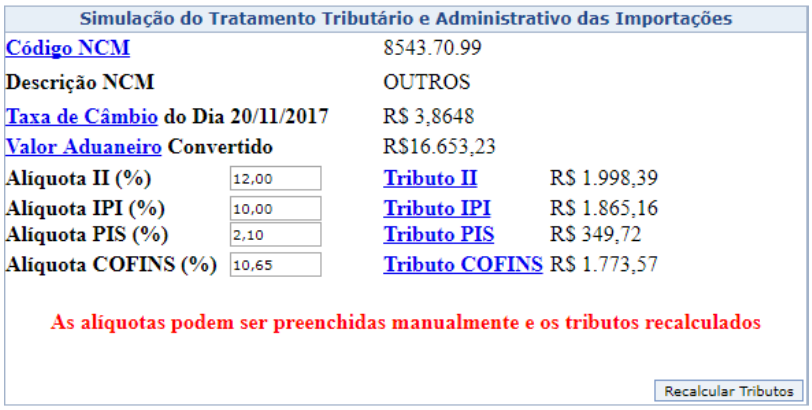


Figura 16: Tratamento tributário e administrativo da importação do sistema MVHR

Fonte: Receita Federal, Ministério da Fazenda, 2017

3.10.2. Custo da energia elétrica

Utilizou-se o custo da tarifa de energia referente ao mês de novembro de 2017, obtidos através das faturas de energia das concessionárias de cada cidade, onde Curitiba é atendida pela COPEL, Santa Maria pela RGE-Sul (antiga AES-Sul) e Florianópolis pela CELESC. O custo do quilowatt-hora foi de R$ 0,71 para Curitiba/PR, R$ 0,65 para Santa Maria/RS e de R$ 0,65 para Florianópolis/SC, incluindo ICMS.

3.10.3. Método de cálculo do custo da energia conservada

O custo da energia conservada (CEC), é calculado de acordo com os custos da medida de conservação de energia (MCE) e com a energia economizada por intermédio dessa medida (Equação 5) (ROSENFELD, 1996, *apud* CARLO, 2008). Um investimento é considerado economicamente viável quando o resultado do CEC é menor que a tarifa de energia.

$$CEC = \left(\frac{TCC}{\Delta E}\right) x \left\{\frac{d}{[1-(1+d)^{-2}]}\right\}$$ Equação 5

Onde:

CEC: custo da energia conservada (R$/kWh);

TCC: custo de implementação da MCE (R$);

∆E: energia economizada (kWh/a);

n= vida útil da MCE (anos);

d= taxa de desconto em base anual comparada ao Índice Nacional de custo da Construção – INCC (IBGE).

3.10.4. Método de cálculo para o p*ayback* simples e descontado

O método do *payback*, ou prazo de retorno, fornece um número de períodos do fluxo de caixa em questão nos quais o somatório dos benefícios se iguala ao somatório dos custos (HIRSCHFELD, 2007). O *payback* simples foi obtido a partir da fração do investimento realizado sobre o custo anual de energia economizada, conforme a Equação 6. Esse método permite analisar a recuperação do investimento ao longo do tempo, sem considerar a variação monetária.

$$PBsimples = \frac{I}{C}$$ Equação 6

Onde: $PB_{simples}$: *Payback* simples (anos)

I: Investimento adicional (R$)

C: Custo da energia economizada (R$/ano)

A variação do dinheiro através do tempo sofre sempre uma compensação chamada juros. O *payback* descontado analisa o prazo de retorno do capital investido, considerando juros. Para o cálculo, considerou-se a taxa de inflação de 7% (IPEADATA, 2018) aplicada sobre o custo do investimento. O dinheiro recuperado,

através da economia de energia, também sofre variação ao longo do tempo, de acordo com cada concessionária de energia. A Tabela 26 apresenta a média da evolução das tarifas de energia nos últimos 10 anos, para as três cidades analisadas (ANEEL, 2018).

Tabela 26: Evolução das tarifas de energia

Ano	Curitiba-PR COPEL		Santa Maria-RS RGE-Sul		Florianópolis-SC CELESC	
	Tarifa* (R$/MWh)	Reajuste	Tarifa* (R$/MWh)	Reajuste	Tarifa* (R$/MWh)	Reajuste
2008	260,67	_	263,62	_	278,36	
2009	289,43	11,03%	300,11	13,84%	297,72	6,96%
2010	300	3,65%	296,37	-1,25%	324,99	9,16%
2011	309,26	3,09%	314,97	6,28%	329,74	1,46%
2012	296,26	-4,20%	331,35	5,20%	313,8	-4,83%
2013	263,55	-11,04%	262,24	-20,86%	288,68	-8,01%
2014	326,37	23,84%	337,93	28,86%	353,49	22,45%
2015	492,31	50,84%	480,35	42,14%	444,36	25,71%
2016	421,47	-14,39%	478,82	-0,32%	431,42	-2,91%
2017	440,56	4,53%	452,02	-5,60%	459,85	6,59%
Média		**7,48%**		**7,59%**		**6,29%**

Fonte: ANEEL, 2018

3.10.5. Cenários para viabilizar o *standard Passive House*

A fim de viabilizar a aplicação do *standard Passive House* nas diferentes zonas bioclimáticas, criou-se 2 cenários hipotéticos: 1) Considerando a redução no custo do sistema recuperador calor; 2) Considerando possível aumento na tarifa de energia elétrica, o que já tem sido uma realidade para os brasileiros.

3.10.5.1. Cenário 1: considerando a redução no custo do sistema recuperador de calor

Tendo em vista que o sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor (MVHR) equivale a aproximadamente 50% do investimento adicional de uma edificação *Passive House,* uma alternativa para viabilizar a aplicação do *standard* é a redução do custo deste sistema. Nesta etapa, foram criados 2 cenários hipotéticos, reduzindo os custos do sistema recuperador de calor, para a comparação com o

cenário real. No cenário 1, supôs-se que o sistema é fabricado no Brasil, onde utilizou-se o custo real do sistema desconsiderando a taxa de importação. No cenário 2, foi considerado 50% do custo real do sistema recuperador de calor, supondo um cenário em que o produto esteja saturado no mercado. Os custos do sistema recuperador de calor, considerados para cada cenário, são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27: Descrição das soluções analisadas no cenário 1

Cenários	**Descrição**	**Custo (R$)**
Cenário real	Custo real do MVHR	22640,07
Cenário 1	Desconsiderando a taxa de importação do MVHR	16653,23
Cenário 2	Considerando 50% do custo real do MVHR	11320,03

Fonte: Autora

3.10.5.2. Cenário 2: considerando o possível aumento na tarifa da energia elétrica

Tendo em vista a evolução das tarifas de energia nos últimos anos, foram criados 5 cenários hipotéticos, considerando um possível aumento no custo da tarifa de energia, de 10% a 50%, nas três zonas bioclimáticas, conforme descrito na Tabela 28. Analisou-se a viabilidade econômica através do *payback* simples, considerando a vida útil da edificação.

Tabela 28: Descrição das soluções analisadas no cenário 2

Cenário	**Aumento da tarifa (%)**	**Custo da tarifa (R$)**		
		ZB1	**ZB2**	**ZB3**
Cenário real	0	0,7134	0,6520	0,6536
Cenário 1	10	0,7847	0,7171	0,7189
Cenário 2	20	0,8561	0,7823	0,7843
Cenário 3	30	0,9274	0,8475	0,8496
Cenário 4	40	0,9987	0,9127	0,9150
Cenário 5	50	1,0701	0,9779	0,9803

Fonte: Autora

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Solução Base

Na Tabela 29 são apresentados os resultados do consumo de aquecimento, refrigeração e a taxa de sobreaquecimento da solução base, que representa uma edificação regulamentar brasileira (NBR 15575), configurada com mesma geometria e solução de envelope para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3. Os resultados são apresentados graficamente na Figura 17. É perceptível que o desempenho da edificação é distinto nas três zonas bioclimáticas, pois está associado às condições climáticas de cada zona. Em todos os casos, a alta transmitância térmica do envelope possibilita grandes trocas de calor entre o interior da edificação e o ambiente exterior. No inverno o calor produzido dentro da edificação, através dos ganhos internos e do sistema de ar condicionado, é rapidamente perdido para o exterior, através do envelope. Esse comportamento gera um elevado consumo de energia de aquecimento, para manter a temperatura interna dentro dos limites de conforto térmico no período noturno, em que o ar condicionado é ativo, principalmente nas zonas bioclimáticas 1 e 2 que possuem inverno rigoroso.

No verão, durante o período diurno, a edificação ganha calor através do envelope (opaco e transparente) por condução e radiação solar direta. Nesse período o conforto térmico é mantido através da ventilação natural, que é ativa com *setpoint* de 20°C, porém, apenas em condições favoráveis, ou seja, quando a temperatura interna é superior à externa. Com isso, a edificação pode permanecer períodos sem ventilar, gerando sobreaquecimento. Durante o período noturno, a alta transmitância térmica do envelope contribui para o resfriamento da edificação, pois o calor ganho durante o dia é perdido através do envelope para o exterior, que nesse período apresenta temperatura mais baixa. Esse comportamento contribui para a redução do consumo de energia para refrigeração, durante o período noturno, em que o ar condicionado é ativo. Na zona bioclimática 1, com clima mais frio, o consumo de refrigeração foi mínimo, próximo a zero. Os resultados de sobreaquecimento e consumo de energia para refrigeração foram maiores nas zonas bioclimáticas 2 e 3, que possuem verão rigoroso.

Tabela 29: Resultados de desempenho da solução base

Zona bioclimática	Consumo de energia (kWh/m²a)			Sobreaquecimento (%)
	Aquecimento	Refrigeração	Total	
1	36,72	0,06	36,78	2,72
2	33,97	3,83	37,80	11,14
3	16,38	1,94	18,32	9,26

Fonte: Autora

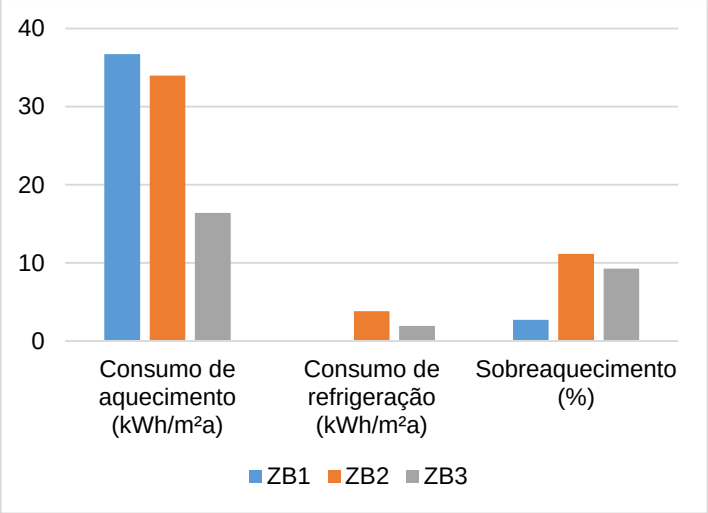


Figura 17: Resultados de desempenho das soluções base

Fonte: Autora

Para a classificação do nível de eficiência energética da envoltória, de acordo com o RTQ-R, primeiramente verificou-se o atendimento aos pré-requisitos específicos da envoltória para as zonas de permanência prolongada (ZT1, ZT2 e ZT3). As Tabelas 30 e 31 referem-se a análise dos pré-requisitos das paredes externas e cobertura, respectivamente, as Tabelas 32 e 33 referem-se à ventilação natural e a Tabela 34 refere-se à iluminação natural.

Tabela 30: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas

ZB	ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
		Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZB1 e ZB2	ZT1	S/E	0,2	Sim	≤ 2,50	2,47	Sim	≥ 130	150,48	Sim
	ZT2		0,2	Sim		2,47	Sim		150,48	Sim
	ZT3		0,2	Sim		2,47	Sim		150,48	Sim
ZB3	ZT1	≤ 0,6 ou > 0,6	0,2	Sim	≤ 3,70 ou ≤ 2,50	2,47	Sim	≥ 130	150,48	Sim
	ZT2		0,2	Sim		2,47	Sim		150,48	Sim
	ZT3		0,2	Sim		2,47	Sim		150,48	Sim

α= Absortância solar; U= Transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Autora

Tabela 31: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura

ZB	ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
		Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZB1 e ZB2	ZT1	S/E	0,2	Sim	≤ 2,30	2,18	Sim	S/E	24,16	Sim
	ZT2		0,2	Sim		2,18	Sim		24,16	Sim
	ZT3		0,2	Sim		2,18	Sim		24,16	Sim
ZB3	ZT1	≤ 0,6 ou > 0,6	0,2	Sim	≤ 2,30 ou ≤ 1,50	2,18	Sim	S/E	24,16	Sim
	ZT2		0,2	Sim		2,18	Sim		24,16	Sim
	ZT3		0,2	Sim		2,18	Sim		24,16	Sim

α= Absortância solar; U= transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Autora

Tabela 32: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação para as ZB 1, 2 e 3

Zona térmica	Área de piso (m²)	Área de abertura (m²)	% em relação ao piso	Requisito (%)	Atende?
ZT1	8,6	1,68	19,53	≥ 8%	Sim
ZT2	7,36	1,68	22,83		Sim
ZT3	26	3,28	12,62		Sim

Fonte: Autora

Tabela 33: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação cruzada

Zona bioclimática	Área de abertura (m²)		Resultado A_2/A_1	Requisito	Atende?
	A_1 (Norte)	A_2 (Sul)			
ZB1	Sem exigência				
ZB2 e ZB3	3,84	3,28	0,85	≥ 0,25	Sim

Fonte: Autora

Tabela 34: Verificação do atendimento ao pré-requisito de iluminação natural

Zona térmica	Área de piso (m²)	Área de abertura (m²)	% em relação ao piso	Requisito (%)	Atende?
ZT1	8,6	1,68	19,53	≥ 12,5%	Sim
ZT2	7,36	1,68	22,83		Sim
ZT3	26	3,28	12,62		Sim

Fonte: Autora

Após a verificação do atendimento dos pré-requisitos específicos da envoltória, realizou-se a classificação do nível de eficiência energética da envoltória, pelo método de simulação do RTQ-R. A Tabela 35 apresenta os resultados da classificação do nível de eficiência energética da envoltória da solução base, nas três zonas bioclimáticas.

Na zona bioclimática 1 os resultados de graus-hora de resfriamento foram inferiores a 143 graus-hora, para as três zonas térmicas, classificando-as em nível A, com equivalente numérico de resfriamento igual a 5. Os resultados do consumo de aquecimento das três zonas térmicas ficaram na faixa de nível C, no intervalo entre 33,40 e 50,099 kWh/m²a, onde o equivalente numérico de aquecimento é igual a 3. O equivalente numérico da envoltória foi determinado com a Equação 2 (item 3.9.1), e obteve o resultado de 3,16, que classifica a envoltória como nível C.

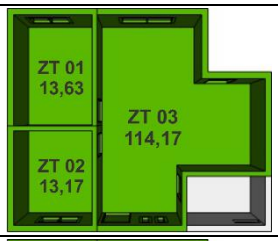
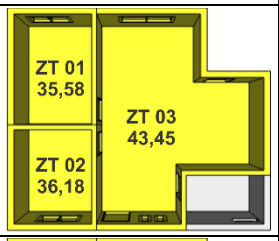
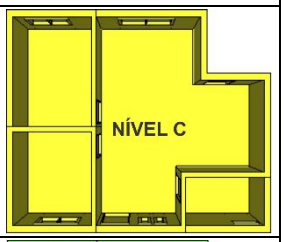
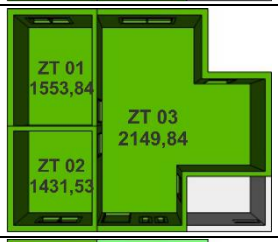
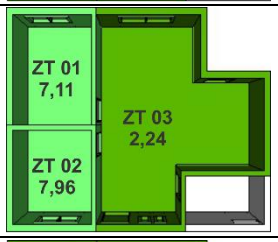
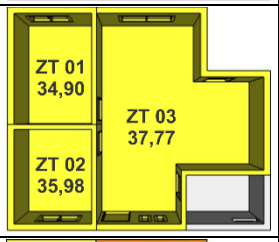
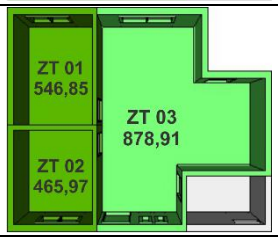
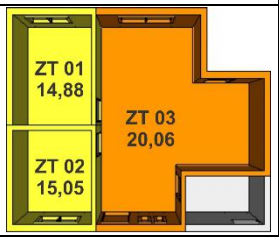
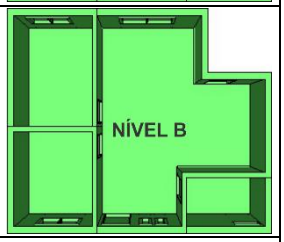
Na zona bioclimática 2 os resultados de graus-hora de resfriamento foram inferiores a 2.310 graus-hora, para as três zonas térmicas, classificando-as em nível A, com equivalente numérico de resfriamento igual a 5. Os resultados do consumo de aquecimento das três zonas térmicas ficaram na faixa de nível C, no intervalo entre 31,182 e 46,772 kWh/m²a, onde o equivalente numérico de aquecimento é igual a 3. O equivalente numérico da envoltória foi determinado com a Equação 3 (item 3.9.1) e obteve o resultado de 3,88, que classifica a envoltória como nível B.

Na zona bioclimática 3 os resultados de graus-hora de resfriamento das zonas térmicas 1 e 2, foram inferiores a 822 graus-hora, classificando-os em nível A, com equivalente numérico de resfriamento igual a 5. Na zona térmica 3 o valor de graus-hora de resfriamento ficou na faixa de nível B, entre 822 e 1643 graus-hora, com equivalente numérico de resfriamento igual a 4. Nesse caso, os equivalentes numéricos de resfriamento obtidos foram ponderados pelas áreas úteis dos ambientes, obtendo o resultado de 4,38, que corresponde a nível B. Os resultados do

consumo de aquecimento nas zonas térmicas 1 e 2, ficaram na faixa de nível C, entre 12,858 e 19,287 kWh/m²a, com equivalente numérico de aquecimento igual a 3, enquanto o resultado da zona térmica 3 ficou na faixa de nível D, entre 19,287 e 25,716 kWh/m²a, que possui equivalente numérico de aquecimento igual a 2. Através da ponderação dos equivalentes numéricos pela área útil dos ambientes, o resultado do equivalente numérico de aquecimento foi de 2,38, que corresponde ao nível D. O equivalente numérico da envoltória foi determinado com a Equação 4 (item 3.9.1), e obteve o resultado de 3,66, que classifica a envoltória como nível B.

Assim, o nível de eficiência energética da envoltória da solução base foi classificado em nível C, na zona bioclimática 1 e em nível B nas zonas bioclimáticas 2 e 3. O nível inferior na zona bioclimática 1, ocorre porque a equação para a classificação dessa zona (item 3.9.1) é mais rigorosa para o consumo de aquecimento, a qual obteve resultados elevados. De acordo com a equação da zona bioclimática 1, 92% da pontuação final é referente ao equivalente numérico de aquecimento e apenas 8% é referente ao equivalente numérico de resfriamento.

Tabela 35: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória de acordo com o RTQ-R – solução base

	Graus-hora de resfriamento	Consumo de refrigeração (kWh/m².a)	Consumo de aquecimento (kWh/m².a)	Nível de eficiência energética da envoltória
Zona bioclimática 1				
Zona bioclimática 2				
Zona bioclimática 3				

ZT= zona térmica

Fonte: Autora

4.2. Análise de sensibilidade para atender ao RTQ-R

Nesta etapa, são apresentados os resultados da análise de sensibilidade, realizada com o objetivo de obter uma solução que atenda aos limites para a classificação nível A, de acordo com o RTQ-R, para as três zonas bioclimáticas. Realizou-se variações da solução base, nomeadamente, a espessura do isolamento térmico e a solução de esquadria. Analisou-se os graus-hora de resfriamento e o consumo de energia para aquecimento, utilizando os modelos configurados com ventilação natural e condicionamento artificial, respectivamente, conforme recomenda o regulamento (item 3.9.1).

Na Figura 18 observa-se a variação dos graus-hora de resfriamento em função da espessura do isolamento térmico das três zonas térmicas, na zona bioclimática 1. Os resultados de graus-hora de resfriamento das 3 zonas térmicas ficaram abaixo do limite para nível A em todos os casos.

O aumento da espessura do isolamento térmico permite a redução do valor de graus-hora de resfriamento. Isso ocorre devido as características da edificação. A baixa transmitância do envelope (opaco e transparente) evita os ganhos de calor por condução. A edificação possui pouca área envidraçada, que são protegidas por persianas durante o verão, evitando os ganhos de calor por radiação. Além disso, nesse modelo o conforto térmico é mantido por ventilação natural durante 24 horas, com *setpoint* de 20°C, ou seja, abaixo da temperatura utilizada para o cálculo de graus-hora (26°C). Na Figura 19 observa-se a variação do consumo de aquecimento em relação à espessura do isolamento térmico nas três zonas térmicas, na zona bioclimática 1. O aumento da espessura do isolamento térmico reduz o consumo de aquecimento, pois evita as perdas de calor através do envelope. Nas ZT1 e ZT2 o resultado do consumo de aquecimento é inferior ao limite para nível A com 0,02 m de isolamento térmico. Porém na ZT3 é necessário 0,06 m de isolamento térmico. Isso ocorre devido a maior área de superfície em contato com o exterior. Assim, para atender aos limites para nível A, em todas as zonas térmicas, são necessários 0,06 m de isolamento térmico no envelope.

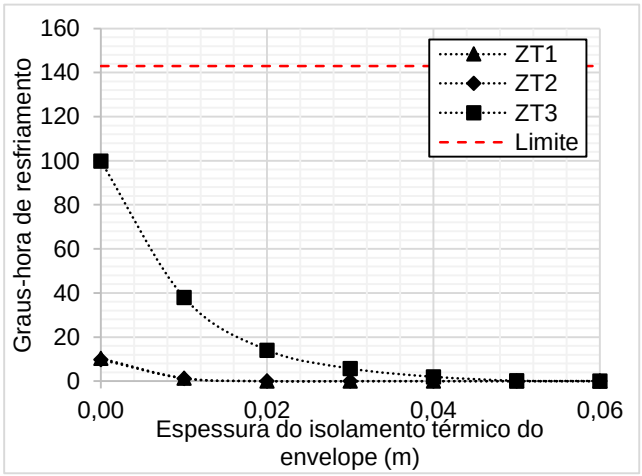


Figura 18: Relação entre graus-hora de resfriamento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 1

Fonte: Autora

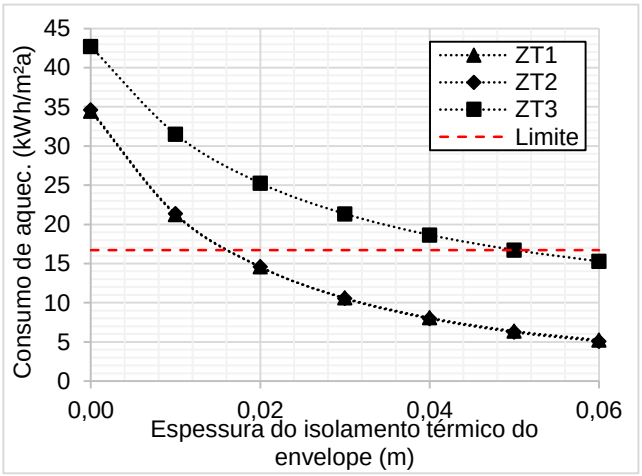


Figura 19: Relação entre o consumo de aquecimento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 1

Fonte: Autora

Na zona bioclimática 2, de acordo com a Figura 20, os resultados de graus-hora de resfriamento das 3 zonas térmicas ficaram abaixo do limite para nível A em todos os casos. Na Figura 21 observamos que os resultados do consumo de aquecimento nas ZT1 e ZT2, ficam abaixo do limite de nível A com 0,03 m de isolamento térmico. Porém, na ZT3 são necessários 0,06 m de isolamento térmico. Assim, para atender aos limites para nível A, em todas as zonas térmicas, são necessários 0,06 m de isolamento térmico no envelope.

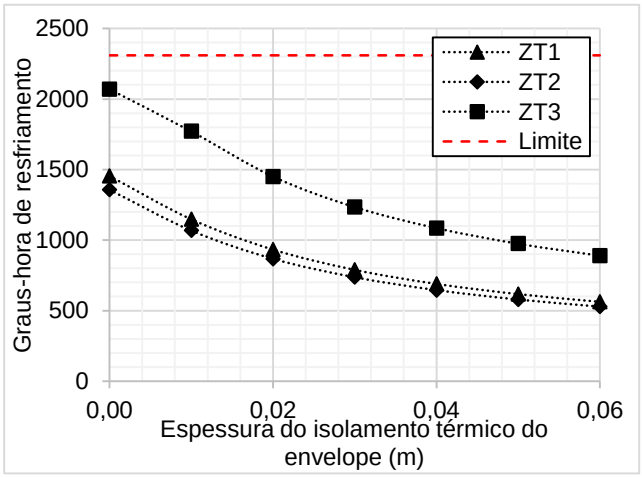


Figura 20: Relação entre graus-hora de resfriamento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 2

Fonte: Autora

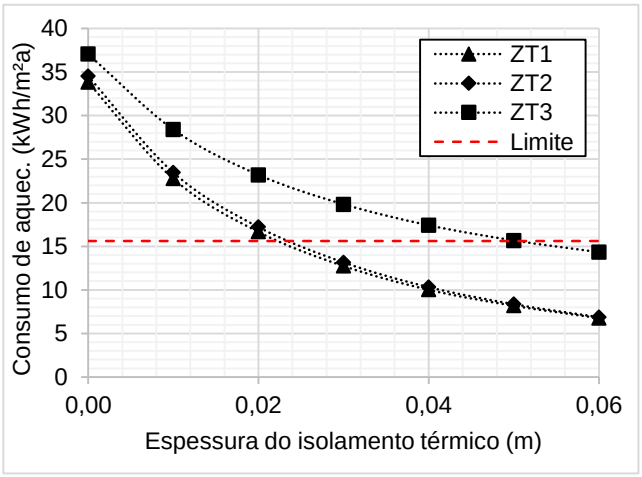


Figura 21: Relação entre o consumo de aquecimento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 2

Fonte: Autora

Na zona bioclimática 3, de acordo com a Figura 22, os resultados de graus-hora de resfriamento das 3 zonas térmicas ficaram abaixo do limite para nível A em todos os casos. Na Figura 23 observa-se que os resultados do consumo de aquecimento nas ZT1 e ZT2, ficam abaixo do limite de nível A com 0,02 m de isolamento térmico. Porém na ZT3 são necessários 0,07 m de isolamento térmico. Assim, para atender aos limites para nível A em todas as zonas térmicas, são necessários 0,07 m de isolamento térmico em todo o envelope.

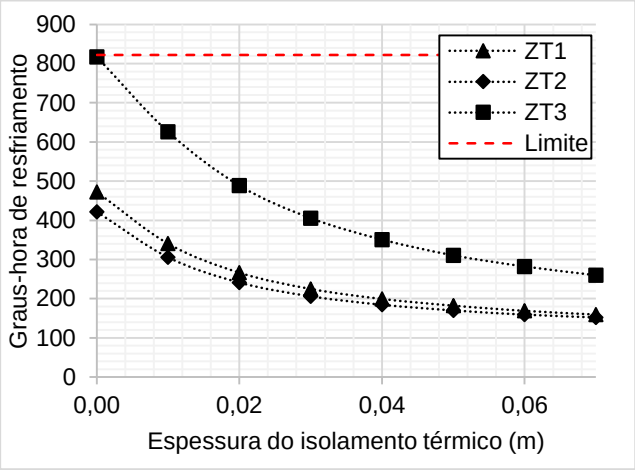


Figura 22: Relação entre graus-hora de resfriamento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 3

Fonte: Autora

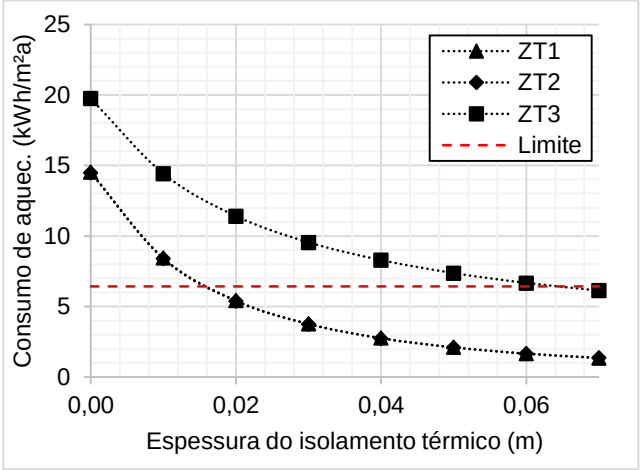


Figura 23: Relação entre o consumo de aquecimento e a espessura do isolamento térmico do envelope – zona bioclimática 3

Fonte: Autora

Nas Tabelas 36 e 37 é verificado o atendimento dos pré-requisitos da envoltória (RTQ-R), para paredes e cobertura, respectivamente. Os pré-requisitos referentes a iluminação e ventilação natural foram verificados no item anterior e não sofrem alterações.

Tabela 36: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas

ZB	ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
		Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZB1 e ZB2	ZT1	S/E	0,2	Sim	≤ 2,50	0,53	Sim	≥ 130	153,46	Sim
	ZT2		0,2	Sim		0,53	Sim		153,46	Sim
	ZT3		0,2	Sim		0,53	Sim		153,46	Sim
ZB3	ZT1	≤ 0,6 ou > 0,6	0,2	Sim	≤ 3,70 ou ≤ 2,50	0,47	Sim	≥ 130	153,95	Sim
	ZT2		0,2	Sim		0,47	Sim		153,95	Sim
	ZT3		0,2	Sim		0,47	Sim		153,95	Sim

α= Absortância solar; U= transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Autora

Tabela 37: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura

ZB	ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
		Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZB1 e ZB2	ZT1	S/E	0,2	Sim	≤ 2,30	0,51	Sim	S/E	27,14	Sim
	ZT2		0,2	Sim		0,51	Sim		27,14	Sim
	ZT3		0,2	Sim		0,51	Sim		27,14	Sim
ZB3	ZT1	≤ 0,6 ou > 0,6	0,2	Sim	≤ 2,30 ou ≤ 1,50	0,45	Sim	S/E	27,64	Sim
	ZT2		0,2	Sim		0,45	Sim		27,64	Sim
	ZT3		0,2	Sim		0,45	Sim		27,64	Sim

α= Absortância solar; U= transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Autora

A Tabela 38 apresenta as soluções de envelope definidas na análise de sensibilidade para cada zona bioclimática, assim como os resultados do consumo de aquecimento, refrigeração e sobreaquecimento. A análise é feita para os modelos configurados com condicionador de ar noturno e ventilação natural diurna (RTQ-R). Observa-se que nas zonas bioclimáticas 1 e 2, o envelope foi definido com 0,06 m de isolamento térmico no envelope. Na zona bioclimática 3, apesar do clima ser menos frio, foram necessários 0,07 m de isolamento térmico no envelope. Isso ocorre porque o limite para nível A de consumo de aquecimento nessa zona bioclimática é inferior, sendo necessário maior isolamento térmico para atender ao limite. Na Figura 24 podemos observar graficamente o desempenho das soluções Nível A nas três zonas bioclimáticas.

Tabela 38: Soluções definidas na análise de sensibilidade

ZB	Espessura do isolamento térmico (m)			Solução de esquadria	Consumo (kWh/m².a)			Sobr. (%)
	Pis.	Par.	Cob.		Aquec.	Refrig.	Total	
1	0,06	0,06	0,06	Caixilho PVC + vidro insulado	10,35	0,88	11,23	0,33
2	0,06	0,06	0,06	Caixilho PVC + vidro insulado	10,61	6,53	17,14	8,09
3	0,07	0,07	0,07	Caixilho PVC + vidro insulado	3,90	5,89	9,79	5,19

Fonte: Autora

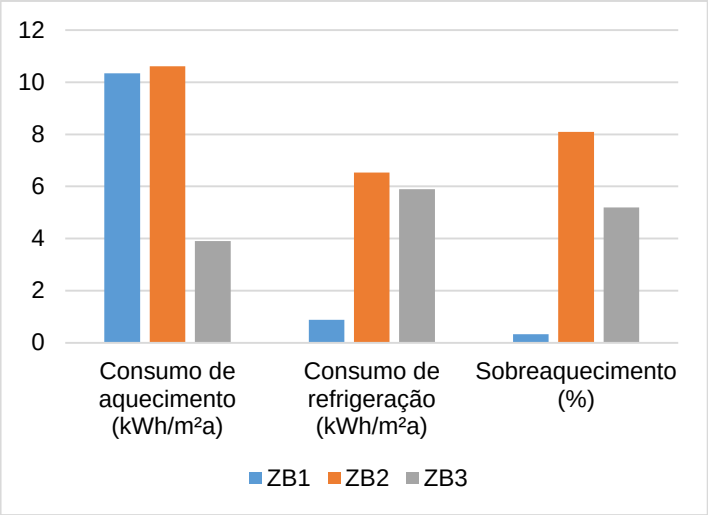


Figura 24: Resultados de desempenho das soluções nível A conforme o RTQ-R

Fonte: Autora

4.3. Otimização do envelope térmico do modelo RTQ-R com algoritmo evolutivo multiobjetivo

Nesta etapa são apresentados os resultados da otimização com algoritmo evolutivo multiobjetivo dos modelos configurados com condicionador de ar, conforme o RTQ-R (item 3.3.4), para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3. Os parâmetros variados foram a espessura do isolamento térmico e a solução de esquadria, conforme os limites descritos no item 3.7. Os objetivos foram minimizar o consumo de energia para aquecimento e graus-hora de resfriamento, requisitos do RTQ-R. As Figuras 25, 26 e 27, apresentam todos os pontos das simulações obtidas na otimização, com destaque do *Pareto Front* (melhores soluções) das zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, respectivamente. Para cada zona bioclimática foi escolhida uma solução para análise, que obteve um resultado equilibrado entre consumo de aquecimento e graus-hora de resfriamento.

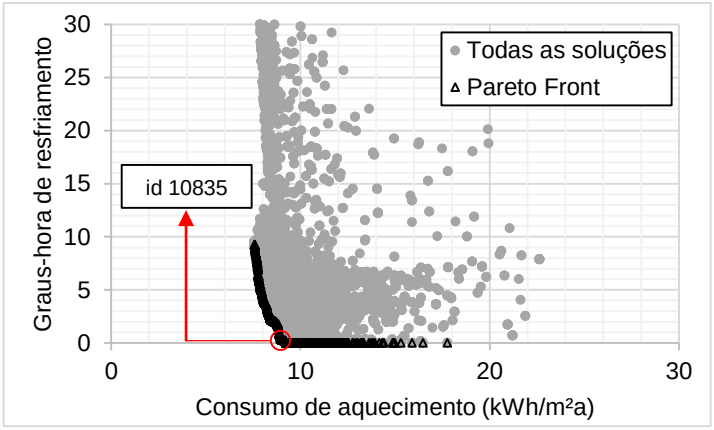


Figura 25: *Pareto front* para a zona bioclimática 1 – modelo RTQ-R

Fonte: Autora

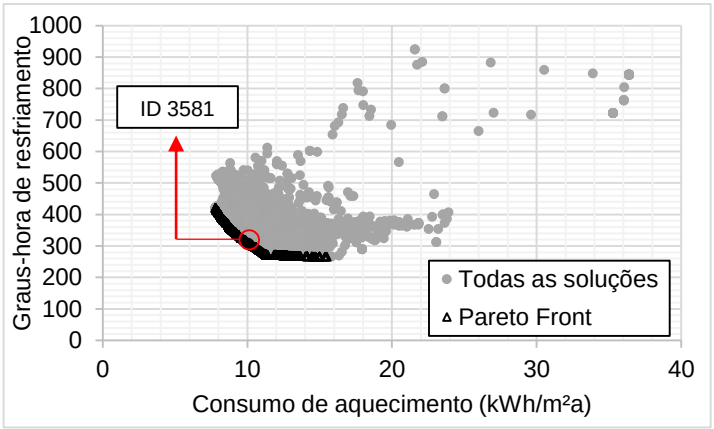


Figura 26: *Pareto front* para a zona bioclimática 2 – modelo RTQ-R

Fonte: Autora

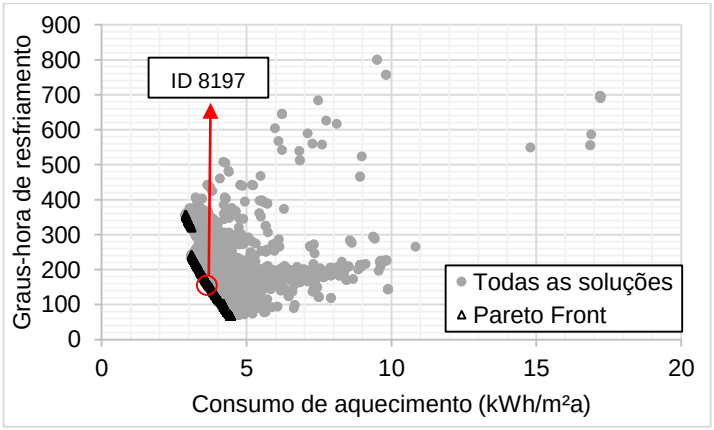


Figura 27: *Pareto front* para a zona bioclimática 3 – modelo RTQ-R

Fonte: Autora

Na Tabela 39 são apresentados os parâmetros que definem as soluções ótimas dos modelos configurados de acordo com o RTQ-R, com resultado equilibrado entre o consumo de energia para aquecimento e graus-hora de resfriamento para as três zonas bioclimáticas. Observa-se que as soluções ótimas foram definidas de forma semelhante nas três zonas bioclimáticas, com baixo isolamento térmico no piso, elevado isolamento térmico nas paredes e cobertura e solução de esquadria em PVC com vidro insulado. Porém, conforme a Figura 28, o desempenho da edificação varia de acordo com as condições climáticas de cada zona bioclimática. No inverno o elevado isolamento térmico das parede e cobertura reduz as perdas do calor produzido no interior da edificação para o exterior, reduzindo assim o consumo de energia para aquecimento da edificação no período noturno, em que o ar condicionado é ativo. O consumo de energia de aquecimento foi baixo nas três zonas bioclimáticas, porém nas zonas bioclimáticas 1 e 2 o resultado é maior, se comparado ao resultado da zona bioclimática 3, pois possuem o inverno mais rigoroso. No verão, o elevado isolamento térmico das paredes e cobertura da edificação reduz os ganhos de calor do exterior, porém não são eliminados totalmente. O baixo isolamento térmico do piso contribui para que o calor acumulado no interior da edificação seja dissipado para o solo, que possui uma temperatura inferior ao ar interno, evitando elevadas taxas sobreaquecimento. Ainda assim, durante o período diurno, podem ocorrer alguns períodos de sobreaquecimento, devido às condições para a ativação da ventilação natural, conforme descrito anteriormente (item 3.3.4). O elevado isolamento térmico do envelope no verão pode ser prejudicial, impedindo a dissipação do calor acumulado durante o dia para o exterior, podendo ser necessário o uso de ar condicionado para refrigeração no período noturno. Por isso é importante o controle dos ganhos solares, através do sombreamento e orientação solar adequada da edificação. O sobreaquecimento e o consumo de energia de refrigeração são maiores nas zonas bioclimáticas 2 e 3, que possuem clima menos frio.

A zona bioclimática 2 apresenta os maiores resultados, para o consumo de energia de aquecimento, refrigeração e taxa de sobreaquecimento, pois possui inverno e verão mais rigorosos. Nas zonas bioclimáticas 1 e 2 o consumo de energia é predominante para aquecimento, enquanto na zona bioclimática 3 o consumo de energia é predominante para refrigeração, isso ocorre devido às condições climáticas de cada zona.

Tabela 39: Soluções definidas na otimização multiobjetivo do modelo RTQ-R

ZB	id	Espessura do isolamento térmico (m)			Solução de esquadria	Consumo (kWh/m².a)			Sobr. (%)
		Pis.	Par.	Cob.		Aquec.	Refrig.	Total	
1	id 10835	0,03	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	7,61	0,86	8,47	0,00
2	id 3581	0,01	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	8,75	5,17	13,92	5,51
3	id 8197	0,01	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	3,36	5,22	8,58	2,79

Fonte: Autora

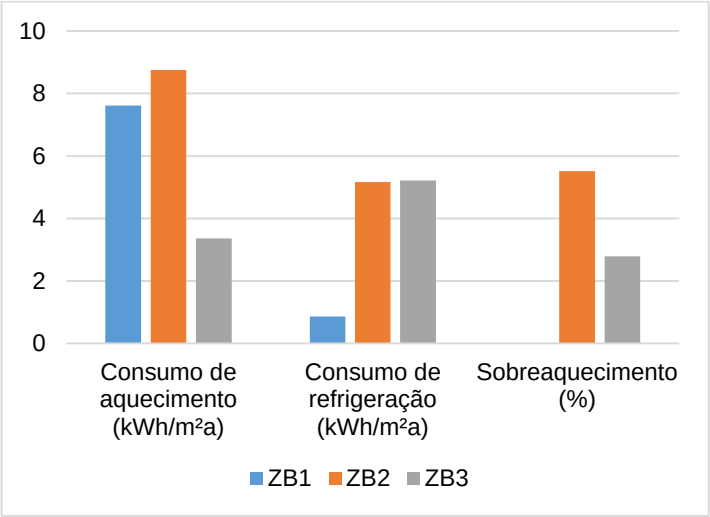


Figura 28: Resultados de desempenho das soluções otimizadas atendendo ao RTQ-R

Fonte: Autora

Utilizando a solução de envelope obtida na otimização, analisou-se o nível de eficiência energética da envoltória da edificação, de acordo com o RTQ-R (item 3.9.1). Nas Tabelas 40 e 41 são verificados o atendimento dos pré-requisitos do envelope (RTQ-R), para paredes e cobertura, respectivamente. Os pré-requisitos referentes a iluminação e ventilação natural foram verificados anteriormente (item 4.1) e não sofrem alterações.

Tabela 40: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas

ZB	ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
		Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZB1 e ZB2	ZT1	S/E	0,2	Sim	≤ 2,50	0,30	Sim	≥ 130	156,44	Sim
	ZT2		0,2	Sim		0,30	Sim		156,44	Sim
	ZT3		0,2	Sim		0,30	Sim		156,44	Sim
ZB3	ZT1	≤ 0,6 ou > 0,6	0,2	Sim	≤ 3,70 ou ≤ 2,50	0,30	Sim	≥ 130	156,44	Sim
	ZT2		0,2	Sim		0,30	Sim		156,44	Sim
	ZT3		0,2	Sim		0,30	Sim		156,44	Sim

α= Absortância solar; U= transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Autora

Tabela 41: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura

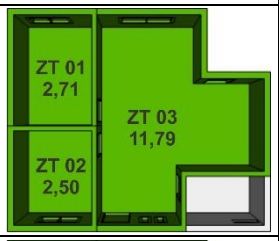
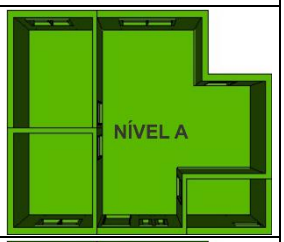
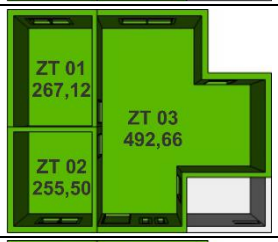
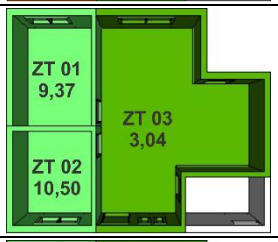
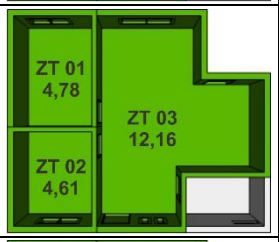
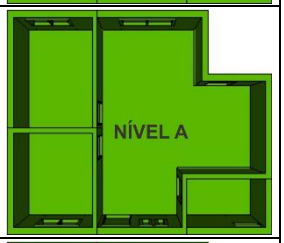
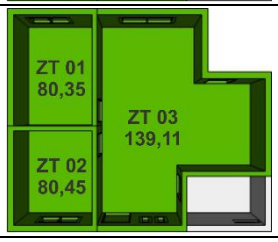
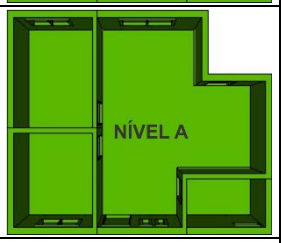
ZB	ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
		Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZB1 e ZB2	ZT1	S/E	0,2	Sim	≤ 2,30	0,29	Sim	S/E	30,12	Sim
	ZT2		0,2	Sim		0,29	Sim		30,12	Sim
	ZT3		0,2	Sim		0,29	Sim		30,12	Sim
ZB3	ZT1	≤ 0,6 ou > 0,6	0,2	Sim	≤ 2,30 ou ≤ 1,50	0,29	Sim	S/E	30,12	Sim
	ZT2		0,2	Sim		0,29	Sim		30,12	Sim
	ZT3		0,2	Sim		0,29	Sim		30,12	Sim

α= Absortância solar; U= transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: Autora

Através do método de simulação do RTQ-R determinou-se o nível de eficiência energética da envoltória das soluções. Na Tabela 42, observa-se que todas as zonas térmicas foram classificadas em nível A, com equivalente numérico igual a 5, tanto para resfriamento como para aquecimento. Assim, o nível de eficiência energética da envoltória foi classificado em nível A, nas três zonas bioclimáticas. Observamos também que o consumo de refrigeração das ZT 1 e ZT 2 foram classificados em nível D na zona bioclimática 1, e em nível B nas zonas bioclimáticas 2 e 3. Isso ocorre porque as duas zonas térmicas são orientadas com a maior fachada para oeste, onde ocorrem maiores ganhos de calor. Como dito anteriormente, o calor acumulado durante o dia encontra dificuldade para ser dissipado durante o período noturno, devido ao excesso de isolamento térmico. Esses fatores associados fazem com que seja necessário o uso de climatização para resfriar os ambientes durante o período noturno.

Tabela 42: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória de acordo com o RTQ-R – solução nível A otimizada

	Graus-hora de resfriamento	Consumo de refrigeração (kWh/m².a)	Consumo de aquecimento (kWh/m².a)	Nível de eficiência energética da envoltória
Zona bioclimática 1				
Zona bioclimática 2				
Zona bioclimática 3				
	A; B; C; D; E;			

ZT= zona térmica

Fonte: Autora

4.4. Otimização do envelope térmico do modelo *Passive House* com algoritmo evolutivo multiobjetivo

Nesta etapa são apresentados os resultados da otimização com algoritmo evolutivo multiobjetivo dos modelos configurados com sistema recuperador de calor, conforme a *Passive House* (item 3.3.5), para as três zonas bioclimáticas. Os parâmetros variados foram a espessura do isolamento térmico e a solução de esquadria, de acordo com os limites estabelecidos no item 3.7, com o objetivo de minimizar o consumo de energia para aquecimento e o sobreaquecimento, requisitos da *Passive House*. As Figuras 29, 30 e 31 apresentam os pontos do *Pareto Front* das zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, respectivamente. Para cada zona bioclimática foram escolhidas duas soluções para análise: 1) solução atendendo às exigências mínimas da *Passive House,* com resultados próximos aos limites exigidos, e 2) solução otimizadas, com resultado equilibrado entre consumo de energia para aquecimento e sobreaquecimento.

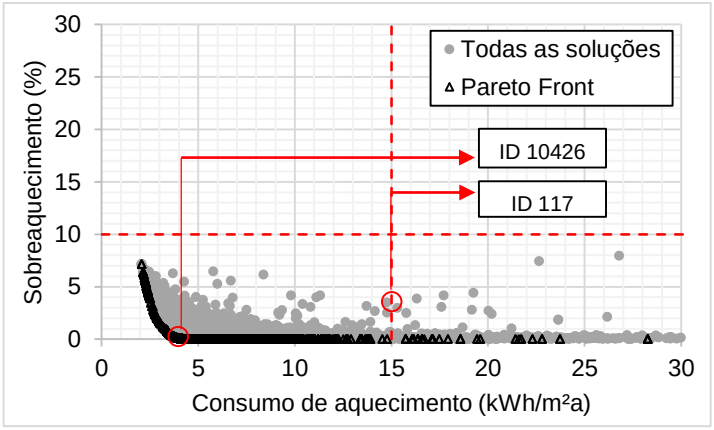


Figura 29: *Pareto front* para a zona bioclimática 1 – modelo *Passive House*

Fonte: Autora

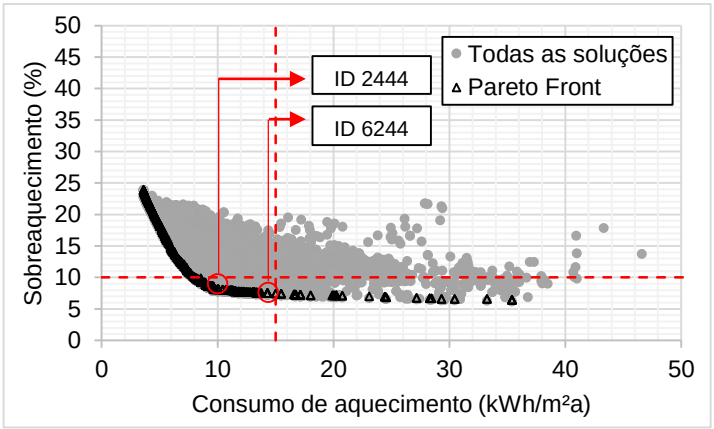


Figura 30: *Pareto front* para a zona bioclimática 2 – modelo *Passive House*

Fonte: Autora

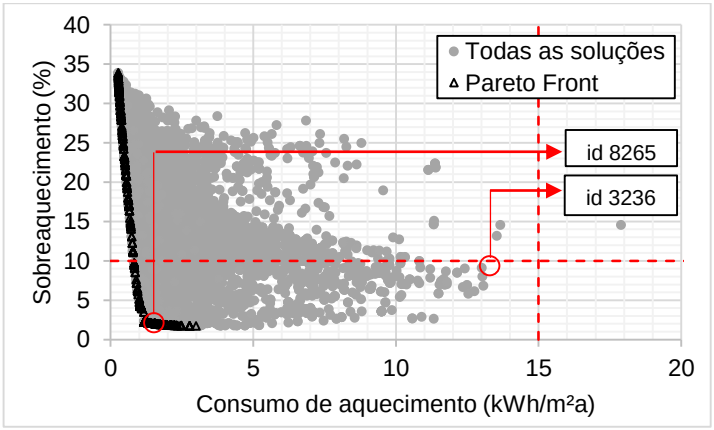


Figura 31: *Pareto front* para a zona bioclimática 3 – modelo *Passive House*

Fonte: Autora

Na Tabela 43 são apresentados os parâmetros que definem as soluções para atender às exigências mínimas da *Passive House*, que obtiveram resultados próximos aos limites exigidos pelo *standard,* para as três zonas bioclimáticas. Observamos que as soluções foram muito diferentes nas três zonas bioclimáticas, porém apresentam um desempenho semelhante (Figura 32). Isso ocorre porque a edificação é um sistema, seu desempenho varia em função da relação entre o isolamento térmico das superfícies dos pisos, paredes e coberturas, controle de radiação solar e qualidade das aberturas. Por isso, para cada clima, podem ser feitas inúmeras diferentes combinações para obtermos os mesmos resultados.

Tabela 43: Resultados das soluções que atendem aos requisitos mínimos da *Passive House*

ZB	id	Espessura do isolamento térmico (m)			Solução de esquadria	Consumo (kWh/m².a)			Sobr. (%)
		Pis.	Par.	Cob.		Aquec	Refrig	Total	
1	id 117	0,06	0,11	0,02	Caixilho PVC + vidro monolítico 4mm	14,77	2,46	17,23	3,50
2	id 6244	0,00	0,06	0,12	Caixilho PVC + vidro monolítico 4mm	14,28	6,78	21,06	8,56
3	id 3236	0,03	0,003	0,04	Caixilho PVC + vidro insulado	13,01	8,97	21,98	9,10

Fonte: Autora

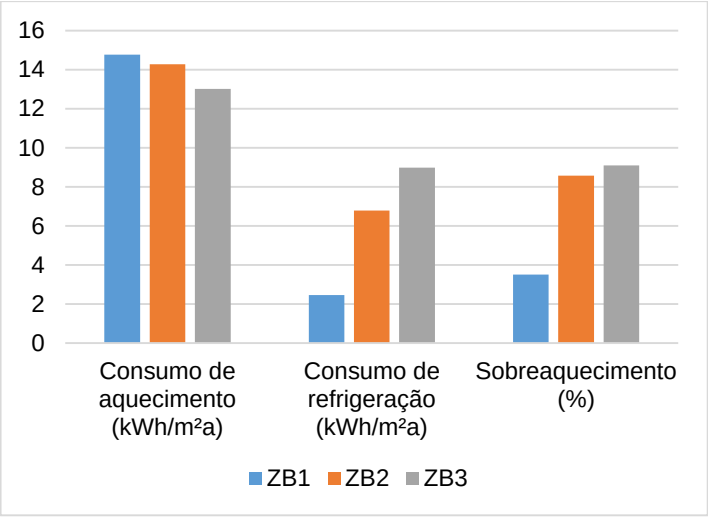


Figura 32: Resultados do desempenho das soluções atendendo aos limites da *Passive House*

Fonte: Autora

Na Tabela 44 são apresentados os parâmetros que definem as soluções ótimas da *Passive House*, que obtiveram um resultado equilibrado entre o consumo de energia para aquecimento e o sobreaquecimento para as três zonas bioclimáticas. Da mesma forma que na otimização anterior, do modelo RTQ-R (item 4.3), as soluções ótimas foram definidas com paredes e cobertura com elevado isolamento térmico e piso com baixo isolamento térmico, nas três zonas bioclimáticas. Com essa estratégia foi possível alcançar baixos resultados nos consumos de energia para aquecimento, refrigeração, e na taxa de sobreaquecimento, em todos os casos atendendo aos requisitos da *Passive House*. Comparando-se as três zonas bioclimáticas (Figura 33), a zona bioclimática 1, que possui o clima mais frio, foi a que apresentou melhor resultado de consumo de refrigeração e sobreaquecimento, e a zona bioclimática 3, com clima mais quente, foi a que apresentou menor resultado de consumo de aquecimento. A zona bioclimática 2 foi a que apresentou os resultados mais elevados, para o consumo de energia para aquecimento, refrigeração e sobreaquecimento, devido às suas condições climáticas, com inverno e verão rigorosos.

Tabela 44: Resultados da solução otimizada da *Passive House*

ZB	**id**	**Espessura do isolamento térmico (m)**			**Solução de esquadria**	**Consumo (kWh/m².a)**			**Sobr. (%)**
		Pis.	**Par.**	**Cob.**		**Aquec.**	**Refrig.**	**Total**	
1	id 10426	0,02	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	4,19	0,23	4,42	0,06
2	id 2444	0,00	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	9,71	6,87	16,58	9,44
3	id 8265	0,00	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	1,08	5,43	6,51	3,48

Fonte: Autora

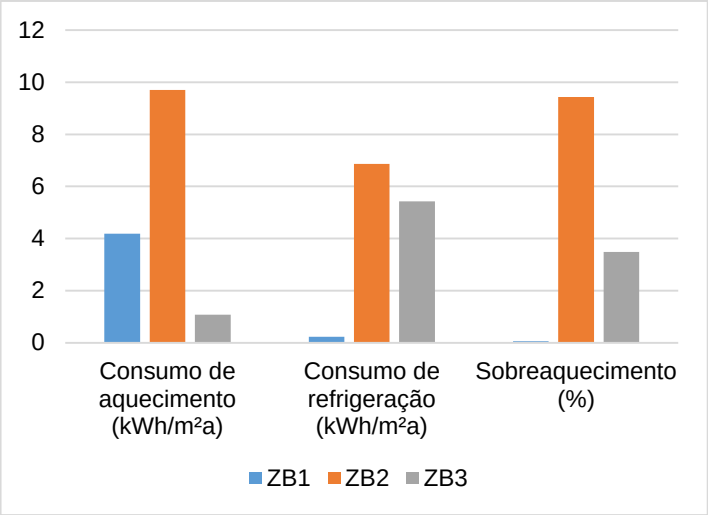


Figura 33: Resultados de desempenho das soluções otimizadas da *Passive House*

Fonte: Autora

4.5. Análise comparativa do desempenho

Nesta etapa, realizou-se uma análise comparativa entre o desempenho das cinco soluções definidas nas quatro etapas do estudo, apresentadas na Tabela 45.

As soluções apresentam comportamentos diferentes, pois possuem sistemas diferentes para climatização conforme a Tabela 45. As soluções 1, 2 e 3 são configuradas com ventilação natural no período diurno e sistema de ar condicionado no período noturno, de acordo com o RTQ-R (item 3.3.4). As soluções 3 e 4, são configuradas com sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor, durante as 24 horas diárias, de acordo com a *Passive House* (item 3.3.5).

Tabela 45: Descrição da configuração da climatização dos modelos

Soluções	**Descrição**	**Ventilação natural**		**Sistema de climatização**		
		Período (h)	***Setpoint* (°C)**	**Período (h)**	***Setpoint* (°C)**	**Tipo**
Solução 1	Atendendo à NBR 15575	9:00-21:00	20	21:00-9:00	22-24	HVAC
Solução 2	Atendendo à classificação Nível A	9:00-21:00	20	21:00-9:00-	22-24	HVAC
Solução 3	Solução nível A otimizada	9:00-21:00	20	21:00-9:00-	22-24	HVAC
Solução 4	Atendendo aos requisitos da *Passive House*	-	-	24h	20-26	MVHR
Solução 5	*Passive House* otimizada	-	-	24h	20-26	MVHR

Fonte: Autora

Nas Tabelas 46, 47 e 48 apresentam-se os resultados obtidos nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, respectivamente, em relação aos parâmetros definidos para cada solução e os respectivos resultados do consumo de energia de aquecimento, refrigeração e sobreaquecimento.

Na zona bioclimática 1, Tabela 46, Figura 34, observamos que o consumo de energia é predominante para aquecimento em todas as soluções, devido ao clima frio. A solução 1 apresentou o maior resultado no consumo de energia, devido à alta transmitância térmica do envelope, que gera trocas de energia entre o interior e o exterior da edificação, gerando maior consumo para climatização. A solução 3 apresentou o menor resultado em relação a taxa de sobreaquecimento e baixo consumo de aquecimento. Como explicado anteriormente, a configuração de envelope contribui para esse resultado. Além disso, durante o período diurno o conforto é mantido através da ventilação natural, que é ativa com *setpoint* de 20°C. Durante o período noturno, o conforto é garantido pelo sistema de climatização artificial, que é ativo com um *setpoint* de 24°C para refrigeração. A melhor solução selecionada foi a solução 5, que apresentou o menor resultado para consumo de energia e baixa taxa de sobreaquecimento. Além da configuração de envelope, que contribui para esse resultado, o modelo é configurado com sistema de ventilação mecânica que reaproveita 80% do calor contido no ar de exaustão e transfere para o ar que é introduzido na edificação, reduzindo o consumo de energia para climatização. A economia de energia, em relação à solução base, foi de aproximadamente 88%.

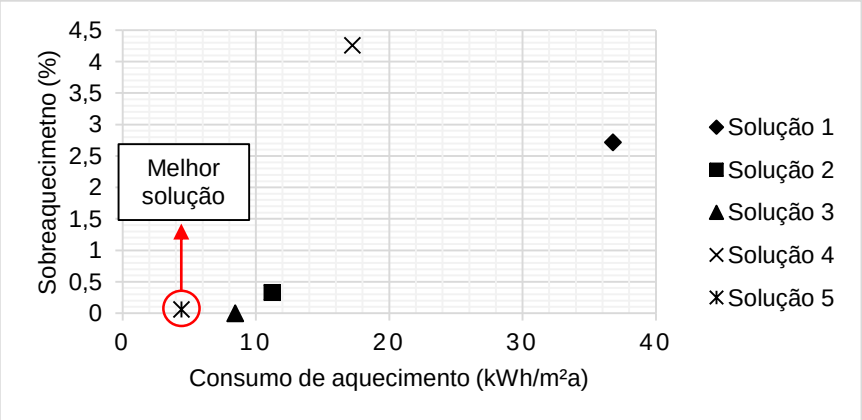


Figura 34: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 1

Fonte: Autora

Tabela 46: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 1

Solução	Espessura do isolamento térmico (m)			Solução de esquadria	Consumo (kWh/m².a)			Sobr. (%)
	Pis.	Par.	Cob.		Aquec	Refr.	Total	
Solução 1	0	0	0	Caixilho PVC + vidro monolítico 3 mm	36,72	0,06	36,78	2,72
Solução 2	0,06	0,06	0,06	Caixilho PVC + vidro insulado	10,35	0,88	11,23	0,33
Solução 3	0,03	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	7,61	0,86	8,47	0,00
Solução 4	0,02	0,11	0,06	Caixilho PVC + vidro monolítico 4 mm	14,77	2,47	14,24	4,26
Solução 5	0,02	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	4,19	0,23	4,42	0,06

Fonte: Autora

Na zona bioclimática 2, Tabela 47, Figura 35, observamos que os resultados são elevados, tanto para consumo de aquecimento quanto para consumo de refrigeração e sobreaquecimento, em todas as soluções, devido ás condições climáticas dessa zona, com inverno e verão rigorosos. A solução 1 apresentou maior consumo de energia e maior taxa de sobreaquecimento, em comparação às outras soluções. O melhor resultado foi obtido na solução 3, que obteve menor consumo de energia e menor taxa de sobreaquecimento. A redução do consumo de energia em relação à solução base foi de aproximadamente 63%. A solução 5, solução ótima *Passive House*, também obteve bons resultados. Essa solução apresenta a vantagem de possuir um sistema de climatização MVHR, que garante o conforto e qualidade do ar interior durante as 24 horas, enquanto no modelo configurado de acordo com o RTQ-R, a climatização funciona conforme a necessidade, apenas no período noturno e não garante a renovação do ar interior. A redução no consumo de energia em relação à solução 1 foi de aproximadamente 56%.

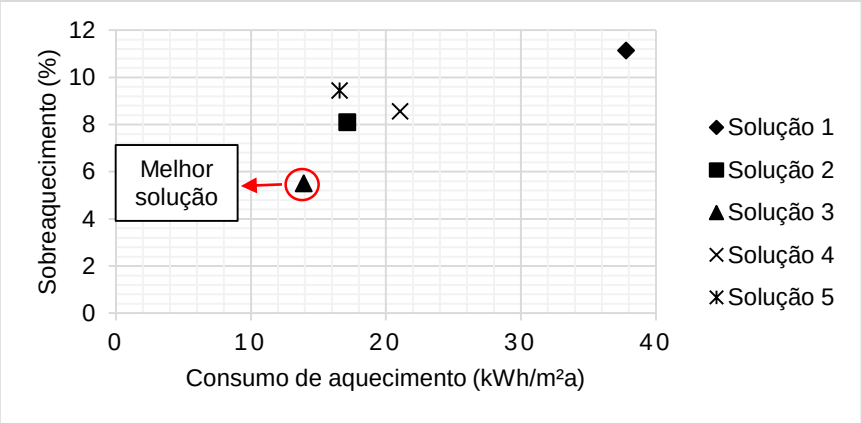


Figura 35: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 2

Fonte: Autora

Tabela 47: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 2

Solução	Espessura do isolamento térmico (m)			Solução de esquadria	Consumo (kWh/m².a)			Sobr. (%)
	Pis.	Par.	Cob.		Aquec	Refr.	Total	
Solução 1	0	0	0	Caixilho PVC + vidro monolítico 3mm	33,97	3,83	37,80	11,14
Solução 2	0,6	0,6	0,6	Caixilho PVC + vidro insulado	10,61	6,53	17,14	8,09
Solução 3	0,01	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	8,75	5,17	13,92	5,51
Solução 4	0,00	0,06	0,12	Caixilho PVC + vidro monolítico 4mm	14,28	6,78	21,06	8,56
Solução 5	0,00	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	9,71	6,87	16,58	9,44

Fonte: Autora

Na zona bioclimática 3, Tabela 48, Figura 36, que apresenta clima mais quente, os modelos apresentaram maiores resultados no consumo de refrigeração e sobreaquecimento, em relação aos climas anteriores. A solução 1 apresentou elevado consumo de energia, predominante para aquecimento, e elevada taxa de sobreaquecimento. As melhores soluções foram as soluções 3 e 5, onde a solução 3 apresentou menor sobreaquecimento e a solução 5 apresentou menor consumo de energia. A economia de energia da solução 5, em relação à solução base, foi de aproximadamente 65%.

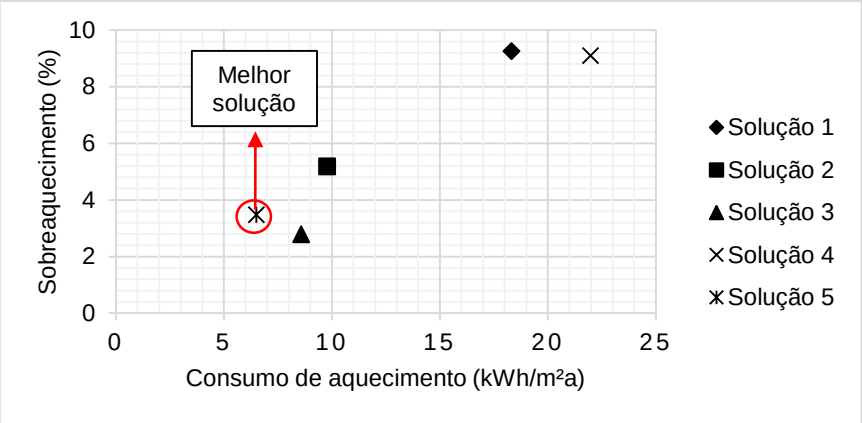


Figura 36: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 3

Fonte: Autora

Tabela 48: Análise comparativa entre as soluções na zona bioclimática 3

Solução	Espessura do isolamento térmico (m)			Solução de esquadria	Consumo (kWh/m².a)			Sobr. (%)
	Pis.	Par.	Cob.		Aquec	Refr.	Total	
Solução 1	0	0	0	Caixilho PVC + vidro monolítico 3mm	16,38	1,94	18,32	9,26
Solução 2	0,07	0,07	0,07	Caixilho PVC + vidro insulado	3,90	5,89	9,79	5,19
Solução 3	0,01	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	3,36	5,22	8,58	2,79
Solução 4	0,03	0,00	0,04	Caixilho PVC + vidro insulado	13,01	8,97	21,98	9,10
Solução 5	0,00	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	1,08	5,43	6,51	3,48

Fonte: Autora

Por fim, observa-se que, nas três zonas bioclimáticas, as soluções ótimas RTQ-R e com a *Passive House* são muito semelhantes, os resultados diferem devido aos diferentes sistemas de climatização, onde os modelos acordando com o RTQ-R são configurados com condicionador de ar no período noturno e ventilação natural no período diurno, enquanto os modelos acordando com a *Passive House* são configurados com o sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor, durante 24 horas.

4.6. Otimização do envelope térmico e sistemas do modelo *Passive House* com algoritmo evolutivo multiobjetivo

Nesta etapa realizou-se uma segunda otimização com algoritmo evolutivo multiobjetivo dos modelos configurados conforme *a Passive House*, conforme o item

3.3.5, para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3. Os parâmetros variados foram a espessura do isolamento térmico do piso, paredes externas e cobertura, orientação solar, taxa de infiltração, taxa de ventilação para aquecimento e resfriamento tipo de vidro e absortância das paredes e cobertura, conforme os limites definidos no item 3.8. O objetivo da otimização foi minimizar ainda mais o consumo de aquecimento e sobreaquecimento, requisitos do *standard Passive House*.

O objetivo desta etapa foi verificar o potencial de melhoria na otimização dos modelos *Passive House* com a variação de um maior número de parâmetros. Para isso realizou-se uma análise comparativa entre os resultados encontrados na otimização do envelope da *Passive House* (item 4.4), que chamamos de otimização 1, e os resultados encontrados na otimização atual, onde otimizou-se o envelope e sistemas, que chamamos de otimização 2. As Figuras 37, 38 e 39 apresentam os pontos *Pareto Front* das otimizações 1 e 2 para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, respectivamente. Em cada figura são destacadas duas soluções ótimas para análise, representando cada otimização, apresentadas nas Tabelas 49, 50 e 51, para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, respectivamente.

Na Figura 37, que se refere aos resultados da zona bioclimática 1, observamos que com a otimização 2, foi possível uma pequena redução do consumo de energia de aquecimento em relação a otimização 1.

Analisando as duas soluções selecionadas, apresentadas na Tabela 49, observamos que a estratégia do otimizador para reduzir o consumo de aquecimento foi aumentar a taxa de ventilação para aquecimento em todas as zonas térmicas e a absortância térmica das paredes e reduzir a taxa de infiltração da edificação. A redução da taxa de infiltração é favorável para a redução do consumo de aquecimento pois reduz a entrada de ar frio nos ambientes durante o inverno. O aumento da absortância térmica das paredes e cobertura faz com os materiais absorvam uma parcela maior da radiação solar. A radiação solar absorvida aquece os materiais e é parcialmente conduzida para o ambiente interno, aquecendo o ambiente durante o inverno e reduzindo o consumo de aquecimento. Comparando as duas soluções selecionadas, na otimização 2, foi possível uma redução de 34% no consumo de aquecimento, em relação a otimização 1.

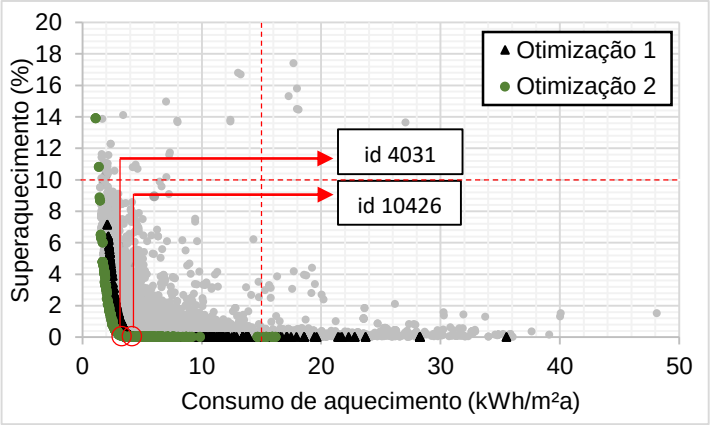


Figura 37: *Pareto-front* das otimizações 1 e 2 dos modelos *Passive House* na ZB1

Fonte: Autora

Tabela 49: Comparação das soluções obtidas nas otimizações 1 e 2 na zona bioclimática 1

Parâmetros		**Solução 1**	**Solução 2**
id		id 10426	id 4031
Espessura do isolamento térmico	**Piso**	0,02	0,02
	Paredes	0,12	0,12
	Cobertura	0,12	0,12
Desvio do norte (°)		0	183
Taxa de ventilação para aquecimento (h^{-1})	**ZT1**	0,40	0,80
	ZT2	0,40	0,50
	ZT3	0,40	0,50
	ZT4	0,40	0,70
Taxa de ventilação para refrigeração (h^{-1})	**ZT1**	0,40	0,70
	ZT2	0,40	0,70
	ZT3	0,40	0,70
	ZT4	0,40	0,50
Infiltração (h^{-1})		0,05	0,018
Solução de esquadria		Caixilho PVC + vidro insulado	Caixilho PVC + vidro insulado
Absortância	**Paredes**	0,20	0,97
	Cobertura	0,60	0,40
Consumo de aquecimento (kWh/m²a)		4,19	2,76
Consumo de refrigeração (kWh/m²a)		0,23	0,65
Sobreaquecimento (%)		0,23	0,20

Fonte: Autora

Na zona bioclimática 2, Figura 38, observamos que com a otimização 2 foi possível uma pequena redução no sobreaquecimento, em relação a otimização 1. Analisando as duas soluções selecionadas, apresentadas na Tabela 50, observamos que a estratégia do otimizador para reduzir o sobreaquecimento foi principalmente o aumento da taxa de ventilação para refrigeração. Comparando as duas soluções, com

a otimização 2, foi possível uma redução de 27% no sobreaquecimento e um aumento de 3% no consumo de aquecimento, em relação a otimização 1.

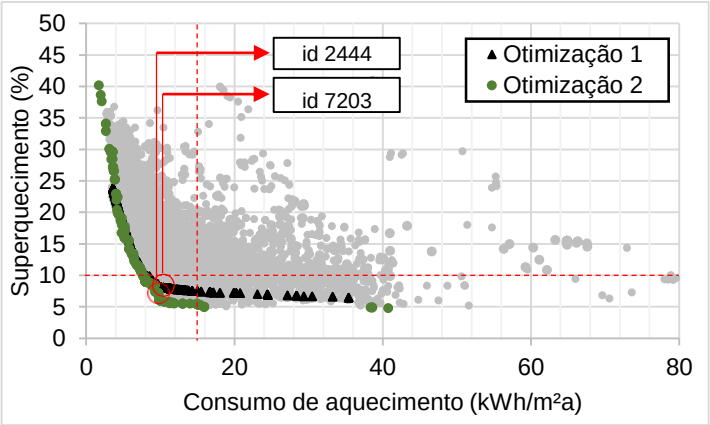


Figura 38: *Pareto-front* das otimizações 1 e 2 dos modelos *Passive House* na ZB2

Fonte: Autora

Tabela 50: Comparação das soluções obtidas nas otimizações 1 e 2 na zona bioclimática 2

Parâmetros		**Solução 1**	**Solução 2**
id		id 2444	id 7203
Espessura do isolamento térmico	**Piso**	0,00	0,00
	Paredes	0,12	0,12
	Cobertura	0,12	0,12
Desvio do norte (°)		0	0
Taxa de ventilação para aquecimento (h^{-1})	**ZT1**	0,40	0,60
	ZT2	0,40	0,90
	ZT3	0,40	0,30
	ZT4	0,40	0,90
Taxa de ventilação para refrigeração (h^{-1})	**ZT1**	0,40	0,90
	ZT2	0,40	0,90
	ZT3	0,40	0,80
	ZT4	0,40	0,30
Infiltração (h^{-1})		0,05	0,015
Solução de esquadria		Caixilho PVC + vidro insulado	Caixilho PVC + vidro insulado
Absortância	**Paredes**	0,20	0,20
	Cobertura	0,60	0,20
Consumo de aquecimento (kWh/m²a)		9,71	10,02
Consumo de refrigeração (kWh/m²a)		6,87	5,43
Sobreaquecimento (%)		8,15	5,94

Fonte: Autora

Na zona bioclimática 3, Figura 39, observamos que com a otimização 2 foi possível uma pequena redução, tanto no consumo de aquecimento quanto no sobreaquecimento, em relação à otimização 1. Analisando as duas soluções selecionadas, na Tabela 51, observamos que para a redução do consumo de aquecimento a estratégia foi o aumento da absortância das paredes e a redução da taxa de infiltração. Para a redução do sobreaquecimento a estratégia foi a redução do isolamento térmico do piso e o aumento da taxa de ventilação para refrigeração. Com isso, a otimização 2 obteve uma redução de 55% no consumo de aquecimento e de 82% no sobreaquecimento, em relação à otimização 1.

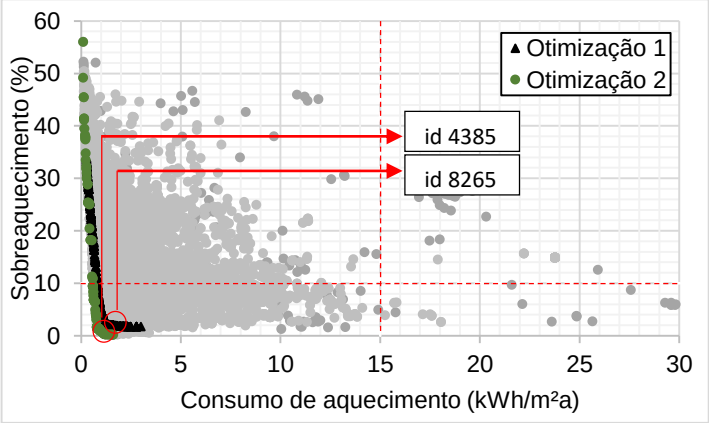


Figura 39: *Pareto-front* das otimizações 1 e 2 dos modelos *Passive House* na ZB3

Fonte: Autora

Tabela 51: Comparação das soluções obtidas nas otimizações 1 e 2 na zona bioclimática 3

Parâmetros		**Solução 1**	**Solução 2**
id		id 8265	id 4385
Espessura do isolamento térmico	**Piso**	0,00	0,02
	Paredes	0,12	0,12
	Cobertura	0,12	0,12
Desvio do norte (°)		0	0
Taxa de ventilação para aquecimento (h^{-1})	**ZT1**	0,40	0,90
	ZT2	0,40	0,30
	ZT3	0,40	0,30
	ZT4	0,40	0,30
Taxa de ventilação para refrigeração (h^{-1})	**ZT1**	0,40	0,90
	ZT2	0,40	0,90
	ZT3	0,40	0,90
	ZT4	0,40	0,50
Infiltração (h^{-1})		0,05	0,02
Solução de esquadria		Caixilho PVC + vidro insulado	Caixilho PVC + vidro insulado
Absortância	**Paredes**	0,20	0,97
	Cobertura	0,60	0,20
Consumo de aquecimento (kWh/m²a)		1,08	0,48
Consumo de refrigeração (kWh/m²a)		5,43	12,03
Sobreaquecimento (%)		3,96	0,73

Fonte: Autora

4.7. Viabilidade econômica

Neste item, realizou-se a análise da viabilidade econômica das soluções atendendo a classificação nível A, conforme o RTQ-R e ao *standard Passive House,* nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, conforme descrito no item 3.10.

Utilizando a mesma base geométrica, e igualando as condições de contorno na configuração dos modelos, foram analisadas 5 soluções, onde a solução 1 representa a solução regulamentar brasileira (NBR 15575), a solução 2 representa a solução com classificação nível A (RTQ-R), a solução 3 representa a solução Nível A otimizada (RTQ-R), a solução 4 representa a solução que atende aos limites da *Passive House* e a solução 5 representa a *Passive House* otimizada. A configuração do envelope e do sistema de climatização das 5 soluções são apresentadas na Tabela 52.

Tabela 52: Descrição das soluções para análise da viabilidade econômica

	Solução	Espessura do isolamento térmico (m)			Solução de esquadria	Sistema de climatização		
		Piso	Par.	Cob.		Período	*Setpoint*	Tipo
ZB1	Solução 1	0	0	0	Caixilho metálico + vidro monolítico 3mm	24h	20-26°C	HVAC
	Solução 2	0,06	0,06	0,06	Caixilho PVC + vidro insulado	24h	20-26°C	HVAC
	Solução 3	0,03	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	24h	20-26°C	HVAC
	Solução 4	0,02	0,11	0,06	Caixilho PVC + vidro monolítico 4mm	24h	20-26°C	MVHR
	Solução 5	0,02	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	24h	20-26°C	MVHR
ZB2	Solução 1	0	0	0	Caixilho metálico + vidro monolítico 3mm	24h	20-26°C	HVAC
	Solução 2	0,06	0,06	0,06	Caixilho PVC + vidro insulado	24h	20-26°C	HVAC
	Solução 3	0,03	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	24h	20-26°C	HVAC
	Solução 4	0	0,06	0,12	Caixilho PVC + vidro monolítico 4mm	24h	20-26°C	MVHR
	Solução 5	0	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	24h	20-26°C	MVHR
ZB3	Solução 1	0	0	0	Caixilho metálico + vidro monolítico 3mm	24h	20-26°C	HVAC
	Solução 2	0,07	0,07	0,07	Caixilho PVC + vidro insulado	24h	20-26°C	HVAC
	Solução 3	0,01	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	24h	20-26°C	HVAC
	Solução 4	0,03	0,003	0,04	Caixilho PVC + vidro insulado	24h	20-26°C	MVHR
	Solução 5	0,003	0,12	0,12	Caixilho PVC + vidro insulado	24h	20-26°C	MVHR

Fonte: Autora

4.7.1. Orçamentação

Nas Tabelas 53, 54 e 55, são apresentados o orçamento dos serviços e o investimento total das 5 soluções analisadas, para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, respectivamente.

Utilizando como base a solução 1 (NBR 15575), comparou-se o seu investimento com as demais soluções, a fim de verificar o investimento adicional das soluções atendendo ao RTQ-R e à *Passive House*. Na zona bioclimática 1, conforme a Tabela 53, o investimento adicional em relação à solução 1, foi de 26% e 28% nas soluções 2 e 3, respectivamente, que atendem ao RTQ-R, e de 40% e 42% nas soluções 4 e 5, respectivamente, que atendem à *Passive House*.

Na zona bioclimática 2, conforme a Tabela 54, o investimento adicional em relação à solução 1, foi de 26% e 27%, nas soluções 2 e 3 (RTQ-R), respectivamente, e de 39% e 41% nas soluções 3 e 4 (*Passive House*), respectivamente.

Na zona bioclimática 3, conforme a Tabela 55, o investimento adicional em relação à solução 1, foi de 26% e 27% nas soluções 2 e 3 (RTQ-R), respectivamente, e de 40% e 41% nas soluções 4 e 5 (*Passive House*), respectivamente.

Tabela 53: Orçamento dos serviços para a zona bioclimática 1

Zona bioclimática 1						
Descrição dos serviços		**Custo (R$)**				
		Solução 1	**Solução 2**	**Solução 3**	**Solução 4**	**Solução 5**
B-1	Instalações provisórias	159,12	159,12	159,12	159,12	159,12
	Trabalhos em terra - aterro	597,24	597,24	597,24	597,24	597,24
B-2	Radier - fundação	2909,70	2909,70	2909,70	2909,70	2909,70
B-3	Cintas de amarração	3643,55	3643,55	3643,55	3643,55	3643,55
	Vergas e contravergas	829,94	829,94	829,94	829,94	829,94
B-4	Alvenaria externa - blocos cerâmicos furados	3267,10	3267,10	3267,10	3267,10	3267,10
	Alvenaria interna - tijolos maciços cerâmicos	1811,06	1811,06	1811,06	1811,06	1811,06
	Janelas	4481,73	23506,33	23506,33	20598,34	23506,33
	Portas externas	2579,68	2579,68	2579,68	2579,68	2579,68
	Portas internas	2064,96	2064,96	2064,96	2064,96	2064,96
B-5	Estrutura para cobertura	3315,36	3315,36	3315,36	3315,36	3315,36
	Telha de fibrocimento	2558,83	2558,83	2558,83	2558,83	2558,83
	Cumeeira de fibrocimento	392,93	392,93	392,93	392,93	392,93
	Calha de chapa de aço	560,09	560,09	560,09	560,09	560,09
	Impermeabilização do piso	1023,84	1023,84	1023,84	1023,84	1023,84
	Isolamento térmico - EPS	0,00	3947,13	5241,03	4311,53	5131,20
B-6	Revestimento externo	3113,04	3113,04	3113,04	3113,04	3113,04
	Revestimento interno	4571,17	4571,17	4571,17	4571,17	4571,17
	Peitoril de granilite	259,41	259,41	259,41	259,41	259,41
	Forro de madeira	2160,74	2160,74	2160,74	2160,74	2160,74
	Pintura externa - tinta látex acrílica	1755,69	1755,69	1755,69	1755,69	1755,69
	Pintura interna - tinta látex PVA	2671,46	2671,46	2671,46	2671,46	2671,46
	Pintura esquadrias madeira – verniz	231,24	231,24	231,24	231,24	231,24
	Pintura forro de madeira - tinta esmalte	647,22	647,22	647,22	647,22	647,22
B-7	Regularização da base para piso	638,15	638,15	638,15	638,15	638,15
	Piso cerâmico	2073,87	2073,87	2073,87	2073,87	2073,87
	Rodapé cerâmico	735,22	735,22	735,22	735,22	735,22
	Soleira de granilite	66,94	66,94	66,94	66,94	66,94
B-8	Aparelhos e metais	1958,41	1958,41	1958,41	1958,41	1958,41
	Instalações elétricas	4161,61	4161,61	4161,61	4161,61	4161,61
	Instalações hidráulicas, sanitária e gás	4161,61	4161,61	4161,61	4161,61	4161,61
	Sistema de climatização	3744,96	3744,96	3744,96	26385,03	26385,03
B-9	Calafete e limpeza	734,40	734,40	734,40	734,40	734,40
Investimento total		**63880,28**	**86852,01**	**88145,91**	**106948,49**	**110676,15**
Investimento adicional (R$)		**-**	**22971,73**	**24265,62**	**43068,21**	**46795,87**
Investimento adicional (%)		**-**	**26**	**28**	**40**	**42**

Fonte: Autora

Tabela 54: Orçamento dos serviços para a zona bioclimática 2

Zona bioclimática 2						
Descrição dos serviços		**Custo (R$)**				
		Solução 1	**Solução 2**	**Solução 3**	**Solução 4**	**Solução 5**
B-1	Instalações provisórias	164,73	164,73	164,73	164,73	164,73
	Trabalhos em terra - aterro	612,57	612,57	612,57	612,57	612,57
B-2	Radier - fundação	3355,69	3355,69	3355,69	3355,69	3355,69
B-3	Cintas de amarração	4405,76	4405,76	4405,76	4405,76	4405,76
	Vergas e contravergas	952,49	952,49	952,49	952,49	952,49
B-4	Alvenaria externa - blocos cerâmicos furados	3456,99	3456,99	3456,99	3456,99	3456,99
	Alvenaria interna - tijolos maciços cerâmicos	1713,44	1713,44	1713,44	1713,44	1713,44
	Janelas	4467,02	23492,10	23492,10	20584,11	23492,10
	Portas externas	2641,14	2641,14	2641,14	2641,14	2641,14
	Portas internas	1915,41	1915,41	1915,41	1915,41	1915,41
B-5	Estrutura para cobertura	3968,21	3968,21	3968,21	3968,21	3968,21
	Telha de fibrocimento	2614,40	2614,40	2614,40	2614,40	2614,40
	Cumeeira de fibrocimento	397,92	397,92	397,92	397,92	397,92
	Calha de chapa de aço	483,62	483,62	483,62	483,62	483,62
	Impermeabilização do piso	1012,09	1012,09	1012,09	1012,09	1012,09
	Isolamento térmico - EPS	0,00	3987,82	5062,07	3495,41	4459,84
B-6	Revestimento externo	3196,73	3196,73	3196,73	3196,73	3196,73
	Revestimento interno	4536,65	4536,65	4536,65	4536,65	4536,65
	Peitoril de granilite	327,67	327,67	327,67	327,67	327,67
	Forro de madeira	2387,93	2387,93	2387,93	2387,93	2387,93
	Pintura externa - tinta látex acrílica	1520,54	1520,54	1520,54	1520,54	1520,54
	Pintura interna - tinta látex PVA	2290,42	2290,42	2290,42	2290,42	2290,42
	Pintura esquadrias madeira – verniz	228,44	228,44	228,44	228,44	228,44
	Pintura forro de madeira - tinta esmalte	512,62	512,62	512,62	512,62	512,62
B-7	Regularização da base para piso	691,13	691,13	691,13	691,13	691,13
	Piso cerâmico	1433,33	1433,33	1433,33	1433,33	1433,33
	Rodapé cerâmico	712,35	712,35	712,35	712,35	712,35
	Soleira de granilite	84,56	84,56	84,56	84,56	84,56
B-8	Aparelhos e metais	1996,76	1996,76	1996,76	1996,76	1996,76
	Instalações elétricas	4243,13	4243,13	4243,13	4243,13	4243,13
	Instalações hidráulicas, sanitária e gás	4243,13	4243,13	4243,13	4243,13	4243,13
	Sistema de climatização	3744,96	3744,96	3744,96	26385,03	26385,03
B-9	Calafete e limpeza	748,79	748,79	748,79	748,79	748,79
Investimento total		**65060,62**	**88073,52**	**89147,772**	**107313,19**	**111185,61**
Investimento adicional (R$)		**-**	**23012,905**	**24087,157**	**42252,57**	**46124,99**
Investimento adicional (%)		**-**	**26**	**27**	**39**	**41**

Fonte: Autora

Tabela 55: Orçamento dos serviços para a zona bioclimática 3

Zona bioclimática 3						
Descrição dos serviços		**Custo (R$)**				
		Solução 1	**Solução 2**	**Solução 3**	**Solução 4**	**Solução 5**
B-1	Instalações provisórias	163,64	163,64	163,64	163,64	163,64
	Trabalhos em terra - aterro	637,60	637,60	637,60	637,60	637,60
B-2	Radier - fundação	3145,67	3145,67	3145,67	3145,67	3145,67
B-3	Cintas de amarração	3991,82	3991,82	3991,82	3991,82	3991,82
	Vergas e contravergas	930,22	930,22	930,22	930,22	930,22
B-4	Alvenaria externa - blocos cerâmicos furados	3125,05	3125,05	3125,05	3125,05	3125,05
	Alvenaria interna - tijolos maciços cerâmicos	1949,62	1949,62	1949,62	1949,62	1949,62
	Janelas	4615,41	23516,46	23516,46	23516,46	23516,46
	Portas externas	2348,56	2348,56	2348,56	2348,56	2348,56
	Portas internas	1886,46	1886,46	1886,46	1886,46	1886,46
B-5	Estrutura para cobertura	3598,23	3598,23	3598,23	3598,23	3598,23
	Telha de fibrocimento	2667,29	2667,29	2667,29	2667,29	2667,29
	Cumeeira de fibrocimento	389,04	389,04	389,04	389,04	389,04
	Calha de chapa de aço	516,78	516,78	516,78	516,78	516,78
	Impermeabilização do piso	1094,86	1094,86	1094,86	1094,86	1094,86
	Isolamento térmico - EPS	0,00	4421,28	5115,15	1784,22	4459,84
B-6	Revestimento externo	3254,47	3254,47	3254,47	3254,47	3254,47
	Revestimento interno	4725,79	4725,79	4725,79	4725,79	4725,79
	Peitoril de granilite	283,22	283,22	283,22	283,22	283,22
	Forro de madeira	2449,50	2449,50	2449,50	2449,50	2449,50
	Pintura externa - tinta látex acrílica	1717,20	1717,20	1717,20	1717,20	1717,20
	Pintura interna - tinta látex PVA	2653,51	2653,51	2653,51	2653,51	2653,51
	Pintura esquadrias madeira – verniz	246,00	246,00	246,00	246,00	246,00
	Pintura forro de madeira - tinta esmalte	620,01	620,01	620,01	620,01	620,01
B-7	Regularização da base para piso	663,45	663,45	663,45	663,45	663,45
	Piso cerâmico	2044,28	2044,28	2044,28	2044,28	2044,28
	Rodapé cerâmico	724,58	724,58	724,58	724,58	724,58
	Soleira de granilite	73,09	73,09	73,09	73,09	73,09
B-8	Aparelhos e metais	2014,07	2014,07	2014,07	2014,07	2014,07
	Instalações elétricas	4279,89	4279,89	4279,89	4279,89	4279,89
	Instalações hidráulicas, sanitária e gás	4279,89	4279,89	4279,89	4279,89	4279,89
	Sistema de climatização	3744,96	3744,96	3744,96	26385,03	26385,03
B-9	Calafete e limpeza	755,28	755,28	755,28	755,28	755,28
Investimento total		**65589,44**	**88911,77**	**89605,64**	**108914,78**	**111590,40**
Investimento adicional (R$)		**-**	**23322,33**	**24016,20**	**43325,34**	**46000,96**
Investimento adicional (%)		**-**	**26**	**27**	**40**	**41**

Fonte: Autora

A Figura 40 apresenta graficamente o investimento total das soluções, nas três zonas bioclimáticas. Observa-se que as soluções 2 e 3, atendendo ao RTQ-R, apresentam um investimento em média de 27% maior que a solução 1, enquanto as

soluções 4 e 5, atendendo à *Passive House,* apresentam um investimento em média, 40% maior que a solução 1. O grande investimento adicional para as soluções, em partes, se deve devido à baixa exigência da NBR 15575.

Em relação às soluções atendendo ao RTQ-R, as soluções *Passive House* apresentam investimento adicional de, em média, 14%.

A diferença do investimento entre as duas soluções atendendo ao RTQ-R é pequena. Em relação a solução 2, que atende aos limites do regulamento, o investimento adicional para obter a solução 3, com desempenho otimizado, foi de aproximadamente 2% na ZB1, e 1% nas ZB2 e ZB3.

Entre as soluções *Passive House*, a diferença entre o investimento da solução 4, atendendo ao limite do *standard*, e a solução 5, com desempenho otimizado, foi de aproximadamente 2% nas ZB1 e ZB2 e de 1% na ZB3.

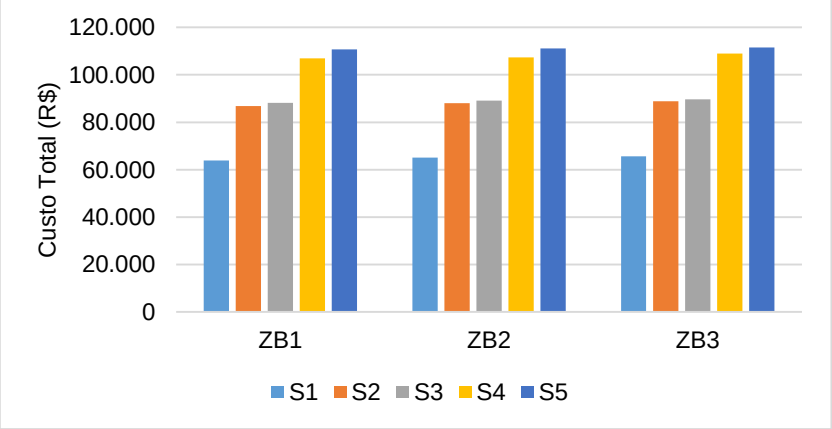


Figura 40: Investimento total das soluções nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3

Fonte: Autora

Na Figura 41 observamos que os custos das soluções diferem pouco entre as três zonas bioclimáticas. A ZB1 apresenta custos mais baixos, enquanto a ZB3 apresenta custos mais altos.

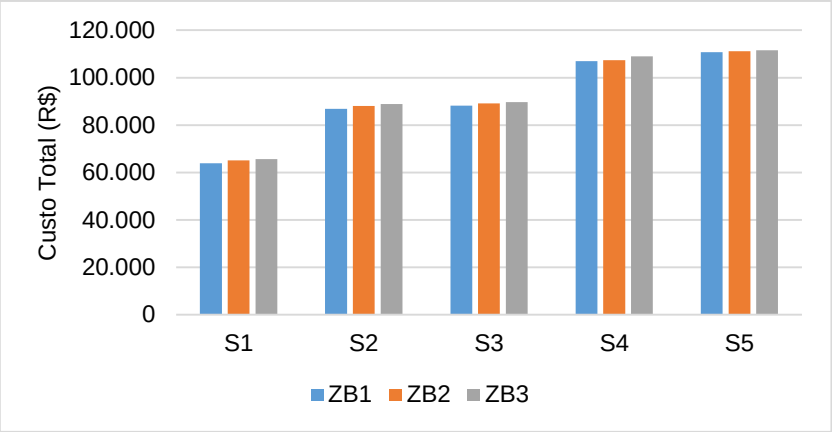


Figura 41: Comparação do investimento entre as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3

Fonte: Autora

As Figuras 42, 43 e 44 apresentam graficamente os custos, separadamente por serviços, conforme a NBR 12721 (ABNT, 2006), para as cinco soluções analisadas, para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, respectivamente. Observamos que, nas três zonas bioclimáticas, a soluções de acordo com o RTQ-R (soluções 2 e 3) apresentam custos adicionais apenas nos itens B.4, paredes e painéis, que se refere a substituição das esquadrias (caixilho e vidro) e B.5, coberturas e proteções, que se refere à adição do isolamento térmico nas paredes e cobertura. Já as soluções *Passive House*, além dos custos adicionais nos itens B.4 e B.5, apresentam custos adicionais no item B.8, instalações e aparelhos, que se refere à adição do sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor.

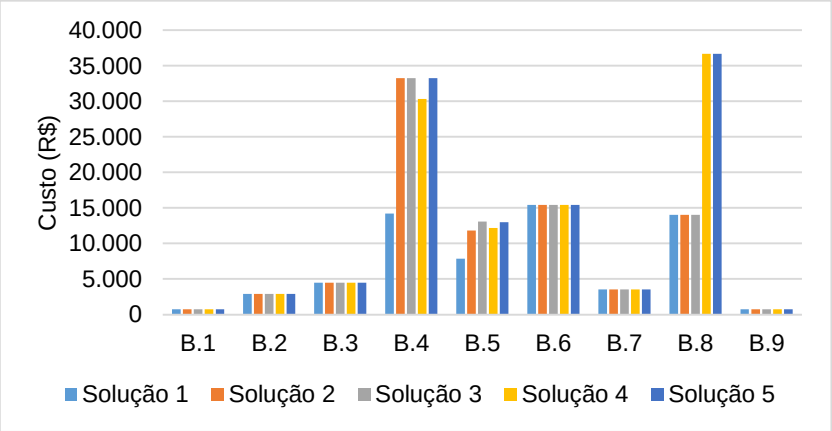


Figura 42: Custo dos serviços na zona bioclimática 1

Fonte: Autora

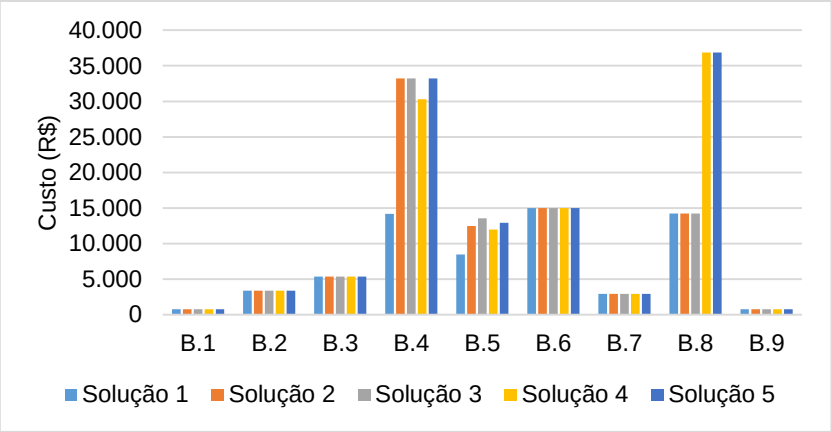


Figura 43: Custo dos serviços na zona bioclimática 2

Fonte: Autora

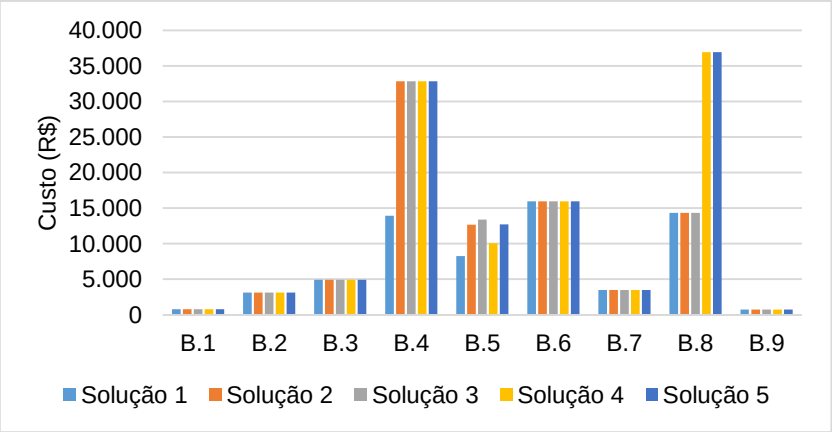


Figura 44: Custo dos serviços na zona bioclimática 3

Fonte: Autora

4.7.2. Balanço energético

A Tabela 56 apresenta o consumo e custo energético das 5 soluções analisadas, para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3. Utilizando como base a solução 1 (NBR 15575), comparou-se o seu consumo de energia com as demais soluções, a fim de verificar a economia de energia obtida com as soluções atendendo ao RTQ-R e à *Passive House*. Na zona bioclimática 1, a economia de energia em relação à solução 1, foi de 52% e 59% nas soluções 2 e 3, respectivamente, que atendem ao RTQ-R, e de 49% e 60% nas soluções 4 e 5, respectivamente, que atendem à *Passive House*.

Na zona bioclimática 2, a economia de energia em relação à solução 1, foi de 42% e 53% nas soluções 2 e 3 (RTQ-R), respectivamente, e de 58% e 61% nas soluções 4 e 5 (*Passive House*), respectivamente.

Na zona bioclimática 3, a economia de energia em relação à solução 1, foi de 22% e 34% nas soluções 2 e 3 (RTQ-R), respectivamente, e de 26% e 43% nas soluções 4 e 5 (*Passive House*), respectivamente.

Tabela 56: Resultados de consumo e economia de energia

	Soluções	**Energia (kWh/a)**		**Custo (R$/a)**			**Economia (%)**
		Consumo	**Economia**	**Tarifa**	**Total**	**Economia**	
ZB1	Solução 1	2034,02	-	0,71	1451,04	-	-
	Solução 2	971,01	1063,01	0,71	692,70	758,34	52
	Solução 3	833,95	1200,07	0,71	594,93	856,11	59
	Solução 4	1034,25	999,77	0,71	737,82	713,22	49
	Solução 5	823,55	1210,47	0,71	587,51	863,53	60
ZB2	Solução 1	2602,60	-	0,65	1696,77	-	-
	Solução 2	1513,29	1089,31	0,65	986,59	710,18	42
	Solução 3	1234,05	1368,55	0,65	804,54	892,23	53
	Solução 4	1092,18	1510,42	0,65	712,05	984,72	58
	Solução 5	1017,20	1585,40	0,65	663,17	1033,61	61
ZB3	Solução 1	1492,65	-	0,65	975,53	-	-
	Solução 2	1159,29	333,36	0,65	757,66	217,87	22
	Solução 3	979,40	513,25	0,65	640,10	335,44	34
	Solução 4	1104,33	388,32	0,65	721,75	253,79	26
	Solução 5	851,25	641,40	0,65	556,34	419,19	43

Fonte: Autora

Observamos graficamente na Figura 45 a diferença entre o custo energético das soluções analisadas, para as três zonas bioclimáticas. Nas zonas bioclimáticas 1 e 2 podemos visualizar uma maior economia de energia de todas as soluções em relação a solução base, já na zona bioclimática 3 a economia é menor.

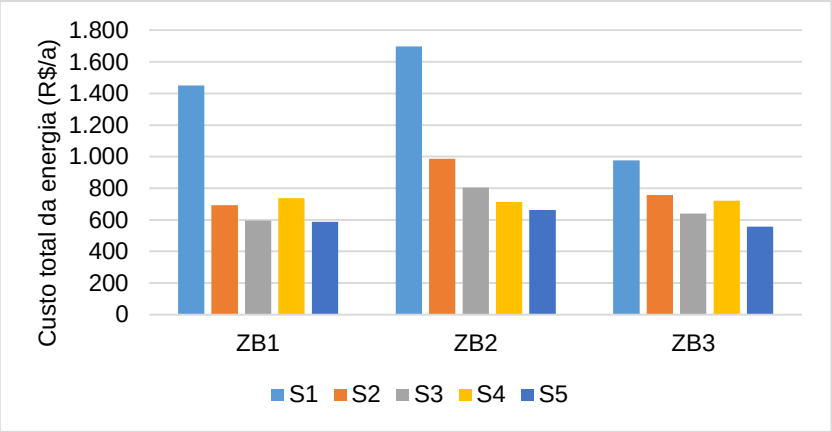


Figura 45: Custo total da energia nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3

Fonte: Autora

Comparando o custo com energia elétrica entre as zonas bioclimáticas, Figura 46, apesar de a tarifa de energia da ZB1 ser a mais alta, os maiores gastos com energia ocorrem na ZB2, que é maior consumidora, devido às condições climáticas, com inverno e verão rigorosos.

A solução 4 apresenta resultados semelhantes, pois possui consumo de energia dentro dos limites da *Passive House*, que é o mesmo para as três zonas bioclimáticas. O custo da energia dessa solução é um pouco maior na ZB1, que possui tarifa de energia mais alta.

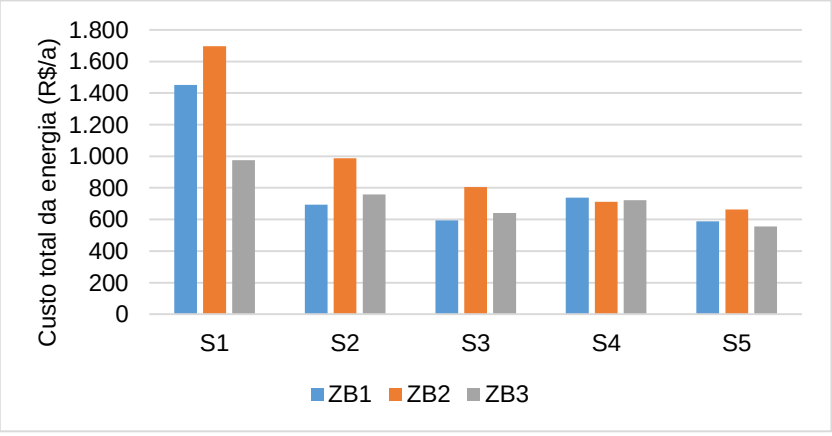


Figura 46: Comparação do custo total da energia entre as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3

Fonte: Autora

4.7.3. Resultados do custo da energia conservada

Conforme o item 3.10.3, o cálculo do custo da energia conservada (CEC) relaciona os custos do investimento adicional, a energia economizada, a vida útil da edificação e a taxa de desconto comparada ao INCC - IBGE.

A Tabela 57, apresenta os resultados do cálculo do custo da energia conservada para as soluções 2, 3, 4 e 5, para as três zonas bioclimáticas. Nenhuma das soluções é economicamente viável, pois, em todos os casos os resultados do CEC ficaram maiores que o custo da tarifa de energia.

Tabela 57: Resultados do cálculo do custo da energia conservada

	Solução	Investimento (R$)	Econ. energia (kWh/a)	n (anos)	d	CEC (R$/kWh)	Tarifa de energia (R$/kWh))	CEC/Tarifa
ZB1	Solução 2	22971,73	1063,01	50	0,0743	1,65	0,7134	2,32
	Solução 3	24265,62	1200,07	50	0,0743	1,55	0,7134	2,17
	Solução 4	43068,21	999,77	50	0,0743	3,29	0,7134	4,61
	Solução 5	46795,87	1210,47	50	0,0743	2,95	0,7134	4,14
ZB2	Solução 2	23012,91	1089,31	50	0,0743	1,61	0,6520	2,48
	Solução 3	24087,16	1368,55	50	0,0743	1,35	0,6520	2,06
	Solução 4	42252,57	1510,42	50	0,0743	2,14	0,6520	3,28
	Solução 5	46124,99	1585,40	50	0,0743	2,22	0,6520	3,41
ZB3	Solução 2	23322,33	333,36	50	0,0743	5,35	0,6536	8,18
	Solução 3	24016,20	513,25	50	0,0743	3,58	0,6536	5,47
	Solução 4	43325,34	388,32	50	0,0743	8,53	0,6536	13,05
	Solução 5	46000,96	641,40	50	0,0743	5,48	0,6536	8,39

Fonte: Autora

4.7.4. *Resultados de payback* simples e descontado

Para a análise de *payback*, simples e descontado, o investimento foi considerado viável quando o tempo de retorno não ultrapassa o tempo de vida útil da edificação, considerado 50 anos.

A Tabela 58 e a Figura 47 apresentam os resultados do cálculo do *payback* simples das soluções atendendo ao RTQ-R e à *Passive House,* nas três zonas bioclimáticas. O *payback* simples foi obtido através da relação entre o investimento adicional (R$) e a economia anual de energia (R$), conforme descrito no item 3.10.4.

Na zona bioclimática 1, as soluções 2 e 3, que atendem ao RTQ-R, obtiveram *payback* inferior à vida útil da edificação, sendo consideradas viáveis. Já as soluções 4 e 5, que atendem à *Passive House*, obtiveram *payback* superior à vida útil da edificação, sendo consideradas inviáveis. Isso ocorre porque o investimento inicial para a aplicação do *standard Passive House* é maior em relação ao RTQ-R, enquanto a economia de energia obtida com a aplicação dos dois regulamentos é semelhante.

Na zona bioclimática 2, todas as soluções apresentaram resultados viáveis, isso ocorre porque a aplicação do RTQ-R e da *Passive House* possibilitam uma maior economia de energia nessa zona, o que facilitando a recuperação do investimento inicial.

Na zona bioclimática 3 todas as soluções apresentaram *payback* elevado, superiores à vida útil da edificação. Isso ocorre devido ao clima mais ameno, com menores necessidades de climatização. Assim, a economia de energia das soluções atendendo ao RTQ-R e à *Passive House* é baixa em relação à solução base, dificultando a recuperação do investimento inicial.

Apesar de em alguns casos a aplicação do *standard Passive House* ter sido considerada viável, o período para a recuperação do investimento adicional é longo em todos os casos. Supõe-se que isso ocorre por se tratar de uma habitação de interesse social, de pequeno porte, onde o consumo de energia é baixo. Acredita-se que em edificações de grande porte o investimento adicional seja ligeiramente maior, porém proporcionando uma maior economia de energia, reduzindo o tempo de *payback* e viabilizando a aplicação do *standard.* Isso é dito pelo fato de que o sistema recuperador de calor representa a principal parcela do investimento adicional, e pode atender a edificações de maior área pelo mesmo preço, de acordo com o limite estabelecido pelo fabricante.

Destaca-se que a solução com maior atratividade financeira é a solução 3 (RTQ-R otimizado), com envelope otimizado, porém sem o sistema de recuperação de calor, pois esse sistema é responsável por um grande aumento no custo do investimento inicial. Em relação à solução 5 (*Passive House* ótima), a solução 3 apresentou uma redução no tempo de retorno de 25,85 anos na ZB1, de 17,63 anos na ZB2 e de 38,14 anos na ZB3.

Tabela 58: *Payback* simples nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3

	Soluções	Investimento adicional (R$)	Economia (R$/a)	$PB_{simples}$	Vida útil 50 anos
ZB1	Solução 2	22971,73	758,34	30,29	PB < VU
	Solução 3	24265,62	856,11	28,34	PB < VU
	Solução 4	43068,21	713,22	60,39	PB > VU
	Solução 5	46795,87	863,53	54,19	PB > VU
ZB2	Solução 2	23012,90	710,18	32,40	PB < VU
	Solução 3	24087,16	892,23	27,00	PB < VU
	Solução 4	42252,57	984,72	42,91	PB < VU
	Solução 5	46124,99	1033,61	44,63	PB < VU
ZB3	Solução 2	23322,33	217,87	107,05	PB > VU
	Solução 3	24016,20	335,44	71,60	PB > VU
	Solução 4	43325,34	253,79	170,72	PB > VU
	Solução 5	46000,96	419,19	109,74	PB > VU

PB= *Payback*; VU=Vida útil.

Fonte: Autora

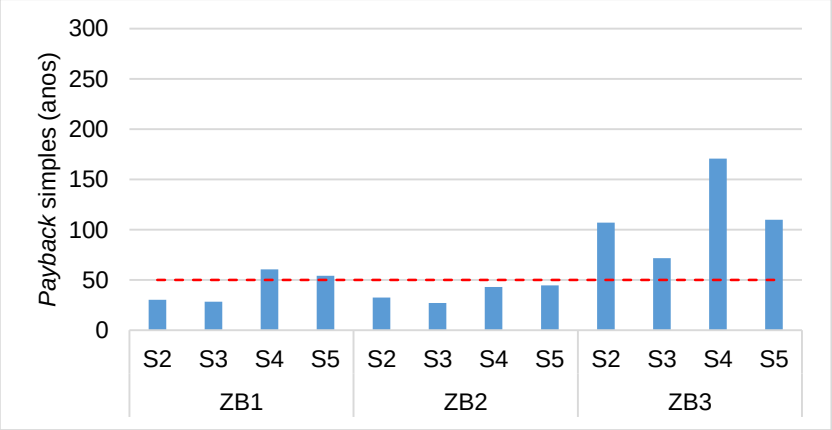


Figura 47: *Payback* simples nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3

Fonte: Autora

A Tabela 59 e a Figura 48 apresentam os resultados do cálculo do *payback* descontado das soluções atendendo ao RTQ-R e à *Passive House,* nas três zonas bioclimáticas, conforme descrito no item 3.10.4. Na zona bioclimática 1 apenas a solução 4 foi considerada inviável, pois obteve *payback* superior à vida útil da edificação. Na zona bioclimática 2 todas as soluções foram consideradas viáveis, pois obtiveram resultado de *payback* inferior à vida útil da edificação. Na zona bioclimática 3, todas as soluções obtiveram resultados elevados de *payback*, e foram consideradas inviáveis. Observa-se que na solução 4 não foi possível a recuperação do investimento.

Tabela 59: *Payback* descontado nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3

	Soluções	Investimento adicional (R$)	i invest.(%)	Economia (R$/a)	i economia (%)	$PB_{descontado}$	Vida útil 50 anos
ZB1	Solução 2	22971,73	7,00	758,34	7,48	28,44	PB < VU
	Solução 3	24265,62	7,00	856,11	7,48	26,69	PB < VU
	Solução 4	43068,21	7,00	713,22	7,48	53,52	PB > VU
	Solução 5	46795,87	7,00	863,53	7,48	48,58	PB < VU
ZB2	Solução 2	23012,90	7,00	710,18	7,59	29,84	PB < VU
	Solução 3	24087,16	7,00	892,23	7,59	25,50	PB < VU
	Solução 4	42252,57	7,00	984,72	7,59	39,31	PB < VU
	Solução 5	46124,99	7,00	1033,61	7,59	40,01	PB < VU
ZB3	Solução 2	23322,33	7,00	217,87	6,29	186,09	PB > VU
	Solução 3	24016,20	7,00	335,44	6,29	97,04	PB > VU
	Solução 4	43325,34	7,00	253,79	6,29	<1000	PB > VU
	Solução 5	46000,96	7,00	419,19	6,29	195,61	PB > VU

PB= *Payback*; VU=Vida útil.

Fonte: Autora

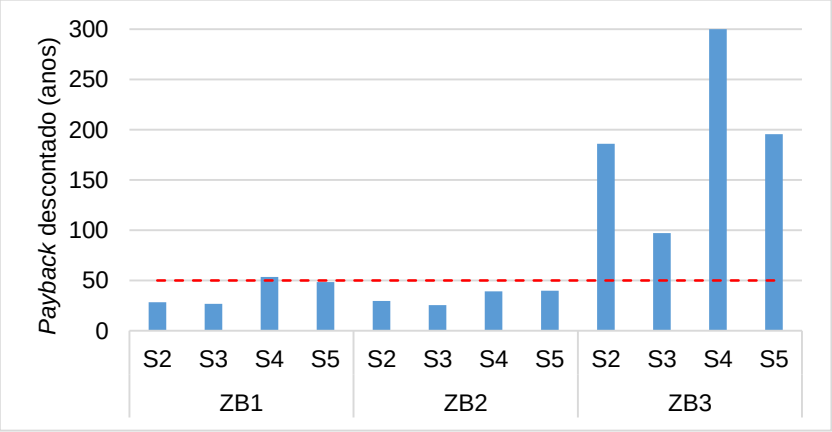


Figura 48: *Payback* descontado nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3

Fonte: Autora

Nas zonas bioclimáticas 1 e 2, os resultados do *payback* descontado são inferiores aos resultados do *payback* simples, pois a taxa da evolução da tarifa de energia é maior que a taxa de inflação, valorizando a economia de energia, que representa o dinheiro recuperado ao longo do tempo. Já na zona bioclimática 3, a economia de energia é desvalorizada ao longo do tempo, pois a taxa de inflação é maior que a taxa da evolução da tarifa de energia, o que torna mais difícil a recuperação do investimento.

4.7.5. Resultados dos cenários para viabilizar o *standard Passive House*

4.7.5.1. Considerando a redução no custo do sistema recuperador de calor

Nesta etapa, foram criados 2 cenários hipotéticos, reduzindo os custos do sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor (MVHR), para a comparação com o cenário real. Conforme descrito no item 3.10.5.1, no cenário 1 desconsiderou-se a taxa de importação do sistema e no cenário 2 foi reduzido 50% do custo real do sistema.

A Tabela 60 e a Figura 49 apresentam os resultados do *payback* simples para a solução *Passive House* atendendo aos limites do *standard* (solução 4). Observa-se que, na zona bioclimática 1, em relação ao cenário real, foi possível reduzir o *payback* em 8,4 e 15,88 anos, nos cenários 1 e 2, respectivamente, tornando a aplicação do *standard* viável apenas no cenário 2. Na zona bioclimática 2, em relação ao cenário real, que já era considerado viável, foi possível reduzir o *payback* em 6,08 e 11,5 anos nos cenários 1 e 2, respectivamente. Na zona bioclimática 3, em relação ao cenário real, foi possível reduzir o *payback* em 23,59 e 44,60 anos, nos cenários 1 e 2, respectivamente, porém a aplicação do *standard* permaneceu inviável.

Tabela 60: *Payback* simples da solução 4 considerando a redução do custo do MVHR

	Cenários	Custo HR (R$)	Investimento (R$)		Percentual em relação ao invest. (%)		$PB_{simples}$	Vida útil 50 anos
			Total	Adicional	Total	Adicional		
ZB1	Cenário real	22640,07	106948,49	43068,21	21%	53%	60,39	PB > VU
	Cenário 1	16653,23	100961,65	37081,37	16%	45%	51,99	PB > VU
	Cenário 2	11320,03	95628,46	31748,17	12%	36%	44,51	PB < VU
ZB2	Cenário real	22640,07	107313,19	42252,57	21%	54%	42,91	PB < VU
	Cenário 1	16653,23	101326,35	36265,73	16%	46%	36,83	PB < VU
	Cenário 2	11320,03	95993,15	30932,54	12%	37%	31,41	PB < VU
ZB3	Cenário real	22640,07	108914,78	43325,34	21%	52%	170,72	PB > VU
	Cenário 1	16653,23	102927,94	37338,50	16%	45%	147,13	PB > VU
	Cenário 2	11320,03	97594,74	32005,31	12%	35%	126,11	PB > VU

PB= *Payback*; VU=Vida útil.

Fonte: Autora

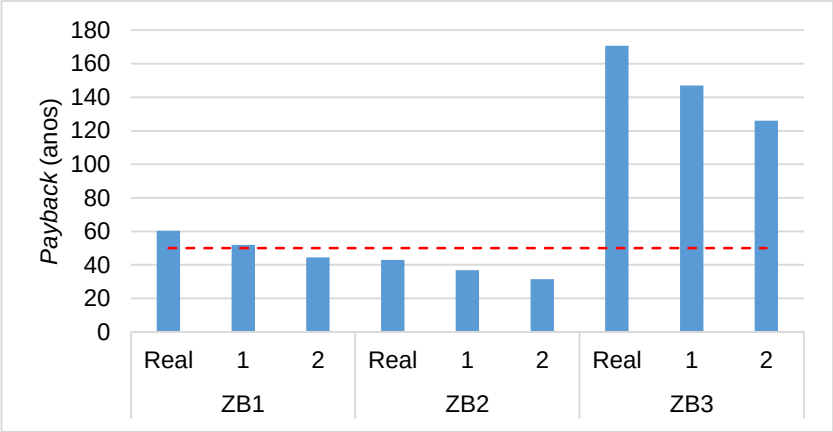


Figura 49: *Payback* simples da solução 4 considerando a redução do custo do MVHR

Fonte: Autora

A Tabela 61 e a Figura 50 apresentam os resultados do *payback* simples para a solução *Passive House* otimizada (solução 5). Observa-se que na zona bioclimática 1, em relação ao cenário real, foi possível reduzir o *payback* em 6,93 e 13,11 anos, nos cenários 1 e 2 respectivamente, viabilizando a aplicação do *standard* nos dois cenários. Na zona bioclimática 2, em relação ao cenário real, que já era considerado viável, foi possível uma redução do *payback* em 5,80 e 10,96 anos, nos cenários 1 e 2 respectivamente. Na zona bioclimática 3, em relação ao cenário real, foi possível reduzir o *payback* em 14,28 e 27,01 anos, nos cenários 1 e 2, respectivamente, porém a aplicação do *standard* permaneceu inviável.

Tabela 61: *Payback* simples da solução 5 considerando a redução do custo do HR

	Cenários	Custo HR (R$)	Investimento (R$)		Percentual em relação ao invest. (%)		$PB_{simples}$	Vida útil 50 anos
			Total	Adicional	Total	Adicional		
ZB1	Cenário real	22640,07	110676,15	46795,87	20%	48%	54,19	PB > VU
	Cenário 1	16653,23	104689,31	40809,03	16%	41%	47,26	PB < VU
	Cenário 2	11320,03	99356,12	35475,84	11%	32%	41,08	PB < VU
ZB2	Cenário real	22640,07	111185,61	46124,99	20%	49%	44,63	PB < VU
	Cenário 1	16653,23	105198,77	40138,15	16%	41%	38,83	PB < VU
	Cenário 2	11320,03	99865,57	34804,96	11%	33%	33,67	PB < VU
ZB3	Cenário real	22640,07	111590,40	46000,96	20%	49%	109,74	PB > VU
	Cenário 1	16653,23	105603,56	40014,12	16%	42%	95,46	PB > VU
	Cenário 2	11320,03	100270,36	34680,92	11%	33%	82,73	PB > VU

PB= *Payback*; VU=Vida útil.

Fonte: Autora

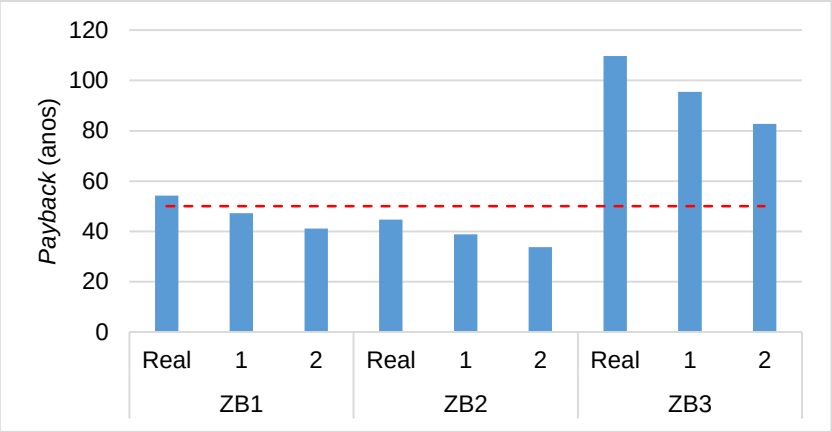


Figura 50: *Payback* simples da solução 5 considerando a redução do custo do MVHR

Fonte: Autora

4.7.5.2 Considerando possível aumento na tarifa de energia

Nesta etapa, conforme o item 3.10.5.2, criou-se 5 cenários hipotéticos, aumentando o custo da tarifa de energia de 10% a 50%, para as três zonas bioclimáticas.

A Tabela 62 e a Figura 51 apresentam os resultados do *payback* simples para a solução 4, que atende aos limites do *standard Passive House*. Observa-se que na zona bioclimática 1, o *payback* torna-se viável a partir de um aumento de 30% no custo da tarifa de energia. Na zona bioclimática 2, em todos os cenários a solução obteve *payback* viável. Na zona bioclimática 3, em nenhum dos cenários a solução apresentou *payback* viável.

Tabela 62: *Payback* simples da solução 4 considerando o aumento na tarifa de energia

	Cenário	Tarifa (R$)	Custo da energia (R$)		Economia (R$/a)	$PB_{simples}$ (anos)	Vida útil 50 anos
			Solução 1	Solução 2			
ZB1	**Real**	0,7134	1451,04	737,82	713,22	60,39	PB > VU
	10%	0,7847	1596,14	811,60	784,54	54,90	PB > VU
	20%	0,8561	1741,25	885,38	855,86	50,32	PB > VU
	30%	0,9274	1886,35	959,17	927,18	46,45	PB < VU
	40%	0,9987	2031,46	1032,95	998,51	43,13	PB < VU
	50%	1,0701	2176,56	1106,73	1069,83	40,26	PB < VU
ZB2	**Real**	0,6520	1696,77	712,05	984,72	42,91	PB < VU
	10%	0,7171	1866,45	783,25	1083,20	39,01	PB < VU
	20%	0,7823	2036,13	854,46	1181,67	35,76	PB < VU
	30%	0,8475	2205,80	925,66	1280,14	33,01	PB < VU
	40%	0,9127	2375,48	996,87	1378,61	30,65	PB < VU
	50%	0,9779	2545,16	1068,07	1477,09	28,61	PB < VU
ZB3	**Real**	0,6536	975,53	721,75	253,79	170,72	PB > VU
	10%	0,7189	1073,09	793,92	279,17	155,20	PB > VU
	20%	0,7843	1170,64	866,10	304,55	142,26	PB > VU
	30%	0,8496	1268,19	938,27	329,92	131,32	PB > VU
	40%	0,9150	1365,75	1010,45	355,30	121,94	PB > VU
	50%	0,9803	1463,30	1082,62	380,68	113,81	PB > VU

PB= *Payback*; VU=Vida útil.

Fonte: Autora

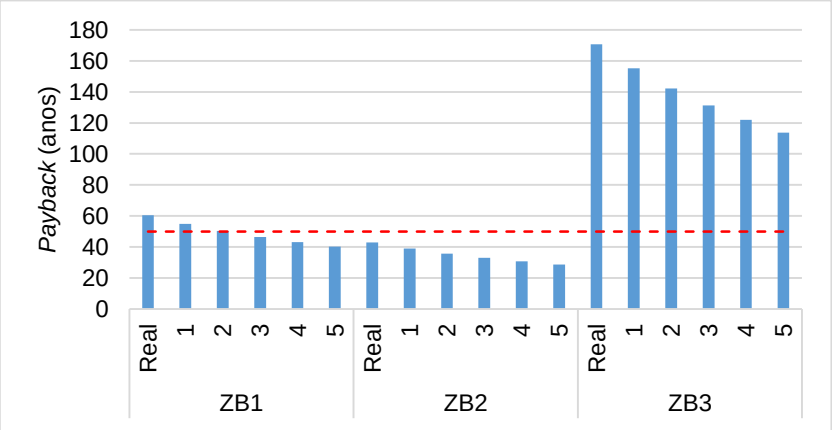


Figura 51: *Payback* simples da solução 4 considerando o aumento na tarifa de energia

Fonte: Autora

A Tabela 63 e a Figura 52 apresentam os resultados do *payback* simples para a solução 5, que representa a solução *Passive House* otimizada. Observa-se que na zona bioclimática 1, o *payback* torna-se viável a partir de um aumento de 30% no custo da tarifa de energia. Na zona bioclimática 2, em todos os cenários a solução obteve *payback* viável. Na zona bioclimática 3, em nenhum dos cenários a solução apresentou *payback* viável.

Tabela 63: *Payback* simples da solução 5 considerando o aumento na tarifa de energia

	Cenário	Tarifa (R$)	Custo da energia (R$)		Economia (R$/a)	$PB_{simples}$ (anos)	Vida útil 50 anos
			Solução 1	S 3			
ZB1	**Real**	0,7134	1451,04	587,51	863,53	54,19	PB > VU
	10%	0,7847	1596,14	646,26	949,88	49,26	PB < VU
	20%	0,8561	1741,25	705,01	1036,24	45,16	PB < VU
	30%	0,9274	1886,35	763,76	1122,59	41,69	PB < VU
	40%	0,9987	2031,46	822,51	1208,94	38,71	PB < VU
	50%	1,0701	2176,56	881,26	1295,30	36,13	PB < VU
ZB2	**Real**	0,6520	1696,77	663,17	1033,61	44,63	PB < VU
	10%	0,7171	1866,45	729,48	1136,97	40,57	PB < VU
	20%	0,7823	2036,13	795,80	1240,33	37,19	PB < VU
	30%	0,8475	2205,80	862,12	1343,69	34,33	PB < VU
	40%	0,9127	2375,48	928,43	1447,05	31,88	PB < VU
	50%	0,9779	2545,16	994,75	1550,41	29,75	PB < VU
ZB3	**Real**	0,6536	975,53	556,34	419,19	109,74	PB > VU
	10%	0,7189	1073,09	611,98	461,11	99,76	PB > VU
	20%	0,7843	1170,64	667,61	503,03	91,45	PB > VU
	30%	0,8496	1268,19	723,25	544,95	84,41	PB > VU
	40%	0,9150	1365,75	778,88	586,87	78,38	PB > VU
	50%	0,9803	1463,30	834,52	628,79	73,16	PB > VU

PB= *Payback*; VU=Vida útil.

Fonte: Autora

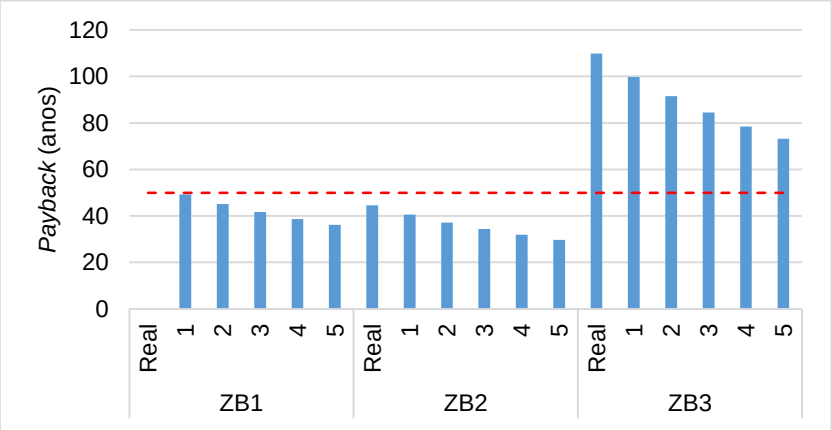


Figura 52: *Payback* simples da solução 5 considerando o aumento na tarifa de energia

Fonte: Autora

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de melhorar o desempenho de uma edificação de interesse social, atendendo à NBR 15575, através da definição de diferentes soluções de envelope, a fim de atender à classificação Nível A do regulamento brasileiro RTQ-R e à normativa alemã *Passive House*, para o contexto climático do Sul do Brasil, e analisar o seu desempenho sob o enfoque energético e econômico.

Conclui-se que as soluções atendendo ao RTQ-R e ao *standard Passive House* proporcionam uma grande redução no consumo de energia em relação à solução base, atendendo à NBR 15575, nas três zonas bioclimáticas. Analisando duas soluções atendendo ao RTQ-R, a economia de energia foi de 52% e 59% na ZB1, 42% e 53% na ZB2 e de 22% e 34% na ZB3. Com as soluções *Passive House,* a economia de energia foi de 49% e 60% na ZB1, 58% e 61% na ZB2, e de 26% e 43% na ZB3.

No entanto, verificou-se que o investimento para a aplicação das regulamentações é elevado. Comparando-se os custos de construção, em relação à solução base (atendendo a NBR 15575), as soluções atendendo ao RTQ-R apresentaram um investimento adicional entre 26% e 27%, enquanto as soluções atendendo ao *standard Passive House* apresentaram um investimento adicional entre 39% e 42%, nas três zonas bioclimáticas. O grande acréscimo de custos das soluções, em parte, se deve pela baixa qualidade das construções atualmente no Brasil, onde as normas em relação ao desempenho de edificações ainda são pouco exigentes, como é o caso da NBR 15575.

Na análise de *payback* simples, as soluções atendendo ao RTQ-R foram consideradas viáveis nas zonas bioclimáticas 1 e 2, onde o *payback* foi inferior à vida útil da edificação, considerado 50 anos. Já as soluções *Passive House* foram consideradas viáveis somente na zona bioclimática 2. Na zona bioclimática 3 todas as soluções obtiveram resultados elevados de *payback*, ultrapassando os 100 anos.

Conclui-se que a aplicação do *standard Passive House* em edificações de interesse social no Brasil, atualmente é economicamente viável apenas para a zona bioclimática 2, onde foi possível comprovar que o tempo de retorno (*payback*), apesar de longo, é inferior a vida útil da edificação. Porém, é possível que no futuro se torne viável nas demais zonas bioclimáticas, devido a diversos fatores, entre eles a possível redução no custo do sistema de ventilação com recuperador de calor e ao possível aumento das tarifas de energia.

Destaca-se que apesar do elevado investimento, a implantação do *standard Passive House* proporciona conforto térmico e garante a qualidade do ar interior, trazendo benefícios à qualidade de vida e a saúde dos usuários, além de benefícios ambientais.

5.1. Limitações do trabalho

Como limitação do trabalho destacamos a configuração do sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor no *software EnergyPlus*®, onde utilizou-se o objeto *IdealLoadsAirSystem* que considera o uso de um condicionador de ar com coeficiente de performance igual a 1, quando a temperatura está fora dos limites de *setpoints*, prejudicando a eficiência do sistema.

5.2. Trabalhos futuros

O estudo desenvolvido analisou a aplicação do *standard Passive House* nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, porém enfatiza-se a necessidade de ampliar ainda mais a discussão para as demais zonas bioclimáticas brasileiras.

Foi utilizado como objeto de estudo uma edificação de interesse social, portanto, sugere-se o desenvolvimento de novos estudos utilizando edificações de porte maior, residenciais e comerciais, a fim de maximizar a economia de energia gerada pelo sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor, viabilizando a sua implementação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12721. Anexo B (normative) Discriminação orçamentária.** ABNT, 2006.

_____. **NBR 15220: Desempenho Térmico para Edificações de Interesse Social.** Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

_____. **NBR 15.575. Norma Brasileira de Edifícios habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BADESCU, Viorel; LAASER, Nadine; CRUTESCU, Ruxandra. Warm season cooling requirements for passive buildings in Southeastern Europe (Romania). **Energy 35**, 2010, 3284e3300.

BRASIL. Decreto n. 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. **Lex:** Diário Oficial da União, Brasília, 2001a.

BRASIL. Instrução Normativa MPOG/SLTI nº 2, De 4 de Junho de 2014. Disponível em: <https://www.comprasgovernamentais.gov.br/index.php/legislacao/instrucoes-normativas/304-instrucao-normativa-n-2-de-04-de-junho-de-2014> Acesso em: abril de 2017.

BRASIL. Lei Federal n°. 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. Lei n°. 10295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. **Lex:** Diário Oficial da União, Brasília, 2001b.

BRE, Facundo; FACHINOTTI, Víctor D. A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings. **Energy and Buildings,** v.154, 283–294, 2017.

CARLO, Joyce C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação de eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais.** (Tese de doutorado). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. 215 p.

CUNHA, E.; GIOIELLI, B. Analysis of Thermal Bridge Impact in a Hotel Building for the Eight Brazilian Bioclimatic Zones. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 9, p. 393-400, 2015.

DALBEM, Renata; CUNHA, Eduardo G.; VICENTE, Romeu; FIGUEIREDO, António J.; SILVA, Antonio César. S. B. Discussão do desempenho da envoltória de uma

Passive House adaptada à zona bioclimática 2 acordando com o RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 201-222, 2017.

DALBEM, Renata; KNOP, Stifany; CUNHA, Eduardo G.; OLIVEIRA, Rui; RODRIGUES, Maria F.; VICENTE, Romeu. Verification of the Passive House Concept to the South of Brazil Climate. **Journal of Civil Engineering and Architecture (Online),** v. 10, p. 937-945, 2016.

DOE – U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY. EnergyPlus Energy Simulation Software. Disponível em <https://energyplus.net/downloads>. Acesso em: abril de 2017.

EL FOUIH, Y. et al. Adequacy of Air-to-Air Heat Recovery Ventilation System Applied in Low Energy Buildings. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 29-39, 2012.

ENTRANZE. Overview of the EU-27 building policies and programs - Factsheets on the nine Entranze target countries Cross-analysis on Member-States' plans to develop their building regulations towards the nZEB standard. Disponível em: <www.entranze.eu/files/downloads/D5_1_3/ENTRANZE_Integration_of_report_D5.1_D5.2_D5.3_final.pdf>. Acesso em: janeiro de 2018.

EN 13829. Thermal performance of building – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified). 2002

EUROPEAN COMMISSION. **Report from the Commission to the European Parliament and the Council Progress by Member States towards Nearly Zero-Energy Buildings**, COM (2013) 483 final/2. Outubro de 2013. Disponível em: <http://goo.gl/2PyY7x>. Acesso em janeiro de 2018.

EUROPEAN PARLIAMENT. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). **Official Journal of the European Union,** EU. 2010.

FIGUEIREDO, António; FIGUEIRA, José; VICENTE, Romeu; MAIO, Rui. Thermal Comfort and Energy Performance: sensitivity analysis to apply the Passive House concept to the Portuguese climate. **Building and Environment**, v. 103, p. 276-288, 2016a.

FIGUEIREDO, António.; KAMPF, Jérôme Henri; VICENTE, Romeu. Passive House Optimization for Portugal: overheating evaluation and energy performance. **Energy and Buildings,** v. 118, p. 181-196, 2016b.

FOKAIDES, Paris A.; CHRISTOFOROU, Elias; ILIC, Milos; PAPADOPOULOS, Agis. Performance of a Passive House under subtropical climatic conditions. **Energy and Buildings.** 133, 14–31, 2016.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Déficit Habitacional no Brasil 2013-2014. Disponível em: <http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/docman/cei/informativos-cei-eventuais/634-deficit-habitacional-06-09-2016/file>. Acesso em: abril de 2017.

GRANGEIA, Rui Manuel da Cruz. **Passivhaus em Portugal: Viabilidade Económica** (Dissertação de Mestrado). Departamento de engenharia civil, Universidade de Aveiro, Aveiro-PT, 2013.

GUSTAFSSON, M. et al*.* Energy Performance Comparison of Three Innovative HVAC Systems for Renovation Through Dynamic Simulation. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 512-519, 2014.

HATT, T.; SAELZER, G.; HEMPEL, R.; GERBER, A. Alto confort interior con mínimo consumo energético a partir de la implementación del estándar Passivhaus en Chile. **Revista de la Construcción**, v. 11, p. 123–134, 2012.

HIRSCHFELD, Henrique. **Engenharia econômica e análise de custos.** Editora Atlas S.A. 7ª Edição. São Paulo, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R.** Eletrobrás, 2012.

_____. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos, RTQ-C**, Eletrobrás, 2012.

KALYANMOY, D. Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 2001.

KÄMPF, Jérôme H. **On the modelling and Optimisation of Urban Energy Fluxes** (Tese de doutorado), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 186 p., 2009.

KÄMPF, Jérôme H., ROBINSON, Darren A hybrid CMA-ES and HDE optimisation algorithm with application to solar energy potential, Applied Soft Computing, v. 9, p. 738-745, 2009.

LABRINCHA, J., SAMAGAIO, A., VICENTE, R. Associação para o Desenvolvimento da Casa do Futuro. Sub Projecto de Isolamento Térmico - 1º Relatório de Progresso*.* 2006.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** Eletrobrás, 3ª Ed, 2015.

MATTOS, Aldo Dórea. **Como preparar orçamento de obras: dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos.** Editora PINI. São Paulo, 2006.

MCLEOD, Rob, MEAD, Kym, STANDEN, Mark. **Passivhaus primer: Designer's guide A guide for the design team and local authorities.** Disponível em

<http://www.passivhaus.org.uk/filelibrary/Primers/KN4430_Passivhaus_Designers_Guide_WEB.pdf>. Acesso em janeiro de 2018.

MEAD, KyM. BRYLEWSKI, Robin. **Passivhaus primer: Introduction An aid to understanding the key principles of the Passivhaus Standard.** Disponível em <http://www.passivhaus.org.uk/filelibrary/Primers/KN4430_Passivhaus_Primer_WEB.pdf>. Acesso em janeiro de 2018.

MINISTÉRIO DAS CIDADES - MINCIDADES. Programa Minha Casa, Minha vida. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/habitacao-cidades/programa-minha-casa-minha-vida-pmcmv>. Acesso em: abril de 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016.** Rio de Janeiro, 2017.

_____. **Plano Nacional de Energia 2030: Projeções.** Brasília, 2007.

OLIVEIRA, Liader S. **Avaliação dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos da NBR 15220-3, para habitações de interesse social, da zona bioclimática 2** (Dissertação de Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

PACHECO, Miguel Teixeira Gomes. **Ventilação Natural e Climatização Artificial: crítica ao modelo superisolado para residências de energia zero em Belém e Curitiba. Florianópolis** (Tese de doutorado), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

PASSIPEDIA. Classic, Plus, Premium: The new Passive House classes and how they can be reached. Disponível em: <https://passipedia.org/certification/passive_house_categories/classic-plus-premium>. Acesso em janeiro de 2018a.

_____. Thermal bridges: the definition of thermal bridges**.** Disponível em: <https://passipedia.org/basics/building_physics_-_basics/thermal_bridges/thermal_bridge_definition>. Acesso em janeiro de 2018c.

_____. The world's first Passive House, Darmstadt-Kranichstein, Germany. Disponível em: <https://passipedia.org/examples/residential_buildings/multi-family_buildings/central_europe/the_world_s_first_passive_house_darmstadt-kranichstein_germany>. Acesso em janeiro de 2018b.

PASSIVE HOUSE INSTITUTE - PHI. Certified Passive House – Certification Criteria For Residential Passive House Buildings. 2013. Disponível em: <http://passiv.de/downloads/03_certification_criteria_residential_en.pdf>. Acesso em janeiro de 2018.

_____. Passive House Planning Package PHPP, Versão 9. 2016.

PASSIVE-ON PROJECT. A Norma Passivhaus Directrizes De Projecto Para Casas Confortáveis De Baixo Consumo Energético, Parte 1. Revisão De Casas Confortáveis De Baixo Consumo Energético. 2007a.

_____. The Passivhaus Standard In European Warm Climates: Design Guidelines For Comfortable Low Energy Homes. Part 3. Comfort, Climate And Passive Strategies. 2007b.

_____. <http://www.eerg.it/passive-on.org/pt/details.php>. Acesso em janeiro de 2018.

PINI. TCPO – Tabela de Composições e Preços para Orçamentos. PINI. Disponível em < http://tcpoweb.pini.com.br/home/home.aspx>. Acesso em outubro de 2017.

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM - PBE EDIFICA. Tabelas de Classificação pelo método de simulação. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/residencial/simulacao>. Acesso em: abril de 2017.

RECEITA FEDERAL, MINISTÉRIO DA FAZENDA. Simulador do Tratamento Tributário e Administrativo das importações. Disponível em: < http://www4.receita.fazenda.gov.br/simulador/>. Acesso em novembro de 2017.

ROJAS, Gabriel; WAGNER, Waldemar; SUSCHEK-BERGER, Jurgen; PFLUGER, Rainer; FEIST, Wolfgang. Applying the passive house concept to a social housing project in Austria – evaluation of the indoor environment based on long-term measurements and user surveys. **Advances in Building Energy Research**, 2015.

SCHNIEDERS, Jürgen; FEIST, Wolfgang; RONGEN, Ludwig. Passive Houses for different climate zones. **Energy and Buildings**, v. 105, 71–87, 2015.

SCHNIEDERS, Jürgen; HERMELINK, Andreas. CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building. **Energy Policy**, v. 34, 151–171, 2006.

TUBELO, Renata C. S.; RODRIGUES, Lucelia T.; GILLOTT, Mark. A Comparative Study of the Brazilian Energy Labelling System and the Passivhaus Standard for Housing. **Buildings**, v. 4, p. 207-221, 2014.

WASSOUF, Micheel. **Da casa passiva à norma *Passivhaus:* a arquitetura passiva em climas quentes.** Editora Gustavo Gili, Barcelona, 2014.

WIKIPÉDIA. Casa Passiva. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Casa_passiva>. Acesso em janeiro de 2018.