

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



Dissertação

**Otimização multiobjetivo na análise de desempenho energético de uma
edificação escolar**

Thalita dos Santos Maciel

Pelotas, 2021

Thalita dos Santos Maciel

**Otimização multiobjetivo na análise de desempenho energético de uma
edificação escolar**

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

M152o Maciel, Thalita dos Santos

Otimização multiobjetivo na análise de desempenho energético de uma edificação escolar / Thalita dos Santos Maciel ; Eduardo Grala da Cunha, orientador. — Pelotas, 2021.

161 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. Eficiência energética. 2. Simulação computacional. 3. Otimização baseada em simulação. 4. Otimização multiobjetivo. I. Cunha, Eduardo Grala da, orient. II. Título.

CDD : 727

Thalita dos Santos Maciel

Otimização multiobjetivo na análise de desempenho energético de uma edificação
escolar

Dissertação aprovada como requisito para 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: 06 de dezembro de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (Orientador)

Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Antônio Cesar Silveira Baptista da Silva

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Aldomar Pedrini

Doutor em Arquitetura pela Universidade de Queensland

Prof. Dr. Maurício Carvalho Ayres Torres

Doutor em Engenharia Civil pela Universitat Politecnica de Catalunya

**Aos meus pais, pelo apoio incondicional
durante toda minha trajetória acadêmica.**

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à minha família. Aos meus pais, Reginaldo e Roselaine, que são os maiores incentivadores que eu poderia ter. Serei eternamente grata pela presença, amor e suporte que recebi durante todos os anos dedicados à minha formação. Essa conquista é nossa!

Ao meu noivo, Alessandro, por me encorajar sempre e não permitir que eu duvidasse da minha força em nenhum dos dias que antecederam o término deste trabalho. Obrigada pelo companheirismo, carinho e, principalmente, pela compreensão em tantos momentos de ausência durante esse período.

À UFPel, à FAUrb e ao PROGRAU, pela oportunidade de crescimento enquanto ser humano e profissional em uma instituição pública e de extrema qualidade.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu querido orientador, Professor Eduardo Grala, pela confiança e conhecimento transmitidos durante este período.

Ao Professor Paulo Afonso Rheingantz, que inicialmente sonhou conosco esse trabalho. Alguém que tanto admiro e que se tornou um grande amigo e incentivador da minha trajetória acadêmica desde a iniciação científica.

A todos colegas do LABCEE e GES3E pela convivência e troca de conhecimentos. Em especial agradeço ao Rodrigo, a Carol, a Luisa e a Thaisa, pela disponibilidade durante a realização deste trabalho e, principalmente, por tornarem essa jornada um pouco mais leve.

As grandes amigas que fiz logo ao ingressar no mestrado e hoje encerram esse ciclo junto comigo, Tanara, Fernanda, Roseana e Ludimila, pelo apoio que muitas vezes foi o principal sustento para os dias mais cansativos.

Aos demais colegas e professores do programa que fizeram parte dessa conquista e, finalmente, a todos àqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

De todo o meu coração, muito obrigada!

***Os computadores são incrivelmente rápidos, precisos e burros.
Os homens são incrivelmente lentos, imprecisos e brilhantes.
Juntos, seus poderes ultrapassam os limites da imaginação.***

Albert Einstein

Resumo

MACIEL, Thalita dos Santos. **Otimização multiobjetivo na análise de desempenho energético de uma edificação escolar**. 2021. 161f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

A demanda global no consumo final de energia elétrica vem crescendo 1% a cada ano e, no Brasil, essa perspectiva não é diferente. Atualmente, o setor da construção civil é um dos que mais consome recursos naturais existentes e as edificações utilizam cerca de 50% da energia que é produzida no país. Nesse cenário, os edifícios podem ser considerados peças-chave para elaboração de estratégias de mitigação de maiores impactos ambientais, sendo que sua eficiência energética pode ser alcançada através de um apropriado projeto arquitetônico. A análise realizada através do método de simulação computacional representa um grande avanço. No entanto, a multidisciplinaridade dos temas vinculados ao projeto de edificações apresenta problemas que necessitam que vários objetivos sejam alcançados ao mesmo tempo, possibilitando a utilização de métodos evolutivos. Este estudo utiliza a ferramenta de otimização multiobjetivo como auxílio à tomada de decisão de parâmetros projetuais para otimização de um edifício escolar com projeto-padrão Proinfância que deve ser adequado ao contexto das ZBs 1, 2 e 3. A escolha do objeto de estudo baseou-se na tendência brasileira de padronização dos projetos de instituições públicas e no potencial de melhoria do desempenho termoenergético apontado pela literatura. A metodologia foi dividida em 4 etapas: revisão de literatura, definição do objeto de estudo, processo de otimização e análise de resultados. A otimização multiobjetivo foi realizada com a associação do *software EnergyPlus* ao algoritmo NSGA-II e foram definidas como funções-objetivo a Intensidade do Uso de Energia elétrica (IUE) para aquecimento e refrigeração. Foram analisadas 5 organizações formais derivadas da solução arquitetônica inicial, onde os parâmetros variados foram a espessura do isolamento térmico das paredes externas, da cobertura e do piso, a absorvância solar das paredes externas e da cobertura e a orientação solar. Ao total, foram realizadas cerca de 750.000 simulações e os resultados indicaram que a utilização de algoritmos evolutivos como ferramentas de otimização contribui de forma relevante na concepção de edificações eficientes. Quando otimizadas, todas as organizações formais apresentaram bons resultados, no entanto, a tipologia padrão otimizada foi a mais eficiente para o contexto analisado, onde o consumo final da edificação representa uma redução de 80% em relação ao consumo inicial do projeto-padrão com as características estipuladas pelo FNDE.

Palavras-chave: Eficiência energética; Simulação computacional; Otimização baseada em simulação; Otimização multiobjetivo.

Abstract

MACIEL, Thalita dos Santos. **Otimização multiobjetivo na análise de desempenho energético de uma edificação escolar**. 2021. 161f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

The global demand in the final consumption of electricity has been growing 1% every year, and in Brazil this perspective is no different. Currently, the construction sector is one of the largest consumers of existing natural resources and buildings use about 50% of the energy produced in the country. In this scenario, buildings can be considered key pieces in the elaboration of strategies to mitigate greater environmental impacts, and their energy efficiency can be achieved through an appropriate architectural design. The analysis performed through the method of computer simulation represents a great advance, however, the multidisciplinary of the themes related to building design presents problems that require several goals to be achieved at the same time, thus enabling the use of evolutionary methods. This study uses the multiobjective optimization tool as an aid to decision-making of design parameters for the optimization of a school building with a Proinfância standard design that must be adequate to the context of ZBs 1, 2 and 3. The choice of the object of study was based on the Brazilian tendency of standardization of public institutions projects and on the potential for improvement of the thermoenergetic performance pointed out by the literature. The methodology was divided into four steps: literature review, definition of the object of study, optimization process and analysis of results. The multiobjective optimization was carried out with the association of EnergyPlus software with the NSGA-II algorithm and the Intensity of Electric Energy Use (IUE) for heating and cooling were defined as objective functions. Five formal set derived from the initial architectural solution were analyzed, where the parameters varied were the thickness of the thermal insulation of the external walls, roof and floor, the solar absorptance of the external walls and roof, and the solar orientation. In total, about 750,000 simulations were performed, and the results indicated that the use of evolutionary algorithms as optimization tools contributes significantly to the design of efficient buildings. When optimized, all formal organizations presented above-average results, and, the optimized standard typology was the most efficient for the context analyzed, where the final consumption of the building represents a reduction of 80% in relation to the initial consumption of the standard project with the characteristics stipulated by the FNDE.

Keywords: Energy efficiency; Computational simulation; Simulation-based optimization; Multi-objective optimization.

Lista de Figuras

Figura 1: Estrutura dos conteúdos abordados na dissertação	28
Figura 2: Etapas da revisão de literatura.....	29
Figura 3: Representação das organizações espaciais propostas por Ching	30
Figura 4: Estrutura básica de um Algoritmo Genético	36
Figura 5: Porcentagem de seleção dos sigmas na distribuição normal dos algoritmos AND e OR	40
Figura 6: Comportamento da Fronteira de Pareto em análises multiobjetivo	42
Figura 7: Processo de Otimização Baseada em Simulação.....	44
Figura 8: Frequência de estudos que utilizam a otimização multiobjetivo na área da construção civil.....	46
Figura 9: Análise dos objetivos recorrentes identificados pela revisão de literatura presente no Apêndice A	48
Figura 10: Ferramentas para o processo de otimização identificadas pela RSL.....	49
Figura 11: Frequência de utilização dos algoritmos evolutivos nos estudos identificados pela RSL.....	51
Figura 12: Fluxograma das etapas do método de pesquisa.....	58
Figura 13: Planta baixa setorizada do projeto-padrão Proinfância tipo 2	59
Figura 14: Representação dos sistemas de vedação da envoltória	61
Figura 15: Composições arquitetônicas desenvolvidas com base no projeto-padrão Proinfância tipo 2.....	63
Figura 16: Modelos tridimensionais desenvolvidos no <i>software SketchUp</i> através do <i>plugin Euclid</i>	65
Figura 17: Código de programação para otimização de uma variável	72
Figura 18: Código de programação para definição das funções objetivo desenvolvido com base nas variáveis de saída do software EnergyPlus	74
Figura 19: Interface de um notebook no JN	75

Figura 20: Representação da orientação geográfica de acordo com o setor pedagógico	78
Figura 21: Representação do conjunto de resultados obtidos através da simulação preliminar para Zona Bioclimática 1	81
Figura 22: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Padrão na Zona Bioclimática 1	82
Figura 23: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Padrão com implantação na Zona Bioclimática 1	83
Figura 24: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Central na Zona Bioclimática 1	84
Figura 25: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Central com implantação na Zona Bioclimática 1	85
Figura 26: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia em Fita na Zona Bioclimática 1	86
Figura 27: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia em Fita com implantação na Zona Bioclimática 1	87
Figura 28: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia L na Zona Bioclimática 1	89
Figura 29: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia L com implantação na Zona Bioclimática 1	90
Figura 30: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Radial na Zona Bioclimática 1	91
Figura 31: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Radial com implantação na Zona Bioclimática 1	92
Figura 32: Representação do conjunto de resultados obtidos através da simulação preliminar para Zona Bioclimática 2	93
Figura 33: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Padrão na Zona Bioclimática 2	94
Figura 34: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Padrão com implantação na Zona Bioclimática 2	96

Figura 35: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Central na Zona Bioclimática 2	97
Figura 36: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Central com implantação na Zona Bioclimática 2.....	98
Figura 37: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia em Fita na Zona Bioclimática 2.....	99
Figura 38: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia em Fita com implantação na Zona Bioclimática 2.....	100
Figura 39: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia L na Zona Bioclimática 2.....	101
Figura 40: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia L com implantação na Zona Bioclimática 2.....	102
Figura 41: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Radial na Zona Bioclimática 2.....	103
Figura 42: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Radial com implantação na Zona Bioclimática 2.....	103
Figura 43: Representação do conjunto de resultados obtidos através da simulação preliminar para Zona Bioclimática 3	105
Figura 44: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Padrão na Zona Bioclimática 3	106
Figura 45: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Padrão com implantação na Zona Bioclimática 3.....	107
Figura 46: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Central na Zona Bioclimática 3	108
Figura 47: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Central com implantação na Zona Bioclimática 3.....	109
Figura 48: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia em Fita na Zona Bioclimática 3.....	110
Figura 49: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia em Fita com implantação na Zona Bioclimática 3.....	110

Figura 50: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia L na Zona Bioclimática 3.....	111
Figura 51: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia L com implantação na Zona Bioclimática 3.....	112
Figura 52: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Radial na Zona Bioclimática 3.....	113
Figura 53: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Radial com implantação na Zona Bioclimática 3.....	114
Figura 54: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de verão na ZB 1	117
Figura 55: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de verão na ZB 2	117
Figura 56: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de inverno na ZB 1	120
Figura 57: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de inverno na ZB 2	121
Figura 58: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de verão na ZB 3.....	123
Figura 59: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de inverno na ZB 3	124
Figura 60: Gráfico de coordenadas paralelas com a combinação das soluções que compõem a Fronteira de Pareto para a ZB1	125
Figura 61: Gráfico de coordenadas paralelas com a combinação das soluções que compõem a Fronteira de Pareto para a ZB2	126
Figura 62: Gráfico de coordenadas paralelas com a combinação das soluções que compõem a Fronteira de Pareto para a ZB3	127
Figura 63: Representação do custo computacional necessário para execução das estratégias de otimização no contexto da Zona Bioclimática 1	130

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características descritivas gerais dos projetos padrão do Proinfância/FNDE	55
Tabela 2: Comparativo das principais características dos Projeto-padrão de EMEIs/FNDE	55
Tabela 3: Agrupamento e setorização dos ambientes da tipologia padrão	62
Tabela 4: Caracterização dos modelos através dos parâmetros numéricos e geométricos.....	64
Tabela 5: Composição das paredes externas, equivalente à parede com tijolos de nove furos de 14 cm x 19 cm x 39 cm, assentados em ½ vez	66
Tabela 6: Composição das paredes internas, equivalente à parede com tijolos de nove furos de 9 cm x 19 cm x 39 cm, assentados em ½ vez.....	66
Tabela 7: Composição do piso	67
Tabela 8: Composição da cobertura	67
Tabela 9: Previsão do número de funcionários pelo número de crianças atendidas.	67
Tabela 10: Dados de ocupação dos setores de permanência prolongada.....	68
Tabela 11: Caracterização das Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3	71
Tabela 12: Variáveis de otimização e seus respectivos intervalos limítrofes	73
Tabela 13: Configuração dos parâmetros de otimização	77
Tabela 14: Descrição das características das melhores soluções obtidas durante o processo de otimização para as ZBs 1, 2 e 3.....	115

Lista de Abreviaturas e siglas

5ª CRE PELOTAS	5ª Coordenadoria Regional de Educação de Pelotas
A	Altura
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Ar-condicionado
AE	Algoritmo evolutivo
AEMO	Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo
Aenv	Área da envoltória
AG	Algoritmo genético
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning</i>
Atot	Área total
BESOS	<i>Building and Energy Systems Optimization and Surrogate-modelling</i>
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CFD	<i>Computacional Fluid Dynamics</i>
CMA-ES	<i>Covariance matrix adaptation evolution strategy</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
CODIN	Coordenação de Desenvolvimento de Infraestrutura
COP	Coeficiente de performance
COVID-19	Coronavírus
CT	Capacidade Térmica
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos
e isol	Espessura do isolante
EMEI	Escola Municipal de Educação Infantil
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPS	Poliestireno expandido

EP	EnergyPlus
Eppy	<i>EnergyPlus Python</i>
FNDE	Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
FF	Fator forma
HDE	<i>Hybrid differential evolution</i>
HIS	Habitação de Interesse Social
IA	Inteligência Artificial
IC	Índice de compacidade
IDA ICE	<i>IDA Indoor Climate and Energy</i>
IDF	<i>Input Data File</i>
IEA	Agência Internacional de Energia
INI-C	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
IUE	Intensidade do Uso de Energia elétrica
JN	<i>Jupyter Notebook</i>
LDB	Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional
MPOG	Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão
NBR	Norma Brasileira
NSGA-II	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
N°	Número
OBS	Otimização Baseada em Simulação
P	Peso
PAF	Percentual de Abertura na Fachada
PDE	Plano de Desenvolvimento da Educação
PIR	Poliisocianurato
PMCMV	Programa “Minha Casa, Minha Vida”
POM	Problema de Otimização Multiobjetivo

PROINFÂNCIA	Programa Nacional de Reestruturação e Aquisição de Equipamentos para a Rede Escolar Pública de Educação Infantil
R	Resistência térmica (m^2/WK)
RSL	Revisão Sistemática de Literatura
RTQ-C	Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
Sc	Superfície corporal
SPEA2	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2</i>
TCU	Tribunal de Contas da União
U	Transmitância térmica [$\text{W}/(\text{m}^2\text{k})$]
VN	Ventilação natural
Vol	Volume
XPS	Poliestireno extrudado
ZB	Zona bioclimática
ZT	Zona térmica

Lista de Símbolos

λ	Condutividade térmica (W/m.K)
ρ	Densidade de massa aparente (kg/m ³)
c	Calor específico (kJ/kg.K)
e	Espessura (m)
α	Absortância à radiação solar

Sumário

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Justificativa.....	25
1.2. Objetivos.....	26
1.2.1. Objetivo geral	26
1.2.2. Objetivos específicos	26
1.3. Estrutura do trabalho	26
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	29
2.1. A complexidade do ato de projetar edificações.....	29
2.2. A técnica de simulação computacional para análise do desempenho dos edifícios.....	33
2.3. O processo de otimização de edifícios	34
2.3.1. Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo.....	37
2.3.2. Fronteira de Pareto.....	41
2.3.3. O método de otimização multiobjetivo	42
2.4. Aplicação da técnica de otimização multiobjetivo como auxílio na tomada de decisões para o projeto de edificações mais eficientes	45
2.4.1. Ferramentas de otimização.....	48
2.4.2. A otimização multiobjetivo no contexto brasileiro.....	51
2.5. A padronização de edifícios escolares e o contexto brasileiro em educação infantil....	53
3. MÉTODO DE PESQUISA.....	57
3.1. Definição do objeto de estudo.....	58
3.2. Pré-processamento.....	64
3.2.1. Caracterização dos modelos para simulação computacional	64
3.2.1.1. Caracterização da envoltória.....	66

3.2.1.2. Configuração dos ganhos internos.....	67
3.2.1.3. Características do sistema de ventilação híbrido	69
3.2.1.4. Caracterização Bioclimática	70
3.2.1.5. Variáveis de otimização	71
3.3. Processamento.....	73
3.3.1. Definição das funções-objetivo.....	73
3.3.2. Delimitação das estratégias de implementação	74
3.3.3. Definição do algoritmo de otimização	76
3.4. Pós-processamento	77
4. ANÁLISE DE RESULTADOS	79
4.1. Zona Bioclimática 1	79
4.1.1. Simulação preliminar.....	79
4.1.2. Simulação evolutiva	81
4.1.2.1. Tipologia Padrão	81
4.1.2.2. Tipologia Central	84
4.1.2.3. Tipologia em Fita.....	86
4.1.2.4. Tipologia L 88	
4.1.2.5. Tipologia Radial.....	90
4.2. Zona Bioclimática 2.....	92
4.2.1. Simulação preliminar.....	92
4.2.2. Simulação evolutiva	94
4.2.2.1. Tipologia Padrão	94
4.2.2.2. Tipologia Central	96
4.2.2.3. Tipologia em Fita.....	98
4.2.2.4. Tipologia L 100	
4.2.2.5. Tipologia Radial.....	102

4.3. Zona Bioclimática 3.....	104
4.3.1. Simulação preliminar.....	104
4.3.2. Simulação evolutiva	105
4.3.2.1. Tipologia Padrão	105
4.3.2.2. Tipologia Central	107
4.3.2.3. Tipologia em Fita.....	109
4.3.2.4. Tipologia L	111
4.3.2.5. Tipologia Radial.....	112
4.4. Análise comparativa do desempenho das tipologias	114
4.5. Análise do desempenho computacional da ferramenta multiobjetivo.....	129
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	130
5.1. Limitações do trabalho	133
5.2. Trabalhos futuros	134
Referências	135
Apêndice A – Protocolo de revisão	150
Apêndice B – Memória de cálculo das principais propriedades da envoltória conforme a metodologia da NBR 15.220-2.....	151
Anexo A – Código de programação utilizado para otimização dos modelos (Interface gráfica <i>Jupyter Notebook</i>).....	157

1. INTRODUÇÃO

Em um âmbito global, as edificações consomem mais de 30% do consumo final de energia e são responsáveis por cerca de 40% das emissões dos gases que provocam o efeito estufa (WBCSD, 2020). De acordo com o Global Status Report – Renewables 2020, essa demanda vem crescendo em torno de 1% a cada ano e, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), aumentará para cerca de 2,1% até o ano de 2024. No Brasil, essa perspectiva não é diferente. Segundo dados do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), o setor da construção civil é um dos que mais consome recursos naturais existentes.

Em 2019, o consumo de energia derivado das edificações correspondeu a cerca de 50% do total da eletricidade produzida no país. Nesse mesmo ano, registrou-se uma progressão de 1,3% desse consumo, sendo os setores, residencial, comercial e público os maiores contribuintes para este aumento (EPE, 2020). Logo, em 2020, o avanço da crise sanitária instalada pela COVID-19 fez com que a demanda energética brasileira regredisse em 1%. Essa redução ocorreu principalmente através dos edifícios caracterizados pelos ramos comerciais e públicos, que tiveram seu funcionamento afetado pelas medidas de contenção impostas pela pandemia. Em contrapartida, no mesmo período, as edificações residenciais e os setores alimentício e agropecuário apresentaram um maior período de ocupação e, conseqüentemente, um aumento em sua demanda, de respectivamente 4%, 12% e 7% (EPE, 2021).

A progressão do consumo de energia é fruto do aumento da utilização de sistemas de climatização artificial pela busca de conforto térmico dos usuários, o que está diretamente relacionado com o baixo desempenho dos edifícios atuais. No contexto das edificações de serviços, a maior parte da energia consumida é utilizada durante a fase de uso (CABEZA et al., 2014; MUSTAPA et al., 2016) e os sistemas de condicionamento artificial geralmente representam mais da metade do seu consumo total (KATS, 2014). Em uma perspectiva projetual, todas as decisões podem exercer grande influência no desempenho térmico e energético de um edifício, o que significa que a melhoria desses parâmetros e um desempenho ambiental satisfatório pode ser alcançado mediante um apropriado projeto arquitetônico (OCHOA; ARAÚJO; SATTLER, 2012; TIAN, 2013; KIRIMTAT et al., 2016; ASCIONE et al., 2019).

A questão energética desempenha um papel fundamental na economia e no desenvolvimento global quanto às mudanças climáticas, ao crescimento populacional e, inclusive, ao esgotamento de fontes fósseis (ASCIONE et al., 2020). Historicamente, o setor da construção civil é responsável por significativos impactos ambientais por consumo e descarte de bens naturais ou manufaturados, degradação e poluição (SAKR; SHERIF; EL-HAGGAR, 2010). Ainda que alguns casos contrariem a responsabilidade ambiental pela ampla ocupação e transformação da paisagem, as edificações podem ser consideradas peças-chave para elaboração de estratégias de mitigação de maiores impactos ambientais. Por esse mesmo motivo, a partir da década de 1970, com a Crise Energética provocada pela interrupção do suprimento de petróleo, passaram a surgir iniciativas voltadas a um âmbito sustentável a longo prazo.

Após esse período, alguns projetistas passaram a repensar o processo projetual como uma nova perspectiva para edifícios que fossem sustentáveis através do reaproveitamento de recursos naturais (GYLLING, 2011). No entanto, o passar dos anos e o avanço da tecnologia estabeleceu uma posição cômoda perante as facilidades de adequação de um edifício ao clima através de sistemas artificiais. Tal atitude fez com que fossem desconsiderados importantes aspectos sobre a caracterização climática para inserção projetual, onde as consequências são observadas atualmente.

Novamente, o momento pede a conscientização sobre o impacto dos edifícios no consumo de energia elétrica e nas emissões indiretas de CO₂. Essa necessidade tem gerado um crescente interesse em projetos que ultrapassem as questões normativas e alcancem a otimização do edifício como um todo (KONIS; GAMAS; KENSEK, 2016). Sobretudo, edificações energeticamente eficientes e adaptadas ao clima de implantação têm um elevado potencial para redução do consumo final de energia e das emissões dos gases responsáveis pelo efeito estufa (UNITED..., 2020), o que torna esse processo indispensável.

Todavia, a discussão sobre o desempenho e a caracterização de uma edificação eficiente, por si só é um desafio. No que diz respeito ao balanço energético de um edifício, sabe-se que algumas variáveis se destacam pela grande influência que podem exercer no desempenho final das construções e, quando comparadas às

demais, aquelas relacionadas com a forma e com o envelope térmico são as mais impactantes (BERLEZE; BRASILEIRO; SILVOSO, 2021).

A envoltória, quando bem projetada, pode reduzir significativamente a demanda do consumo por climatização (BATRA; SINGHAL, 2017), já que as propriedades físicas dos elementos opacos e transparentes são capazes de ajustar as trocas térmicas entre o interior de um edifício e o meio externo em que ele está inserido (YU et al., 2015).

No caso dos elementos opacos, a escolha dos materiais é capaz de interferir substancialmente nas condições finais do edifício. Variáveis como a absorptância solar (GUARDA, et al., 2019), transmitância térmica, capacidade térmica, orientação solar (SARTORI, 2019), o fator solar do vidro (ZHAI et al., 2019) e o percentual de abertura das janelas (GASTINES; CORREA; PATTINI, 2019) são influentes nessa troca e podem afetar os ganhos térmicos das construções.

A organização espacial também é um parâmetro que possui relação direta com o comportamento dos fluxos de ar e da incidência de luz e calor recebidos por um edifício. Segundo Evins (2013), os parâmetros relacionados à geometria são considerados os mais complexos para estudos que investigam o desempenho e a racionalização do uso de energia nas edificações. Isso ocorre pela dificuldade da análise conjunta entre implicações espaciais, estéticas, estruturais e ainda de desempenho.

Além de mais econômicas, a incorporação de requisitos de desempenho, ainda durante a fase de concepção de um projeto, consiste em uma das práticas mais eficientes para elaboração de edificações com menor impacto ambiental. Dada a complexidade de avaliação do conjunto de parâmetros, os últimos anos foram marcados pela vasta utilização de estratégias que visam a melhoria do desempenho das edificações através da parametrização por *softwares* de simulação computacional (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014). Com a inserção do uso do computador, é possível que sejam desenvolvidos modelos que representem sistemas de forma gráfica e em um ambiente computadorizado, simulando o comportamento de edificações reais (ZALUSKI; DANTAS, 2018).

A simulação computacional convencional, quando realizada através de *softwares* como o *EnergyPlus*, pode ser um processo demorado para a avaliação de modelos complexos. Para Pan et al. (2016), ainda que deva ser considerada como um

grande avanço científico, o procedimento pode ser inviável para análise de um maior conjunto de parâmetros, considerando que eles são analisados individualmente. O processo de projeto por si só é caracterizado por ser evolutivo, multidisciplinar, apresentar multicritérios e multissoluções (PAPAMICHAEL, 1991). Essas características também são encontradas nos edifícios.

A otimização das construções consiste em uma ciência complexa, pois envolve muitas variáveis e equações não lineares (LARTIGUE; LASTERNAS; LOFTNESS, 2014). Por essa razão, observa-se atualmente a necessidade da automatização para o formato de busca de projetos eficientes, de forma que a avaliação individual de todas as alternativas existentes não seja necessária (BRE; ROMAN; FACHINOTTI, 2020).

O aperfeiçoamento entre as áreas da arquitetura e computação, tem realizado otimizações baseadas em simulação através da associação de algoritmos a programas de simulação (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014). Nesse processo, surgiu a otimização multiobjetivo, caracterizada pela análise de duas ou mais funções-objetivos conflitantes entre si. Nessa abordagem, busca-se um conjunto de resultados satisfatórios levando em consideração as variáveis definidas para análise (MIETTINEN, 2012), onde, geralmente são utilizados os denominados algoritmos evolutivos.

Os algoritmos evolutivos, ou genéticos, se inserem como ferramentas baseadas nos princípios de Inteligência Artificial (GOUVEIA et al., 2021), e possibilitam o aumento da complexidade dos cenários simulados com a análise de uma ampla gama de combinações entre as variáveis, aproximando os resultados do comportamento real de um edifício.

Considerando a influência que todas as decisões de projeto exercem sobre o potencial de desempenho de uma edificação, os projetos-padrão das Escolas Municipais de Educação Infantil (EMEIs) trazem um problema em relação à adaptação local. Esses projetos foram criados com intuito de atender uma demanda nacional e foram desenvolvidos pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) através de recursos do Programa Nacional de Reestruturação e Aquisição de Equipamentos para a Rede Escolar Pública de Educação Infantil, o Proinfância (BRASIL, 2007). Apesar de serem considerados referência quanto à concepção dos ambientes destinados à educação infantil, desconsideram a diversidade climática e

sociocultural do Brasil, o que pode resultar em problemas socioambientais e termoenergéticos dessas edificações.

Com base nos estudos e na problemática que serão apresentados, essa pesquisa buscou utilizar a otimização multiobjetivo como auxílio à tomada de decisão de parâmetros geométricos e projetuais para a melhoria do desempenho energético de uma edificação. O objeto de estudo consiste justamente em um edifício escolar de educação infantil com projeto-padrão Proinfância tipo 2, considerando sua implantação nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3, representadas, respectivamente, pelas cidades de Curitiba (PR), Santa Maria (RS) e Florianópolis (SC).

1.1. Justificativa

O baixo desempenho observado nas edificações atuais, eleva a complexidade e a responsabilidade do projetista durante o ato de projetar edificações com máxima eficiência energética sem que se comprometa outras prerrogativas inerentes ao projeto. A transformação e o amadurecimento da pesquisa em arquitetura enquanto área do conhecimento, trouxeram ao projetista novas possibilidades e desafios em sua atividade profissional. Embora atualmente existam várias ferramentas para compreensão do comportamento dos edifícios, as mesmas costumam ser subutilizadas ou aplicadas apenas quando a concepção formal já está definida.

O ato de projetar é qualificado por seu caráter multidisciplinar e, a análise da organização formal, juntamente com a avaliação das outras variáveis que compõem um edifício, pode ser realizada através da integração de ferramentas baseadas nos princípios de Inteligência Artificial ainda durante a tomada de decisão inicial de um projeto. Essa estratégia possibilita que o problema a ser solucionado seja verificado concomitante a sua criação, viabilizando a concepção de edificações mais eficientes.

No contexto da construção civil, a utilização da ferramenta multiobjetivo ainda é um assunto muito recente em nosso país. Entre os poucos estudos existentes, a maioria realiza a otimização de modelos hipotéticos ou de edificações residenciais, considerando a menor complexidade de avaliação da ferramenta e dos modelos computacionais. No entanto, no caso das edificações brasileiras, observou-se nos últimos anos uma tendência à padronização dos projetos de instituições públicas, incluindo os edifícios voltados à área da educação, como escolas e creches.

Nesse sentido, unindo a necessidade de avaliação da aplicabilidade dessa estratégia em modelos complexos e reais ao potencial de melhoria apontado pelos trabalhos de Rheingantz (2017), Maciel (2019) e Sartori (2019), um projeto-padrão Proinfância foi definido como objeto de estudo dessa pesquisa. A análise visa demonstrar que a proposta de utilização de ferramentas inteligentes durante o processo de tomada de decisão projetual, considerando aspectos formais e tecnológicos, pode possibilitar a concepção de edificações mais eficientes, considerando para este caso a adaptação ao contexto climático das Zonas Bioclimáticas (ZBs) 1, 2 e 3.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O principal objetivo do utilizar a técnica de otimização multiobjetivo como auxílio à tomada de decisão de parâmetros geométricos e referentes à envoltória para adequação de um edifício escolar com projeto-padrão Proinfância ao contexto climático das ZBs 1, 2 e 3.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Discutir o processo metodológico de otimização multiobjetivo sob o olhar de um projetista não-programador;
2. Identificar as contribuições da inserção da ferramenta nos estágios iniciais de um projeto;
3. Otimizar um projeto-padrão Proinfância tipo 2, definindo sua melhor composição e discutindo os valores de referência das variáveis otimizadas, considerando aspectos formais e tecnológicos, para o contexto climático do sul do Brasil.

1.3. Estrutura do trabalho

O trabalho foi estruturado em 5 capítulos: introdução, revisão de literatura, método, análise de resultados e considerações finais. O primeiro capítulo introduz o que é abordado ao longo do estudo, apresenta a contextualização sobre o tema, a

justificativa para realização da pesquisa, os objetivos gerais e os específicos e, a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo consiste na revisão de literatura, onde são abordados os assuntos relevantes para a fundamentação da pesquisa e justificativa das escolhas metodológicas da dissertação. São discutidos os temas referentes à conceituação e complexidade do processo de projeto, a utilização de ferramentas computacionais para análise e otimização de edifícios e a contextualização da tendência brasileira de padronização dos projetos escolares, embasando a escolha do objeto de estudo.

O terceiro capítulo explana todas as decisões metodológicas tomadas durante o desenvolvimento da pesquisa. Essa etapa apresenta a definição do objeto de estudo, as decisões referentes ao processo de otimização e a definição dos critérios para avaliação das soluções.

O quarto capítulo consiste na discussão dos resultados obtidos através da simulação convencional e do processo de otimização multiobjetivo. Nesse momento também é apresentada uma cartilha de recomendações para implantação de novos projetos no contexto estudado e a análise do desempenho computacional da ferramenta.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais da pesquisa, suas limitações e sugestões para trabalhos futuros. A Figura 1 resume a estrutura do trabalho e permite visualizar previamente os conteúdos abordados no decorrer da dissertação.

Figura 1: Estrutura dos conteúdos abordados na dissertação

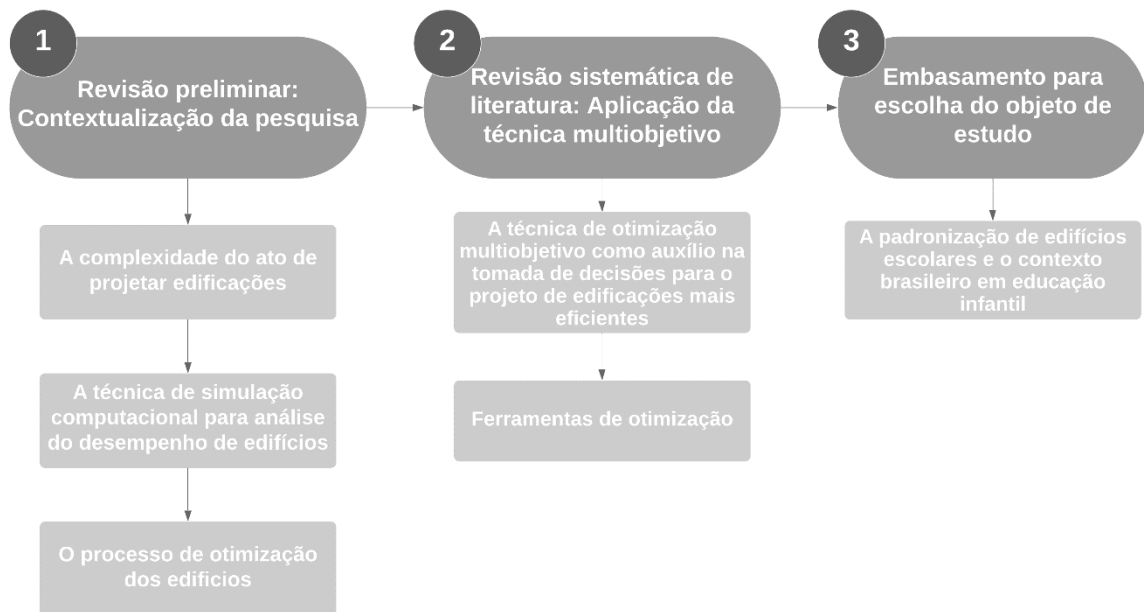
Introdução	<p>Introdução ao tema;</p> <p>Justificativa;</p> <p>Objetivos;</p> <p>Estrutura da dissertação.</p>
Revisão de literatura	<p>A complexidade do ato de projetar edificações;</p> <p>A técnica de simulação computacional para análise do desempenho de edifícios;</p> <p>O processo de otimização de edifícios;</p> <p>Aplicação da técnica de otimização multiobjetivo como auxílio na tomada de decisões para o projeto de edificações mais eficientes;</p> <p>A padronização de edifícios escolares e o contexto brasileiro em Educação Infantil.</p>
Método	<p>Definição do objeto de estudo;</p> <p>Pré-processamento;</p> <p>Processamento;</p> <p>Pós-processamento.</p>
Análise de resultados	<p>Zona Bioclimática 1;</p> <p>Zona Bioclimática 2;</p> <p>Zona Bioclimática 3;</p> <p>Análise comparativa do desempenho das tipologias;</p> <p>Recomendações para implantação de novos projetos-padrão Proinfância tipo 2 para as Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3;</p> <p>Análise de desempenho computacional da ferramenta multiobjetivo.</p>
Considerações finais	<p>Limitações da pesquisa;</p> <p>Trabalhos futuros.</p>
Apêndices	<p>Apêndice A: Protocolo para revisão sistemática;</p> <p>Apêndice B: Memória de cálculo das principais propriedades da envoltória conforme a metodologia da NBR 15.220-2.</p>
Anexos	<p>Anexo A: Código de programação utilizado para otimização dos modelos.</p>

Fonte: Autora (2021).

2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura foi dividida em três estágios, conforme apresenta a Figura 2. A primeira etapa visa a contextualização geral da pesquisa, a segunda relata a aplicação da técnica multiobjetivo no contexto das edificações, através de uma metodologia sistemática de revisão e, a terceira, apresenta um embasamento para escolha do objeto de estudo.

Figura 2: Etapas da revisão de literatura



Fonte: Autora (2021).

2.1. A complexidade do ato de projetar edificações

A fase de concepção de um projeto arquitetônico é caracterizada por uma série de tomadas de decisão do projetista em relação ao seu produto. Para Lawson (2011), o ato de projetar não consiste em uma rota única, não possui um único método a ser utilizado e não deve ser caracterizado como um processo enrijecido. Com o passar dos anos, essa prática deixou sua obviedade e os objetivos bem definidos de lado e aos poucos deu espaço a exigências de alta complexidade, devido às imprecisões de uma sociedade que avança rapidamente.

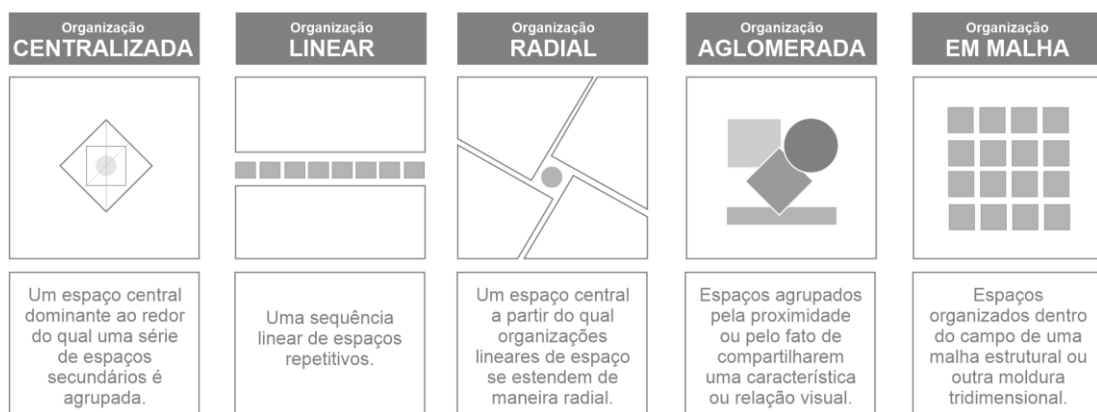
Para Jones (1992), o ato de projetar visa basicamente realizar mudanças nas coisas feitas pelo homem. Na visão de Archer (1965), projetar arquitetura consiste na resolução de um problema para o alcance de um objetivo pré-estipulado e segundo Alexander (1963), esse processo equivale a busca por elementos físicos adequados

para um determinado espaço. São inúmeras as concepções sobre o ato de projetar e todas indicam o mesmo caminho, uma arquitetura que objetiva a busca por soluções. A visão de Francis Ching (2013) resume todos estes apontamentos e enfatiza que, a arte de fazer arquitetura nada mais é que a resposta para as questões que envolvem um conjunto de condições já existentes no espaço a ser projetado.

A arquitetura consiste em algo muito além da questão estética. O projeto não deve abranger apenas questões visuais ou acaba por ignorar a complexidade e interdependência entre todos os parâmetros que compõem o edifício (LIEBITCH, 1994). Projetar não deve visar apenas o atendimento das questões funcionais de um programa de necessidades pré-estipulado, mas sim atender as atividades humanas que serão abrigadas pelo mesmo (BELTRAMIN, 2015).

A forma de uma edificação e a organização dos seus espaços também podem sugerir respostas à determinados problemas e, para Ching (2013), a discussão sobre as organizações espaciais enquanto resposta às exigências de um programa de necessidades é relevante e deve sempre ser considerada. Na obra *Arquitetura: Forma, espaço e ordem* (CHING, 2013) o autor discute a compreensão do fazer arquitetura através da sua teoria. Após conceituar o espaço e a composição e suas relações com a forma, o autor debate sobre as possíveis organizações de uma edificação no processo de projeto. Para ele, a busca pelas relações existentes entre os espaços que compõem um edifício pode ser representada por cinco organizações espaciais: centralizada, linear, radial, aglomerada e em malha, conforme representa a Figura 3.

Figura 3: Representação das organizações espaciais propostas por Ching



Fonte: Adaptado de Ching (2013).

Em resumo, o fazer arquitetura nada mais é que um processo para resolução de um problema originado de várias condicionantes existentes (BELTRAMIN, 2015) e é justamente durante o processo de projeto que os problemas e as soluções surgem concomitantemente, onde tudo que é projetado tem a capacidade de resolver problemas, mas também de criá-los (LAWSON, 2005). Nesse sentido, a interdependência entre as diferentes condições de um projeto está entrelaçada e diretamente relacionada ao desempenho final do edifício (JU; NING; PAN, 2016).

Além da sua relação com os espaços e o programa de necessidades que será abrigado, a forma e a organização espacial também afetam diretamente o desempenho da edificação (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2013; SANTANA; GUIMARÃES; CARLO, 2015). Segundo Evins (2013) os parâmetros relacionados à organização formal e à geometria são considerados os mais complexos em estudos que investigam o desempenho térmico e a racionalização do uso de energia em edificações, devido à dificuldade da sua associação a materiais construtivos com aspectos mensuráveis ligados ao desempenho e ao comportamento não-linear de todas as variáveis que compõem o sistema (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014).

Por esse motivo, nas últimas décadas a concepção de projeto tem recebido atualizações relevantes devido a sua interação com os recursos computacionais (ARANTES, 2012). Os arquitetos e designers tomadores de decisão que até então tendiam a utilizar métodos de projeto passivos, com base em suas experiências subjetivas, atualmente podem utilizar abordagens tecnológicas durante o processo de projeto (LONGO; MONTANA; RIVA SANSEVERINO, 2019).

Na maioria das vezes, essas abordagens são caracterizadas por ferramentas digitais que podem ser grandes aliadas e facilitadoras do processo de decisão, representação e análise projetual dos edifícios (VENÂNCIO; PEDRINI, 2011; CARTANA; PEREIRA; BERTÉ, 2016). No entanto, a utilização dessas ferramentas ainda é pouco usual por projetistas que optam pelos processos tradicionais de projeto (VENÂNCIO; PEDRINI, 2011). O contrário pode ser observado no meio acadêmico, onde o número de estudos que utilizam do computador como auxílio para análise do comportamento de edificações é crescente (DIDONÉ; PEREIRA, 2010; GRANADEIRO et al., 2013).

Na literatura, ainda são observados poucos estudos que consideram a influência da geometria no desempenho geral de um edifício. Almeida (2014) e

Santana (2018) afirmam que a determinação equivocada de parâmetros geométricos durante a fase projetual pode resultar em uma edificação termicamente desconfortável e ineficiente.

Mediante o *software EnergyPlus* (EP), Sorgato (2009) considerou quatro diferentes tipologias e investigou a influência do tamanho dos ambientes e das áreas de superfície expostas no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente. Monteiro (2012) complementou as simulações realizadas no *software Design Builder* com simulações CFD (*Computacional Fluid Dynamics*) para chegar a uma solução de modelo capaz de elevar o desempenho térmico de uma HIS localizada em Macaíba, Rio Grande do Norte, na Zona Bioclimática 8.

Oliveira (2017) utilizou o EP para avaliar a influência das variáveis arquitetônicas no consumo energético de edificações institucionais situadas na UFERSA, Campus de Mossoró, também no Rio Grande do Norte, confirmando a relevância das esquadrias no desempenho do sistema. Da mesma forma, Santesso e Chvatal (2018) analisaram o impacto de parâmetros arquitetônicos no desempenho energético de salas de escritório localizadas na cidade de São Paulo. No estudo, foi possível verificar a importância de associar a forma da sala à área da janela.

A complexa relação dos aspectos geométricos das edificações com o desempenho termoenergético dos edifícios levou estudos recentes a trabalharem com tecnologias computacionais que associam a otimização multiobjetivo à parametrização da forma das edificações. Santana (2016) realizou a otimização multiobjetivo do desempenho energético da geometria de edificações residenciais com base nos requisitos do PBE Edifica. Para isso, utilizou a integração de simulações termoenergéticas e algoritmos genéticos através dos programas *Rhinoceros/Grasshopper* com o *software* EP e o *plugin Archsim*. Utilizando as mesmas ferramentas, Fonseca et al. (2017), associou a otimização multiobjetivo com a técnica de modelagem paramétrica para investigação da solução formal dos ambientes de uma edificação residencial unifamiliar. Neste estudo, foram definidas como funções-objetivo o desempenho térmico e os custos, levando em consideração as restrições estruturais da parametrização da forma.

2.2. A técnica de simulação computacional para análise do desempenho dos edifícios

Dada a complexidade de avaliação das questões projetuais discutidas, os últimos anos foram marcados pela vasta utilização de estratégias que visam a melhoria do desempenho das edificações através da parametrização por programas de simulação computacional (COAKLEY; RAFTERY; KEANE, 2014). Evins (2013), Abdallah (2014) e Nguyen et al. (2014) afirmam que métodos de simulação têm sido aplicados no setor da construção para diversos fins. Estes métodos permitem visualizar, analisar, otimizar e prever o desempenho energético dos edifícios através de modelos matemáticos, estatísticos ou computacionais.

Para análises mais efetivas é importante que a escolha do *software* de simulação seja feita cuidadosamente, já que a fidelidade do modelo com o caso real depende diretamente dessa decisão. Os primeiros programas com essa finalidade surgiram a partir da década de 70, diante da crise do petróleo e do cenário de busca por recursos energéticos nos Estados Unidos. Nessa situação, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) foi responsável pelo lançamento do DOE-2, um dos primeiros programas voltados para simulação dos edifícios que, posteriormente, serviria de base para um dos programas mais precisos da área (WEBER, 2018).

Na década de 90 a preocupação com as limitações das ferramentas existentes, BLAST e DOE-2, levou ao desenvolvimento de um novo programa, o reconhecido *EnergyPlus* (EP). Apesar de estar em desenvolvimento desde o ano de 1997, o programa foi lançado pela primeira vez apenas em 2001. Tinha como público-alvo os projetistas que buscavam o dimensionamento correto de equipamentos de climatização, o desenvolvimento de estudos de *retrofit* para análises de custos de ciclos de vida e a otimização do desempenho energético dos edifícios (DOE, 2021).

Segundo o manual da ferramenta (DOE, 2021), o EP pode ser utilizado para simulação de edifícios com análises voltadas tanto para o desempenho energético quanto para ventilação, iluminação e inclusive para a utilização de água. Além das características que o colocam à frente dos demais programas de simulação termoenergética, o EP foi desenvolvido como uma ferramenta de código aberto, que pode ser utilizada gratuitamente. Sousa (2012) afirma que a ferramenta é uma das mais reconhecidas e utilizadas como instrumento para análise computacional de eficiência energética.

Apesar de fornecer resultados precisos e representar um avanço na área de avaliação do desempenho termoenergético de edificações, o EP não apresenta uma interface de fácil compreensão para os quesitos de otimização, automatização ou parametrização das variáveis que compõem o sistema de um edifício. O procedimento de simulação é realizado de forma manual e pode consumir muito tempo, demandar inúmeros testes e muitas vezes ainda tornar-se impraticável para projetos complexos (PAN et al., 2016).

Em um processo de simulação realizado por este método, as variáveis de decisão são analisadas de forma isolada, o que significa que, para avaliação do efeito de uma característica nos dados de saída pré-estabelecidos, a respectiva variável de decisão é alterada de maneira individual, de forma que todos outros parâmetros que compõem o edifício são mantidos fixos (DELGARM et al., 2016a; SHADRAM; MUKKAVAARA, 2019). Essa técnica pode ser repetida iterativamente com outras variáveis mas não garante resultados ideais por não considerar todo o edifício.

Nas análises de objetivo único, o processo de otimização busca as melhores soluções visando atender apenas um objetivo, independentemente da satisfação dos demais que constituem uma edificação (DELGARM; SAJADI; DELGARM, 2016). Esse procedimento limita tanto o número de medidas estudadas quanto à precisão e à confiabilidade dos resultados, já que também não é capaz de avaliar as milhares de combinações possíveis entre as variáveis de otimização (CARLUCCI et al., 2015; NIEMELÄ; KOSONEN; JOKISALO, 2017).

Por esse motivo, observou-se nos últimos anos a busca pela automatização no formato de busca de projetos eficientes, de modo que a avaliação manual das possíveis alternativas não seja necessária (BRE; ROMAN; FACHINOTTI, 2020). Considerando os avanços recentes na ciência da computação, os métodos baseados em simulação tornaram-se uma alternativa eficaz para melhorar o desempenho das construções.

2.3. O processo de otimização de edifícios

Devido à multiplicidade de fatores que influenciam diretamente no desempenho das edificações, o setor da construção civil tem buscado novas soluções que auxiliem na concepção dos projetos (LINCZUK; BASTOS, 2020). Alcançar alternativas de otimização mais eficientes que atendam a vários critérios conflitantes é uma tarefa

árdua e a avaliação do desempenho energético dos edifícios requer métodos precisos (YIGIT; OZORHON, 2018).

De acordo com a obra publicada por Jared Leigh Cohon, '*Multiobjective Programming and Planning*' (1978), a seleção da técnica de otimização depende de dois principais fatores: o método de aplicação e os parâmetros a serem otimizados. A categorização do tipo de otimização se baseia na incerteza das variáveis de decisão, no número de parâmetros a serem otimizados e no valor das funções objetivo. Quando o valor das funções objetivo pode ser estimado com certeza, a otimização pode ser considerada determinística e, em caso contrário, é categorizada como estocástica.

Alguns anos depois, Goldberg (1989) categorizou os métodos de otimização em três principais tipos: enumerativo, sistemático e estocástico. O Algoritmo Genético (AG) é um dos métodos estocásticos mais eficientes (SHARIF; HAMMAD, 2018) e, segundo Evins (2013), a alguns nos integram cerca de 60% das pesquisas relacionadas à arquitetura.

Os problemas de otimização que possuem apenas um objetivo são considerados mono-objetivo e aqueles com dois ou mais objetivos são chamados de multiobjetivo (COHON, 1978). Nesse caso, para a realização efetiva de uma otimização é primordial que a definição do algoritmo seja adequada para cada tipo de problema, onde seu desempenho é considerado o principal critério de seleção (HAMDY; NGUYEN; HENSEN, 2016). Isso auxilia na eficiência da análise e ainda possibilita que um mesmo problema seja resolvido com menor esforço, permitindo a identificação de um maior número de soluções (ZEMERO, 2019).

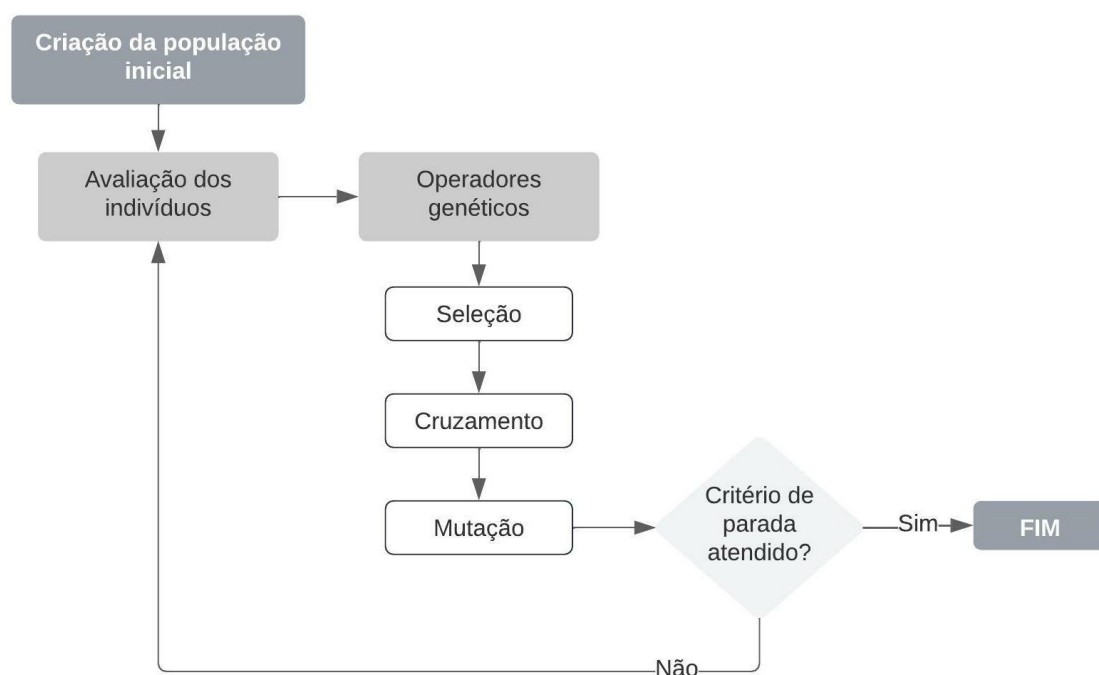
Para Nguyen, Reiter e Rigo (2014) a robustez dos algoritmos estocásticos baseados em população, equivalente aos algoritmos genéticos, evolutivos, híbridos e PSO (*Particle Swarm Optimization*), faz com que eles sejam os mais utilizados na otimização de desempenho. Os reconhecidos AGs pertencem ao grupo dos Algoritmos Evolutivos (AE), diferem dos métodos tradicionais de busca e otimização e são bastante utilizados na área da construção civil.

Esses algoritmos lidam com variáveis contínuas e discretas, possuem boa robustez perante problemas de descontinuidade e determinam as melhores soluções de um processo baseado na evolução por seleção natural (FERDYN-GRYGIEREK; GRYGIEREK, 2017). São considerados como uma ferramenta eficaz para resolução de problemas complexos e multivariados de edifícios (NGUYEN; REITER; RIGO,

2014) e são capazes de identificar todo espaço de busca de um determinado problema (MARTINS, 2014).

Desenvolvidos em 1960 por John Holland (1975), os AGs correspondem a métodos de busca que relacionam os mecanismos de evolução natural das espécies, incluindo suas características genéticas de cruzamento e mutação. Em sua estrutura básica, apresentada na Figura 4, o processo inicia com a criação de um conjunto de indivíduos que geralmente são definidos de forma aleatória e irão formar a população inicial. Logo, o algoritmo realiza o processo de evolução a partir dessa seleção e, posteriormente, atribui um valor de adaptação para cada indivíduo. Este procedimento é denominado aptidão e indica o quanto a solução representada por este indivíduo é boa em relação às demais da população. Os indivíduos mais aptos passam pelo processo de cruzamento e mutação, reproduzindo descendentes que podem somar características de dois indivíduos, alterando seus atributos iniciais.

Figura 4: Estrutura básica de um Algoritmo Genético



Fonte: Adaptado de Linden (2008).

Por simularem a teoria da evolução proposta por Darwin no século XIX e serem baseados nos mecanismos da evolução biológica, incorporam também estes

conceitos aos computadores. Ao criar populações de soluções, as avaliam de acordo com seu desempenho e eliminam da população aquelas que apresentarem os piores resultados (EVINS, 2013). No processo de otimização, essas soluções são denominadas indivíduos, onde os melhores são mantidos para a criação e seleção das próximas gerações (FONSECA et al., 2017).

Borges (2000) definiu os algoritmos genéticos como um conjunto de métodos de Inteligência Artificial (IA). Eles se inserem dentro da Computação Evolucionária, que é justamente uma das áreas da IA (GOUVEIA et al., 2021), e conceitualmente sistematizam e automatizam tarefas intelectuais. Assim como no caso dos AGs, os AEs também surgem como uma vertente da Programação Evolutiva, que foi proposta em 1962 por Fogel (FOGEL, 1962). Estes algoritmos têm sido amplamente utilizados e uma de suas características mais importantes é a investigação de soluções ótimas para um problema complexo sem a necessidade de cálculos custosos (GOLDBERG, 1989).

Com o desenvolvimento dos AEs durante os problemas de otimização multiobjetivo, surgiram os Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo (AEMO). Estes algoritmos trazem a intenção de melhor representar essas análises e buscam maximizar ou minimizar duas ou mais funções-objetivo conflitantes de um determinado problema (COELLO; LAMONT; VAN VELDHUIZEN, 2007). A implementação foi proposta pela primeira vez por Schaffer (1985) em 1985, e novos modelos foram propostos mais tarde por Goldberg (1989) em 1989.

Os AEMOs foram classificados por Deb (2001) em dois tipos: não elitistas e elitistas. No que diz respeito ao desempenho de edificações, destacam-se os elitistas *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) (DEB et al., 2002) e o *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2* (SPEA2) (ZITZLER; LAUMANN; THIELE, 2001).

2.3.1. Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo

A busca por estratégias com rápida convergência de dados ampliou a investigação de métodos que priorizassem o desempenho da curva de convergência ótima em uma quantidade menor de gerações. Entre os algoritmos existentes na literatura para problemas de otimização multiobjetivo, o NSGA-II é o mais popular e destaca-se pela eficiência na otimização de edificações (DEB et al., 2002; EVINS, 2013; ATTIA et al., 2013; ECHENAGUCIA et al., 2015; BRE; FACHINOTTI, 2017).

Baseado em uma ordenação elitista por dominância, este algoritmo utiliza este conceito para avaliação de cada um dos indivíduos de sua população. Não necessita do armazenamento de soluções não dominadas, pois por ser elitista, preserva apenas as melhores soluções de cada população. Neste contexto, em uma população P , com indivíduos p e q , q será dominado por p , se p for melhor que q em, pelo menos, um dos seus objetivos. O método permite que os indivíduos mais aptos sejam classificados a partir da distância de cada um deles até o ponto ótimo. Assim, quanto maior o número de indivíduos dominados por p e menor a sua distância até o ponto ótimo, melhor será a sua classificação.

Proposto por Zitzler, Laumanns e Thiele (2001), o SPEA2 trata-se de uma abordagem evolutiva que, assim como o NSGA II, utiliza duas populações durante sua execução. Uma delas é gerada pelas operações evolutivas (P) e a outra é denominada como população externa (Q), onde constam apenas as soluções não dominadas que foram encontradas pelo algoritmo. Denota-se P_y e Q_y as populações P e Q na geração y .

Para início da análise, suas populações são criadas e então Q é povoada com a população inicial e P é mantida vazia. Posteriormente, todos os indivíduos não dominados pela união de P_y e Q_y são adicionados em Q_{y+1} . Caso o número dessas soluções seja maior que o observado em P ou Q , uma redução entre essas soluções é realizada. O objetivo do algoritmo é de fazer com que seja observada uma convergência rápida em Q , sem considerar possíveis bons resultados em P . Assim, após a execução de algumas gerações, casos interessantes podem ser encontrados a partir da combinação entre os valores de P e bons resultados de Q , passando a integrar o novo conjunto da população Q . Esse procedimento garante que os dados inicialmente não dominados pelo algoritmo sejam revisados, dificultando o descarte de possíveis indivíduos com bons resultados.

Cabe mencionar ainda duas novas abordagens evolutivas multiobjetivo elitistas desenvolvidas e investigadas durante o aperfeiçoamento dessa pesquisa. Baseados na utilização da distribuição normal como uma possível inovação para a área, os algoritmos AND e OR são apresentados e analisados por Balboni et al. (2019), Maciel et al. (2020), Leitzke et al. (2021) e Maciel et al. (2021).

Esses algoritmos foram implementados com base nos algoritmos NSGA-II e SPEA2, visando ao aprimoramento de estratégias elitistas e a redução de custos computacionais para execução. Segundo Maciel et al. (2021), as propostas de recorte

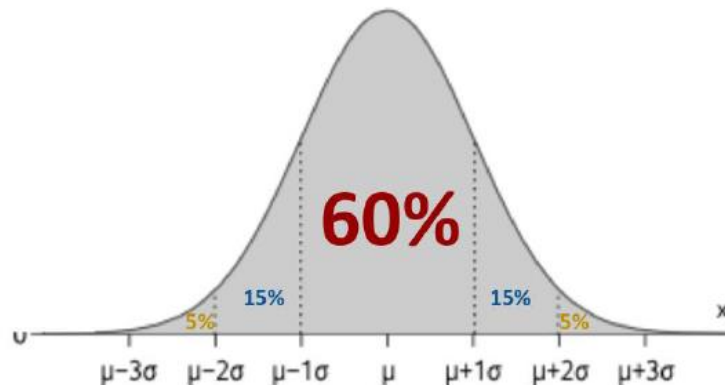
para o afinilamento das condições dessas duas abordagens estão atreladas à justificativa da distribuição normal como recurso estatístico para identificação das condições de maior impacto na configuração das variáveis. Pontos próximos da região central do sino da curva de distribuição indicam uma concentração dos resultados a partir das estratégias de afinilamento. Esse comportamento implica a perpetuação das melhores configurações em função da maior probabilidade destes casos no sorteio de composição dos indivíduos.

Ambas as abordagens podem ser consideradas elitistas na ótica das análises evolutivas e nos dois casos a estrutura inicial é a mesma. A partir da seleção das variáveis e dos seus respectivos limites, um conjunto amostral de dados com tamanho pré-definido pelo usuário é gerado aleatoriamente. Então, cada indivíduo desse conjunto é composto pelos valores sorteados para cada uma das variáveis com base nos limites estabelecidos inicialmente. Os indivíduos são avaliados de acordo com os valores referentes às funções-objetivo escolhidas pelo tomador de decisão.

Em seguida, os indivíduos relacionados com os seus resultados das funções-objetivo compõem a população inicial da análise. Para determinação das gerações seguintes, a abordagem 1 (OR) ou a abordagem 2 (AND) deve ser selecionada. Os dados de ambos os objetivos são obtidos por meio dos relatórios de saída da simulação computacional com o *software* EP, a implementação dos algoritmos é baseada na biblioteca *Eppy (EnergyPlus Python)* (PHILIP; TRAN; TANJUATCO, 2020), e *Python* é utilizada como linguagem de programação.

Para avaliação dos indivíduos aptos, é atribuída uma distribuição normal para cada uma das variáveis, definindo assim um sigma que será utilizado para definição de novos valores limites para as variáveis durante as próximas gerações. Os valores das variáveis que estiverem mais próximos do centro da distribuição normal serão aqueles com maior chance de participarem da definição dos novos limites de valores para os indivíduos das próximas gerações (Figura 5). Assim, além da utilização da Fronteira de Pareto, a curva de distribuição normal ou gaussiana também auxiliará no ajuste de valores de todas as variáveis que possuem características que não sejam constantes.

Figura 5: Porcentagem de seleção dos sigmas na distribuição normal dos algoritmos AND e OR



Fonte: MACIEL et al. (2021).

Na abordagem 1, que corresponde ao algoritmo denominado OR, os indivíduos que fizerem parte dos 50% dos melhores resultados, no eixo X ou no eixo Y do plano cartesiano de representação, são selecionados e então passam a fazer parte da próxima geração. Isso quer dizer que, mesmo que um indivíduo apresente funções-objetivo não satisfatórias para fazer parte do grupo de selecionados em algum dos eixos, ainda pode ser considerado um indivíduo apto se apresentar bons resultados no outro eixo. Nessa abordagem não são descartados potenciais bons resultados por serem pouco representativos em um dos seus objetivos. Se durante a execução um indivíduo apresentar bons valores em apenas um dos eixos, são utilizados operadores de mutação para alteração de algumas das suas características como busca por melhores resultados em suas funções-objetivo.

Na abordagem 2, correspondente ao AND, 50% dos indivíduos da geração que apresentaram os melhores resultados em ambos os objetivos são selecionados. Uma das principais características dessa abordagem é a busca pelo elitismo. Assim, apenas os melhores indivíduos são selecionados. Essa característica influencia diretamente a convergência das gerações, já que em poucas gerações os indivíduos são capazes de convergir para regiões com bons resultados. Contudo, diferente da abordagem OR, essas situações permitem que potenciais bons indivíduos possam ser descartados caso estes não façam parte do grupo ótimo selecionado nas primeiras gerações.

Para as novas gerações, os resultados são agrupados aos das gerações anteriores, realimentando o conjunto inicial de dados. A justificativa para essa

estratégia passa pela contínua utilização da amplitude dos valores que constituem as variáveis. Além disso, ao utilizar os resultados obtidos nas gerações passadas exclui-se a possibilidade de perda dos indivíduos ótimos, já que estes estarão sempre participando do processo evolutivo. Em análises evolutivas com grande explosão combinatória, desconsiderar um determinado indivíduo pode representar a perda dos limites utilizados nas suas variáveis e, sobretudo na abordagem AND, manter uma população concisa e povoada é fundamental para que exista melhora na convergência dos resultados das funções-objetivo.

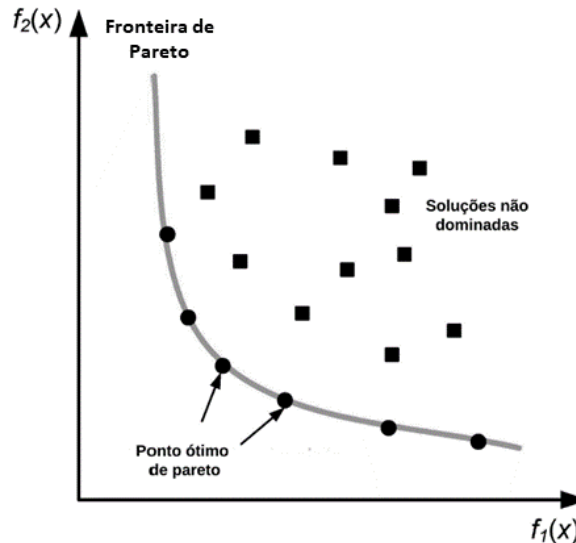
2.3.2. Fronteira de Pareto

Tanto no NSGA-II, quanto no SPEA2, a região com os melhores resultados é estabelecida através da construção de um diagrama elaborado com base em um conceito genérico definido pelo economista Vilfredo Pareto, publicado em sua obra '*Cours D'économie Politique*' (1986). Esse diagrama é conhecido como diagrama de Pareto, onde cada ponto plotado representa uma solução do espaço de soluções viáveis para o problema em questão.

Baseado na intersecção entre as regiões dominadas (conjunto bruto de indivíduos obtidos pelas simulações) e as regiões não dominadas (ainda não alcançadas pelos resultados das simulações), este método busca identificar a região de fronteira entre o que foi obtido até o momento e a região ainda não alcançada, sendo este o conjunto ótimo de soluções entre as funções-objetivo (NGATCHOU; ZAREI; EL-SHARKAWI, 2005).

A Figura 6 exemplifica esse comportamento e apresenta a curva de Pareto em uma análise multiobjetivo. Nessa representação, $f_1(x)$ e $f_2(x)$ correspondem as duas funções-objetivo, a curva em cinza representa a Fronteira de Pareto formada a partir dos pontos ótimos (círculos) e os quadrados representam as soluções não dominadas, sendo estas as que não apresentaram resultados próximos da curva ótima naquela iteração da análise. Em um cenário de minimização, a solução ideal de ambas as funções-objetivo seria aquela que estivesse o mais próximo possível da origem do gráfico (0,0).

Figura 6: Comportamento da Fronteira de Pareto em análises multiobjetivo



Fonte: Adaptado de Huang et al. (2015).

2.3.3. O método de otimização multiobjetivo

Várias linguagens de programação visual fornecem metodologias combinadas entre modelagem, simulação e ferramentas de otimização como auxílio ao processo de tomada de decisão para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos (ASCIONE et al., 2016). A utilização de algoritmos de otimização acoplados a programas de simulação passou a ser denominada como *Simulation-based Optimization*, ou simplesmente Otimização Baseada em Simulação (OBS) (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014).

A OBS passou a ser reconhecida como uma ferramenta altamente precisa para utilização durante o processo de otimização de projetos, incluindo os de alta complexidade (FERRARA et al., 2019). Na grande área da otimização, alguns problemas necessitam que vários objetivos sejam alcançados e não apenas um. No caso das edificações, geralmente esses objetivos são conflitantes entre si e dificilmente é possível que se encontre uma solução ótima para todos os objetivos de modo simultâneo. Essas características fazem parte de um Problema de Otimização Multiobjetivo (POM), que também pode ser chamado de Otimização Multicritério ou Multiatributo (SAMPAIO, 2011).

Para Shi et al. (2016) esse tipo de otimização representa uma ferramenta promissora para o projeto de edificações mais eficientes. Em análises de desempenho, essa abordagem é comumente utilizada devido à infinidade de variáveis

e objetivos que compõem o sistema de um edifício (MACHAIRAS; TSANGRASSOULIS; AXARLI, 2014; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014). Como o próprio nome indica, a otimização multiobjetivo explora sistematicamente várias combinações entre os parâmetros de otimização, alcançando uma ou mais soluções ótimas, para duas ou mais funções objetivo, que devem ser minimizadas ou maximizadas simultaneamente (SAMPAIO, 2011; WU; NG; SKITMORE, 2016).

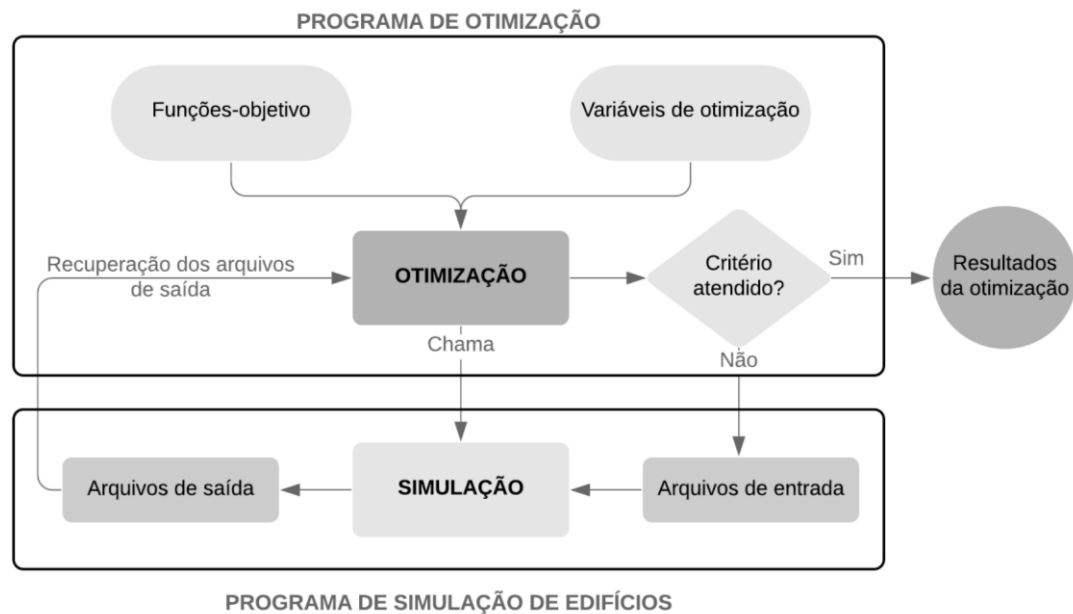
Matematicamente, um problema de multiobjetivo pode ser representado pela Equação 1 (BRE; ROMAN; FACHINOTTI, 2020):

$$\min f_m(x) \quad m = 1, \dots, M; \quad Eq. 1$$

Sendo, f_m um objetivo específico e x o conjunto de variáveis que compõem um edifício. O término de um problema multiobjetivo consiste na resolução entre os objetivos $f_1(x)$, $f_2(x)$, (...), $f_M(x)$, onde o resultado não é caracterizado por uma única solução, mas sim um conjunto de soluções não dominadas, conforme denominado por Pareto.

Para Nguyen, Reiter e Rigo (2014) o processo de otimização pode ser subdividido em três fases: pré-processamento, que consiste na formulação do problema, processo de execução da otimização e pós-processamento, referente à interpretação dos resultados obtidos através da otimização. De forma prática, esse processo acontece em quatro estágios: (i) identificação dos parâmetros de projeto a serem otimizados; (ii) definição dos intervalos limítrofes dos parâmetros de projeto; (iii) execução das simulações através de um programa de simulação; e (iv) seleção dos parâmetros ideais de projeto através de um motor de otimização (CARLUCCI et al., 2015). Essa otimização acontece de forma automatizada, através de um ciclo que envolve a associação de um programa de simulação a um algoritmo de otimização (ATTIA, 2013), onde o objetivo principal é a avaliação dos indivíduos ao longo de suas futuras gerações. A Figura 7 exemplifica esse processo.

Figura 7: Processo de Otimização Baseada em Simulação



Fonte: Adaptado de Nguyen, Reiter e Rigo (2014).

Em grande parte dos problemas práticos, o tamanho e a complexidade dos métodos de avaliação das soluções exigem a intervenção de um tomador de decisão. Na área da eficiência energética, frequentemente são observados pela literatura os métodos clássicos: Método da Soma Ponderada (*WSM-Weighted Sum Method*); Método ε -Restrito (*ε -Constraint Method*); e Método da Distância Ponderada (*Weight Metric Method*) (DEB, 2001). Além destes, existem ainda os meta-heurísticos, que constituem uma estrutura mais genérica e comumente utilizam os algoritmos genéticos durante o processo de otimização. São conhecidos pela resolução de problemas multiobjetivo de otimização combinatória e de otimização não linear com muita flexibilidade (VELDHUIZEN; LAMONT, 2000; ARROYO, 2002).

O desempenho das análises não depende apenas do problema de otimização, mas também das características do processo de otimização que devem ser definidas pelo tomador de decisão. As variáveis de decisão, o tamanho populacional e o número de gerações são parâmetros importantes e que devem levar em consideração o problema a ser solucionado, o comportamento das variáveis que serão otimizadas e a capacidade computacional disponível para execução das soluções (CARLUCCI et al., 2015). A qualidade dos resultados e o tempo de processamento das análises dependem diretamente da configuração inicial destes parâmetros (HAMDY et al., 2016; GOU et al., 2018), o que faz com que diversos estudos investiguem o efeito

dessas condições no conjunto final de resultados (LU et al., 2015; HAMDY; NGUYEN; HENSEN, 2016; ASCIONE et al., 2016).

O tamanho da população e o número máximo de gerações são os parâmetros que exercem maior influência sob os resultados (ASCIONE et al., 2017b). O número de indivíduos para população inicial geralmente é definido com base em avaliações relacionados ao problema específico para cada tipo de otimização (BRE; FACHINOTTI, 2017). Presume-se que o tamanho populacional deva ser de, no mínimo, duas a quatro vezes maior que a quantidade de variáveis que serão analisadas durante o processo de otimização (HAMDY; NGUYEN; HENSEN 2016; CHEN; YANG, 2018). No que diz respeito ao método para definição do número máximo de gerações, a literatura é bastante variada. É comum que esse parâmetro seja investigado através de um teste inicial com diferentes tamanhos de gerações a fim de identificar aquele que garante a melhor compensação entre tempo computacional e precisão dos resultados (ASCIONE et al., 2016).

Para Ferrara et al. (2019), os parâmetros de decisão devem ser considerados como a principal entrada para o processo de otimização, pois caracterizam o problema a ser solucionado. Para os autores, os parâmetros a serem otimizados podem ser classificados em dois grupos, passivos e ativos. Os passivos são aqueles que afetam a redução passiva das necessidades de energia do edifício, onde geralmente são otimizados parâmetros relacionados ao envelope térmico, como o material, a espessura dos componentes dos sistemas e a caracterização de esquadrias. Por outro lado, os parâmetros ativos são aqueles relacionados ao sistema de energia e as fontes renováveis, capazes de afetar diretamente o desempenho energético do edifício do lado da oferta.

2.4. Aplicação da técnica de otimização multiobjetivo como auxílio na tomada de decisões para o projeto de edificações mais eficientes

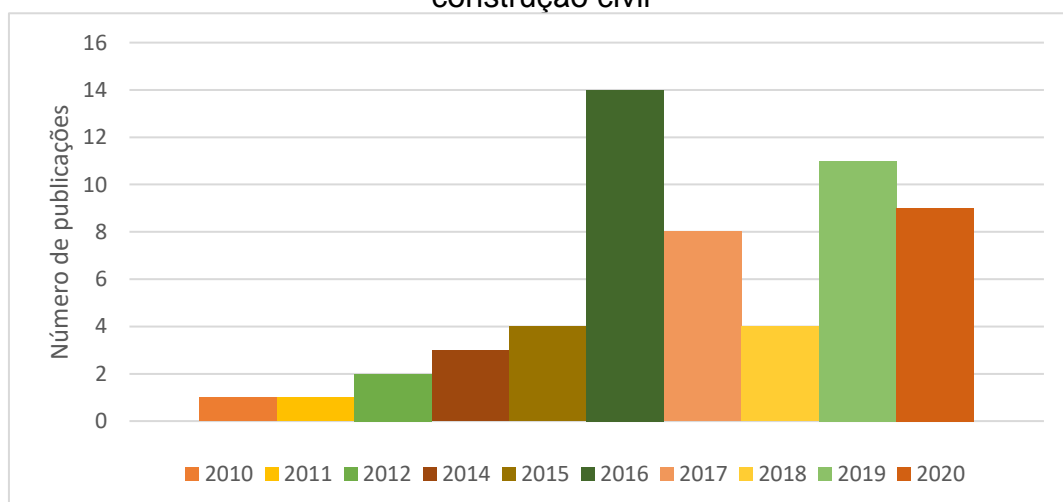
Nessa fase, foi realizada uma revisão sistemática de literatura (RSL), visando identificar o contexto de aplicação das estratégias de otimização multiobjetivo na análise da eficiência de projetos de arquitetura. Inicialmente, a busca pelos estudos foi realizada através de 11 bases de dados, sendo utilizada aquela em que foi identificado o maior número de artigos através da *string* de busca selecionada, que corresponde a base *Science Direct*. Considerando um período de 10 anos, entre 2010

e 2020, foram identificados 168 artigos, sendo 57 selecionados para análise. O protocolo de revisão é apresentado no Apêndice A deste trabalho.

Na área da Arquitetura, estudos que utilizam algoritmos de otimização são relativamente recentes. Nos últimos anos, observou-se um crescimento na busca por melhorias entre as técnicas de otimização já existentes (ECHENAGUCIA et al., 2015; DELGARM et al., 2016a; CALDAS; SANTOS, 2016; GOU et al., 2018; PAPADOPOULOS et al., 2019; WANG et al., 2020). A preocupação por tornar os projetos de edifícios mais eficientes fez com que fossem desenvolvidos diversos métodos de Otimização Baseada em Simulação (OBS), seja para a avaliação do desempenho energético, econômico ou ambiental das construções (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; EINI, et al., 2016; LI; MALKAWI, 2016; WANG; SUN, 2020).

As referências consultadas revelam o aumento do número de estudos na área da otimização energética da construção civil nos últimos 5 anos. A Figura 8 ilustra a frequência em que os trabalhos são observados com o passar dos anos, onde é possível observar o contraste entre o número de estudos observados entre os anos de 2010 e 2014 e aqueles publicados a partir de 2016. Possivelmente isso se deve a maior disponibilidade de ferramentas de otimização e ao recorrente aumento da demanda de energia dos edifícios atuais. A técnica de otimização multiobjetivo também tem sido frequentemente utilizada para abrangência de normas e políticas relacionadas aos custos energéticos, onde o desenvolvimento de interfaces gráficas de programação mais eficientes e intuitivas também são responsáveis por este progresso.

Figura 8: Frequência de estudos que utilizam a otimização multiobjetivo na área da construção civil



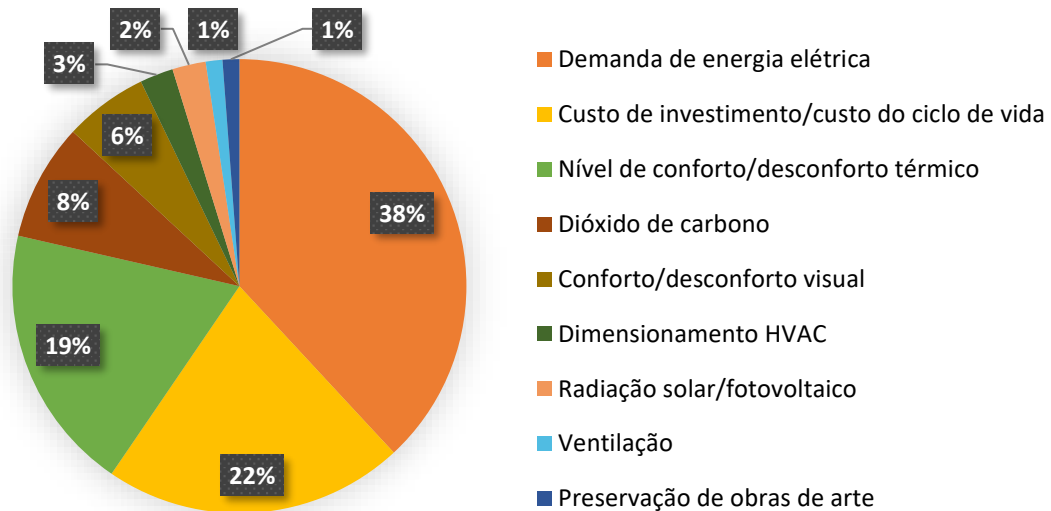
Fonte: Autora (2021).

Com o desenvolvimento destes métodos, os estudos de otimização observados na literatura passaram a aprimorar a aplicação de novos parâmetros como estratégias de otimização e, atualmente, é notório o uso de funções objetivo relacionadas à eficiência e o consumo de energia (DELGARM; SAJADI; DELGARM, 2016; DELGARM et al., 2016b; SHADRAM; MUKKAVAAR, 2018; SHARIF; HAMMAD, 2018; SCHITO et al., 2020), ao aumento do nível de conforto térmico dos ocupantes (HAMDY; HASAN; SIREN, 2011a; CARLUCCI et al., 2015; CHEN; YANG; SUN, 2016; GOU et al., 2018; JAVANROODI; NIK; MAHDAVINEJAD, 2019) e ao conforto visual (KONIS; GAMAS; KENSEK, 2016; KIRIMTAT et al., 2019; NADERI et al., 2020).

A redução do custo de investimento total para construção e a operação dos edifícios (HAMDY; NGUYEN; HENSEN, 2016; ASCIONE et al., 2016; NIEMELÄ; KOSONEN; JOKISALO, 2017; SHARIF; HAMMAD, 2019), a ventilação e o ajuste de HVAC (CHEN; YANG; SUN, 2016; SCHITO et al., 2020; LEGORBURU; SMITH, 2020) e ainda a minimização das emissões de Dióxido de Carbono (CO₂) (HAMDY; HASAN; SIREN, 2011b; PAL et al., 2017; JAVID et al., 2019) também são comumente observadas.

Um dos primeiros pontos observados é que, grande parte dos estudos relatados tem a minimização do consumo de energia elétrica como principal objetivo (Figura 9). A redução da demanda elétrica das edificações é uma parte crucial da resposta global às recorrentes mudanças climáticas e, por esse motivo, a ferramenta tem sido cada vez mais utilizada para resolução deste problema (BROWNLEE; WRIGHT, 2015). Shadram e Mukkavaar (2019) afirmam que a literatura tende a concentrar o processo de otimização para resolução de objetivos que façam parte da fase operacional dos edifícios devido a esta representar o maior período do ciclo de vida de uma edificação. Para Wang et al. (2020), a combinação de vários parâmetros passivos de construção exerce um efeito perceptível no consumo de energia de um edifício, o que faz com que o tema seja amplamente abordado.

Figura 9: Análise dos objetivos recorrentes identificados pela revisão de literatura presente no Apêndice A



Fonte: Autora (2021).

Esses objetivos costumam ser avaliados em diferentes estágios do processo de projeto e geralmente são alcançados através da otimização de parâmetros como a geometria do envelope de construção (ZHANG; ZHANG; WNAG, 2016; KONIS; GAMAS; KENSEK, 2016; YANG et al., 2018), os tipos de materiais (ASADI et al., 2012, KARMELOS; KIPRAKIS; MAVROTAS, 2015; BROWNLEE; WRIGHT, 2015), a espessura de um isolamento (ASCIONE et al., 2015; WU; NG; SKITMORE, 2016; WANG et al., 2020), as características de esquadrias (ECHENAGUCIA et al., 2015; BRE et al., 2016; KIRIMTAT et al., 2019), ou ainda os elementos de sombreamento (KHOROSHILTSEVA; SLANZI; POLI, 2016; BRE; FACHINOTTI, 2017; NADERI et al., 2020). Ainda foi observada a otimização de parâmetros relacionados ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos (LU et al., 2015; ASCIONE et al., 2017a; CHEN et al., 2019) e ao *setpoint* de temperatura para operação dos sistemas de climatização (HAMDY; HASAN; SIREN, 2011a; SALIMI; HAMMAD, 2020).

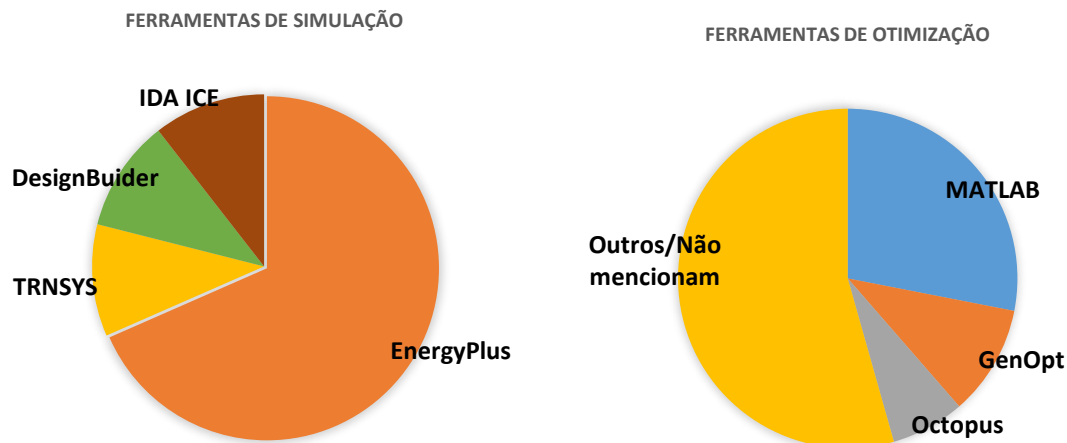
2.4.1. Ferramentas de otimização

Entre os estudos analisados, o *software* mais popular para avaliação do comportamento térmico e energético dos edifícios é o EnergyPlus (EP), o que condiz com o que é observado na literatura em geral. *Softwares* como o IDA ICE (*IDA Indoor Climate and Energy*), TRNSYS e *DesignBuilder* costumam ser utilizados com o

mesmo objetivo e, neste caso, foram ponderados em um menor número de referências, conforme apresenta a Figura 10.

Os métodos de otimização identificados destacam o uso do MATLAB, GenOpt e Octopus como ferramentas de otimização, pois são capazes de lidar com os dados de entrada e saída dos *softwares* de simulação e seu acoplamento permite que sejam executados grandes conjuntos de simulações.

Figura 10: Ferramentas para o processo de otimização identificadas pela RSL



Fonte: Autora (2021).

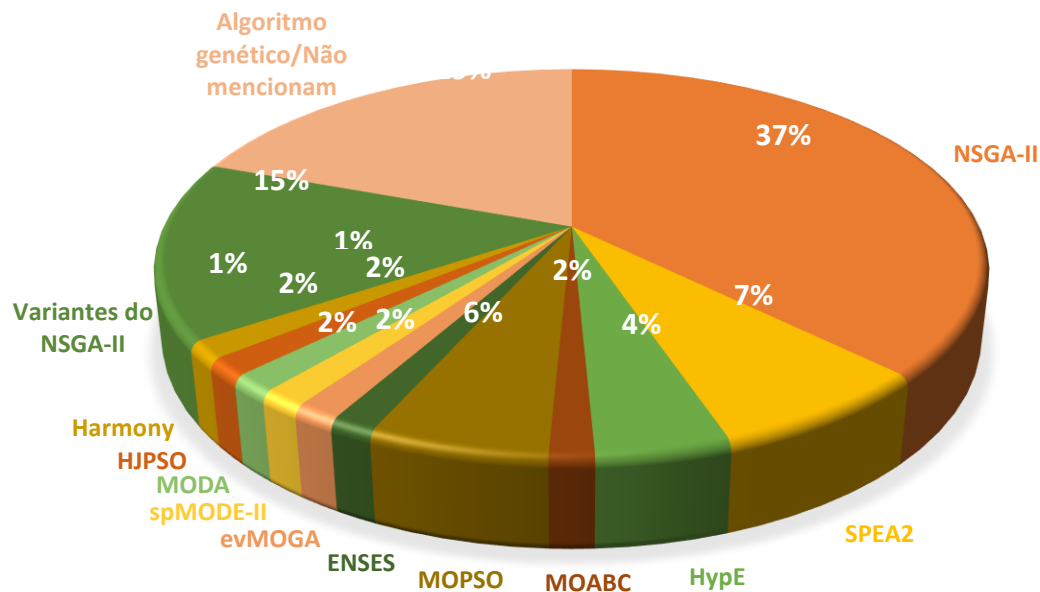
Ainda foram observados estudos paramétricos com a utilização de ferramentas específicas para esse fim, como *jEplus* e *Rhinoceros*. Esses softwares geralmente são utilizados para o estudo detalhado da geometria e são acoplados às ferramentas *Grasshopper*, *Honeybee*, *LadyBug*, *Daysim* e *Archsim*. A título de exemplo, Zhang, Zhang e Wang (2016) otimizaram a geometria de um edifício em Shenyang, na China, através da modelagem paramétrica realizada pelos *softwares* *Rhinoceros* e *Grasshopper*. O edifício foi avaliado visando o alcance de três objetivos: a maximização do ganho de radiação solar, a maximização da eficiência espacial e a minimização do coeficiente da forma. Os três objetivos são alcançados e o ganho total de radiação solar é otimizado em até 50% quando comparado ao edifício utilizado como referência. O mesmo acontece para os demais objetivos, que apresentam uma grande porcentagem de otimização. De acordo com os autores, o método proposto pode auxiliar o estudo de projetos arquitetônicos reais, resolvendo problemas práticos através da otimização.

Yang et al. (2018) propuseram uma nova abordagem para exploração do design computacional e visam facilitar o processo de projeto através de uma plataforma computacional aprimorada, o *modeFRONTIER*. O estudo combina o uso dessa plataforma com as ferramentas *Rhinoceros* e *Grasshopper*. Buscando uma análise de desempenho mais completa, os autores ainda realizam simulações anuais da luz do dia e do consumo de energia através do *Daysim* e do *EnergyPlus*, via *Ladybug* e *Honeybee*, que realizam a conexão das geometrias com as ferramentas de simulação. O método proposto foi aplicado ao projeto de um edifício esportivo e as variáveis de otimização correspondem à geometria da arquibancada, ao envelope do edifício, ao sombreamento externo e à estrutura do telhado.

Em outro estudo, Naderi et al. (2020) realizaram uma otimização multiobjetivo através da implementação de estratégias de controle para dispositivos de sombreamento de janelas. As simulações foram realizadas através do *EnergyPlus*, os parâmetros de otimização foram analisados através do *jEPlus* e a otimização foi realizada pela ferramenta *jEPlus+EA*. A metodologia foi empregada em uma sala de escritório localizada em um edifício implantado em 6 regiões climáticas do Irã. A minimização do consumo total de energia, da porcentagem prevista de insatisfeitos e do índice de ofuscamento são considerados como objetivos a serem otimizados simultaneamente. Os resultados obtidos indicam uma redução de cerca de 48% no consumo anual de energia e, respectivamente, 70% e 56% de redução dos índices de ofuscamento e porcentagem prevista de insatisfeitos. Estes resultados foram alcançados por intermédio do algoritmo NSGA-II.

No que diz respeito às abordagens de otimização existentes, atualmente o algoritmo evolutivo *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*, ou simplesmente NSGA-II, é o mais utilizado. Em geral, a literatura considera esse algoritmo como o mais eficiente, o que foi enfatizado através da revisão realizada, no qual o mesmo foi utilizado por cerca de 52% das referências consultadas (Figura 11).

Figura 11: Frequência de utilização dos algoritmos evolutivos nos estudos identificados pela RSL



Fonte: Autora (2021).

2.4.2. A otimização multiobjetivo no contexto brasileiro

No Brasil, a utilização de algoritmos de otimização na análise da eficiência termoenergética das edificações é um assunto ainda mais recente. Entre os poucos estudos existentes, Santana (2016) realizou a otimização multiobjetivo da geometria de edificações residenciais por intermédio de algoritmos genéticos e dos *softwares* *EnergyPlus*, *Rhinoceros*, *Grasshopper* e *plugin Archsim*. Em seu estudo, a autora destaca a importância da utilização destas ferramentas e a necessidade de reparar a carência de referências brasileiras quanto a essas técnicas, considerando principalmente a importância do condicionamento natural no parque edificado nacional, pouco discutido internacionalmente.

Em seguida, Fonseca et al. (2017) utilizou o mesmo método para investigação da relação entre o desempenho térmico e o custo final de construção de uma edificação residencial unifamiliar com implantação na cidade de Viçosa, em Minas Gerais. Os autores identificaram um grande potencial na aplicação do método multiobjetivo durante a concepção de projetos arquitetônicos.

Através da associação do *software* *EnergyPlus* com um algoritmo híbrido desenvolvido com base nos algoritmos CMA-ES (*Covariance matrix adaptation evolution strategy*) e HDE (*Hybrid differential evolution*), Dalbem (2018) realizou uma

otimização multiobjetivo a fim de melhorar o desempenho de uma Habitação de Interesse Social (HIS) a ser implantada nas Zonas Bioclimáticas 1,2 e 3, atendendo à NBR 15.575 e ao conceito *Passive House*. Diferentes soluções de envelope foram utilizadas como parâmetros de otimização e a minimização do consumo de energia para aquecimento e o índice de graus-hora para resfriamento foram utilizados como funções objetivo.

Mais tarde, Linczuk (2020) realizou a otimização multiobjetivo do projeto de edificações residenciais para obtenção de baixo consumo energético na região Sul do Brasil. Para o estudo utilizou o *software EnergyPlus* em conjunto com as ferramentas de parametrização *jEPlus* e otimização *jEPlus+EA*, considerando a aplicação do algoritmo NSGA-II. Seu estudo possibilitou a identificação de variáveis para serem aplicadas ainda durante a fase de concepção do projeto arquitetônico para obtenção de edificações com melhor desempenho, menor consumo energético e também menor custo adicional.

No mesmo ano, Berleze, Brasileiro e Silvosso (2020) realizaram a otimização multiobjetivo de uma habitação social do Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV), implantada na cidade de Chapecó/SC, Zona Bioclimática 3. Os autores visavam a investigação dos parâmetros de concepção relacionados à geometria da edificação, com o intuito de possibilitar um melhor desempenho térmico para os ocupantes. Para execução do processo de otimização utilizaram as ferramentas *Rhinoceros* e para parametrização do modelo, *Grasshopper* e *EnergyPlus*. O *plugin Archsim* foi utilizado para acoplar a ferramenta de simulação ao *Grasshopper*. Os indicadores de graus-horas para refrigeração e aquecimento foram considerados como funções objetivo. Os resultados indicaram uma melhoria expressiva, de cerca de 98% para os períodos quentes e 49% para os períodos frios.

Recentemente, Maciel et al. (2021) discutiram o desempenho de quatro algoritmos multiobjetivo no processo de otimização termoenergética de uma edificação escolar. Para realização do trabalho, os autores utilizaram o *software EnergyPlus* e os algoritmos evolutivos NSGA-II, SPEA2, AND e OR. Neste caso, os resultados demonstraram que a utilização de algoritmos evolutivos contribui na identificação de soluções compositivas capazes de auxiliar na redução da intensidade do uso de energia elétrica de edificações. Todos os algoritmos possibilitaram a minimização das funções objetivo definidas inicialmente e o algoritmo SPEA2 foi o que obteve o melhor desempenho computacional.

2.5. A padronização de edifícios escolares e o contexto brasileiro em educação infantil

A lacuna entre a abordagem dos educadores e a concepção arquitetônica das escolas-padrão de Educação Infantil é comumente discutida na área científica (RHEINGANTZ, 2016; MODLER, 2018). Contudo, nota-se nos últimos anos um crescimento no número de trabalhos que também estudam os impactos da concepção e padronização no desempenho ambiental desses edifícios, considerando diversas zonas bioclimáticas (RHEINGANTZ et al., 2017; MODLER et al., 2018; MACIEL et al., 2019; SARTORI, 2019; LOPES, 2020).

No setor público, a padronização de edificações é frequentemente utilizada com o intuito de racionalizar os custos de construção e tornar o processo mais ágil, já que um único projeto costuma ser implantado em série, sem adaptações, em diferentes contextos climáticos. Segundo Kowaltowski (2011), instituições públicas como escolas e creches, frequentemente adotam um projeto padrão. No caso do Brasil, destacam-se os projetos resultantes do Programa Nacional de Reestruturação e Aquisição de Equipamentos para a Rede Escolar Pública de Educação Infantil, o Proinfância.

Para situar o contexto de implantação do programa, é necessário que sejam pontuados alguns momentos históricos que fazem parte da trajetória da educação infantil brasileira. Após o ano de 1988, com a promulgação da Constituição Federal do Brasil (BRASIL, 1988), a educação infantil para crianças de 0 a 5 anos passou a ser um direito da criança e um dever do Estado (Art. 208). No decorrer dos anos, diferentes leis e documentos de referência foram publicados, porém, foi em 1996 que a educação infantil foi incluída na educação básica, obrigatória e gratuita. A criação da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB) nº 9.394/96 (BRASIL 1996) definiu a partir desse ano a educação escolar em todos os níveis e descaracterizou o que antes era visto apenas como caridade.

Após um longo período marcado por poucos investimentos, com creches construídas ou adaptadas em prédios existentes com recursos comunitários, o Proinfância foi criado pelo Governo Federal em 2007, como parte do Plano de Desenvolvimento da Educação (PDE) do Ministério da Educação. Com o objetivo de proporcionar a melhoria da infraestrutura da rede física escolar de Educação Infantil (BRASIL, 2007), o Fundo Nacional para o Desenvolvimento da Educação (FNDE)

ficou responsável pela coordenação do programa e elaboração dos projetos-padrão de arquitetura e complementares, bem como o gerenciamento do processo de financiamento de obras e de aquisição de mobiliário e equipamentos.

Para atender a demanda dos municípios, inicialmente o FNDE desenvolveu dois projetos-padrão: o Proinfância Tipo B (2007), com capacidade de atendimento de até 224 crianças em dois turnos ou 112 em período integral e o Proinfância Tipo C (2009), desenvolvido com capacidade para atendimento de até 120 crianças em dois turnos ou 60 em período integral. Com o crescimento da infraestrutura educacional, uma auditoria operacional do Tribunal de Contas da União (TCU) realizada em 2012 apontou inadequações do projeto arquitetônico a diversas regiões de implantação (BRASIL, 2012). Então, com a necessidade de revisão destas tipologias, no mesmo ano, foi criada a Coordenação de Desenvolvimento de Infraestrutura (CODIN).

A CODIN possuía duas principais missões: (1) revisar as reconhecidas inconsistências dos projetos e os manuais técnicos disponibilizados pelo programa e (2) desenvolver novos projetos que atendessem à crescente demanda na área. Devido a ausência de normas de desempenho específicas para habitações escolares, os manuais de orientações técnicas desenvolvidos utilizam alguns critérios da NBR 15.575 (ABNT, 2013) como referência de desempenho térmico. Então, em 2014 a Instrução Normativa nº 2/2014 do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPOG) determinou que todos os projetos de novos edifícios públicos federais deveriam obter a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) Geral de Projeto classe 'A' (RHEINGANTZ, 2016).

Perante a dificuldade de adaptação dos projetos-padrão existentes às novas demandas de desempenho, em 2015 a CODIN desenvolveu dois projetos para substituição das tipologias B e C: o Proinfância Tipo 1, com capacidade de atendimento de até 376 crianças em dois turnos ou 188 em período integral, e o Proinfância Tipo 2, que atende até 192 crianças em dois turnos ou 96 crianças em período integral.

O programa de necessidades das novas tipologias é similar ao utilizado para concepção dos projetos descontinuados. As edificações permanecem térreas, devem ser implantadas em terrenos com declividade máxima de 3% e a capacidade de atendimento e a taxa de ocupação apresentam maiores índices para os novos projetos. Segundo Rheingantz (2016), para a CODIN/FNDE as principais vantagens

das tipologias propostas são as características de desempenho termoenergético. A Tabela 1 apresenta algumas características descritivas das tipologias quanto as dimensões mínimas do lote, área construída, taxas de ocupação, coeficiente de aproveitamento e capacidade de acolhimento e as principais adequações realizadas nos projetos Tipo 1 e 2 são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1: Características descritivas gerais dos projetos padrão do Proinfância/FNDE

Características	Tipo B	Tipo C	Tipo 1	Tipo 2
Dimensões mínimas dos lotes (m)	40x70	35x45	40x60	35x45
Área construída (m²)	991,05	668,30	1.311,90	774,0
Área ocupada (m²)	1.323,58	781,26	1.510,23	890,73
Taxa de ocupação	47%	49,6%	62,92%	56,55%
Coeficiente de aproveitamento	0,35	0,42	0,55	0,49
Número de alunos (turno integral)	112	60	188	94
Localização	Urbana	Urbana/Rural	Urbana	Urbana/Rural

Fonte: Adaptado de FNDE¹ (2021).

Tabela 2: Comparativo das principais características dos Projeto-padrão de EMEIs/FNDE

Principais características	Projeto-padrão das tipologias descontinuadas		Projeto-padrão das novas tipologias	
	B	C	1	2
Conforto térmico	Conforme Laudo do Laboratório de Conforto Ambiental de UnB não atendia a algumas regiões bioclimáticas.		Adequado para receber a etiquetagem A.	
Renovação de ar nas salas de aula	Grande parte dos ambientes não atendiam a NBR 15.575.		Adequado para a NBR 15.575.	
Materiais de construção	Alvenaria de blocos cerâmicos, estrutura em concreto armado, forro em laje, cobertura em telhas cerâmicas.		Alvenaria de blocos cerâmicos, estrutura metálica e em concreto armado, cobertura com telhas com isolamento térmico e forro acústico: ganho no isolamento térmico e acústico e na rapidez da construção.	
Cronograma de construção	9 a 12 meses.		Prazo 20% inferior aos 12 meses.	
Racionalização da construção	Volumetria variada entre os blocos que compõem o conjunto, exigindo soluções de engenharia complexas e nem sempre econômicas e funcionais.		Volumetria simples que permite facilidade na execução.	
Soluções arquitetônicas	Espaços superdimensionados (vestiários e sanitários de serviço) e refeitório exposto às intempéries.		Racionalização dos fluxos, setorização dos espaços, otimização dos ambientes e refeitório protegido de intempéries.	
Acessibilidade	Não atendia integralmente a NBR 9050.		Adequado ao atendimento da NBR 9050.	

Fonte: Adaptado de CODIN/FNDE (apud RHEINGANTZ, 2016).

¹Desenvolvida a partir de informações contidas em <http://www.fnde.gov.br/programas/proinfancia>. Acesso em: 10 nov. 2020.

Considerando a discussão apresentada sobre a influência que as decisões de projeto exercem sobre o potencial de desempenho de uma edificação, os projetos-padrão das Escolas Municipais de Educação Infantil (EMEI) trazem um problema em relação à adaptação local. Apesar de serem considerados referência quanto à concepção dos ambientes destinados à educação infantil, na maioria das vezes em que falamos em padronização, a mesma não é pensada de modo a adaptar-se a contextos climáticos diversificados. Esses projetos desconsideram a diversidade climática e sociocultural do Brasil e geralmente resultam em problemas no desempenho socioambiental e termoenergético dessas edificações.

No contexto das edificações escolares, é importante que as condições de conforto térmico sejam adequadas às sensações dos pequenos usuários, já que o processo de aprendizagem e desenvolvimento das crianças pode ser significativamente afetado por um ambiente de má qualidade (KOWALTOWSKI, 2011; RHEINGANTZ, 2016; VILCEKOVA et al., 2017; JIANG et al., 2018). Um ambiente desconfortável também é responsável por elevados índices de consumo de energia pelo uso de sistemas artificiais de condicionamento, o que torna indispensável a adaptação dos mesmos aos contextos climáticos inseridos.

No âmbito da pesquisa nacional, diversos autores avaliam e investigam o potencial de melhoria do desempenho termoenergético dos projetos-padrão Proinfância para o contexto de diferentes zonas bioclimáticas. Rheingantz et al. (2017) avaliaram um projeto padrão Proinfância com tipologia C implantado na cidade de Pelotas/RS. Além das questões sociais levantadas, o estudo pontuou os baixos níveis de conforto térmico identificados pela simulação computacional, evidenciando a necessidade de revisão dos projetos arquitetônicos padronizados e a importância de adaptação de um projeto ao contexto climático de implantação.

Sartori (2019) avaliou o impacto da orientação solar de um projeto padrão Proinfância Tipo 2 no desempenho térmico da edificação no contexto das 8 zonas bioclimáticas brasileiras. Além disso, também pontuou questões importantes e pouco discutidas no meio acadêmico, como a necessidade do desenvolvimento de normativas específicas para edificações escolares, já que atualmente as existentes englobam outros tipos de edificações. O estudo identificou que a influência da orientação solar no desempenho do edifício variou em cada zona bioclimática e que

existe a necessidade de um maior número de adaptações para o melhoramento efetivo do projeto.

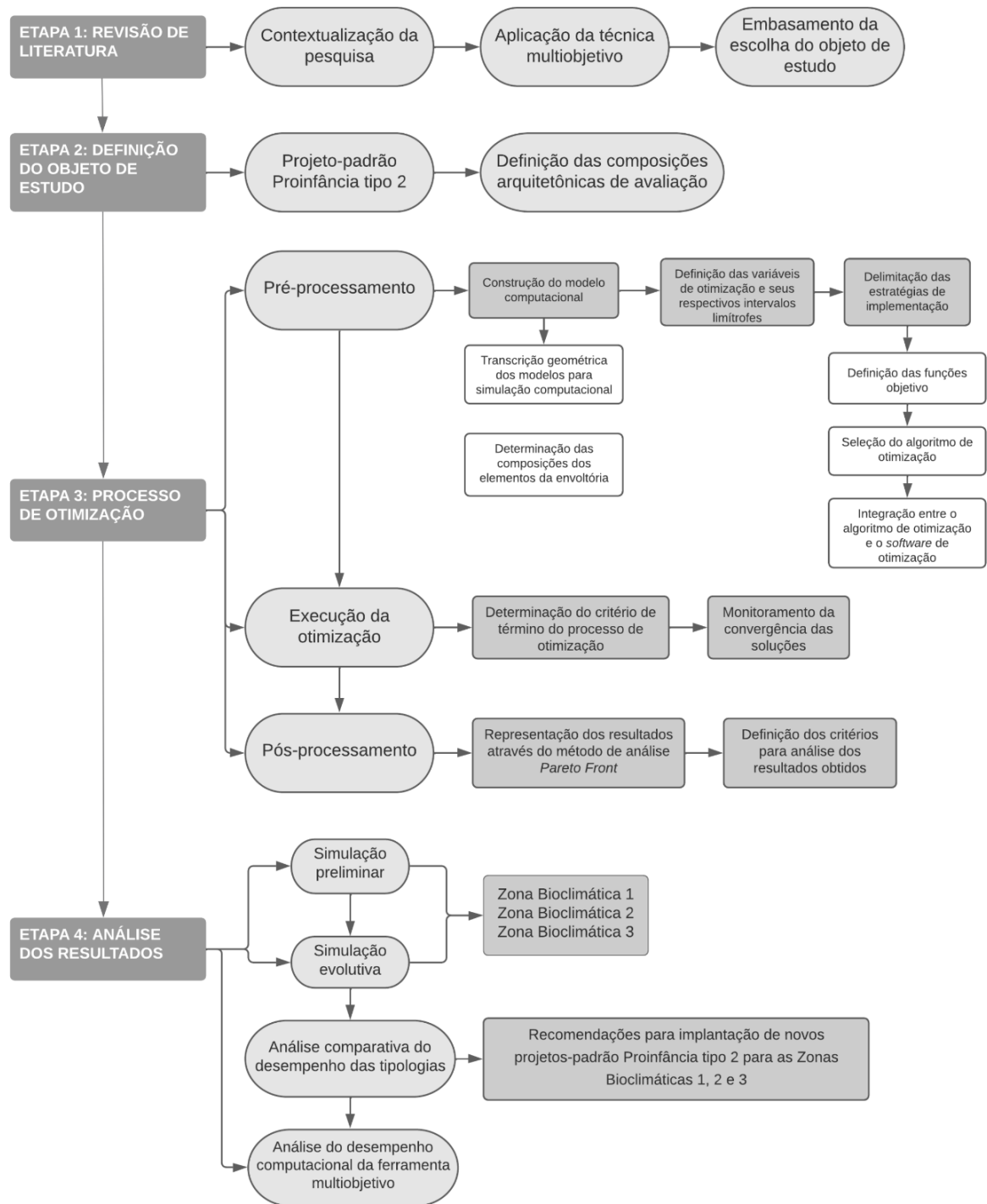
Maciel et al. (2019) avaliaram o desempenho energético e o nível de conforto térmico de duas unidades de EMEIs com projeto padrão Proinfância construídas na cidade de Pelotas/RS (ZB2) com tipologias 1 e 2. O estudo evidenciou as limitações do projeto padrão e discutiu a diferenciação das estruturas formais das tipologias e sua provável influência nos resultados obtidos. Ambos os projetos apresentam um potencial de melhoria e as adaptações propostas pelo estudo proporcionaram o aumento do conforto térmico de 7,5% das horas ocupadas.

Um dos capítulos da pesquisa de Modler (2020) discute através de dois tipos de metodologias o desempenho de uma EMEI construída com base no projeto Proinfância Tipo C. O estudo realiza o entrelaçamento dos resultados obtidos através da simulação computacional com os pontos levantados por um percurso *Walkthrough*. Os resultados da simulação indicaram que durante a maior parte do tempo os usuários permanecem em conforto no interior da edificação, com exceção do pátio coberto, onde o desconforto por frio no inverno é alto. Estes resultados foram equivalentes com o que foi pontuado pelas educadoras, que discordam apenas com os resultados equivalentes às estações frias, onde consideram que o desconforto por frio seja maior devido ao tipo de piso utilizado nos espaços de aprendizagem.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O delineamento do método de pesquisa é apresentado esquematicamente pela Figura 12. Para atingir os objetivos estabelecidos, o método adotado foi dividido basicamente em quatro grandes etapas, sendo: revisão de literatura, definição do objeto de estudo, processo de otimização e análise de resultados. O processo de otimização foi organizado com base no estudo de Nguyen, Reiter e Rigo (2014) e por esse motivo foi dividido em três estágios: pré-processamento, processamento (parâmetros de execução da otimização) e pós-processamento. A otimização multiobjetivo foi realizada por intermédio do *software EnergyPlus* associado ao algoritmo NSGA-II.

Figura 12: Fluxograma das etapas do método de pesquisa



Fonte: Autora (2021).

3.1. Definição do objeto de estudo

O objeto de estudo definido para esta pesquisa consiste em um projeto-padrão de educação infantil Tipo 2, desenvolvido pelo Programa Proinfância. Essa escolha

está relacionada ao papel do Programa dentro do estado, que inclusive ocupou a posição de terceiro lugar no quesito de maior número de prefeituras contempladas na época de sua criação. A tipologia 2 foi escolhida devido à deliberação do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), que estipulou que os recursos para implantação de novas Escolas Municipais de Educação Infantil (EMEI)s na cidade de Pelotas (ZB2), no Rio Grande do Sul, fossem destinados para construção de projetos-padrão com essa tipologia.

A escola conta com 775,85m² de área construída e possui capacidade de acolhimento de até 94 crianças em turno integral ou 188 em turnos alternados. O projeto apresenta características como pavimento único, blocos interligados por um pátio coberto central e áreas externas com playground, jardins e castelo d'água. De acordo com o FNDE a distribuição dos espaços prevê as atividades restritas a cada faixa etária e também ao grupo escolar, considerando a interação da criança em atividades coletivas. A Figura 13 apresenta o projeto arquitetônico através dos setores pedagógico, administrativo, serviço, pátio coberto e uso transitório.

Figura 13: Planta baixa setorizada do projeto-padrão Proinfância tipo 2



Fonte: Adaptado de FNDE (2017).

Nesta setorização, os espaços de educação infantil dividem-se entre as Creches 1 (0 a 18 meses), 2 (18 meses a 3 anos) e 3 (3 a 4 anos) e Pré-escola 1 e 2, que atendem as crianças de 4 a 6 anos. Possui ainda uma sala multiuso, utilizada para atividades especiais e de integração. O setor administrativo é caracterizado por uma sala reservada para administração, sala de professores, fraldário e sala de amamentação, alocados neste setor pela necessidade de monitoramento interno. O setor de serviço abriga todas as atividades relacionadas a alimentação, organização e limpeza, agrupados com os vestiários e sanitários adultos e infantis. No uso transitório são observados os ambientes referentes as circulações e o hall de entrada. O pátio coberto abriga atividades de movimento, complementares e até mesmo de alimentação, caracterizado em algumas ocasiões como refeitório.

De acordo com as especificações do projeto contidas no memorial descritivo fornecido pelo FNDE (FNDE, 2017), a edificação apresenta um sistema construtivo convencional, com estrutura em concreto armado e fechamentos verticais em alvenaria de blocos cerâmicos furados assentados em 1/2 vez (em pé). Estes blocos possuem dimensões nominais de 9 cm x 19 cm x 39 cm para as paredes internas e 14 cm x 19 cm x 39 cm para as externas, que devem ter espessuras finais de 15 cm e 20 cm, respectivamente. As paredes possuem revestimento em argamassa e pintura acrílica na cor branca, tanto no interior quanto no exterior da edificação. Os solários são compostos por chapas de aço perfuradas que possibilitam a ventilação e o sombreamento destes espaços.

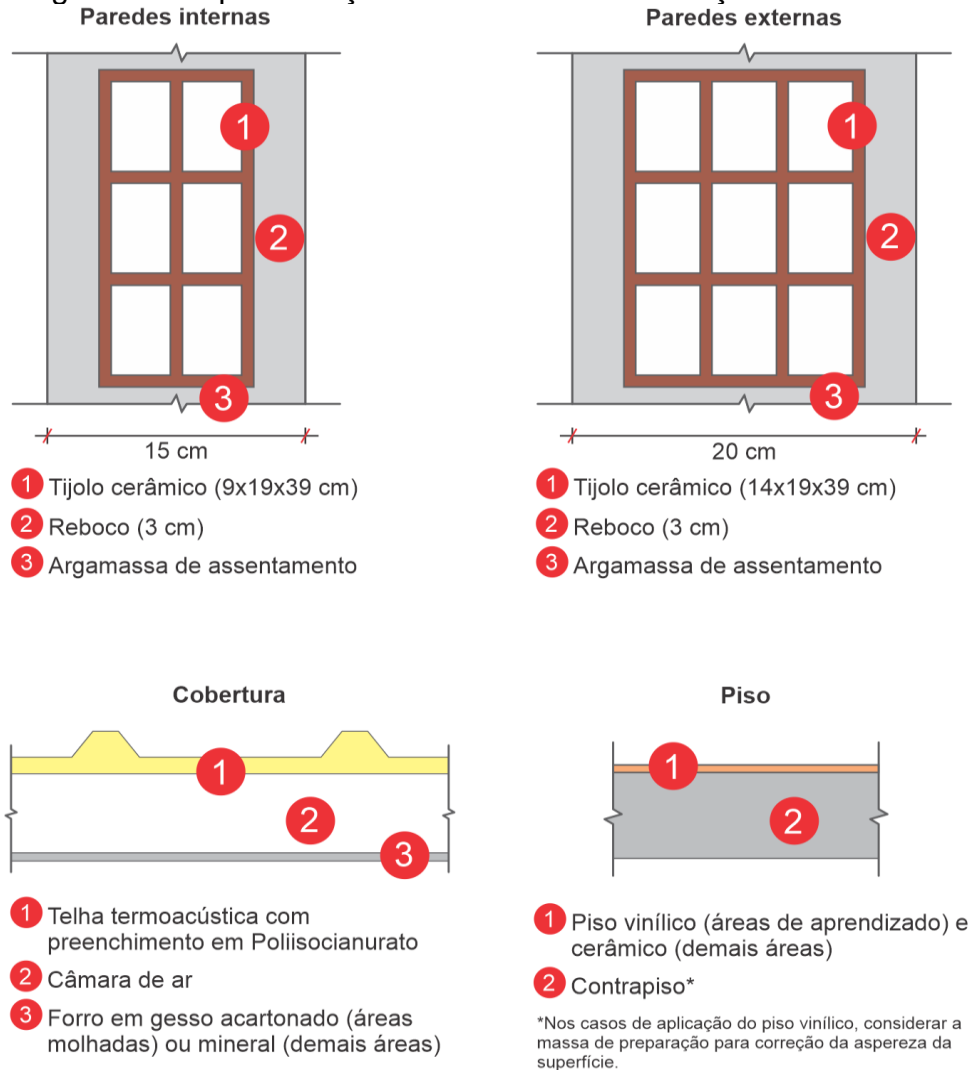
A cobertura é constituída por telhas metálicas com preenchimento em espuma rígida de Poliisocianurato (PIR) fixadas sobre uma estrutura metálica em aço galvanizado. O forro em gesso acartonado é indicado para as áreas molhadas e o forro mineral para as demais.

O piso da edificação varia de acordo com o ambiente. Os ambientes externos possuem piso em concreto armado desempenado e bloco intertravado de concreto, além dos espaços com grama e areia. Para o sistema interno de pisos, são especificados três tipos: vinílico em manta, para as áreas de aprendizado; cerâmico para as áreas molhadas e demais ambientes; e cimentado liso para os solários, hall, circulações e pátio coberto.

As esquadrias são de alumínio, com exceção das portas internas que são em madeira compensada. Os vidros são temperados, com espessura de 6 mm para as janelas e 8mm para as portas. Para adequação da edificação a regiões de clima frio,

o memorial descritivo indica o fechamento do pátio coberto com esquadrias de vidro e, além desta, não menciona nenhuma outra modificação relacionada aos materiais que compõem os elementos da envoltória. A orientação solar do edifício também não é discutida e, geralmente, a implantação ocorre em função das dimensões do terreno e do seu entorno, onde as vias urbanas circundantes delimitam o acesso da escola. A Figura 14 apresenta a composição dos sistemas de vedação descritos acima.

Figura 14: Representação dos sistemas de vedação da envoltória



Fonte: Autora (2021).

Definido o objeto de estudo, serão avaliadas cinco composições arquitetônicas, uma composição referente à tipologia padrão e as outras quatro desenvolvidas com base no que preconiza a discussão apresentada pela revisão de literatura, que enfatiza que um mesmo programa arquitetônico pode dar origem a várias

composições formais. Esse procedimento permite a investigação da influência dos aspectos projetuais sob o desempenho energético do edifício através da avaliação de cinco modelos com a mesma configuração de envoltória e cargas internas, porém, com volumes, fator de forma e soluções formais distintas.

As composições foram desenvolvidas com as mesmas características apresentadas na definição do objeto de estudo, incluindo a setorização dos ambientes e suas respectivas áreas. Além disso, também foram considerados os seguintes critérios: lançamento da proposta através de uma modulação de 1,20 metros para o auxílio e padronização da organização dos ambientes; percentual de abertura de áreas envidraçadas iguais a tipologia padrão; e área de piso com variação máxima de 5% em relação as áreas do projeto-padrão. Neste caso, apenas o setor referente ao uso transitório apresenta área variável, podendo ultrapassar a porcentagem estipulada devido às necessidades arquitetônicas para o lançamento das propostas.

A Tabela 3 apresenta o agrupamento dos ambientes que constituem a setorização definida com base na tipologia 2 e suas respectivas áreas, que foram utilizadas como base para o desenvolvimento das composições arquitetônicas.

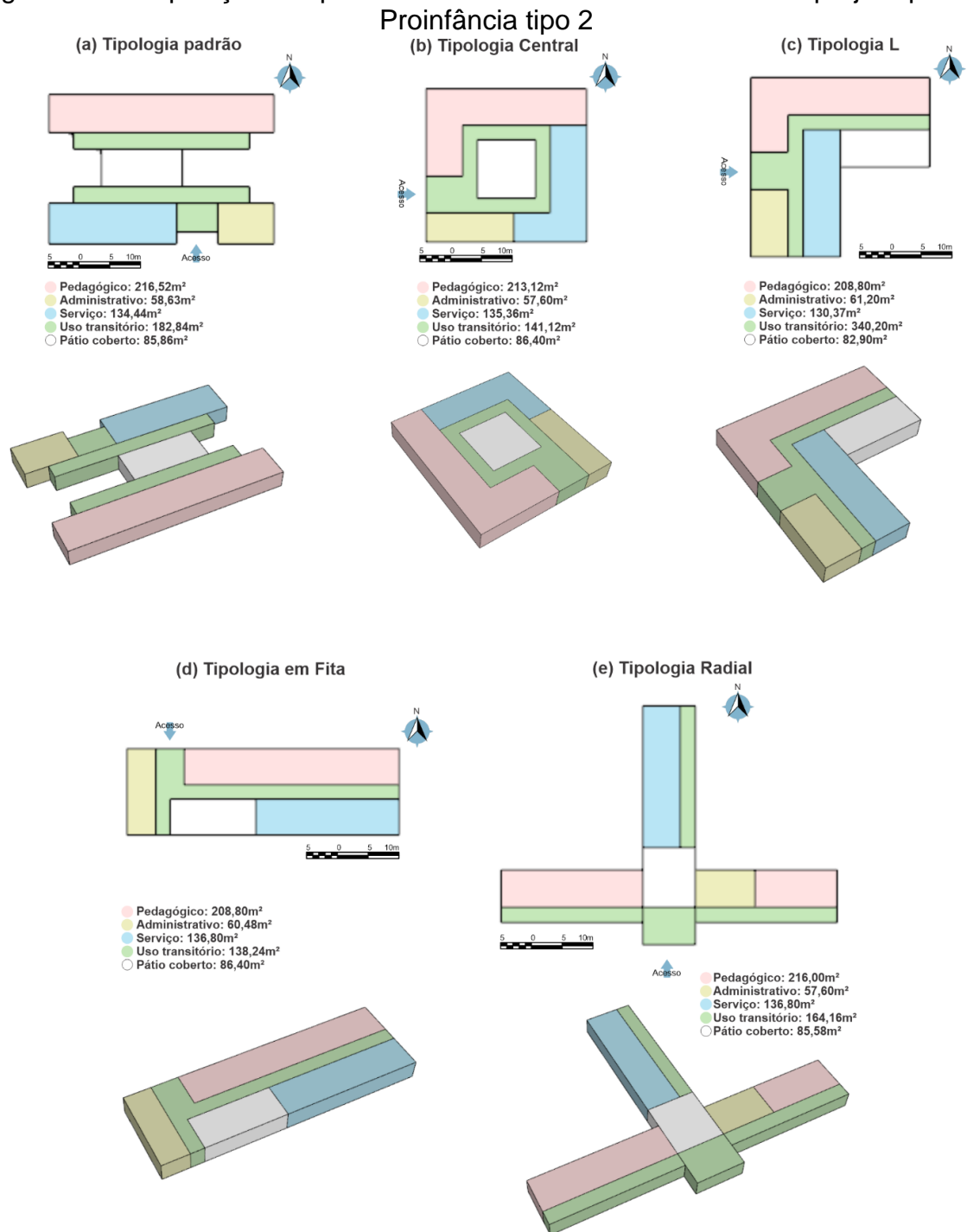
Tabela 3: Agrupamento e setorização dos ambientes da tipologia padrão

Setor Pedagógico		
Ambiente	Área (m²)	Área total (m²)
Pré-escola1	35,70	216,52
Pré-escola 2	35,58	
Creche I	35,70	
Creche II	35,63	
Creche III	35,51	
Sala Multiuso	38,40	
Setor Administrativo		
Administração	19,20	58,63
Sala de professores	16,20	
Amamentação	7,50	
Fraldário	15,73	
Setor de Serviço		
Sanitários	45,30	134,44
Vestiários	7,02	
Almoxarifado	7,50	
Cozinha	35,19	
Despensa	6,03	
Copa	14,42	
Lavanderia	11,48	
Lactário	7,50	
Uso transitório		
Hall	-	Variável
Circulações	-	
Pátio coberto		85,86

Fonte: Autora (2021).

As tipologias desenvolvidas e analisadas por este estudo são representadas pela Figura 15, onde: (a) Tipologia Padrão, também setorizada com base na identificação dos usos do projeto; (b) Tipologia Central; (c) Tipologia L; (d) Tipologia em Fita; (e) Tipologia Radial.

Figura 15: Composições arquitetônicas desenvolvidas com base no projeto-padrão



Fonte: Autora (2021).

Os volumes na cor rosa representam o setor pedagógico e os que estão em amarelo, o setor administrativo. Os setores de serviço são demarcados em azul, o pátio coberto em cinza e os ambientes referentes ao uso transitório, como hall e circulações, são representados pela cor verde. A Tabela 4 apresenta a caracterização das tipologias através dos seguintes parâmetros: Área total (A_{tot}), Volume (Vol), Área da envoltória (A_{env}), Fator de forma (FF) e Índice de compactidade (IC).

Tabela 4: Caracterização dos modelos através dos parâmetros numéricos e geométricos

Tipologia	Altura (m)	A_{tot} (m ²)	Vol (m ³)	A_{env} (m ²)	FF	IC (%)
Padrão	3	687,60	2.062,89	1.204,71	0,58	18,99
Central	3	633,60	1.900,80	968,40	0,51	39,56
L	3	621,48	1.864,44	981,47	0,53	33,47
Fita	3	630,72	1.892,16	979,92	0,52	34,65
Radial	3	705,60	2.116,80	1274,40	0,60	20,27

Fonte: Autora (2021).

3.2. Pré-processamento

A etapa de pré-processamento consiste basicamente na formulação do problema a ser otimizado. Nessa fase, primeiramente foram caracterizados e desenvolvidos os modelos para simulação computacional. Posteriormente, foram determinadas as funções-objetivo e, em seguida, foram definidas as variáveis a serem otimizadas para o alcance destes objetivos.

3.2.1. Caracterização dos modelos para simulação computacional

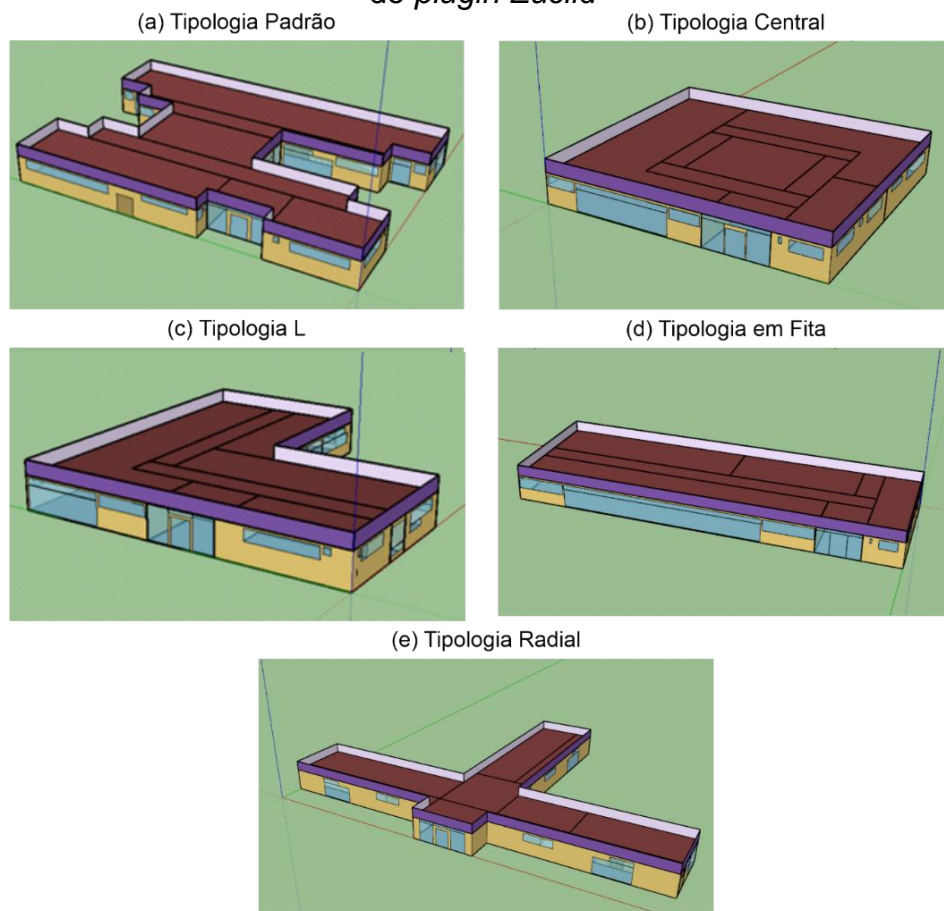
A modelagem das tipologias foi realizada através da interface gráfica do *software SketchUp 2017 Make* com acréscimo do *plugin Euclid 0.9.3*, conforme representa a Figura 16. As etapas de configuração e simulação dos modelos, foram realizadas através do *software EnergyPlus*, versão 9.0.1. Para isso, foram utilizadas as especificações de projeto do memorial descritivo fornecido pelo FNDE (FNDE, 2017) e demais informações descritas a seguir.

Os modelos referem-se às composições arquitetônicas definidas pelo item 3.1.1, que devido ao alto custo computacional dos métodos evolutivos, foram pensadas de modo que a geometria das tipologias fosse simplificada. Essa estratégia

é recorrente em estudos que utilizam esse tipo de abordagem e, assim como realizado por Hamdy, Hasan e Siren (2011), Asadi et al. (2012) e Gou et al. (2018), as tipologias foram modeladas de forma que cada setor caracterizasse uma Zona térmica (ZT). A massa térmica das paredes internas não representadas geometricamente foi inserida através do objeto *InternalMass*, o que aproxima o comportamento dos modelos da realidade.

Assim como na solução arquitetônica inicial, a área dos setores foi distribuída de forma igualitária entre os modelos, assim como todas suas características e configurações. As esquadrias externas foram distribuídas de acordo com o Percentual de Abertura na Fachada (PAF) dos ambientes que representam ZT em questão. Neste caso, a distribuição do uso transitório foi dividida em um número maior de ZTs devido a organização arquitetônica das propostas.

Figura 16: Modelos tridimensionais desenvolvidos no *software SketchUp* através do *plugin Euclid*



Fonte: Autora (2021).

3.2.1.1. Caracterização da envoltória

Os modelos foram configurados de acordo com o memorial descritivo do projeto-padrão. As principais propriedades da envoltória foram calculadas de acordo com a metodologia proposta pela NBR 15.220-2 (ABNT, 2005a) e são apresentadas nas Tabelas 5, 6, 7 e 8. A memória de cálculo pode ser consultada no Apêndice B.

Tabela 5: Composição das paredes externas, equivalente à parede com tijolos de nove furos de 14 cm x 19 cm x 39 cm, assentados em ½ vez

Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)	U [W/(m ² k)]
Reboco externo	0,03	1,15	2000	1,00	0,5384	189,05	1,86
Cerâmica	0,0702	0,90	534,44	0,92			
Câmara de ar	0,04	-	-	-			
Cerâmica	0,0702	0,90	534,44	0,92			
Reboco interno	0,03	1,15	2000	1,00			

e = Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c = Calor específico; R = Resistência térmica; U = Transmitância térmica.

Fonte: Autores (2021).

Tabela 6: Composição das paredes internas, equivalente à parede com tijolos de nove furos de 9 cm x 19 cm x 39 cm, assentados em ½ vez

Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)	U [W/(m ² k)]
Reboco externo	0,03	1,15	2000	1,00	0,4363	151,53	2,29
Cerâmica	0,0243	0,90	705,37	0,92			
Câmara de ar	0,04	-	-	-			
Cerâmica	0,0243	0,90	705,37	0,92			
Reboco interno	0,03	1,15	2000	1,00			

e = Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c = Calor específico; R = Resistência térmica; U = Transmitância térmica.

Fonte: Autores (2021).

Conforme apresentado, o piso vinílico é estabelecido para as áreas de permanência prolongada, e o piso cerâmico para os demais ambientes. O mesmo acontece para a composição da cobertura com o tipo de forro, onde o mineral é indicado para as salas de atividades, professores e administração, e o gesso acartonado é estipulado para as demais áreas. Considerando que o método de simulação tem o intuito de representar um modelo aproximado da realidade, adotou-se um único tipo de forro e piso para toda edificação. Respeitando os dados referentes as áreas de permanência prolongada, as superfícies de piso foram caracterizadas como vinílico e o sistema de forro como mineral.

Tabela 7: Composição do piso

Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	U [W/(m ² k)]
Piso vinílico	0,004	0,02	1400	1040	0,2171	4,61
Laje em concreto	0,10	1,75	2400	1000		

e = Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c = Calor específico; R = Resistência térmica; U = Transmitância térmica.

Fonte: Autores (2021).

Tabela 8: Composição da cobertura

Composição		e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	U [W/(m ² k)]
Telha termoacústica com PIR	Telha de aço	0,0005	55	7800	460	3,1284	0,32
	Isolamento	0,03	0,03	40	167		
	Telha de aço	0,0005	55	7800	460		
Câmara de ar		0,25					
Forro mineral		0,015	0,038	1000	840		

e = Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c = Calor específico; R = Resistência térmica; U = Transmitância térmica.

Fonte: Autores (2021).

3.2.1.2. Configuração dos ganhos internos

Os setores pedagógico e administrativo foram caracterizados como usos de permanência prolongada. A configuração da ocupação foi realizada através dos dados fornecidos pela 5ª Coordenadoria Regional de Educação de Pelotas (5ª CRE Pelotas), considerando a previsão do número de usuários e o horário de realização das atividades na escola. O número de professores e auxiliares é referente à quantidade de crianças atendidas, conforme é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Previsão do número de funcionários pelo número de crianças atendidas

Quantidade de turmas	Serventes	Quantidade de alunos	Merendeiras
5 a 6	3	Até 100	2
7 a 8	4	Acima de 100	3
9 a 10	5	Acima de 250	4
Turma	Quantidade de alunos	Professores	Auxiliares
Creche I (0 a 18 meses)	A cada 20 alunos	2	3
Creche II (18 meses a 3 anos)		2	3
Creche III (3 a 4 anos)		2	2
Pré-escola (4 a 6 anos)		1	1

Fonte: Adaptado de 5ª CRE Pelotas.

Para determinação da densidade de carga interna resultante do metabolismo dos ambientes, utilizou-se o método de cálculo de superfície corporal pela equação de DuBois (DuBois, 1916), que relaciona a área de superfície de uma pessoa à sua massa e altura, conforme a Equação 2.

$$Sc = 0,007184 \times (A^{0,725}) \times P^{0,425} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

Sc = Superfície corporal (m²);

A = Altura (cm);

P = Peso (kg).

Essa estratégia foi utilizada pela possibilidade de representação do peso e da altura dos usuários por uma média de faixa etária, considerando o compartilhamento dos ambientes entre adultos e crianças, o que aproxima a configuração do caso real. Para configuração no *EnergyPlus*, a superfície corporal calculada para as crianças foi dividida pela superfície corporal média de um adulto (Sc = 1,80). As agendas de ocupação consideram o horário de funcionamento da EMEI, de 7h30min a 17h30min, de segunda a sexta-feira, com exceção dos feriados e do mês de janeiro, quando a escola se mantém desocupada. Conforme NBR 16401-1 (2008), a taxa metabólica adotada foi de 115 W. Os dados configurados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Dados de ocupação dos setores de permanência prolongada

Setor pedagógico		
Ambiente	Ocupação	
	Nº de crianças	Nº de adultos
Creche I (0 a 18 meses, Sc = 0,361)	10 (Sc total = 3,61)	5
Creche II (18 meses a 3 anos, Sc = 0,481)	16 crianças (Sc total = 7,70)	5
Creche III (3 a 4 anos, Sc = 0,607)	20 crianças (Sc total = 12,14)	4
Pré-escola 1 (4 a 6 anos, Sc = 0,993)	24 crianças (Sc total = 23,83)	3
Pré-escola 2 (4 a 6 anos, Sc = 0,993)	24 crianças (Sc total = 23,83)	3
Sala multiuso	-	-
Crianças (Sc total ÷ 1,80)		40
Adultos		20
Total de pessoas		60
Setor administrativo		
Ambiente	Ocupação	
	Nº de adultos	
Administração	4	
Sala de professores	-	
Amamentação	-	
Fraldário	-	
Total de pessoas	4	

Fonte: Autora (2021).

O sistema de iluminação foi configurado de acordo com os valores obtidos através do projeto elétrico fornecido pelo FNDE (FNDE, 2017). A rotina de iluminação artificial é baseada no período de ocupação dos espaços de permanência prolongada, sendo acionada das 7h30min às 17h30min apenas nos ambientes que possuem uso contínuo durante os cinco dias da semana. No caso do setor pedagógico, exclui-se apenas a sala multiuso, enquanto no administrativo não são considerados os ambientes referentes a sala de amamentação e o fraldário, dos quais são utilizados eventualmente durante o dia. Os valores configurados correspondem a 7,98 W/m² para o setor pedagógico e 4,91 W/m² para o administrativo. No caso dos equipamentos, a densidade de potência foi configurada com base no que preconiza a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) (BRASIL, 2021), que corresponde a 15 W/m², com operação durante o horário de ocupação da escola.

3.2.1.3. Características do sistema de ventilação híbrido

Um sistema de ventilação híbrido é utilizado como alternativa para redução do consumo de energia da edificação. Este sistema consiste na alternância entre a ventilação natural com janelas operáveis e sistemas de condicionamento de ar (CBE, 2017). Essa estratégia combina as melhores características de ambos os sistemas (CIBSE, 2000) e, além de facilitar a economia de energia da edificação, também proporciona o aumento da qualidade do ar interno e consequentemente a satisfação dos usuários.

A ventilação natural foi configurada através dos objetos *AirflowNetwork* do *EnergyPlus* e o controle das duas estratégias de ventilação é realizado pelo objeto *AvailabilityManager:HybridVentilation*. De acordo com o manual de referência da ferramenta, este objeto avalia as condições externas e altera a operação das aberturas com base em um critério pré-definido, maximizando o uso da ventilação natural e reduzindo o uso de sistemas de climatização artificial à medida que esse critério é atendido (DOE, 2021). Entre as opções disponíveis no objeto adotou-se como estratégias de avaliação a número 5, denominada *Operative temperature control using adaptive comfort 80% acceptability limits*. Essa operação considera os limites de conforto adaptativo estipulados pela Standard ASHRAE 55 (2010) para 80% de aceitabilidade. Neste caso, quando a temperatura operativa estiver dentro dos limites

superior e inferior de aceitabilidade a ventilação natural é habilitada, as janelas são abertas e o sistema de ar-condicionado é forçado a desligar. Se a temperatura operativa ultrapassar os limites de aceitabilidade, o ar-condicionado é acionado e as janelas são automaticamente fechadas. Essa condição foi configurada apenas para os ambientes de permanência prolongada (setor pedagógico e administrativo) considerando o período de ocupação da EMEI.

O condicionamento foi configurado com um Coeficiente de Performance (COP) de 2,60, tanto para aquecimento quanto para resfriamento, conforme apresenta a Tabela A.2. da INI-C (BRASIL, 2021). A taxa de fluxo de ar por pessoa é de 0,0094 m³/s e a eficiência do motor e do ventilador possuem valores de 0,90 e 0,70, respectivamente.

3.2.1.4. Caracterização Bioclimática

A otimização das tipologias foi realizada para as Zonas Bioclimáticas (ZBs) 1, 2 e 3, conforme divisão estabelecida pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005b). As ZBs foram caracterizadas, respectivamente, pelos arquivos climáticos das cidades de Curitiba (PR), Santa Maria (RS) e Florianópolis (SC) (LABEEE, 2018).

Caracterizando a ZB 1, a cidade de Curitiba possui altitude média de 935 metros acima do nível do mar e localiza-se a uma latitude 25° 25' 48" Sul e a uma longitude 49° 16' 15" Oeste. Apresenta temperaturas mais baixas ao decorrer do ano, com média anual de 17,4°C, onde o mês de junho é o mais frio, com temperatura média de 14,7°C, e fevereiro é o mais quente, com 20,9°C.

A ZB2 abrange algumas regiões de Estados localizados ao sul do Brasil e é caracterizada pela grande amplitude de suas temperaturas ao longo do ano. A cidade de Santa Maria, representativa para esta zona, possui altitude média de 95 metros acima do nível do mar e localiza-se a uma latitude 29° 41' 29" Sul e a uma longitude 53° 48' 3" Oeste. Apresenta temperatura anual média de 19,1°C, sendo o mês de janeiro o mais quente, com temperatura média de 24,9°C, e o de agosto o mais frio, com 13,4°C.

A ZB 3 apresenta as temperaturas mais elevadas. Na cidade de Florianópolis, o mês com temperaturas mais elevadas é o de janeiro, e agosto é considerado o mais frio, com temperaturas médias de 16,4°C. A cidade localiza-se a cerca de 2,74 m

acima do nível do mar e está localizada a 27° 35' 49" Sul e 48° 32' 58" Oeste. A Tabela 11 apresenta as principais características climáticas das zonas.

Tabela 11: Caracterização das Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3

Mês	Temperatura de bulbo seco (°C)									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

Fonte: Adaptado de LABEEE (2018).

Em todos os modelos, a temperatura do solo foi configurada diretamente no *EnergyPlus* através da classe de objetos *Site:GroundTemperature*. Foram configurados três objetos: o *Site:GroundDomain:Slab*, o *SurfaceProperty:OtherSideConditionsModel* e o *Site:GroundTemperature:Undisturbed:FiniteDifference*. Segundo o manual da ferramenta, o primeiro simula a troca de calor entre o solo e as superfícies horizontais do modelo, o segundo define as condições de contorno válidas para a superfície de contato entre o piso e o solo, e o terceiro caracteriza as principais propriedades termo físicas do solo, como a densidade, o calor específico e a condutividade (DOE, 2021).

3.2.1.5. Variáveis de otimização

Na plataforma utilizada durante a otimização, as variáveis a serem otimizadas são representadas por classes do EP, simulando os atributos de um edifício que podem ser variados. Isso quer dizer que, para que uma variável seja otimizada é necessário que ela faça parte de uma das classes existentes dentro do EP e seja identificada através de um objeto e de um campo, como representa a Figura 17. Neste caso, “*class_name*” representa a classe do objeto, “*object_name*” o nome do objeto a ser modificado e “*field_name*” o nome do campo a ser modificado. É necessário que

esses objetos sejam equivalentes aos configurados no modelo com extensão *.IDF* e, neste cenário, o campo denominado por “*field_name*” poderá assumir qualquer valor dentro dos intervalos limítrofes pré-estabelecidos.

Figura 17: Código de programação para otimização de uma variável

```
parameters = []

parameters.append(
    Parameter(
        selector=FieldSelector(
            class_name="MATERIAL",          # Classe do E+;
            object_name="ParedeIsolamento", # Nome do objeto;
            field_name="Thickness", # Campo do objeto;
        ),
        name='Isolamento da parede',
        value_descriptor=RangeParameter(min_val=0.001, max_val=0.10) # Limites;
    )
)
```

Fonte: Adaptado de *Jupyter Notebook* (2021).

Além dos critérios impostos pela plataforma para seleção dos parâmetros a serem otimizados, a literatura menciona que um grande número de variáveis de decisão dificulta o processo de busca e adiciona mais incerteza aos resultados obtidos (KIRIMTAT et al., 2019). Por esse motivo, com base nos parâmetros testados por Balboni et al. (2019), Dalbem et al. (2019), Maciel et al. (2020), Leitzke et al. (2021) e Maciel et al. (2021), foram selecionadas seis variáveis de otimização.

Estudos como os de Oliveira (2012) e Soares (2014) mostram que o aumento do atraso térmico em fechamentos opacos é favorável para elevação dos índices de conforto térmico de uma edificação residencial, assim como para a redução de graus-hora necessários para mantê-la dentro do intervalo de temperatura da zona de conforto térmico. Nesse sentido, a configuração de envelope do caso base foi mantida, assim como sua capacidade térmica, e optou-se pela inserção de um elemento de isolamento térmico pelo lado externo das composições. Essa decisão considera a baixa densidade aparente do material e também a possibilidade de variação de sua espessura como estratégia de otimização. Para as paredes externas considerou-se o posicionamento do isolamento térmico pelo exterior da composição. Esse tipo de sistema é conhecido por Capoto e consiste em um método para isolamento e proteção dos edifícios pelo exterior, onde são fixadas placas de poliestireno expandido (EPS) nas fachadas.

Do mesmo modo, para o piso, a configuração das placas de poliestireno extrudado (XPS) atuam como isolamento térmico do fechamento. Na cobertura, com baixa transmitância térmica já observada na solução base, preenchimento em poliisocianurato (PIR) e transmitância térmica de $0,32 \text{ W/m}^2\text{k}$, o parâmetro variado é a própria espessura do preenchimento em PIR. Além dessas variáveis, também foram analisados os valores de absortância solar das paredes externas e da cobertura, bem como a orientação solar da edificação. As variáveis e seus respectivos intervalos são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Variáveis de otimização e seus respectivos intervalos limítrofes

Variáveis de otimização	Limite inferior	Limite superior
Espessura do isolante térmico das paredes externas – EPS (m)	0,001	0,10
Espessura do isolante térmico da cobertura – PIR (m)	0,001	0,10
Espessura do isolante térmico do piso – XPS (m)	0,001	0,15
Absortância solar das paredes	0,2	0,9
Absortância solar da cobertura	0,2	0,9
Orientação	0	359

Fonte: Autora (2021).

3.3. Processamento

A fase de processamento consiste na própria execução do processo de otimização. São delimitadas todas as decisões referentes as estratégias de implementação, como a definição do algoritmo de otimização, o tamanho populacional, o número de gerações, a linguagem de programação e a plataforma de otimização utilizadas.

3.3.1. Definição das funções-objetivo

Para avaliação dos indivíduos, é necessário que sejam definidas funções-objetivo que possam ter resultados obtidos por meio dos relatórios de saída da simulação do EP. Assim como nos estudos de Bre e Fachinotti (2017), Ferrara et al. (2019) e Bre, Roman e Fachinotti (2020), neste trabalho a avaliação foi realizada com base nos valores de minimização de duas funções-objetivo referentes ao consumo de energia, sendo: (a) Intensidade do Uso de Energia elétrica (IUE) para refrigeração, abcissas do plano cartesiano de representação; e (b) IUE para aquecimento, referente as ordenadas do plano cartesiano de representação. A Figura 18 apresenta o código de programação desenvolvido para definição das funções objetivo utilizadas no processo de otimização.

Figura 18: Código de programação para definição das funções objetivo desenvolvido com base nas variáveis de saída do software EnergyPlus

```
heating = MeterReader('Heating:Electricity', name="Aquecimento")
cooling = MeterReader('Cooling:Electricity', name="Refrigeração")

EPObjectives = [cooling, heating] # Heating e Cooling como objetivos;

problem = EPPProblem(parameters, EPObjectives, minimize_outputs=[True, True]) # Criando uma instância do problema;
```

Fonte: Autora (2021).

Nesse caso, a solução do problema multiobjetivo pode ser definida pela Equação 3.

$$IUE_{min}(x) = [IUE \text{ Refrigeração}(x) + IUE \text{ Aquecimento}(x)] \quad Eq. 3$$

Onde:

x = Conjunto de variáveis otimizadas

$IUE \text{ Refrigeração}$ = Intensidade do Uso de Energia Elétrica por Refrigeração (kWh/m²ano)

$IUE \text{ Aquecimento}$ = Intensidade do Uso de Energia Elétrica por Aquecimento (kWh/m²ano)

3.3.2. Delimitação das estratégias de implementação

Como um instrumento que visa facilitar o processo de otimização dos modelos de simulação com o EP, foi utilizada a linguagem de programação de computadores *Python*. Essa linguagem se destaca por ser interpretada com alto nível de abstração e por possuir uma sintaxe simples de desenvolvimento (MILLMAN; AIVAZIS, 2011). Segundo os dados do *Madnight*², que avalia a criação de repositórios de códigos entre as linguagens de programação, o *Python* aparece em frente as demais da categoria, representando 15,89% dos repositórios criados. Nessa situação, sua escolha se relaciona com o protagonismo da linguagem em relação às demais.

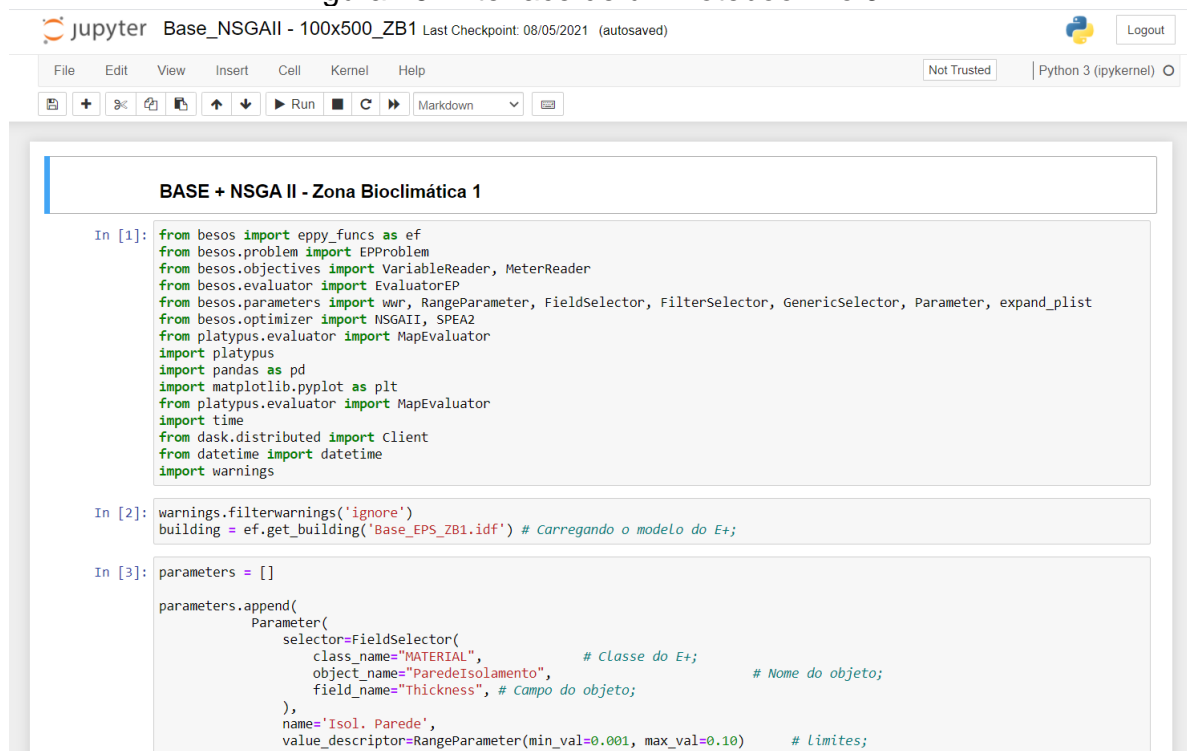
Neste trabalho, a relação entre o *Python* e o EP está pautada na utilização da plataforma *Building and Energy Systems Optimization and Surrogate-modelling*, mais conhecida como BESOS. Essa plataforma foi desenvolvida em 2019 pelo *Energy Incities* da *Victoria University*, no Canadá (ENERGY INCITIES, 2020), e busca relacionar os recursos implementados em bibliotecas do *Python* com as simulações

²https://madnight.github.io/github/#/pull_requests/2020/3. Acesso em: 17 dez. 2020.

térmicas e energéticas do EP através da biblioteca denominada *eppy*. Entre os recursos ofertados pela BESOS, a presença da biblioteca *platypus* possibilita a implementação de algoritmos evolutivos como o NSGA-II.

O código de programação foi desenvolvido através de um *notebook*, que consiste em um documento virtual que possibilita a execução de códigos em linguagem de programação com ferramentas para edição de textos comuns, o que permite com que o usuário possa documentar todo o processo de produção do código. O processo de otimização multiobjetivo demanda de conhecimentos específicos e os *notebooks* possibilitam uma programação mais dinâmica e interativa, reduzindo alguns dos desafios impostos pela falta de formação de um projetista *não-programador*. Para o desenvolvimento e implementação dos códigos, utilizou-se o *Jupyter Notebook* (JN), uma interface gráfica que permite a edição de códigos em um navegador *web*. A Figura 19 apresenta a interface de um *notebook* dentro do JN.

Figura 19: Interface de um notebook no JN



Fonte: Adaptado de *Jupyter Notebook* (2021).

O código que representa o processo de avaliação dividiu-se basicamente em 5 partes, sendo elas: (a) importação das bibliotecas necessárias para entrada e saída dos dados da análise; (b) seleção do arquivo do modelo de construção com extensão

.IDF (*Input Data File*); (c) caracterização dos parâmetros a serem otimizados; (d) seleção das funções-objetivos definidas para a análise e (e) definição das métricas de avaliação e do algoritmo de otimização. Por fim, a avaliação dos modelos é executada, os resultados passam pelo tratamento de dados e estão prontos para serem analisados. O código completo utilizado para o processo de otimização consta no Anexo A da dissertação.

3.3.3. Definição do algoritmo de otimização

O algoritmo de otimização foi selecionado com base nos testes realizados por Maciel et al. (2021) e pelos demais estudos identificados pela revisão de literatura. Além de ser o mais popular no contexto das edificações, o algoritmo NSGA-II também foi o que apresentou melhor desempenho quando aplicado aos modelos computacionais desenvolvidos para este estudo, portanto foi adotado para o processo de otimização.

O algoritmo depende da definição do tamanho da população e do número de gerações para evolução do processo e, geralmente essas escolhas estão relacionadas ao desempenho do processador utilizado, as características do problema de otimização e ao número de iterações desejáveis. As variáveis de otimização apresentadas anteriormente pela Tabela 5 foram utilizadas como critério para definição do primeiro parâmetro, já que o tamanho populacional deve representar algo em torno de duas a quatro vezes o número das variáveis que serão testadas. Assim como nos estudos de Bre et al. (2016), Li e Malkawi (2016), Gou et al. (2018), Wang et al. (2020) e Berleze, Brasileiro e Silvosso (2021), o tamanho da população foi definido em 100 indivíduos.

Durante o processo de otimização, o algoritmo realiza diferentes combinações entre as variáveis, e, a cada teste de combinação, o *EnergyPlus* processa uma nova simulação. É necessário que seja definido um critério para o término do processo, já que esse procedimento é realizado sucessivamente pela busca de novas combinações que possam ser mais eficientes do que as anteriores. O critério de parada foi definido pela quantidade total de gerações.

Assim como preconiza a literatura, durante o processo de caracterização das tecnologias foram realizados diversos testes para definição de um número de gerações que possibilitasse o melhor custo-benefício entre a confiabilidade da

Fronteira de Pareto e o tempo computacional aplicável às condições físicas de execução. Como pode ser observado em Maciel et al., (2021), foram realizados testes com 30, 50 e 100 gerações. No entanto, assim como no estudo de Hamdy, Nguyen e Hensen (2016), constatou-se que a qualidade das soluções obtidas melhorava gradativamente à medida que o número de avaliações também aumentava, possivelmente devido a maior quantidade de cruzamentos entre as variáveis. Logo, os indivíduos foram inicialmente avaliados mediante 300, 500 e 700 gerações, sendo selecionada a segunda opção para as análises. A Tabela 13 resume os valores adotados para a configuração dos parâmetros de otimização.

As análises foram executadas através de um computador com processador Intel Core i7-2600K CPU 3.40GHz x 8, com 16GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 18.04.4 LTS (64bits).

Tabela 13: Configuração dos parâmetros de otimização

Algoritmo	Tamanho da população	Número de gerações
NSGA-II	100	500

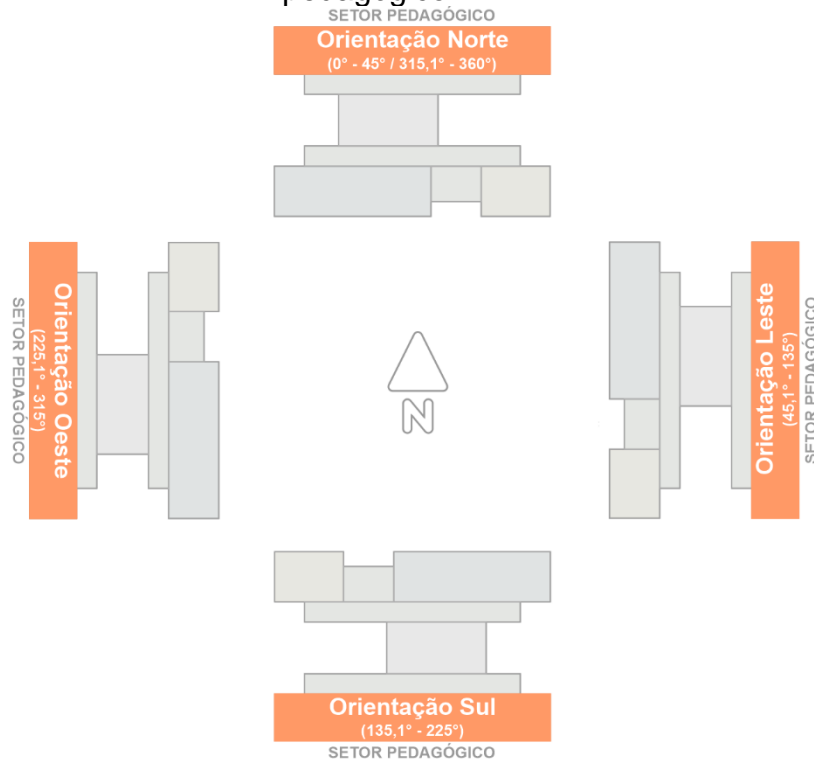
Fonte: Autora (2021).

3.4. Pós-processamento

O pós-processamento consiste na definição dos critérios para avaliação dos resultados obtidos através da otimização. São descritas as decisões referentes à interpretação da variável que representa a orientação solar, o método utilizado para determinação do conjunto de soluções e o critério de seleção para caracterização das soluções mais eficientes.

Os limites estabelecidos para a variável que representa a orientação geográfica variam de 0 a 359°, o que significa que a edificação pode assumir qualquer valor dentro desse intervalo. Portanto, adotou-se um critério para análise dos valores definidos para essa variável. Com base no que preconiza o RTQ-C (INMETRO, 2010), foram considerados os seguintes intervalos: valores de 0 a 45° e de 315,1° a 360°, caracterizam a orientação como Norte; de 45,1° a 135°, Leste; de 135,1° a 225°, Sul; e de 225,1° a 315°, Oeste. Além disso, para avaliação das soluções e, principalmente para análise da influência do PAF no desempenho dos modelos, a fachada com o maior percentual de área envidraçada do setor pedagógico que definirá a orientação solar geral do modelo. Essa estratégia é representada pela Figura 20.

Figura 20: Representação da orientação geográfica de acordo com o setor pedagógico



Fonte: Autora (2021).

O método da Fronteira de Pareto foi utilizado para determinar o conjunto ótimo das soluções. Nesse caso, o problema não possui uma única solução ótima, mas sim um conjunto de soluções que correspondem aos pontos que compõem a Fronteira de Pareto. Logo, cabe ao tomador de decisão a adoção de um critério de seleção para caracterização da solução mais eficiente entre as identificadas pela Fronteira. Neste estudo, foram selecionadas para análise apenas as soluções que não apresentaram um somatório de consumo superior a 15% da solução com o menor somatório entre as duas funções objetivo. Isso significa que, quando uma grande diferença, em termos percentuais, é observada entre a melhor solução e as demais, essas composições são eliminadas das análises, já que, em um cenário de minimização, a solução ideal seria aquela com a menor distância em relação a origem do gráfico (0,0).

O experimento foi dividido em duas etapas. Em primeira instância, foi realizada uma simulação preliminar por intermédio do *software EnergyPlus*, que consiste na simulação das configurações iniciais dos modelos, onde em todos os casos a maior fachada do setor pedagógico foi direcionada à orientação Norte. Posteriormente, foi

executada a otimização multiobjetivo, denominada como simulação evolutiva. A análise de resultados foi dividida da mesma forma. Os resultados são apresentados por zonas bioclimáticas, onde são indicados os resultados da avaliação das condições iniciais dos modelos através da simulação preliminar e, posteriormente, são apresentadas as soluções obtidas através da utilização do algoritmo evolutivo NSGA-II. A avaliação dos modelos considera a caracterização das soluções da Fronteira de Pareto e a comparação entre os resultados obtidos através da simulação preliminar e da simulação evolutiva.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os itens 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os resultados obtidos para cada ZB de implantação. Considerando a configuração inicial de cada uma das cinco composições arquitetônicas, na simulação preliminar é realizada a discussão sobre o consumo total, a variação entre o consumo de aquecimento e refrigeração e o uso final referente as cargas internas de equipamentos e iluminação de cada caso. Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados referentes a simulação evolutiva para cada tipologia otimizada, onde o agrupamento dos resultados e a caracterização da solução mais eficiente podem ser consultados através do item 4.4. Por fim, é realizada a discussão sobre o desempenho da ferramenta multiobjetivo.

4.1. Zona Bioclimática 1

4.1.1. Simulação preliminar

A Figura 21 apresenta os resultados da simulação preliminar para a ZB1 e enfatiza a distinção entre os dados de saída que serão utilizados como funções objetivo. As cinco tipologias apresentam um elevado consumo por refrigeração quando comparado ao consumo para aquecimento, onde na melhor hipótese (tipologia Padrão) a necessidade de refrigeração representa cerca de 60% do consumo total. Isso pode ocorrer devido ao tipo de uso do edifício, que é ocupado apenas durante o dia, quando as temperaturas são mais elevadas, e ainda possui alta carga interna devido a recorrente utilização dos equipamentos e do sistema de iluminação em escolas.

A tipologia Padrão totaliza um consumo de 7,36 kWh/m².ano, o que caracteriza a composição mais eficiente para o contexto da Zona Bioclimática 1 (ZB 1). Nesse caso, 4,60 kWh/m².ano é destinado à refrigeração do edifício e 2,76 kWh/m².ano ao seu aquecimento. A edificação menos eficiente, que apresenta o maior consumo por climatização, corresponde à tipologia em Fita, que consome 26,65 kWh/m².ano para refrigeração e 0,21 kWh/m².ano para seu aquecimento.

Embora a análise preliminar tenha sido realizada de forma mais simplificada, ainda sem a avaliação dos fluxos térmicos, a análise dos resultados indica que a compacidade das tipologias pode ser considerada um indicador de desempenho, onde a edificação energeticamente mais eficiente apresenta o menor Índice de Compacidade (IC).

Através destes resultados pode-se perceber que, apesar da tipologia Padrão apresentar o menor somatório entre ambos os consumos, é a condição que apresenta o maior consumo por aquecimento. Analisando as condições arquitetônicas observa-se que, apesar do setor pedagógico estar direcionado à orientação Norte, o setor administrativo, que também é configurado com o sistema de climatização, está direcionado a Sul. Nesse sentido, considerando as baixas temperaturas que já são mais recorrentes na ZB1, é possível que essa orientação contribua com a maior necessidade de aquecimento desse espaço. De forma inversa, o mesmo pode ser observado na tipologia em Fita que, apesar de apresentar o maior somatório entre ambos os objetivos, necessita de um consumo para aquecimento muito próximo a zero. É provável que essa condição também seja observada em função da orientação solar, já que enquanto o setor pedagógico é voltado a Norte o administrativo é direcionado a Oeste, quando o ganho por radiação solar é maior.

Com relação às cargas internas, todas as soluções apresentam um consumo de 108,31 kWh/m².ano pela utilização de equipamentos e entre 51,54 kWh/m².ano e 53,21 kWh/m².ano para iluminação.

Figura 21: Representação do conjunto de resultados obtidos através da simulação preliminar para Zona Bioclimática 1



Fonte: Autora (2021).

4.1.2. Simulação evolutiva

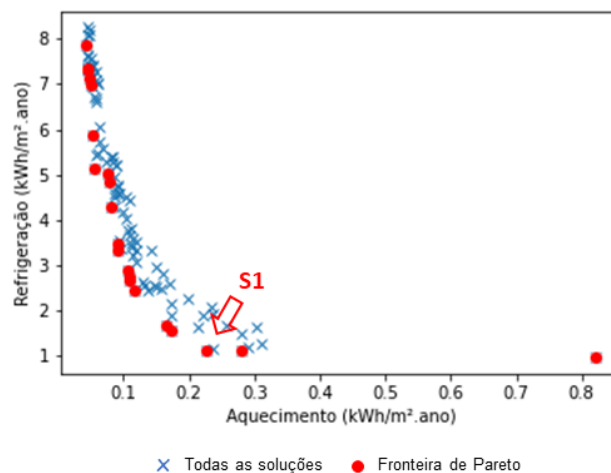
4.1.2.1. Tipologia Padrão

A Figura 22 apresenta o gráfico de Pareto da simulação evolutiva para tipologia Padrão no contexto de 500 gerações. Com base nesses resultados, pode-se constatar que o algoritmo foi capaz de gerar a Fronteira de Pareto conforme o esperado, onde todas as soluções convergem em direção ao ponto ótimo (0,0).

Ambas as funções-objetivo possibilitaram a redução do consumo de energia demandado pela tipologia não otimizada. A melhor solução (S1) identificada durante o processo de otimização apresenta uma composição que possibilitou uma redução de aproximadamente 82% do consumo total de energia por climatização, sendo 92% referente ao consumo inicial por aquecimento e 76% por refrigeração, respectivamente com 0,23 kWh/m².ano e 1,12 kWh/m².ano, algo muito próximo ao ponto ótimo. Nesse caso, onde os consumos de ambas as funções objetivo são relativamente próximos, é possível observar que o algoritmo foi capaz de direcionar quase todas as soluções para uma região muito próxima à Fronteira de Pareto e, no caso do consumo por aquecimento, apenas uma solução apresenta-se dispersa na representação do gráfico, onde a convergência das demais soluções em direção ao ponto ótimo pode ser observada.

Essa redução é ocasionada por uma edificação com um envelope térmico isolado, com 7 centímetros (cm) de isolante nas paredes externas e 8 cm na cobertura. As paredes são em cores escuras, com absorptância igual a 0,8, e com uma cobertura com absorptância solar igual a 0,4. Para a ZB1, a melhor solução da tipologia padrão não apresenta isolamento para o sistema de piso e possui a fachada com maior envidraçamento para a orientação Oeste.

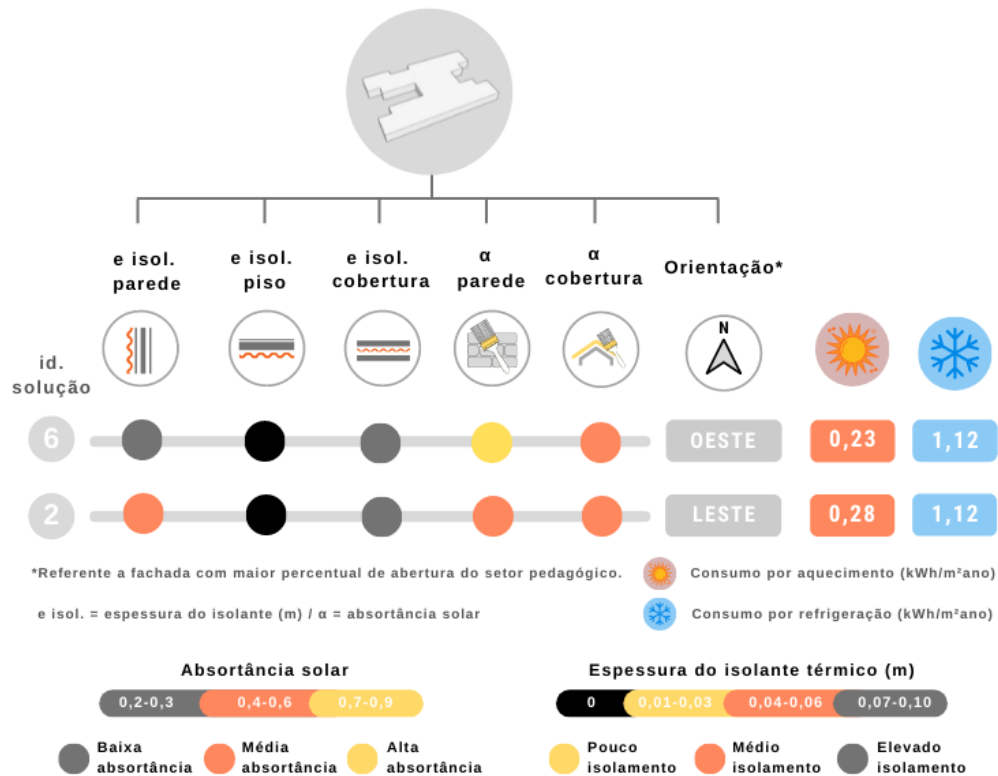
Figura 22: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Padrão na Zona Bioclimática 1



Fonte: Autora (2021).

A Fronteira de Pareto foi composta por 21 soluções, sendo 2 destas selecionadas pelo critério definido para as análises. A composição dessas soluções é representada pela Figura 23, onde o nível de isolamento térmico de cada uma das variáveis foi simplificado por limites e organizado por cores, visando o melhor entendimento das análises. Na representação da espessura do isolante térmico, a cor cinza ilustra o elevado isolamento da envoltória, com espessuras entre 7 e 10 cm, a cor laranja o médio isolamento, com variação de 4 a 6 cm de espessura e o amarelo que simboliza as soluções com pouco isolamento, com espessuras de 1 a 3 cm. A cor preta representa a ausência de isolamento na composição. No caso da absorptância solar a lógica é a mesma, a cor cinza representa os baixos valores de absorptância (0,2 e 0,3), o laranja representa os valores médios, com absorptâncias entre 0,4 e 0,6, e, por fim, o amarelo representa absorptâncias entre 0,7 e 0,9.

Figura 23: Caracterização das soluções seleccionadas para a tipologia Padrão com implantação na Zona Bioclimática 1



Fonte: Autora (2021).

Ainda que sejam observadas diferentes orientações, as soluções apresentam padrões compositivos semelhantes e mínima diferença de consumo de energia. Na solução 6, onde a fachada com maior percentual de abertura envidraçada é direccionada a orientação Oeste, a espessura do isolante é elevada, o que dificulta maiores trocas com o meio externo. Orientada à Leste, a solução 2 apresenta médio isolamento, com 6 cm de isolante térmico, onde observa-se a indicação de revestimentos com absorvância alta na parede mais isolada e média na parede menos isolada. Os demais parâmetros apresentam os mesmos atributos, cobertura isolada com absorvâncias em valores médios e sem a necessidade de isolamento no piso.

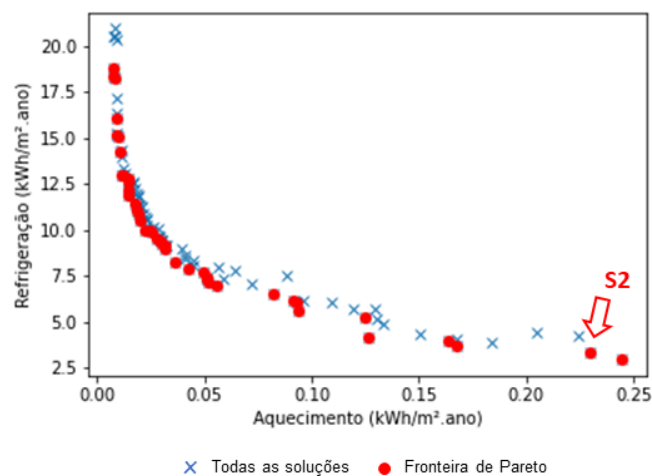
Apesar do algoritmo direccionar a fachada com maior percentual de abertura envidraçada para orientações que recebem grande intensidade de radiação solar (Leste e Oeste), a principal estratégia utilizada foi o aumento da espessura do material isolante da cobertura e a inserção do isolamento nas paredes externas. No verão, quando as temperaturas externas estão mais elevadas, o envelope opaco isolado dificulta os ganhos por condução e reduz a necessidade do uso de climatização para refrigeração dos espaços. Nesse caso, a presença de cores escuras em paredes

isoladas pode demonstrar que essa variável pouco influência nos ganhos por condução do sistema.

4.1.2.2. Tipologia Central

Apesar do modelo equivalente à tipologia Central apresentar maior consumo inicial através da simulação preliminar, a otimização multiobjetivo possibilitou melhores índices de redução do que aqueles que foram observados no caso da tipologia padrão, onde o consumo inicial já é baixo. A Fronteira de Pareto foi formada por um maior número de soluções, especificamente 42. Destas, foram selecionadas para análise apenas 2, visto que as demais apresentaram valores demasiadamente superiores à melhor solução (S2), como pode ser observado na Figura 24 através da plotagem dos resultados pelo gráfico da Fronteira de Pareto.

Figura 24: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Central na Zona Bioclimática 1



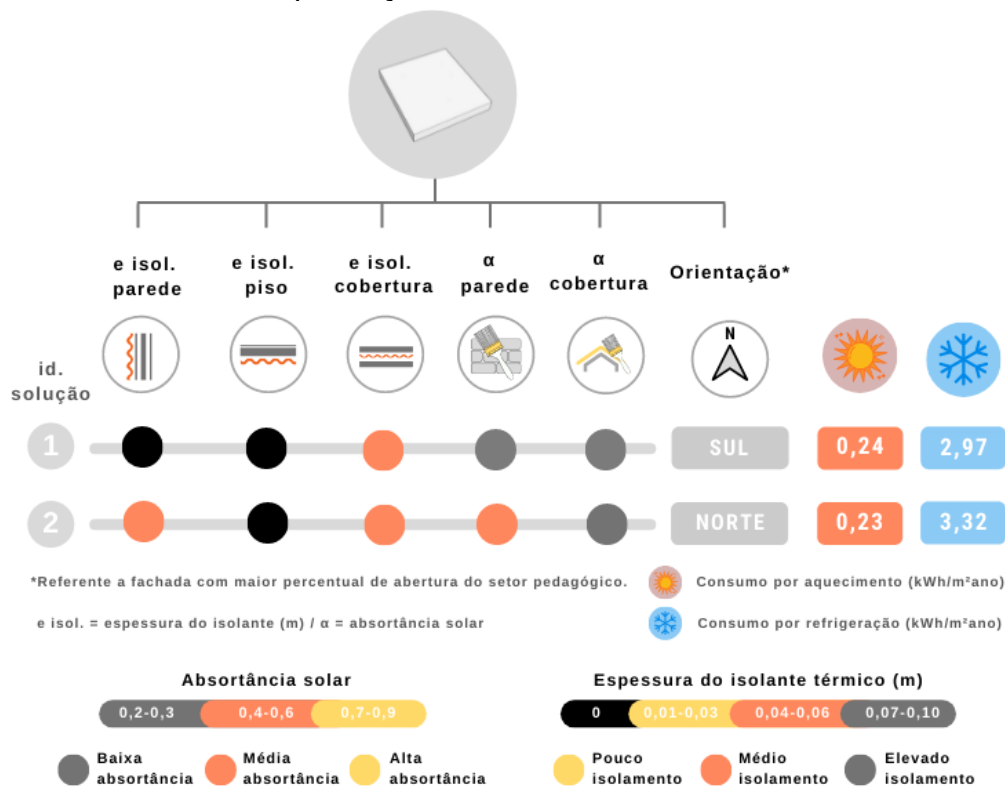
Fonte: Autora (2021).

A solução com menor somatório entre as funções-objetivo (S2) consome 2,97 kWh/m².ano de energia para refrigeração e 0,24 kWh/m².ano para aquecimento, o que representa cerca de, respectivamente, 84% e 81% de redução em relação ao consumo inicial da tipologia.

As soluções de análise dividem-se entre as orientações Sul e Norte (Figura 25). Além da ausência de isolamento no piso, a espessura do isolamento e a absorvância solar da cobertura são parâmetros que também se mantêm semelhantes para ambas

as composições. Quando a edificação é orientada a Sul, as paredes externas não necessitam de isolamento e apresentam a indicação de materiais de baixa absorvência. Quando a edificação é orientada à Norte, a composição das paredes externas é semelhante as que foram apresentadas anteriormente para tipologia padrão voltada à Leste e devem possuir espessura média de isolante e absorvência solar entre 0,4 e 0,6.

Figura 25: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Central com implantação na Zona Bioclimática 1



Fonte: Autora (2021).

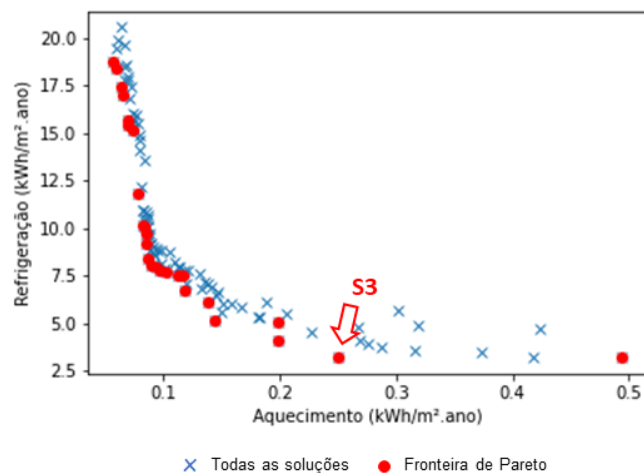
Essa tipologia apresenta a menor área de envoltória onde, consequentemente, as trocas por condução com o meio exterior também devem ser menores, o que pode justificar a ausência de isolante térmico nas paredes externas da melhor solução. Essa estratégia também pode estar relacionada com a possibilidade de resfriamento da edificação durante o período não ocupado, quando as temperaturas externas são menores e a composição facilita a troca do calor interno com o meio externo. Por outro lado, essa mesma composição apresenta baixas absorvências, indicando que devem ser utilizados materiais refletivos que, nessa situação, irão possibilitar a redução das temperaturas superficiais do edifício, reduzindo a necessidade do uso de refrigeração durante o período ocupado. Pode-se observar ainda que, possivelmente, os ganhos

pelo sistema de cobertura sejam maiores, já que o mesmo se mantém com elevadas espessuras de isolante térmico e baixos/médios coeficientes de absorção solar.

4.1.2.3. Tipologia em Fita

A tipologia em Fita apresentou um consumo 86% menor do que o que foi observado na simulação preliminar. Ao total, 26 soluções passaram a fazer parte da Fronteira de Pareto (Figura 26) e, entre elas, apenas 2 foram selecionadas pelo critério de análise, sendo 3,47 kWh/m².ano o consumo por climatização artificial total da melhor solução (S3).

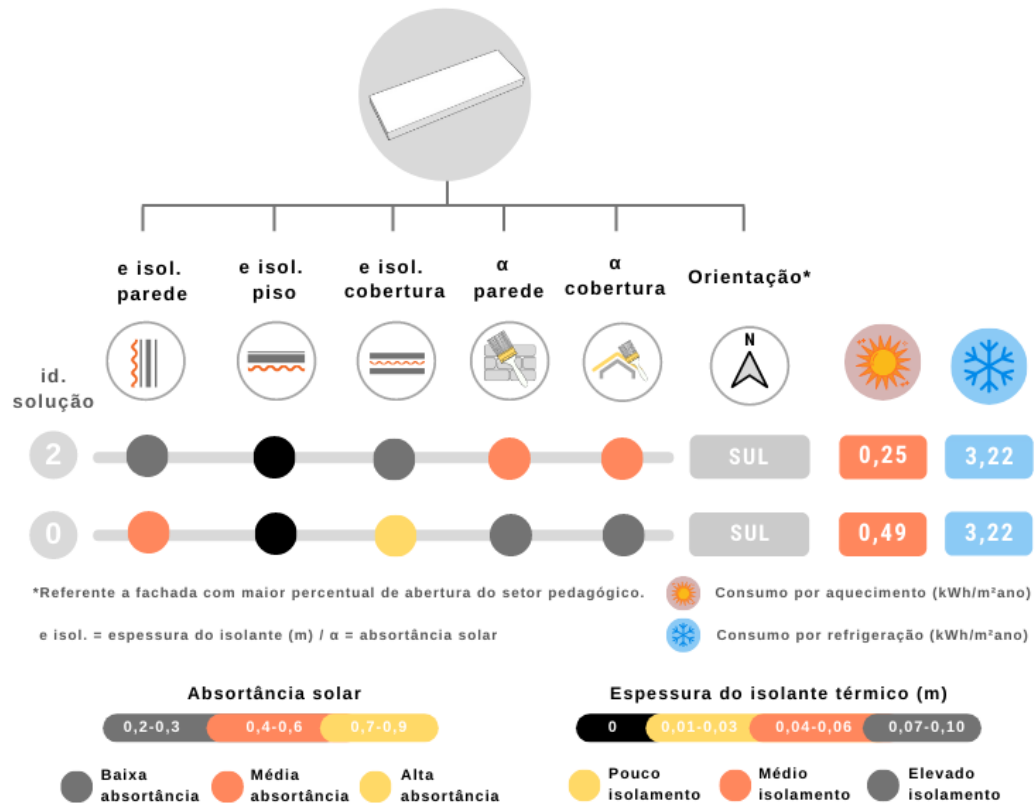
Figura 26: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia em Fita na Zona Bioclimática 1



Fonte: Autora (2021).

Ambas as soluções apresentaram o mesmo consumo por refrigeração e pouca diferença no que se refere ao consumo por aquecimento. Os resultados apresentados pela Figura 27 ressaltam o que foi mencionado pela revisão de literatura e demonstram o vínculo entre as variáveis que compõem o edifício. Nessa situação, o comportamento das composições é semelhante e os valores variam em função do nível de isolamento da edificação.

Figura 27: Caracterização das soluções seleccionadas para a tipologia em Fita com implantação na Zona Bioclimática 1



Fonte: Autora (2021).

Quando os sistemas de vedação apresentam elevada espessura de isolante térmico, os valores referentes a absorptância solar devem variar entre 0,4 e 0,6. Exatamente o inverso é observado na segunda opção, onde quando o isolante que compõe as paredes externas e a cobertura varia entre 1 e 6 cm (pouco e médio isolamento), as cores que cobrem estes sistemas devem possuir baixa absorptância. Em ambos os casos não se faz necessário o isolamento no piso e a fachada com maior percentual de abertura é voltada a Sul.

Considerando que essa implantação se refere a uma escola, sabe-se que em uma ZB fria o direcionamento de salas de aula para orientação sul pode representar uma limitação da otimização, o que demonstra a importância de uma cuidadosa avaliação dos resultados obtidos pela ferramenta.

Nesse caso, onde a escola é utilizada apenas durante o dia, quando as temperaturas são mais altas, a carga interna é elevada e existe maior necessidade de refrigeração dos espaços, a estratégia do algoritmo foi direcionar a fachada com maior PAF a orientação com menor incidência solar visando atingir o objetivo para o qual foi

programado. Essa situação ocorre em função de duas limitações, a ausência de dispositivos de sombreamento em todas as fachadas do edifício e a falta de análise cognitiva, já que o algoritmo busca a melhor solução apenas para os objetivos definidos inicialmente para análise.

Após passar pelo processo de otimização multiobjetivo, a tipologia em Fita foi a que obteve o maior índice de redução de energia para o contexto climático da ZB1. Inicialmente, essa composição apresentou o maior consumo por refrigeração e possuía a fachada com maior percentual de abertura envidraçada direcionada a orientação Norte. Através da análise desses resultados pode-se observar que, apesar de não ser a estratégia ideal a ser utilizada em ambientes de permanência prolongada, uma das técnicas do otimizador foi o direcionamento dessa mesma fachada para orientação Sul, quando a incidência solar é mínima. Por esse motivo, constata-se a ocorrência de um pequeno acréscimo no consumo referente ao aquecimento do edifício, o que aparentemente não foi levado em consideração durante o processo de otimização pela grande influência do eixo referente à refrigeração dos espaços.

Além disso, a composição das soluções indica o comportamento interdependente dos parâmetros de análise. Elevadas espessuras de isolante térmico nas paredes externas e na cobertura apresentam revestimentos com absorvâncias médias, quando as temperaturas superficiais do edifício serão maiores. Por outro lado, a redução do isolamento indica a necessidade de materiais com baixa absorvância, quando pode ocorrer a redução dos ganhos de calor solar do edifício, sem que necessariamente sejam alteradas suas perdas.

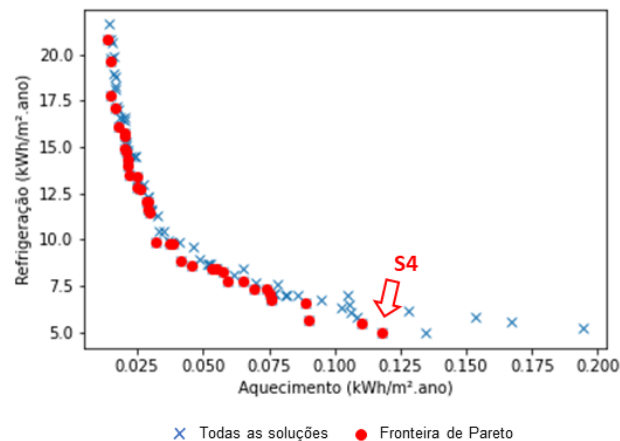
4.1.2.4. Tipologia L

Na tipologia L, a Fronteira de Pareto foi composta por 38 soluções (Figura 28), onde 3 foram selecionadas para análise. Comparadas às demais tipologias, essas soluções foram as que apresentaram o maior consumo de energia para a ZB1, sendo que a melhor solução encontrada pela otimização multiobjetivo apresenta um consumo superior ao identificado pela simulação preliminar para a tipologia Padrão.

A solução mais eficiente consome 4,98 kWh/m².ano por refrigeração e 0,12 kWh/m².ano por aquecimento (S4) e representa uma redução de, respectivamente,

81% e 43%. O menor índice de redução referente ao aquecimento da edificação é justificado pelo seu consumo inicial, que já é mínimo.

Figura 28: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia L na Zona Bioclimática 1

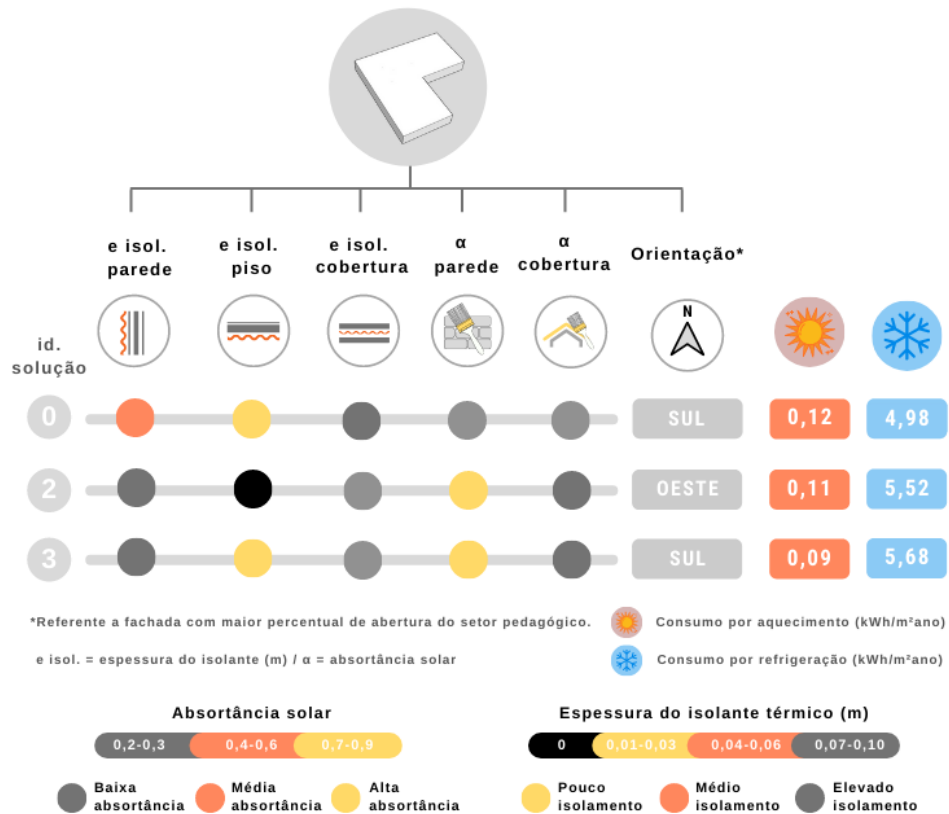


Fonte: Autora (2021).

Caracterizada pelas soluções menos eficientes no contexto climático discutido, a tipologia L apresenta elevado ganho de calor e maior número de acionamentos do sistema de climatização ao longo do período de ocupação. De forma unânime, estas soluções apresentam o sistema de cobertura bem isolado, com elevada espessura de isolante térmico e baixos valores de absorvância solar. Assim como na discussão anterior, pode-se observar a relação entre as duas variáveis de otimização das paredes externas, onde o isolamento resulta dos ganhos gerados pela definição da absorvância solar.

Das três soluções apresentadas, duas são voltadas a Sul, quando se observa pela primeira vez a presença de material isolante no sistema de vedação referente ao piso. A terceira conta com a orientação Oeste, quando a intensidade de radiação solar é alta e as paredes externas e a cobertura recebem elevada espessura de isolante térmico. Nessa composição, possivelmente o piso auxilie com a retirada do calor interno o dissipando para o solo, pois o isolamento para este caso não é requisitado (Figura 29).

Figura 29: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia L com implantação na Zona Bioclimática 1

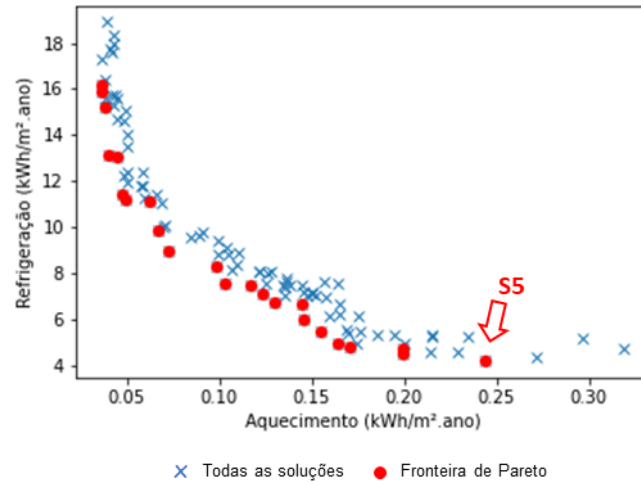


Fonte: Autora (2021).

4.1.2.5. Tipologia Radial

Entre as demais tipologias, a Radial foi a que apresentou o menor índice de redução referente às funções objetivo. A melhor solução (S5) totaliza um consumo por climatização de 4,45 kWh/m².ano, sendo 4,21 kWh/m².ano referente apenas ao resfriamento da edificação. Esses valores representam uma edificação 78% mais eficiente que a mesma tipologia sem a otimização multiobjetivo, no entanto, assim como as demais tipologias, ainda possui um consumo maior que a tipologia padrão. A Figura 30 apresenta as 23 soluções que compõem a Fronteira de Pareto.

Figura 30: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Radial na Zona Bioclimática 1

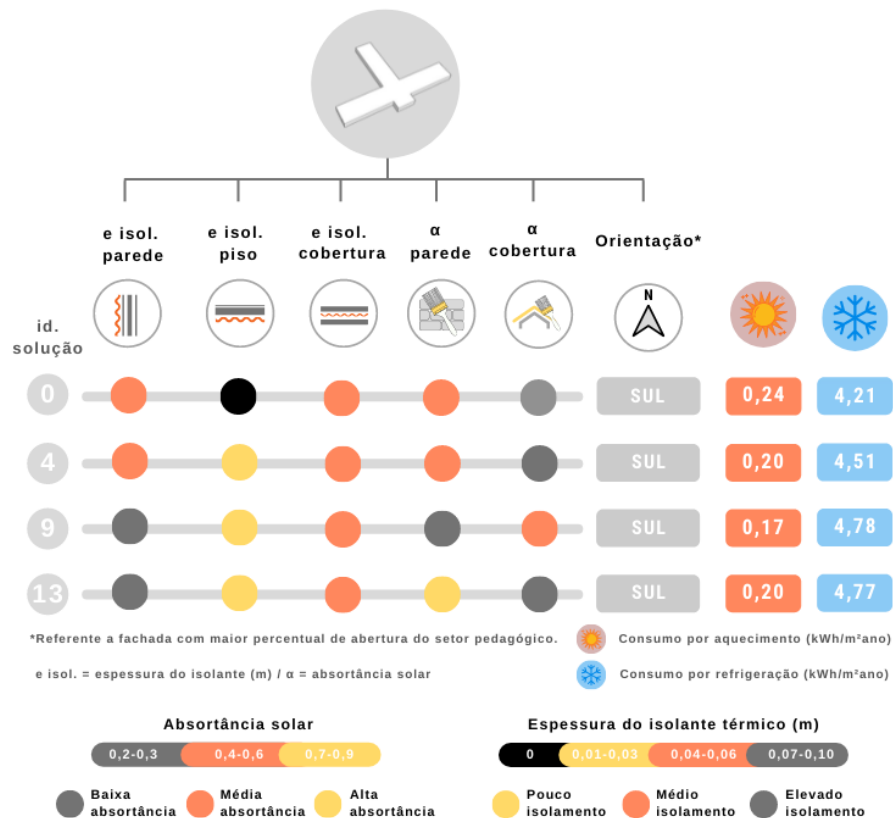


Fonte: Autora (2021).

Através do critério de análise foram selecionadas 4 soluções para caracterização de suas composições (Figura 31). A partir desses resultados observa-se que, nesse edifício, o parâmetro de orientação não foi um dos mais influentes para o desempenho da edificação. Todas as soluções apresentam a mesma orientação e a composição das demais variáveis é distinta, onde o único parâmetro que se mantém constante é a espessura do isolante térmico do sistema de cobertura.

Essa tipologia apresenta as maiores trocas por condução com o meio externo e, de maneira geral, observa-se que as soluções identificadas podem ser divididas em dois grupos, onde o primeiro necessita de médio isolamento nos sistemas de parede e cobertura e, em contrapartida, possui revestimento com materiais de média e baixa absorvância, que reduzem a absorção de calor nas superfícies. O segundo, com elevada espessura de isolante térmico nas paredes externas, ao aumentar a absorvância solar desse sistema permite também o aumento das temperaturas superficiais da cobertura através de um coeficiente de absorvância solar médio. Em contrapartida, ao reduzir a absorvância solar das paredes, indica cores com baixa absorvância para cobertura, agora permitindo o aumento das temperaturas superficiais através do sistema de vedação vertical, demonstrando que ambas as composições podem ser eficientes, desde que considerem a interrelação existente entre as variáveis que as compõem.

Figura 31: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Radial com implantação na Zona Bioclimática 1



Fonte: Autora (2021).

4.2. Zona Bioclimática 2

4.2.1. Simulação preliminar

Na simulação preliminar para a Zona Bioclimática 2 (ZB2), todos os modelos apresentaram consumos superiores a ZB anterior, tanto para aquecimento quanto para refrigeração. Além de apresentar o menor IC, assim como na ZB1, a tipologia Padrão é a que apresenta o maior consumo referente à aquecimento. Nessa situação o setor administrativo é paralelo à localização do pedagógico (Norte), o que o mantém voltado a Sul, onde provavelmente exista maior necessidade de aquecimento em períodos mais frios, explicando o fenômeno. Apesar disso, a tipologia ainda é a mais eficiente, apresenta o menor somatório entre ambos objetivos, e consome cerca de 21,87 kWh/m².ano.

Para refrigeração, a tipologia L é a que apresenta menor eficiência, consumindo 47,12 kWh/m².ano. Considerando a grande amplitude térmica observada na ZB em questão, esses resultados devem ocorrer em função da organização arquitetônica da solução e do parâmetro de orientação solar. Nesse caso, quando a maior fachada do

setor pedagógico é inicialmente voltada a Norte, as demais fachadas do setor e ainda o espaço referente ao setor administrativo são voltados a orientação Oeste, que recebem radiação solar durante todo o dia e, necessariamente, utilizam mais vezes do sistema de refrigeração durante os períodos mais quentes.

Por outro lado, a orientação solar também auxilia na redução do consumo referente ao aquecimento do edifício em períodos mais frios, quando os ambientes são expostos ao sol da tarde e tendem a ser mais quentes, conforme indicam os resultados. Através dos resultados plotados na Figura 32, pode-se observar que as demais tipologias apresentam resultados semelhantes para ambas as funções, onde a eficiência das soluções é definida pelo consumo referente a refrigeração dos edifícios, o que ocorre devido a desproporcionalidade entre os objetivos referentes à climatização final do edifício.

Figura 32: Representação do conjunto de resultados obtidos através da simulação preliminar para Zona Bioclimática 2



Fonte: Autora (2021).

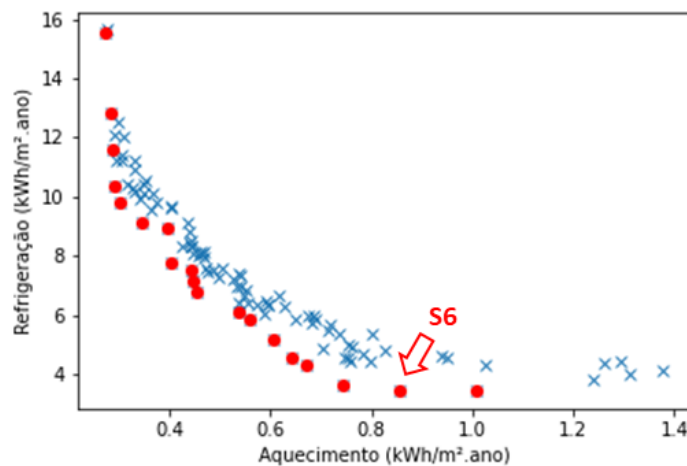
Cabe ressaltar que as paredes externas não apresentam nenhum tipo de isolante térmico e a cobertura possui vedação com telha metálica com preenchimento em PIR, o que mantém a envoltória mais isolada e reduz os ganhos térmicos provenientes desse sistema.

4.2.2. Simulação evolutiva

4.2.2.1. Tipologia Padrão

Na ZB2, a tipologia Padrão apresenta funções objetivo com consumos superiores aos observados na ZB1. No entanto, o índice de redução alcançado pela ferramenta foi próximo ao observado anteriormente, a melhor solução (S6) corresponde a solução id. 0 e apresenta uma composição capaz de reduzir aproximadamente 80% do consumo total de energia por climatização, sendo 86% dessa redução referente ao consumo inicial por aquecimento e 78% por refrigeração, respectivamente com 0,85 kWh/m².ano e 3,47 kWh/m².ano (Figura 33). Nessa situação, onde ambos objetivos apresentam próximos índices de redução, não é possível notar uma relação de dominância entre as funções e as soluções se distribuem de maneira uniforme ao longo da Fronteira, onde poucas soluções apresentam-se dispersas em relação ao ponto ótimo.

Figura 33: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Padrão na Zona Bioclimática 2



Fonte: Autora (2021).

A Fronteira de Pareto foi composta por 19 soluções, onde apenas 4 foram selecionadas pelos critérios de análises. Como pode ser observado na Figura 34, a composição dessas soluções foi representada assim como as anteriores, com o nível de isolamento simplificado por limites e cores.

O comportamento das soluções é de certa forma semelhante e podem ser observados padrões, como no caso da orientação solar. Para essa tipologia, duas

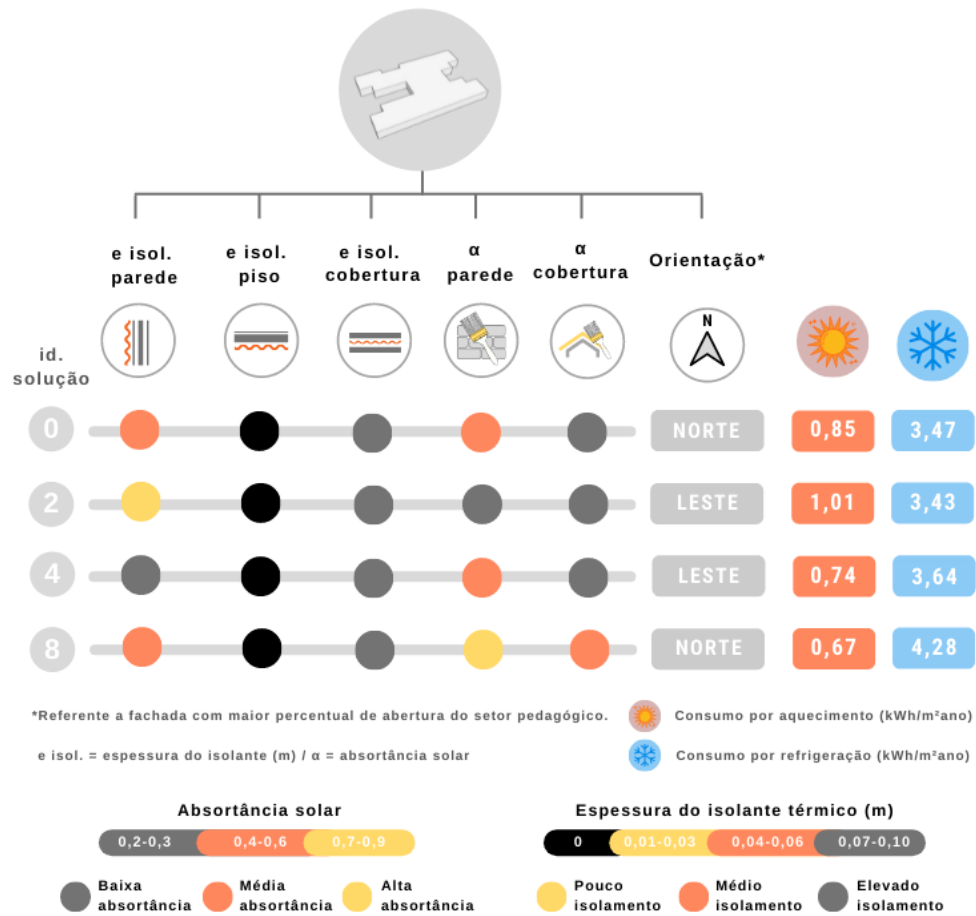
soluções apresentam a fachada com maior porcentagem de abertura envidraçada à Norte e outras duas à Leste. O piso e a cobertura apresentam a mesma configuração para todas as soluções, o primeiro não possui isolamento térmico e a cobertura deve ser bem isolada, com 7 a 10 cm de isolante. Por esse motivo, observa-se que as soluções são caracterizadas pelos parâmetros relacionados à composição das paredes externas e absorvência solar da cobertura.

Na orientação Norte podem ser observadas duas soluções, uma delas com capacidade média de isolamento, isolante com espessura entre 4 e 6 cm e absorvência solar entre 0,4 e 0,6. A segunda solução apresenta a mesma composição de isolante nas paredes externas, com coeficientes de absorvência solar de 0,7 a 0,9, o que mantém o sistema menos isolado termicamente, já que o contato da radiação solar com materiais de alta absorvência ocasionam o aumento das temperaturas superficiais do sistema de vedação. Entre as soluções selecionadas, esta é a que apresenta o maior consumo por refrigeração e o menor por aquecimento.

Na orientação Leste, quando as paredes externas apresentam pequenas espessuras de isolamento, a absorvência solar cumpre o papel isolante e deve possuir cores e materiais com baixas absorvências e coeficientes entre 0,2 e 0,3, quando possibilitam a redução da temperatura superficial do edifício e minimizam a necessidade do uso de climatização, já que o controle da incidência direta da radiação solar sobre a envoltória corresponde a uma forma eficaz para redução dos ganhos de calor de um edifício.

Na segunda composição para a mesma orientação solar a lógica é semelhante, no entanto, o comportamento das variáveis é inverso. A parede com elevado isolamento apresenta absorvência solar média, com coeficientes entre 0,4 e 0,6, quando o material isolante reduz as trocas com o meio e o material de revestimento propicia maior absorção da radiação solar incidente, o que, de certa forma, resulta no equilíbrio do sistema de vedação.

Figura 34: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Padrão com implantação na Zona Bioclimática 2



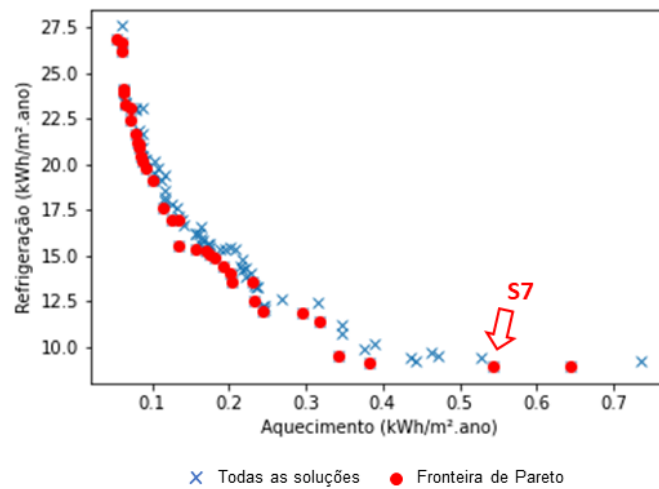
Fonte: Autora (2021).

4.2.2.2. Tipologia Central

Na tipologia Central, a Fronteira de Pareto foi formada por 37 soluções (Figura 35), onde 4 foram selecionadas para análise. Devido ao consumo inicial por refrigeração ser muito superior ao de aquecimento, é possível observar uma concentração maior de soluções próximo a este eixo, onde os valores referentes a função objetivo que representa o consumo por aquecimento apresentam uma pequena variação entre as soluções que fazem parte do conjunto de Pareto.

A otimização possibilitou uma redução de cerca de 77% do consumo inicial da mesma tipologia e 57% da tipologia padrão. No entanto, apesar de ambas as funções terem atingido o objetivo da análise, a melhor solução desse caso consome mais de 50% que a solução otimizada da tipologia padrão, onde o consumo inicial era menor e o processo de otimização foi mais eficiente.

Figura 35: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Central na Zona Bioclimática 2



Fonte: Autora (2021)

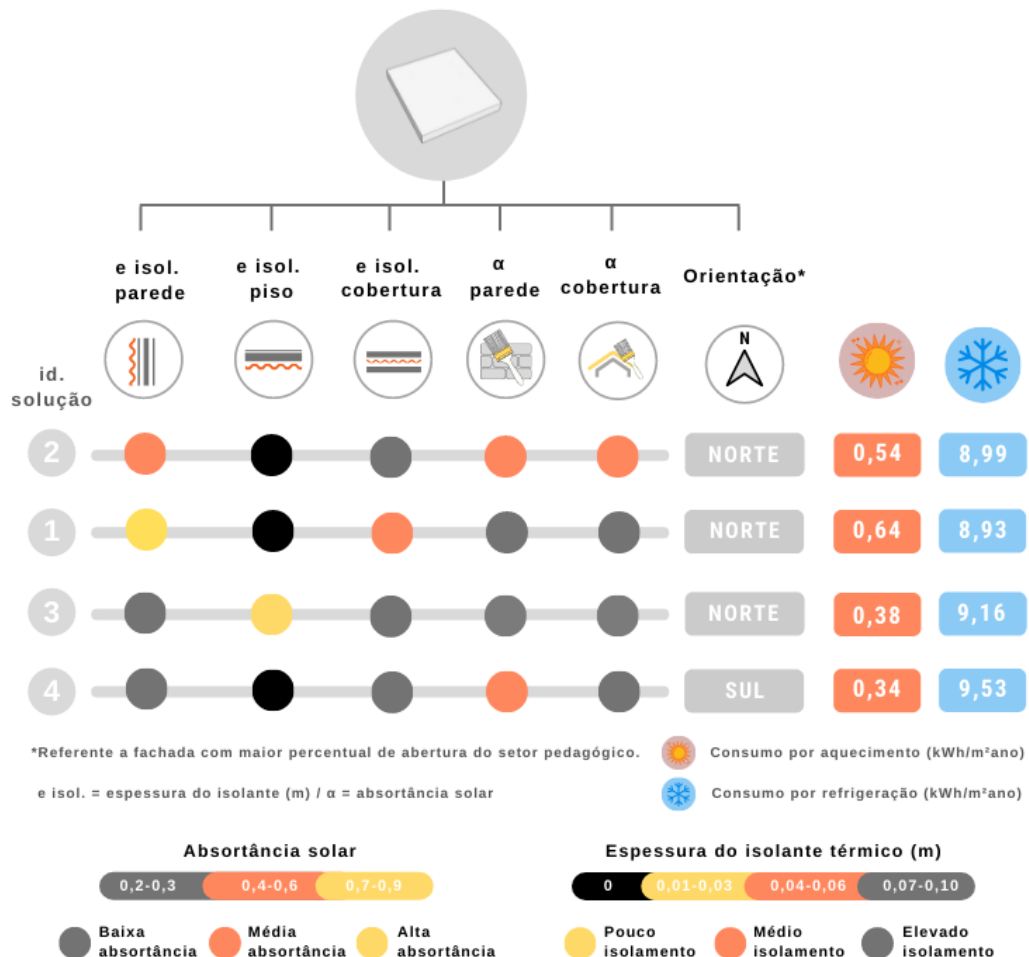
A melhor solução (S7) consome 8,99 kWh/m².ano para refrigeração e 0,54 kWh/m².ano para aquecimento, o que representa um consumo 76% e 84% inferior ao observado inicialmente. Esses valores representam uma edificação voltada à Norte, sem a presença de elemento isolante no piso, paredes externas com médio isolamento e coeficientes médios de absorção. A cobertura é isolada, com isolante térmico entre 7 e 10 cm e a absorção solar deve variar entre 0,4 e 0,6.

As demais soluções dividem-se entre as orientações Norte e Sul e nenhum parâmetro se mantém constante em todas as soluções. A Norte, pode-se observar a tendência de cores escuras, tanto para as paredes, quanto para a cobertura, quando existe maior necessidade do controle da incidência direta da radiação solar sobre a envoltória. Nesta situação, são avaliados dois tipos de soluções, o primeiro que representa um sistema menos isolado, com pouco isolante térmico nas paredes externas e médio isolamento na cobertura e, o segundo com elevada espessura de material isolante, tanto nas paredes quanto na cobertura. Observa-se ainda a presença do material isolante no piso, o que até então era ausente nas demais soluções.

Devido ao consumo por resfriamento ser maior, pode-se observar também uma solução onde o setor pedagógico é voltado a Sul. O sistema das paredes externas e da cobertura permanecem isolados e as paredes devem possuir cores com média absorção, quando a temperatura das superfícies poderá ser elevada com a mínima

incidência solar que é observada na orientação. A Figura 36 apresenta a composição das soluções identificadas pela análise.

Figura 36: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Central com implantação na Zona Bioclimática 2



Fonte: Autora (2021).

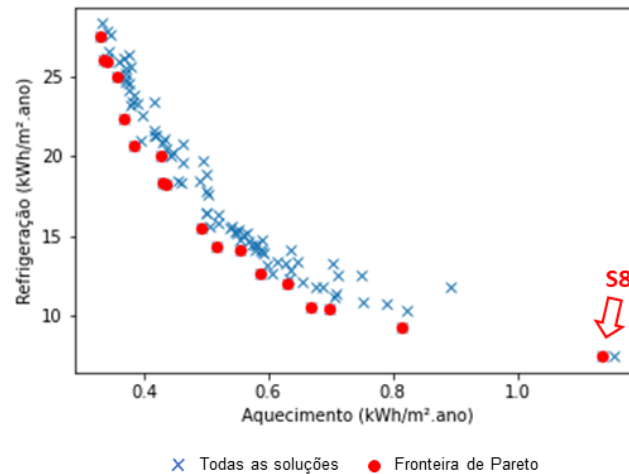
4.2.2.3. Tipologia em Fita

Na otimização da tipologia em Fita, a Fronteira de Pareto foi composta por 18 soluções, onde apenas uma foi selecionada pelo critério de análise, visto que as demais apresentaram valores muito superiores a melhor solução (S8), como representa a Figura 37.

Assim como na ZB1, essa tipologia foi a que apresentou o maior índice de redução no contexto climático da ZB2, representando apenas 19% do consumo

inicialmente necessário para climatização da edificação, utilizando 7,43 kWh/m².ano para refrigeração e 1,13 kWh/m².ano para aquecimento.

Figura 37: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia em Fita na Zona Bioclimática 2

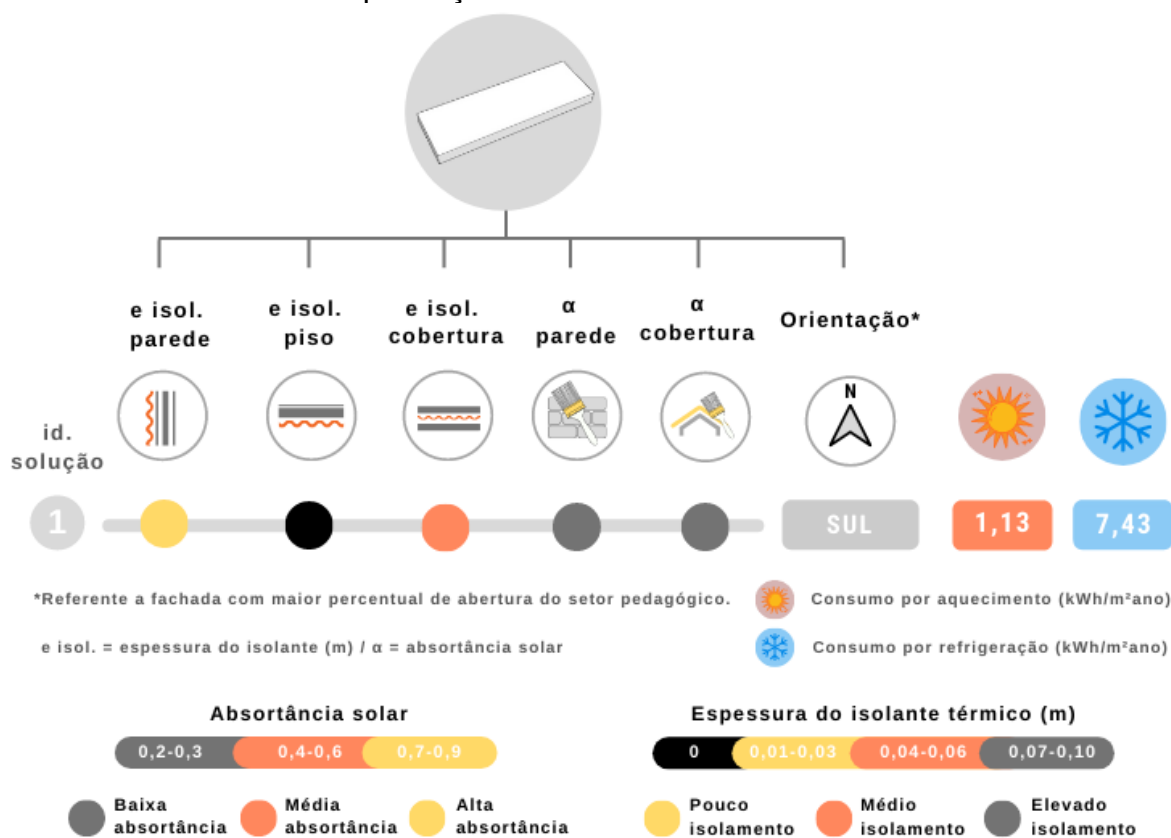


Fonte: Autora (2021).

Através da Figura 38 pode-se observar que a melhor solução foi uma das primeiras identificadas durante o processo de otimização (id. 1). Assim como no caso da ZB anterior, para essa tipologia a principal estratégia do otimizador foi o direcionamento do setor pedagógico para orientação Sul, provavelmente devido a redução da incidência solar sobre a envoltória. Essa solução representa uma edificação com sistema de paredes externas pouco isolado e uma cobertura medianamente isolada. A otimização indica que a absorção solar destes sistemas deve cumprir o papel de redução das temperaturas superficiais do edifício, onde são observados coeficientes de absorção solar que variam entre 0,2 e 0,3, representando cores e materiais altamente refletivos.

Assim como para grande maioria das soluções identificadas durante o processo de otimização, é possível que o sistema de vedação referente ao piso auxilie na perda do calor interno para o solo, já que não houve a necessidade de material isolante no piso.

Figura 38: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia em Fita com implantação na Zona Bioclimática 2

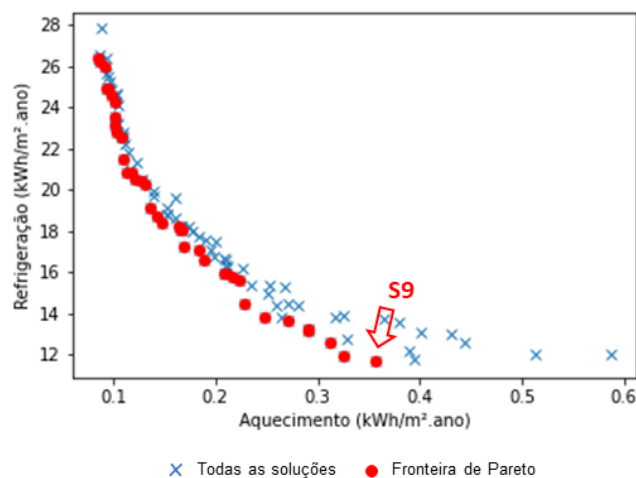


Fonte: Autora (2021).

4.2.2.4. Tipologia L

De forma semelhante ao que já foi observado, a Fronteira de Pareto foi composta por 38 soluções (Figura 39). Destas soluções, 4 foram selecionadas para caracterização das variáveis de otimização. Assim como nas demais tipologias, a maior redução ficou a cargo do eixo responsável pelo aquecimento, onde foi alcançado um consumo 86% inferior ao que foi observado pela simulação preliminar. O segundo objetivo, referente à refrigeração, reduz cerca de 75% e, apesar dessa redução ser significativa, as soluções da tipologia L foram as menos eficientes para ZB2, superando cerca de 64% o consumo alcançado para tipologia padrão.

Figura 39: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia L na Zona Bioclimática 2



Fonte: Autora (2021).

A Figura 40 apresenta as características das melhores soluções, onde podem ser observadas três composições de variáveis para a edificação voltada a Leste e uma a Sul. A caracterização da espessura do isolante térmico para as paredes externas, cobertura e absorvência da cobertura se mantém a mesma para todas as soluções, enquanto os parâmetros que são variados referem-se a absorvência solar das paredes externas e o isolamento do piso.

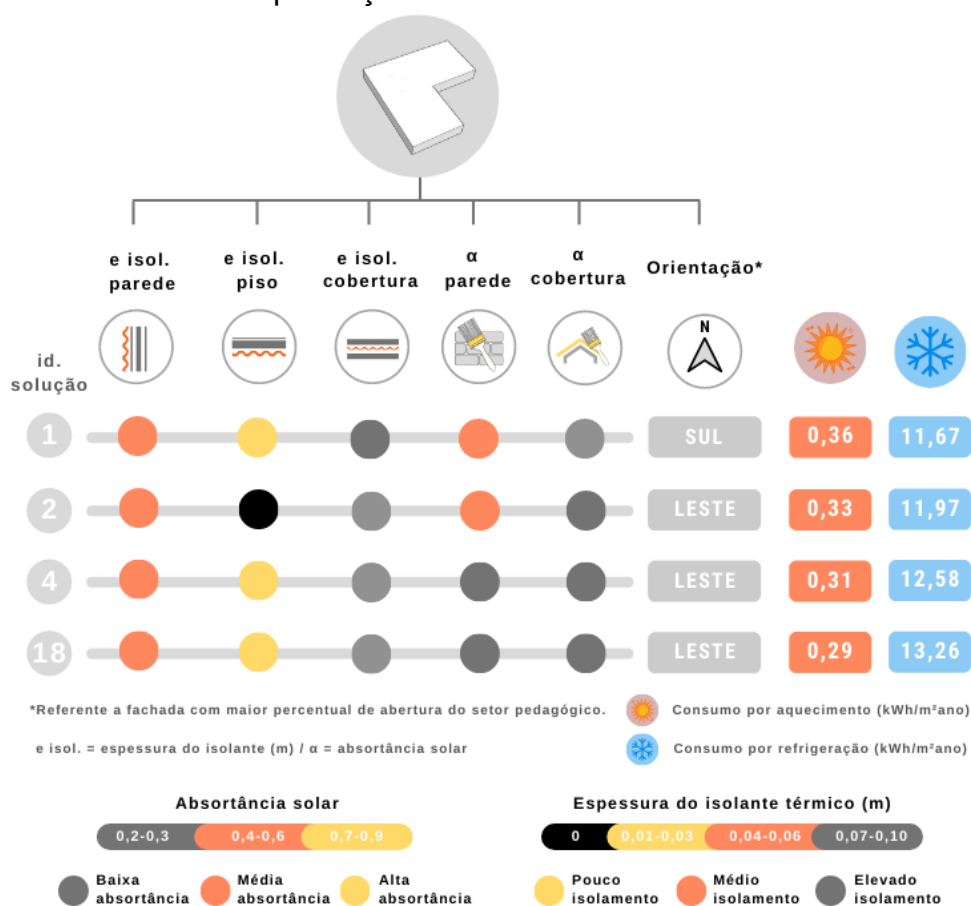
A melhor solução da análise (S9) reflete uma edificação com a maior fachada voltada a Sul, quando a incidência solar é menor e as paredes necessitam de um isolamento mediano, com espessura de isolante térmico entre 4 e 6 cm e absorvência solar com coeficientes que devem variar entre 0,4 e 0,6. Assim como em outros casos, os resultados permitem inferir que os ganhos referentes ao sistema de cobertura são maiores, já que o mesmo se mantém com elevada capacidade de isolamento ao decorrer de todas as soluções, onde ainda são indicadas vedações com baixa absorvência. O piso deve possuir isolante térmico entre 1 e 3 cm, reduzindo as trocas com o solo.

Das composições voltadas à Leste, duas apresentam exatamente a mesma composição da orientação anterior, paredes externas com média espessura de isolante (4 a 6 cm), cobertura bem isolada (7 a 10 cm), piso com pouco isolamento (1 a 3 cm) e paredes externas e coberturas revestidas por cores escuras, com absorvências entre 0,2 e 0,3. Apesar da similaridade, observa-se que para essa orientação o consumo referente ao resfriamento é maior, o que ocorre justamente

devido a orientação solar, quando a parede externa com maior percentual de área envidraçada é exposta a maiores ganhos relacionados a radiação solar.

A terceira solução apresenta uma composição semelhante a que foi observada para orientação Sul, no entanto não há a necessidade de material isolante no piso, o que deve contribuir com o processo de resfriamento do edifício, já que entre as soluções voltadas a Leste, essa é a que apresenta o menor consumo por refrigeração.

Figura 40: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia L com implantação na Zona Bioclimática 2



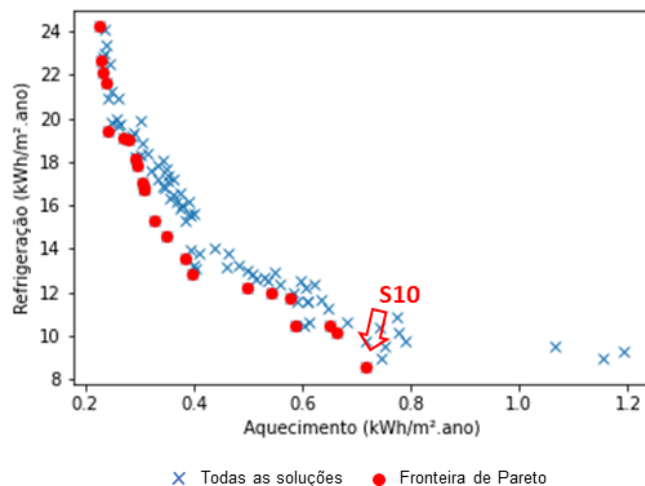
Fonte: Autora (2021).

4.2.2.5. Tipologia Radial

Na tipologia Radial, a Fronteira de Pareto foi composta por 23 soluções e, assim como no caso da tipologia em Fita, apenas uma solução foi selecionada para análise. A Figura 41 apresenta o gráfico de Pareto com os resultados alcançados pela simulação evolutiva e a melhor solução encontrada para a edificação (S10). Essa

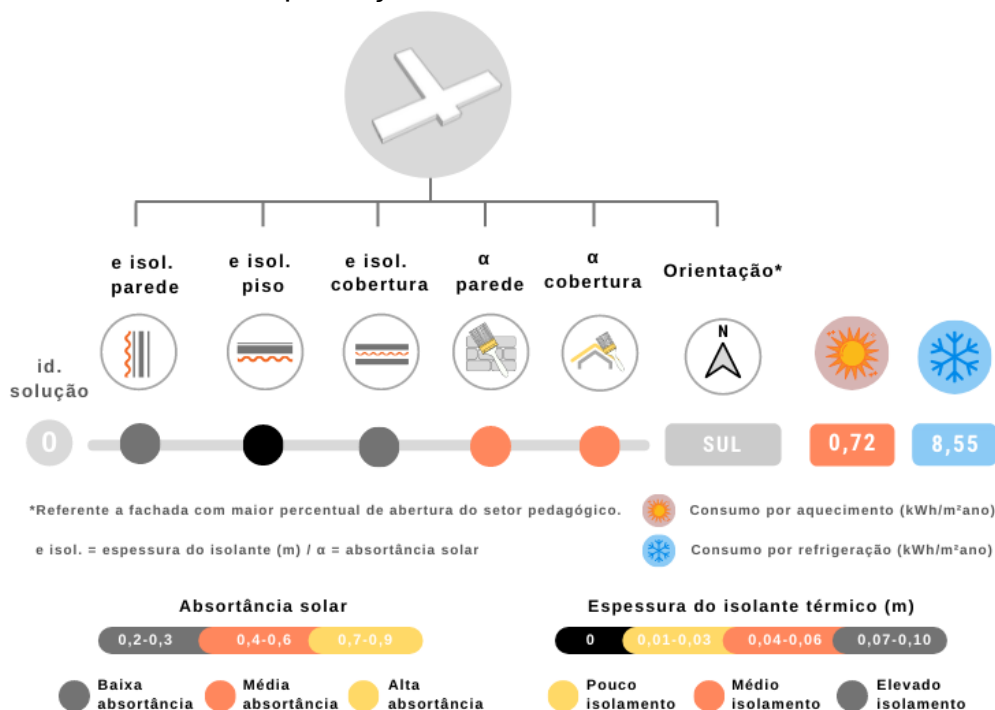
solução consome 8,55 kWh/m².ano por refrigeração e 0,72 kWh/m².ano por aquecimento.

Figura 41: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Radial na Zona Bioclimática 2



Fonte: Autora (2021).

Figura 42: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Radial com implantação na Zona Bioclimática 2



Fonte: Autora (2021).

Nessa tipologia, onde a área em contato com o meio exterior é maior, observa-se que a estratégia para redução do consumo por climatização foi a

inserção de elevadas espessuras de isolante térmico na composição das paredes externas e da cobertura, onde ainda ocorre o aumento dos coeficientes de absorção solar para ambos os sistemas (Figura 42).

4.3. Zona Bioclimática 3

4.3.1. Simulação preliminar

Na Zona Bioclimática 3 (ZB3), onde as temperaturas externas são mais elevadas, foram observados os menores consumos por aquecimento (Figura 43). Para refrigeração, os consumos foram inferiores aos observados na ZB2, que é caracterizada pela amplitude térmica, e superiores a ZB1, onde as temperaturas externas são menores. Assim como as demais ZBs, a tipologia Padrão é a que menos utiliza de climatização artificial para manter os ocupantes em conforto térmico durante o período de utilização da escola, chegando a 70% de inferioridade do consumo da tipologia menos eficiente. Apresenta também um consumo por aquecimento superior as outras quatro tipologias, ainda que, para este caso, esse valor não esteja tão distante dos demais.

Assim como na ZB1, a composição menos eficiente é a tipologia L, que necessita de 42,47 kWh/m².ano para sua climatização, onde apenas 0,12 kWh/m².ano refere-se ao seu aquecimento. Assim como já discutido, apesar de apresentar menor área que as demais tipologias, a situação arquitetônica dessa composição é a principal responsável pelo elevado consumo por refrigeração. Ao direcionar a fachada com maior percentual de abertura a orientação Norte, o restante do setor pedagógico e o setor administrativo são voltados a Oeste, quando a incidência de radiação solar é alta e o aquecimento desses espaços é recorrente.

Figura 43: Representação do conjunto de resultados obtidos através da simulação preliminar para Zona Bioclimática 3



Fonte: Autora (2021).

4.3.2. Simulação evolutiva

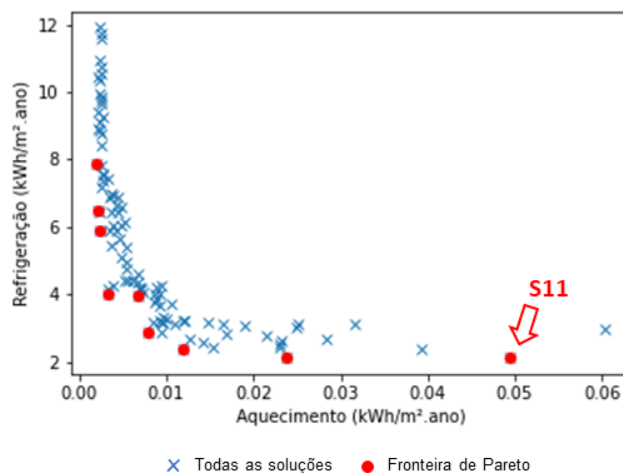
4.3.2.1. Tipologia Padrão

A Figura 44 representa o gráfico da Fronteira de Pareto com os resultados alcançados pela simulação evolutiva no contexto da tipologia Padrão implantada na ZB3. Com base nesses resultados, pode-se constatar que, apesar de todas as soluções convergirem em direção ao ponto ótimo, a Fronteira de Pareto não foi formada como o esperado. Provavelmente essa limitação ocorra devido ao consumo preliminar por aquecimento, que já era muito próximo ao ponto ótimo, quando pode haver a perda de soluções localizadas nas regiões extremas da Fronteira de Pareto.

No entanto, ainda assim ambas as funções-objetivo possibilitaram a redução do consumo de energia demandado pela tipologia padrão não otimizada. A melhor solução da análise, identificada como S11, apresenta uma composição de parâmetros que reduzem aproximadamente 82% do consumo total de energia por climatização. O consumo inicial por aquecimento foi reduzido 86% e por refrigeração 81%, representando respectivamente 0,05 kWh/m².ano e 2,12 kWh/m².ano. Nessa situação, o consumo por aquecimento foi praticamente zerado, o que indica que o algoritmo foi

capaz de direcionar as soluções para uma região muito próxima ao esperado, mesmo que a Fronteira de Pareto não apresente um formato linear.

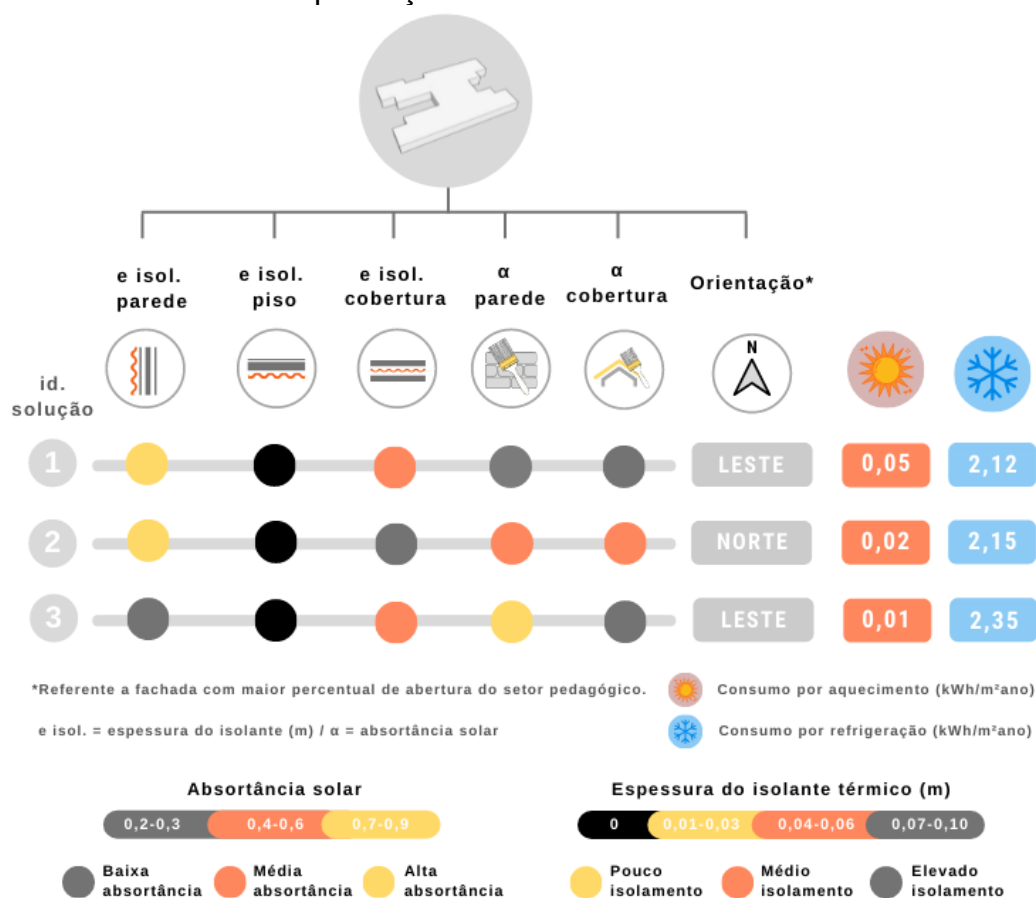
Figura 44: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Padrão na Zona Bioclimática 3



Fonte: Autora (2021).

Entre as 9 soluções identificadas, 3 foram selecionadas para análise (Figura 45). No contexto de implantação da ZB3, onde as temperaturas são mais elevadas, observa-se a cautela do otimizador em relação a utilização do material isolante nos sistemas de vedação. Nesse caso, a melhor solução é caracterizada por uma edificação com apenas 2 cm de isolante térmico nas paredes externas e 4 cm na cobertura. O setor pedagógico é voltado para orientação Leste e, consequentemente, o administrativo é direcionado a Oeste, devido a organização arquitetônica da tipologia. Considerando a grande intensidade de radiação solar dessas orientações, a absorvância solar foi utilizada como estratégia para redução do consumo de energia por refrigeração, onde os coeficientes de 0,2 auxiliam na redução das temperaturas superficiais dos sistemas de vedação. Assim como nas ZBs analisadas anteriormente, essa tipologia não necessita de isolamento térmico para o sistema de piso em nenhuma das soluções identificadas.

Figura 45: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Padrão com implantação na Zona Bioclimática 3



Fonte: Autora (2021).

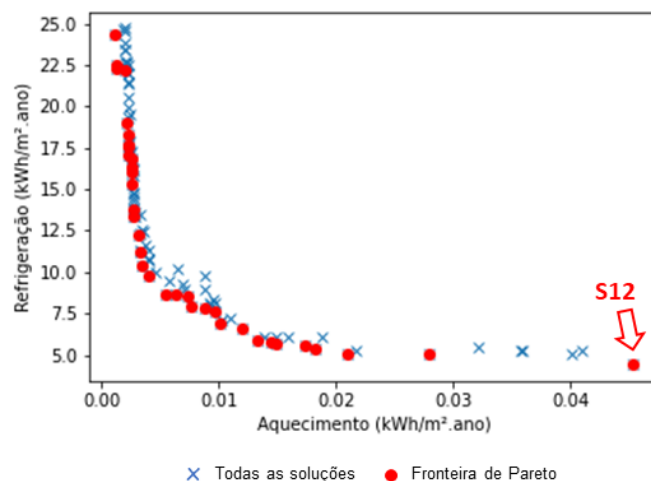
4.3.2.2. Tipologia Central

Na tipologia Central, a Fronteira de Pareto foi formada pelo maior número de soluções, totalizando 35 (Figura 46). Destas soluções, 3 foram selecionadas pelos critérios adotados no método. Assim como acontece em algumas tipologias apresentadas anteriormente, de forma mais evidente no caso dessa ZB, os valores encontrados no eixo referente à refrigeração são os que caracterizam a melhor solução, já que o consumo por aquecimento geralmente apresenta uma pequena variação entre as soluções que fazem parte do conjunto de Pareto.

Nessa situação, a otimização possibilitou uma redução de cerca de 76% do consumo inicial por aquecimento e 87% do consumo por refrigeração, sendo respectivamente 0,04 kWh/m².ano e 4,43 kWh/m².ano (S12). Apesar da melhor solução dessa tipologia apresentar um consumo por refrigeração superior ao alcançado pela tipologia padrão, a otimização multiobjetivo foi mais eficiente, onde o

somatório das funções objetivo representa apenas 13% do que foi identificado pela simulação preliminar para a mesma tipologia.

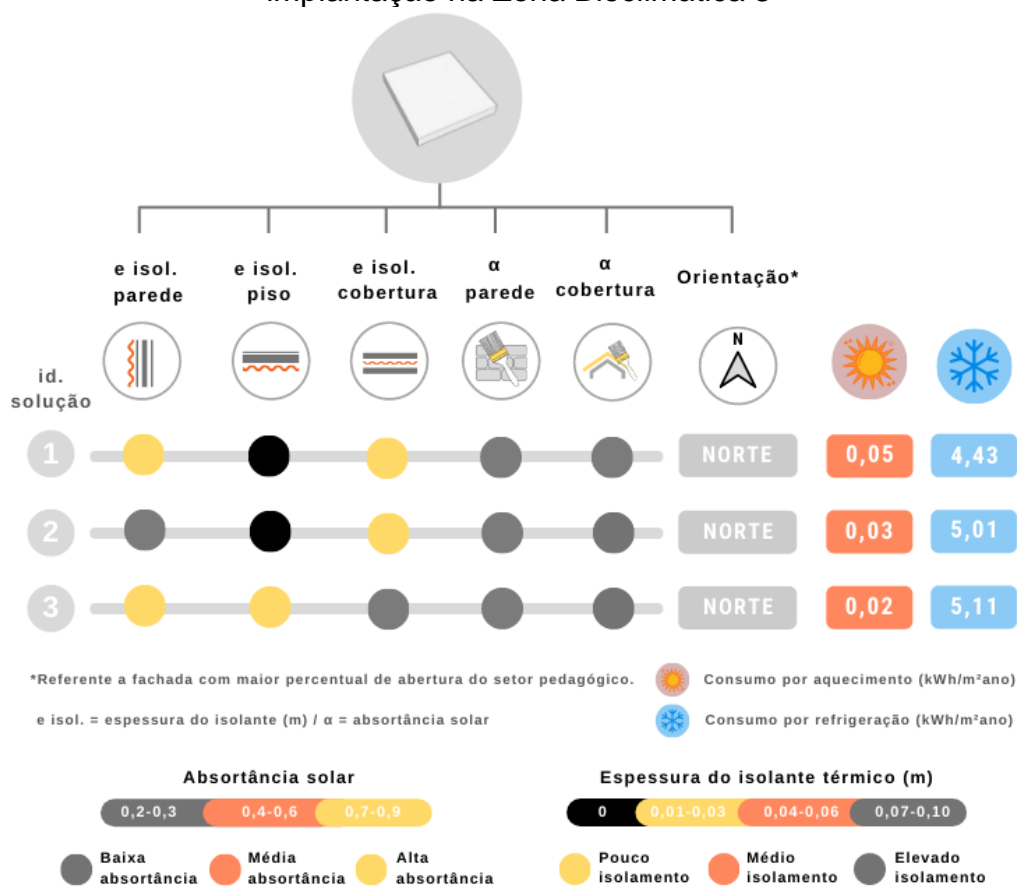
Figura 46: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Central na Zona Bioclimática 3



Fonte: Autora (2021).

As três melhores soluções foram identificadas logo entre as primeiras execuções e possuem id. 1, 2 e 3 (Figura 47). Nos três casos, a edificação é voltada à orientação Norte, no entanto, podem ser observadas diferentes composições. Essa tipologia apresenta a menor área de envoltória e a solução mais eficiente é caracterizada por uma edificação semelhante a tipologia anterior, com paredes externas e cobertura com pequenas espessuras de material isolante e absorvância solar entre 0,2 e 0,3, o que mantém os sistemas termicamente mais isolados pela baixa absorção de radiação solar das superfícies. Nesse caso, não é necessário que o piso seja isolado.

Figura 47: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Central com implantação na Zona Bioclimática 3



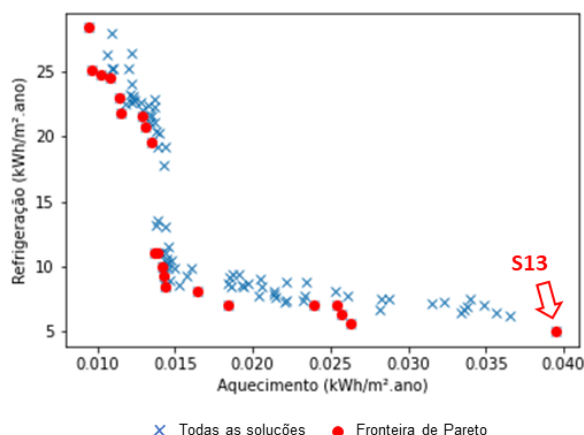
Fonte: Autora (2021).

4.3.2.3. Tipologia em Fita

Assim como foi mencionado na análise da tipologia Padrão, a Fronteira de Pareto não apresentou um comportamento linear. Nessa tipologia, a Fronteira de Pareto foi composta por 21 soluções (Figura 48), onde apenas 2 foram selecionadas para caracterização das variáveis de otimização. A maior redução ficou à cargo do eixo responsável pela refrigeração da edificação, onde foi alcançado um consumo 88% inferior ao observado inicialmente para a mesma tipologia. O segundo objetivo, referente ao aquecimento, reduz cerca de 85%.

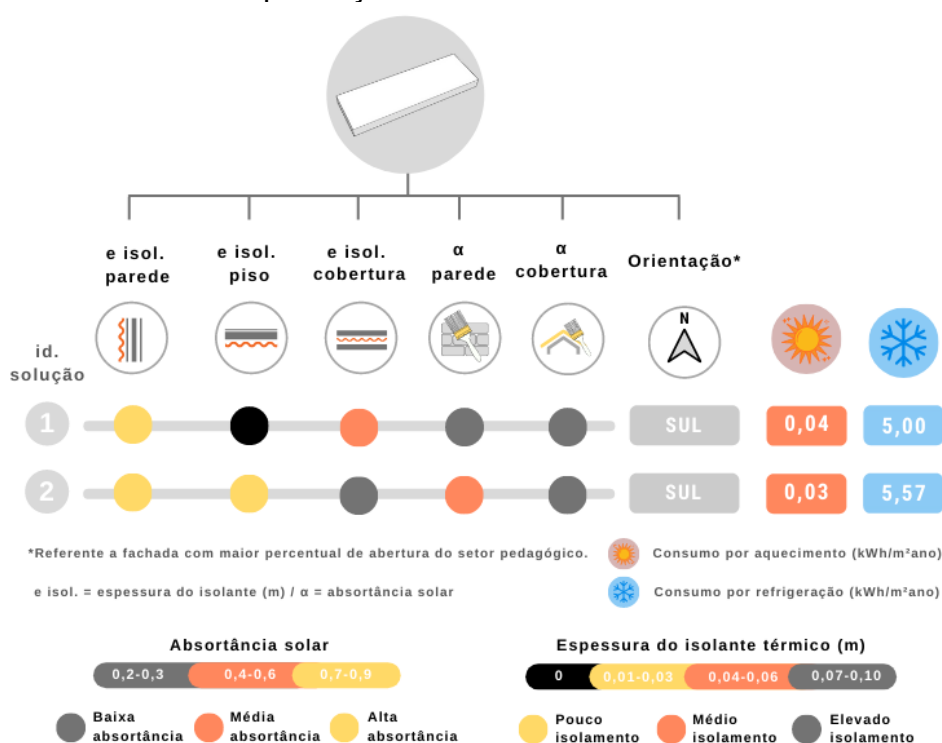
Comparando aos resultados obtidos através da simulação preliminar, esse caso foi onde a otimização multiobjetivo apresentou maior eficiência, com um consumo final para climatização de apenas 5,04 kWh/m².ano (S13), representando apenas 12% do consumo inicial.

Figura 48: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia em Fita na Zona Bioclimática 3



Fonte: Autora (2021).

Figura 49: Caracterização das soluções seleccionadas para a tipologia em Fita com implantação na Zona Bioclimática 3



Fonte: Autora (2021).

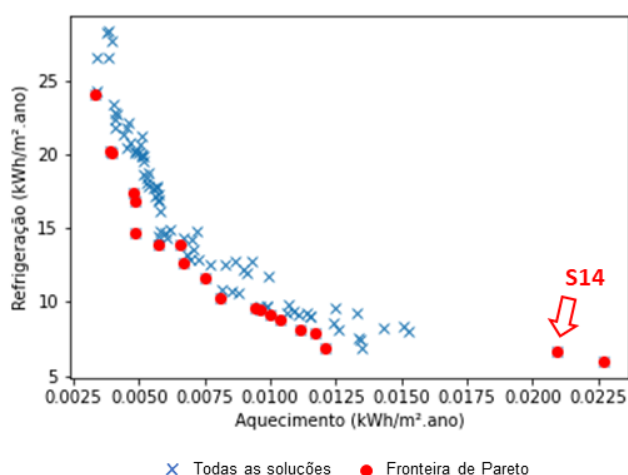
Assim como representa a Figura 49, as duas composições apresentam a mesma orientação, são voltadas a Sul, onde a probabilidade de incidência de radiação solar é pequena. A melhor solução dessa tipologia também apresenta similaridade com as que foram discutidas anteriormente, piso sem isolamento térmico, paredes externas e cobertura minimamente isoladas e revestidas em cores

claras, com baixos coeficientes de absorvência solar, quando as temperaturas superficiais são reduzidas.

4.3.2.4. Tipologia L

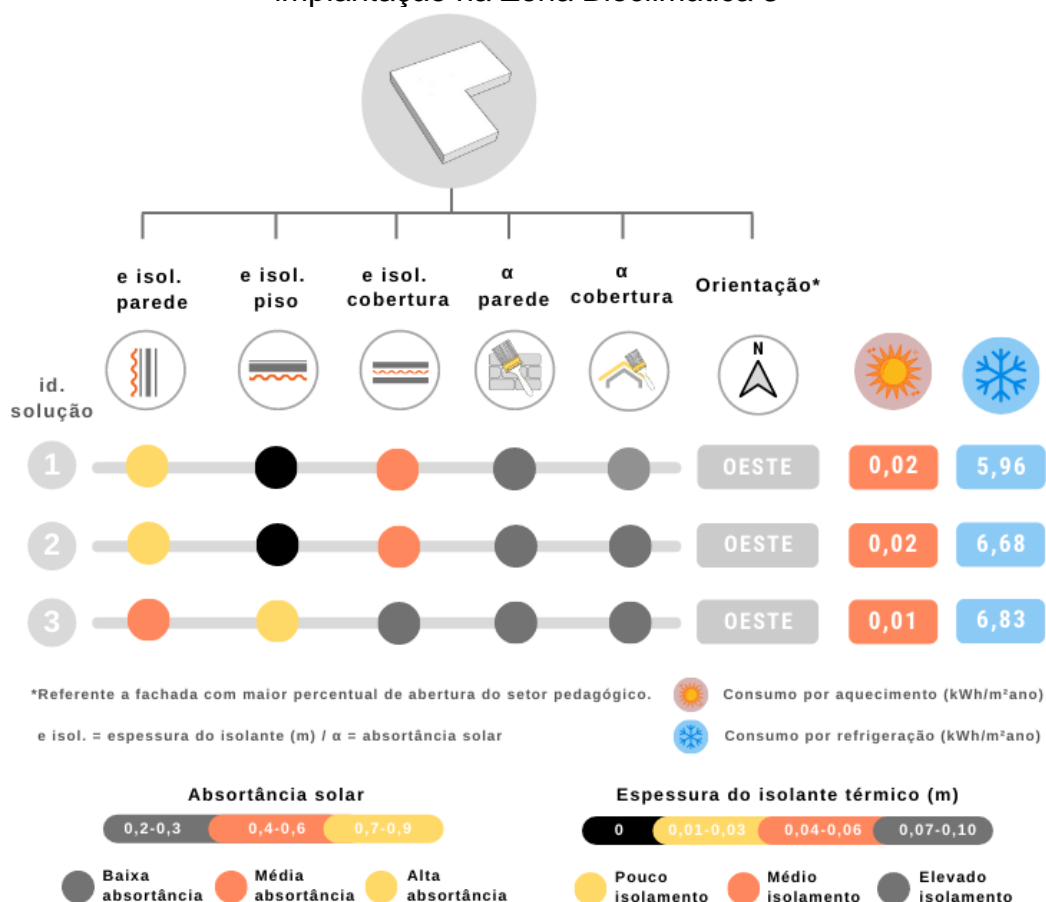
Assim como nas demais ZBs, a tipologia L apresentou o maior consumo para o contexto da ZB3, totalizando 5,98 kWh/m².ano. A Fronteira de Pareto foi composta por 20 soluções e a Figura 50 apresenta o gráfico de Pareto com os resultados alcançados pela simulação evolutiva, onde a melhor solução é identificada por S14. Essa solução consome 5,96 kWh/m².ano por refrigeração e 0,02 kWh/m².ano por aquecimento, reduzindo respectivamente 86% e 83% do consumo inicial. Das soluções que compõem o conjunto de Pareto, 3 foram selecionadas para análise (Figura 51). Essa tipologia é a única que apresenta a principal orientação como Oeste para o contexto da ZB3, e a solução mais eficiente apresenta exatamente a mesma composição da tipologia anterior. As paredes externas e a cobertura possuem pouco isolamento e os coeficientes de absorvência solar são responsáveis pelo controle das temperaturas superficiais dos sistemas e, conseqüentemente, pela redução da necessidade de energia para refrigeração dos espaços climatizados.

Figura 50: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia L na Zona Bioclimática 3



Fonte: Autora (2021).

Figura 51: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia L com implantação na Zona Bioclimática 3

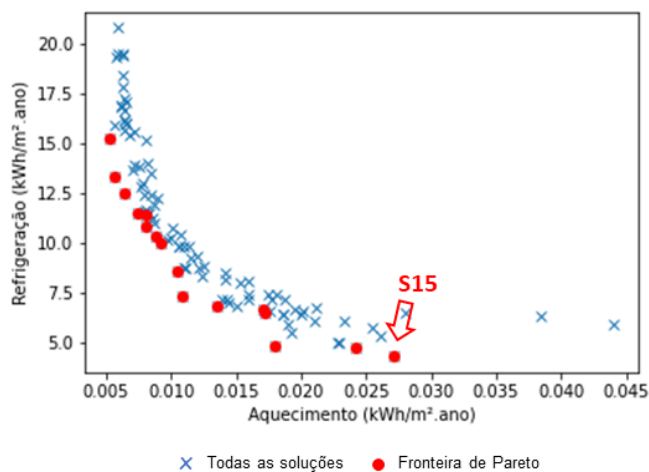


Fonte: Autora (2021).

4.3.2.5. Tipologia Radial

Finalizando a análise da ZB3, depois da tipologia Padrão, a tipologia Radial é a que apresenta o menor consumo para esse contexto de implantação. Mais uma vez, pode-se observar que o IC pode ter sido influente nesses resultados, já que essa tipologia apresenta o segundo menor IC, sendo que o menor é justamente referente a tipologia Padrão. Nessa situação, a Fronteira de Pareto identificou 16 soluções (Figura 52) e a melhor solução (S15) apresenta uma composição capaz de reduzir aproximadamente 87% do consumo de energia inicial necessário para climatização da edificação. Essa solução necessita de 0,03 kWh/m².ano para aquecimento e 4,33 kWh/m².ano para refrigeração.

Figura 52: Gráfico do conjunto de soluções identificadas pela Fronteira de Pareto para a tipologia Radial na Zona Bioclimática 3



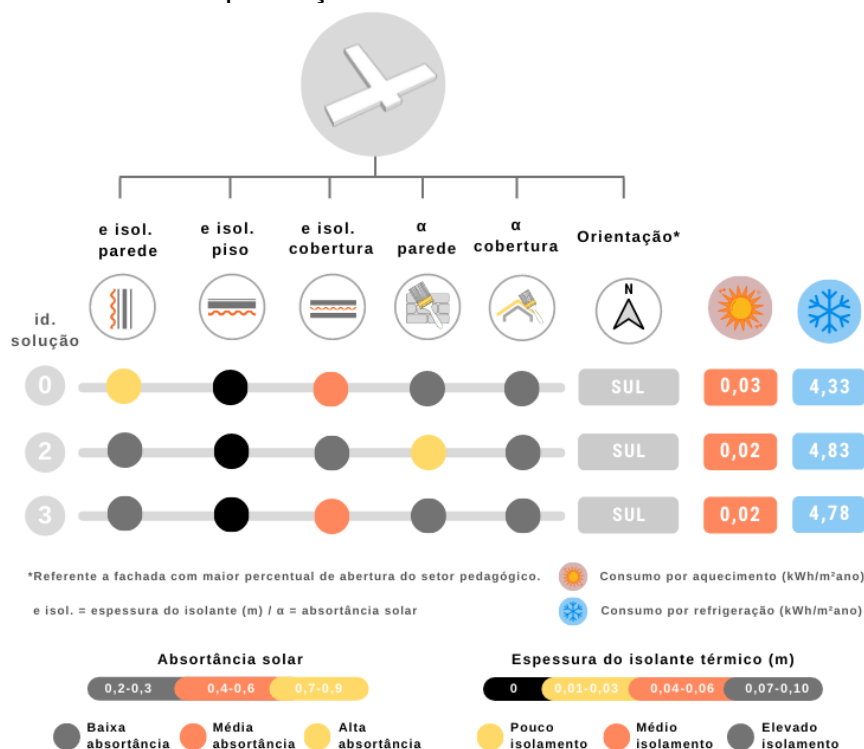
Fonte: Autora (2021).

As 3 soluções selecionadas para análise dessa tipologia apresentaram a mesma orientação solar, onde a fachada referência é voltada a Sul (Figura 53). A solução mais eficiente (S15), identificada no processo de otimização como id. 0, possui paredes externas e cobertura com pouco e média espessura de isolante térmico, onde estes sistemas são isolados através de menores valores de absorvância, que refletem a maior parte da radiação solar e mantém as temperaturas superficiais mais baixas.

As demais soluções apresentam as mesmas características para as variáveis referentes à espessura do isolamento do piso e absorvância solar da cobertura. Na solução com id. 2, a cobertura é altamente isolada e as paredes externas realizam uma troca um pouco maior com o exterior, apresentando absorvância solar de 0,7. Na terceira solução, id. 3, pode ser observado o inverso. Quando a cobertura apresenta um menor isolamento, com 6 cm de PIR, o sistema de vedação referente as paredes externas é mais isolado e também deve ser revestido com cores com absorvância solar de 0,3.

Na condição climática dessa ZB, observa-se que, com exceção do parâmetro relativo à orientação solar, todas as tipologias apresentaram características idênticas ou muito aproximadas, o que provavelmente ocorra devido as temperaturas externas mais elevadas do contexto de implantação.

Figura 53: Caracterização das soluções selecionadas para a tipologia Radial com implantação na Zona Bioclimática 3



Fonte: Autora (2021).

4.4. Análise comparativa do desempenho das tipologias

Os resultados discutidos nos itens anteriores são apresentados de forma sucinta pela Tabela 14. Essa etapa visa a descrição e a comparação das características das soluções identificadas durante o processo de otimização para as ZBs inicialmente definidas.

Através desses resultados pode-se observar que todas as tipologias apresentam diferenças significativas em relação ao consumo inicial referente à tipologia com características padrão. Apesar da dificuldade de identificação de padrões compositivos pelas análises anteriores, constata-se que, a caracterização das melhores soluções das tipologias apresenta algumas semelhanças. Para as três zonas de implantação o contexto foi o mesmo, a tipologia com maior eficiência e menor consumo energético foi a padrão e a tipologia denominada *L* foi a que apresentou o maior consumo por climatização artificial.

Nas ZBs 1 e 2, onde as temperaturas externas são menores, as melhores soluções para tipologia padrão são caracterizadas por um médio/elevado isolamento

nas paredes externas, elevado isolamento na cobertura e ausência de material isolante no piso. Na ZB 1, a fachada com maior percentual de área envidraçada é voltada a Oeste e na ZB 2 a Norte. Na ZB3, onde a média das temperaturas é mais elevada, os elementos de vedação são isolados através da camada exposta ao meio, que devem ser altamente reflexivas e apresentarem valores de absorvância igual a 0,2. O piso não deve ser isolado, a espessura do material isolante das paredes externas deve ser 2 cm e da cobertura 4 cm e a orientação da principal fachada do setor pedagógico é voltada a Leste. Nesse caso, onde a necessidade de refrigeração é maior, não é necessário que o restante do envelope seja demasiadamente isolado, já que em excesso, o mesmo também pode ser prejudicial ao desempenho da edificação. A composição com menor isolamento pode auxiliar o processo de troca do calor interno da edificação com seu exterior durante o período não ocupado, quando as temperaturas externas são menores.

Na tipologia menos eficiente, caracterizada pela organização formal em formato de L, pode ser observado o mesmo comportamento. Os padrões identificados para as ZBs 1 e 2 são os mesmos e a presença de isolamento no piso deve contribuir com o sobreaquecimento da edificação, pois não permite que parte do calor interno seja dissipado para o solo, aumentando o consumo referente à refrigeração. Nesse caso, a fachada principal é voltada a oeste.

Tabela 14: Descrição das características das melhores soluções obtidas durante o processo de otimização para as ZBs 1, 2 e 3

ZB	Tipologia	Variáveis de otimização						IUE (kWh/m²ano)		
		Isol. Par.	Isol. Pis.	Isol. Cob.	Abs. Par.	Abs. Cob.	Orient.	Refrig.	Aquec.	IUE Total
ZB 1	Padrão	0,07	0	0,08	0,8	0,4	Oeste	1,12	0,23	1,35
	Central	0	0	0,06	0,3	0,2	Sul	2,97	0,24	3,21
	Fita	0,07	0	0,07	0,5	0,4	Sul	3,22	0,25	3,47
	L	0,04	0,01	0,08	0,2	0,2	Sul	4,98	0,12	5,10
	Radial	0,05	0	0,04	0,5	0,3	Sul	4,21	0,24	4,45
ZB 2	Padrão	0,05	0	0,08	0,4	0,2	Norte	3,47	0,85	4,32
	Central	0,06	0	0,07	0,5	0,4	Norte	8,99	0,54	9,53
	Fita	0,03	0	0,06	0,2	0,3	Sul	7,43	1,13	8,56
	L	0,06	0,01	0,08	0,4	0,3	Sul	11,67	0,36	12,03
	Radial	0,08	0	0,10	0,6	0,4	Sul	8,55	0,72	9,27
ZB 3	Padrão	0,02	0	0,04	0,2	0,2	Leste	2,12	0,05	2,17
	Central	0,01	0	0,03	0,2	0,2	Norte	4,43	0,04	4,47
	Fita	0,03	0	0,05	0,3	0,2	Sul	5	0,04	5,04
	L	0,03	0	0,04	0,2	0,2	Oeste	5,96	0,02	5,98
	Radial	0,02	0	0,06	0,3	0,2	Sul	4,32	0,03	4,35

Fonte: Autora (2021).

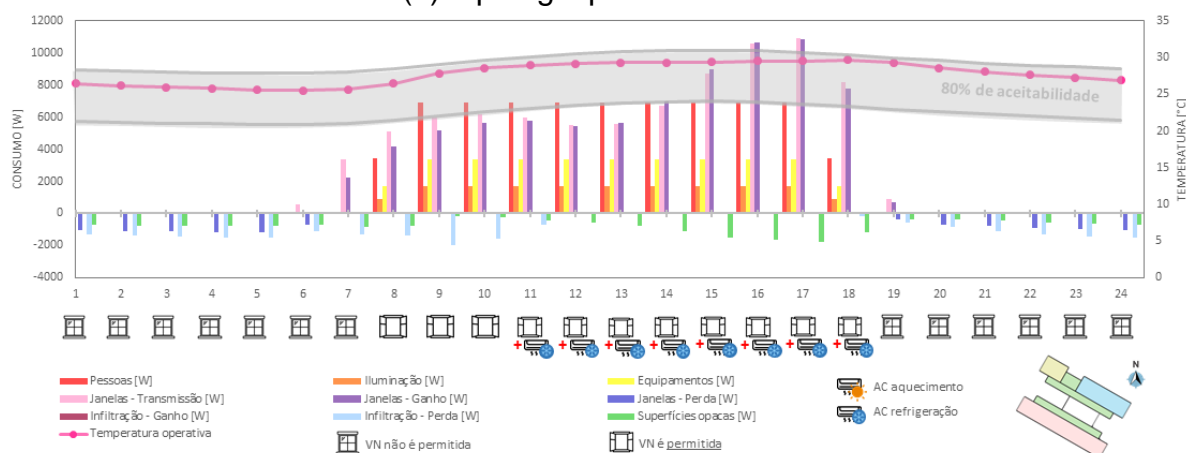
A partir desses resultados observa-se que, ainda que possam ser observadas composições semelhantes para diferentes orientações, é possível afirmar que uma das principais estratégias do otimizador foi o direcionamento da fachada com maior percentual de área envidraçada para sul. É provável que isso ocorra devido à maior necessidade de refrigeração de seus espaços, visto que o consumo por aquecimento é pouco representativo e esse parâmetro não influenciou na totalidade desse consumo.

Visando a compreensão dos fenômenos, será discutido o comportamento dos parâmetros que compõem os sistemas de análise através da plotagem dos resultados no formato de um gráfico de fluxos de calor. Espera-se que esse procedimento permita a identificação dos parâmetros que diferenciam a tipologia com menor consumo da menos eficiente. Para isso, são analisados os ganhos térmicos, os perfis de temperatura e a atuação da ventilação híbrida no setor pedagógico durante os dias típicos de verão e inverno, quando a divergência entre o consumo por climatização é maior.

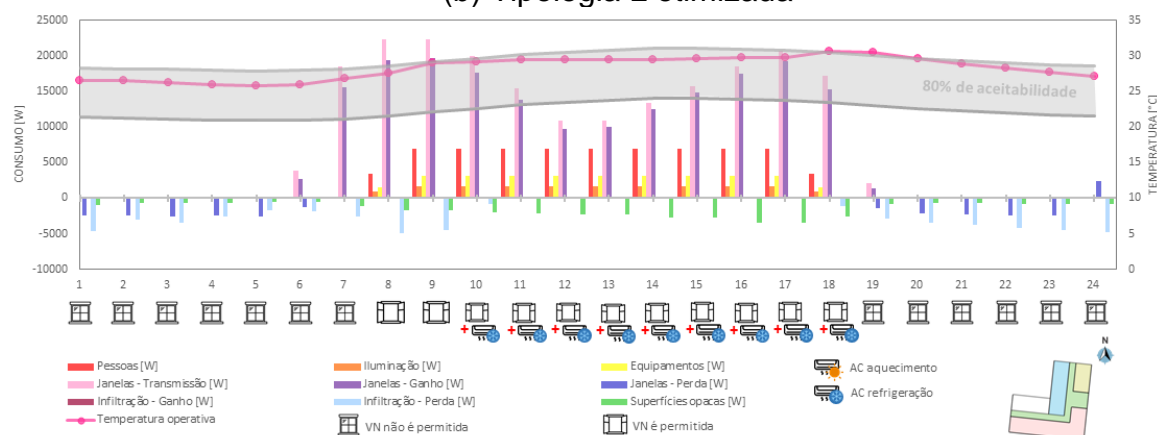
As figuras 54 e 55 representam os gráficos do fluxo de calor de um dia típico de verão na ZB 1 e 2, quando o comportamento das tipologias foi similar. Com base nesses resultados, observa-se que, durante a noite, quando a escola não está ocupada, a temperatura operativa se mantém dentro dos limites aceitáveis de conforto térmico. Pela manhã, quando a temperatura externa começa a subir, a escola é ocupada e os equipamentos e a iluminação são acionados, e a temperatura operativa também aumenta. Nesse momento, na tipologia padrão, a ventilação natural (VN) é permitida até as 10h na ZB1 e até 9h na ZB2. Após esse período, quando a temperatura operativa se aproxima do limite superior de conforto, a ventilação híbrida atua com o controle das condições de conforto e utiliza do revezamento entre o uso de climatização e abertura de janelas até as 18h, quando a escola ainda está ocupada.

Figura 54: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de verão na ZB 1

(a) Tipologia padrão otimizada



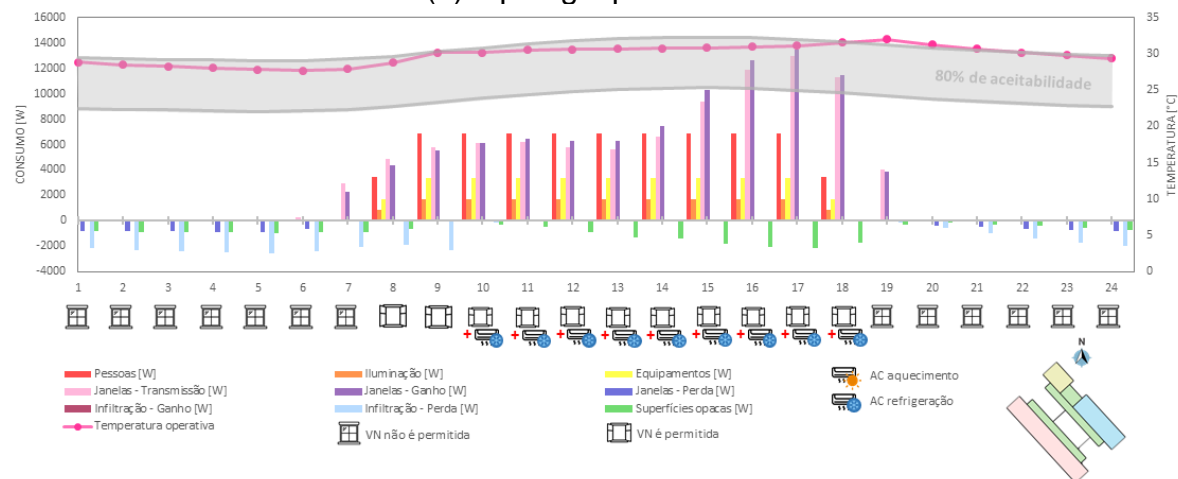
(b) Tipologia L otimizada

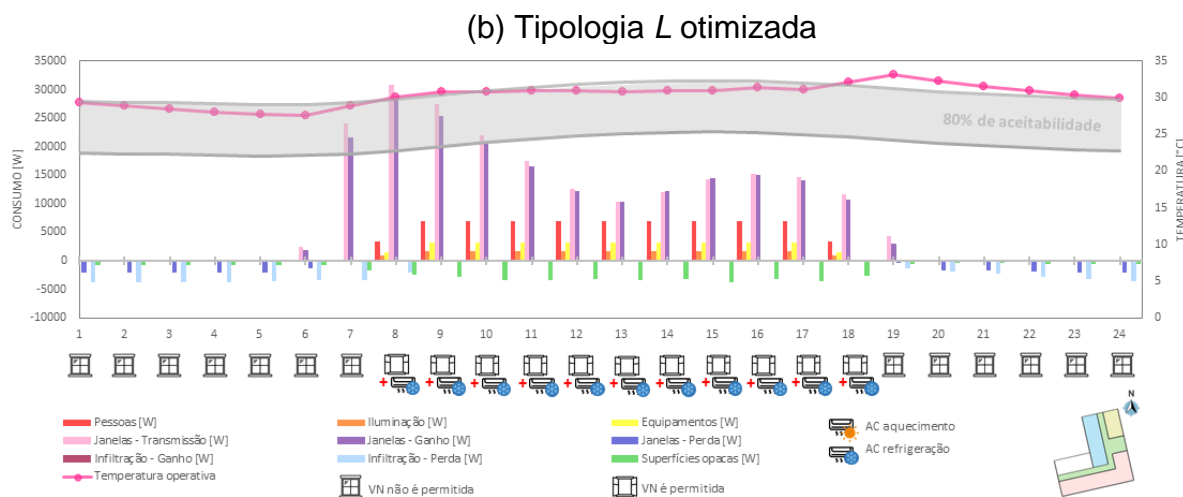


Fonte: Autora (2021).

Figura 55: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de verão na ZB 2

(a) Tipologia padrão otimizada





Fonte: Autora (2021).

Após esse horário, a ventilação híbrida é desativada e as janelas se mantêm fechadas até o período de ocupação do próximo dia. Ainda que o AC seja requisitado nos dois turnos, isso não significa que ele esteja ligado durante o dia inteiro. Os resultados indicam que, durante a maior parte do tempo a VN é suficiente para o equilíbrio térmico da temperatura interna do edifício, no entanto, considerando que as simulações ocorrem a cada 15 minutos, os dados de saída apontam que o AC é acionado em pelo menos uma simulação por hora, o que explica a representação desse parâmetro nos gráficos analisados.

Ainda em relação a mesma tipologia, verifica-se que, durante a noite há uma perda de calor por condução nas esquadrias, pela infiltração de ar e ainda em pequena porcentagem pela troca das paredes externas, que durante o dia exercem a mesma função, atuando com a retirada do calor interno gerado no edifício. Na ZB2, o intervalo sugerido pelo RTQ-C indica que a orientação solar da fachada com maior percentual de área envidraçada deve ser considerada norte, no entanto, os 317° caracterizaram um comportamento mais recorrente na orientação noroeste, onde o ganho por radiação solar direta das janelas ocorre de forma predominante ao final do dia, assim como ocorre na ZB1, quando a orientação solar indicada é oeste (299°).

Na tipologia L da ZB2, o mesmo pode ser observado pelo parâmetro referente à orientação solar do edifício. Apesar de ser direcionada à sul, essa tipologia apresenta características mais aproximadas ao comportamento de um edifício voltado a sudeste, demonstrando o comportamento inverso da tipologia anterior no quesito do ganho de calor pelas esquadrias. Nessa solução, existe a necessidade de AC logo

durante as primeiras horas de manhã, quando pode ser observado um excessivo ganho de calor por condução e radiação solar direta das esquadrias. Esse parâmetro reduz ao longo do dia, conforme a exposição direta das fachadas ao sol é menor.

Nessa tipologia observa-se também que, durante a noite, a perda de calor através da infiltração, condução das esquadrias e superfícies opacas é aproximada ao que foi observado pela tipologia padrão, no entanto, durante o dia a perda pelas superfícies opacas é maior. Nesse caso, a ventilação híbrida é requisitada durante todo o período de funcionamento da EMEI. A partir das 19h, quando a escola já não é mais ocupada, a temperatura interna ultrapassa a que foi observada pela outra tipologia. Em resumo, a superioridade das temperaturas internas dessa tipologia faz com que o AC seja necessário durante maiores períodos ao longo do dia, elevando também o consumo por refrigeração. Diferentemente da tipologia anterior, a VN não é permitida de forma constante em nenhum momento do dia e o controle por ventilação híbrida é contínuo.

Na ZB1 a caracterização dessa tipologia é um pouco diferente. Apesar da mesma indicação de orientação solar, o ganho por condução e radiação solar direta das janelas é inferior, mas também ocorre ao longo de todo o dia. Nessa situação, as temperaturas mais baixas da ZB auxiliam na redução do uso de sistemas artificiais para refrigeração do edifício e possibilitam que as janelas estejam completamente abertas até as 10h, quando a temperatura operativa se aproxima do limite superior de conforto e o AC precisa ser ativado. A IUE necessária para a tipologia na ZB1 é quase 60% inferior a IUE necessária para a mesma tipologia implantada na ZB2.

Em resumo, apesar do tempo de disponibilidade da ventilação híbrida ser aproximado entre a tipologia padrão e a tipologia L, a disponibilidade de VN e AC é alternada e, considerando que o ganho de calor na tipologia padrão é menor ao longo do dia, o tempo em que o AC precisa ser ativado também é menor. Nessa situação, a ventilação híbrida permite que as janelas fiquem abertas durante mais tempo ao longo das horas ocupadas.

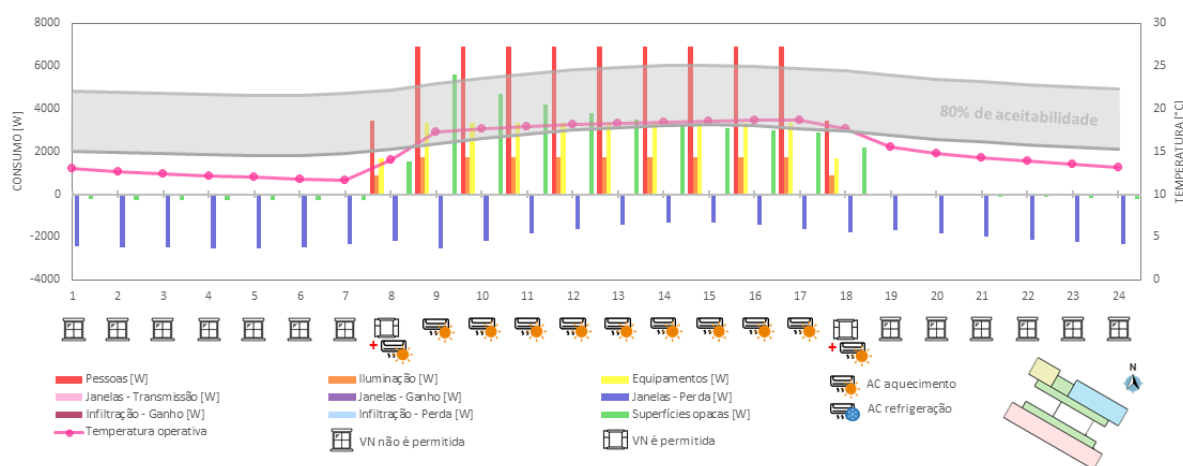
Além de tudo, a análise detalhada dos dados de saída também enfatiza o maior número de acionamentos do AC durante o período das 14h às 17h para a tipologia padrão implantada nas ZBs 1 e 2. Para a tipologia L, esse período é mais extenso, o maior número de acionamentos e, conseqüentemente o maior consumo energético, é

observado das 11h às 17h na ZB1 e das 9h às 17h na ZB2, quando o ganho de calor também é elevado.

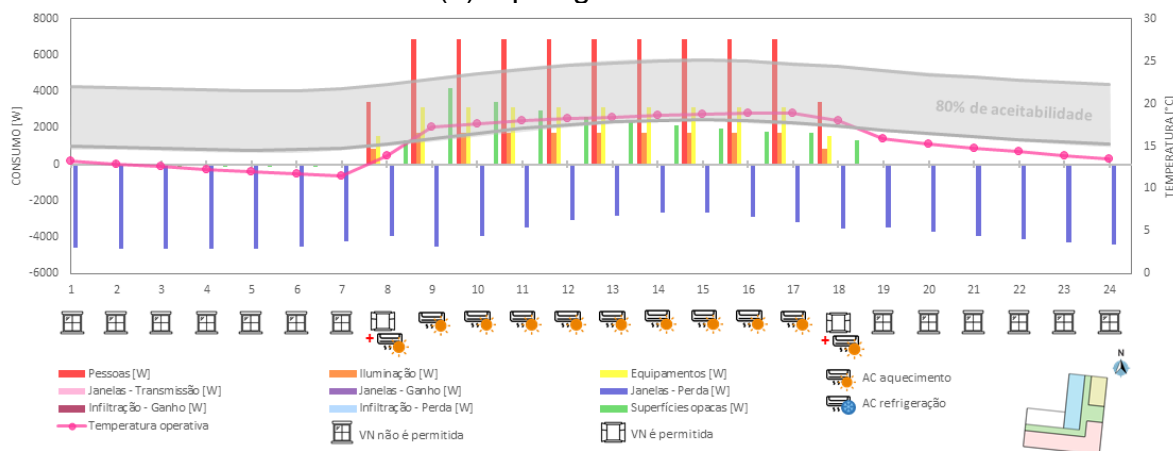
As Figuras 56 e 57 apresentam a caracterização dos mesmos parâmetros discutidos para o dia típico de inverno, que apresenta resultados um pouco diferentes dos observados anteriormente. O consumo por aquecimento das tipologias é aproximado e representa menos de 1 kWh/m²ano, ou seja, o consumo por aquecimento que inicialmente já era muito baixo, foi praticamente zerado com a otimização das tipologias.

Figura 56: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de inverno na ZB 1

(a) Tipologia padrão otimizada



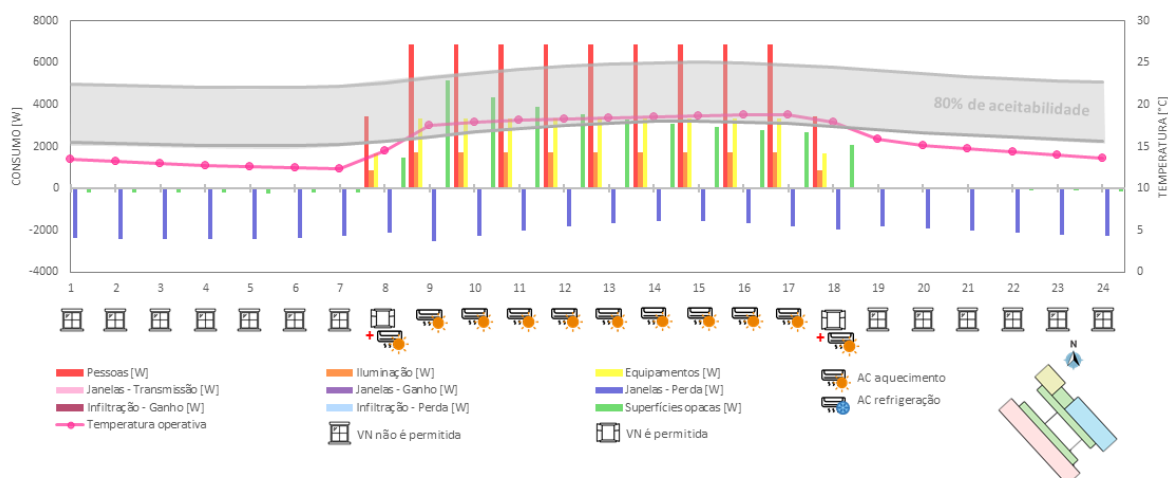
(b) Tipologia L otimizada



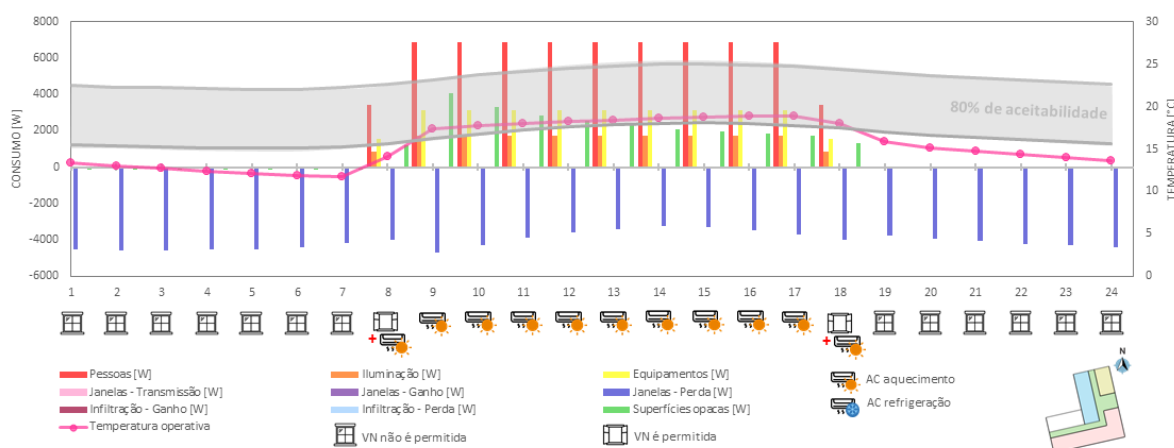
Fonte: Autora (2021).

Figura 57: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de inverno na ZB 2

(a) Tipologia padrão otimizada



(b) Tipologia L otimizada



Fonte: Autora (2021).

Conforme pode ser observado nos gráficos, o comportamento de ambas as edificações é similar. Durante a noite, quando a escola não é ocupada e não existe ganho de calor no interior da edificação, as temperaturas operativas ficam abaixo do limite inferior de conforto. No início da manhã, quando as temperaturas começam a subir e a edificação é então ocupada, o ganho de calor em seu interior ajuda a manter as temperaturas operativas dentro do limite de conforto. Nesse contexto, ainda que o AC esteja disponível durante todo o período de ocupação, o acionamento esporádico durante poucos minutos é suficiente para o equilíbrio da temperatura interna, que se mantém dentro da aceitabilidade dos 80% até a necessidade de um novo acionamento. Nesse período, a abertura das janelas não é permitida para ambas

tipologias, sendo que, o revezamento entre VN e AC é permitido apenas durante dois momentos ao longo do dia, no início e no final do turno de ocupação, às 8h e às 18h.

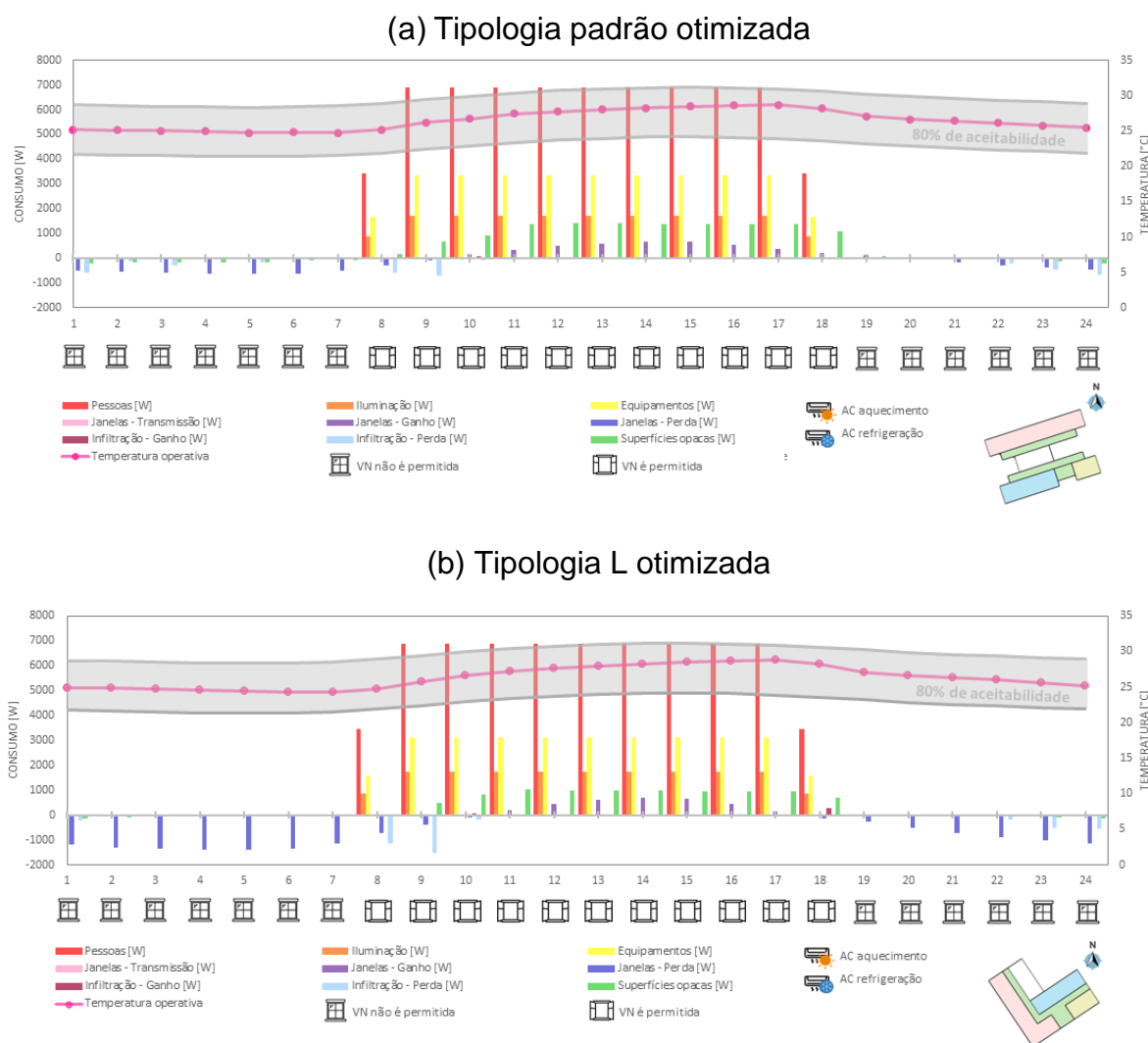
No inverno, a perda de calor das janelas por condução é muito superior ao que foi observado na análise dos fluxos térmicos de verão. Essa perda é ainda maior na tipologia L, que já apresenta temperatura operativa inferior à tipologia padrão. O ganho pelas superfícies opacas durante o dia também auxilia com equilíbrio térmico da edificação durante o período de ocupação e, assim como na análise anterior, os ganhos relacionados com a ocupação, iluminação e equipamentos se mantêm constantes durante todo período de ocupação para ambas as tipologias, já que apresentam as mesmas características.

Considerando as temperaturas externas mais elevadas da ZB3, o comportamento das edificações nessa condição foi um pouco diferente. No dia típico de verão (Figura 58), ambas tipologias apresentam temperaturas internas dentro da aceitabilidade dos 80% com o uso de VN das 8h às 18h. De acordo com a análise detalhada dos resultados obtidos pela simulação (a cada 15 minutos), o consumo final por refrigeração que é observado para as soluções é distribuído entre alguns minutos em poucos dias ao longo do ano inteiro. No dia analisado, o acionamento do AC não é requisitado em nenhum momento ao longo do período de ocupação.

Apesar de apresentarem as principais fachadas voltadas para orientações distintas, o comportamento dos demais parâmetros que compõem as tipologias são similares. O mesmo ocorre com o consumo por refrigeração, sendo essa a ZB que apresenta a menor diferença entre a tipologia de maior eficiência e a que é considerada menos eficiente (com maior consumo energético).

Nessa situação, durante a noite, quando as temperaturas externas são menores, as edificações perdem o calor gerado em seu interior ao longo do dia através da condução das esquadrias e infiltração de ar. Durante o dia, o ganho de calor ocorre pelos parâmetros fixos, como, ocupação, equipamentos e iluminação, e ainda pelas superfícies opacas e condução das esquadrias.

Figura 58: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de verão na ZB 3

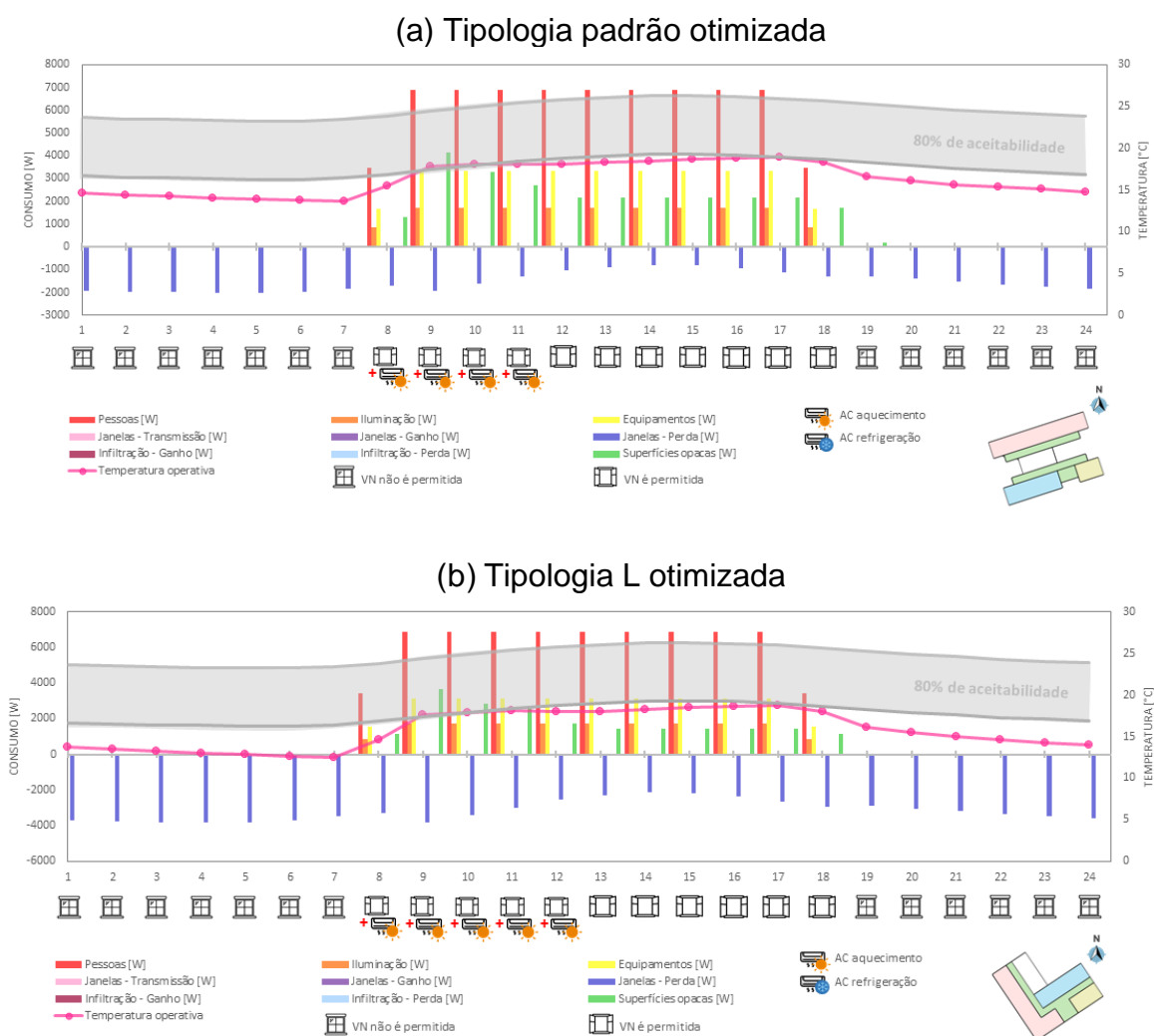


Fonte: Autora (2021).

Na análise do dia típico de inverno (Figura 59), essa ZB apresentou um comportamento atípico das demais já analisadas. Nesse caso, durante o período noturno, a temperatura interna se mantém abaixo do limite inferior de aceitabilidade. Nessa situação, no início da manhã, quando a escola é ocupada, é necessário que o AC seja ativado para que a temperatura interna seja elevada e atinja a faixa de conforto dos 80% de aceitabilidade. Nesse período, a VN é suficiente durante a maior parte do tempo e o consumo por aquecimento é mínimo, já que com o ganho de calor interior gerado pela ocupação a temperatura operativa já passou a ser muito próxima ao limite de conforto inferior. Na tipologia padrão isso ocorre das 8h às 11h e na tipologia L das 8h às 12h.

A plotagem dos gráficos permite observar que, para ambos os casos, durante o decorrer do dia apenas a VN é permitida e a temperatura operativa aparece abaixo da faixa de conforto. Considerando a disponibilidade do controle de ventilação híbrida durante o tempo de ocupação, este resultado não representa o esperado, já que esse sistema é utilizado justamente para que a temperatura interna seja mantida dentro dos índices aceitáveis de conforto térmico. Diante disso, a investigação dessa situação permitiu constatar que, nesse momento, a temperatura operativa está muito próxima às temperaturas que compõem o limite inferior de conforto térmico e, por esse motivo, a VN é permitida e as janelas são abertas. Considerando que a diferença entre essas temperaturas é mínima, e a temperatura interna não representa 1°C abaixo do limite inferior, o AC não é acionado e o EP entende esse período como conforto térmico.

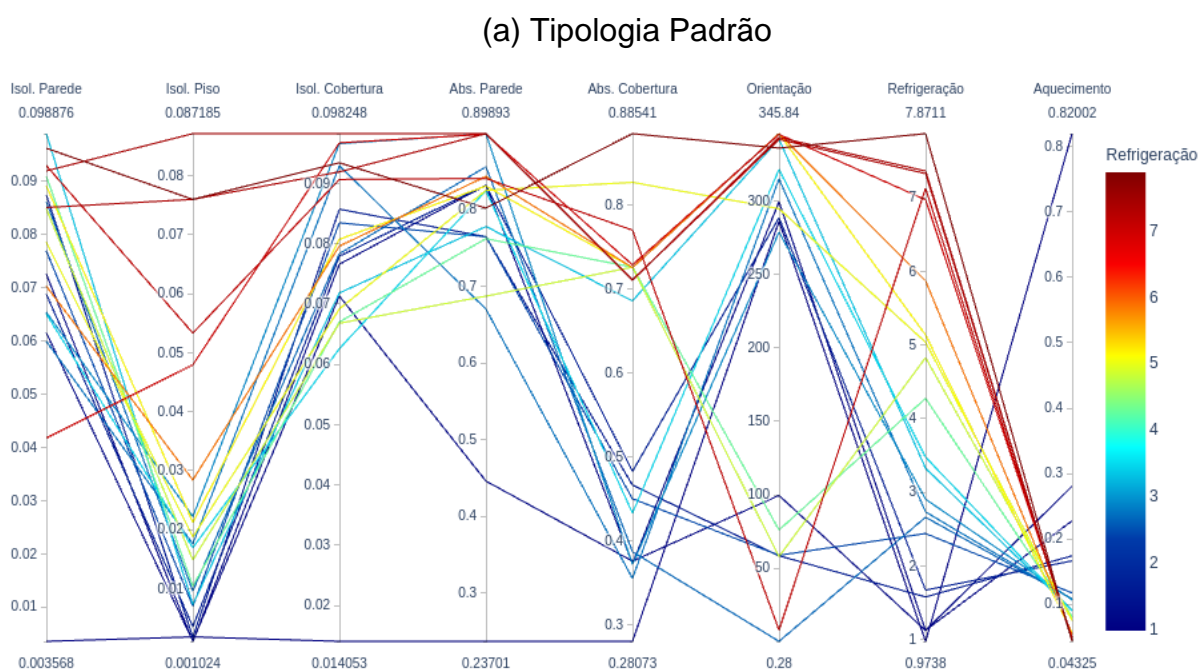
Figura 59: Gráfico do fluxo de calor de um dia típico de inverno na ZB 3



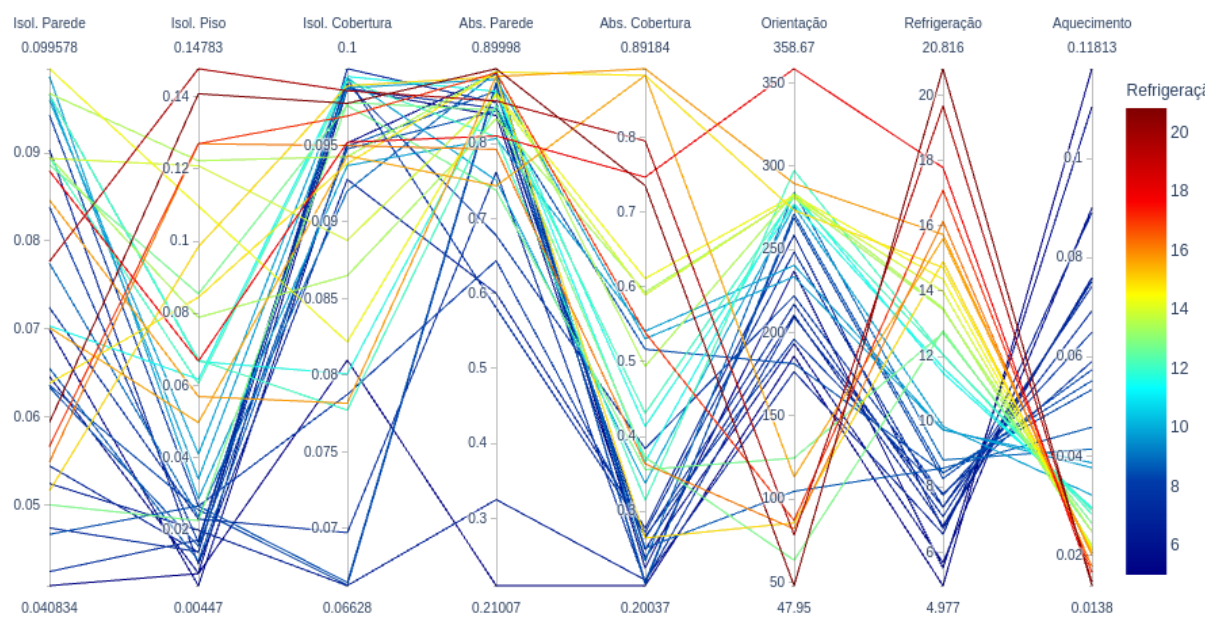
Fonte: Autora (2021).

Para o aprofundamento dessa análise, as Figuras 60, 61 e 62 apresentam os gráficos de coordenadas paralelas para as mesmas tipologias no contexto das ZBs 1, 2 e 3, respectivamente. Os eixos verticais caracterizam as variáveis testadas durante o processo evolutivo, que são representadas em sua própria escala e unidade de medida. As linhas horizontais representam as soluções que compõem a Fronteira de Pareto e a composição dessas soluções pode ser observada através de suas conexões com as colunas verticais. Neste caso, as combinações com menor índice de IUE são plotadas na cor azul e àquelas menos eficientes podem ser identificadas pela cor vermelha.

Figura 60: Gráfico de coordenadas paralelas com a combinação das soluções que compõem a Fronteira de Pareto para a ZB1



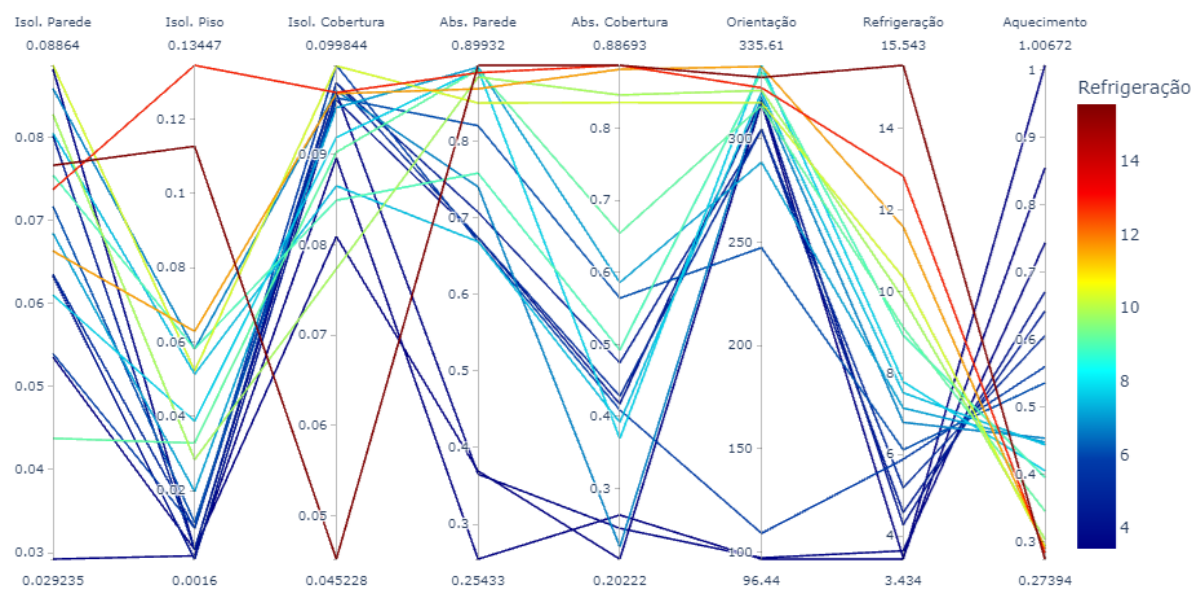
(b) Tipologia L



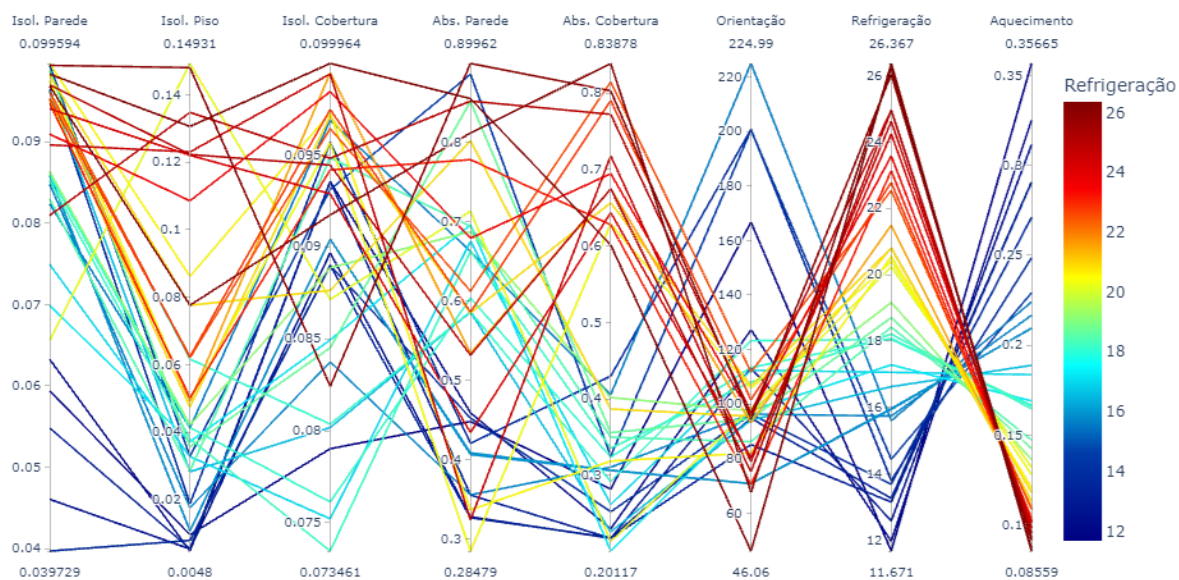
Fonte: Autora (2021).

Figura 61: Gráfico de coordenadas paralelas com a combinação das soluções que compõem a Fronteira de Pareto para a ZB2

(a) Tipologia Padrão



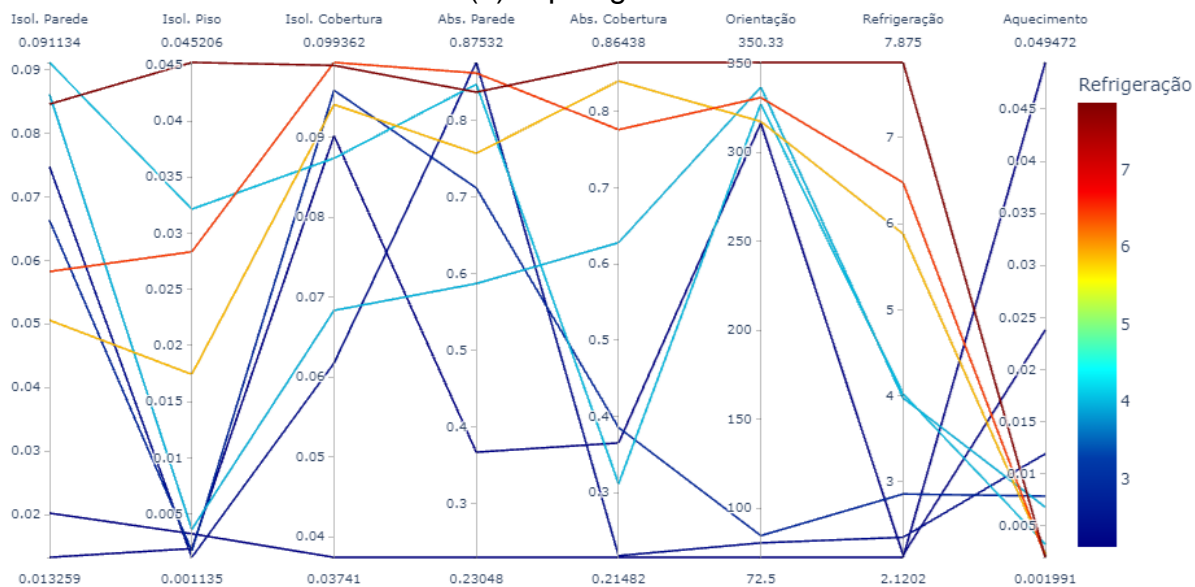
(b) Tipologia L



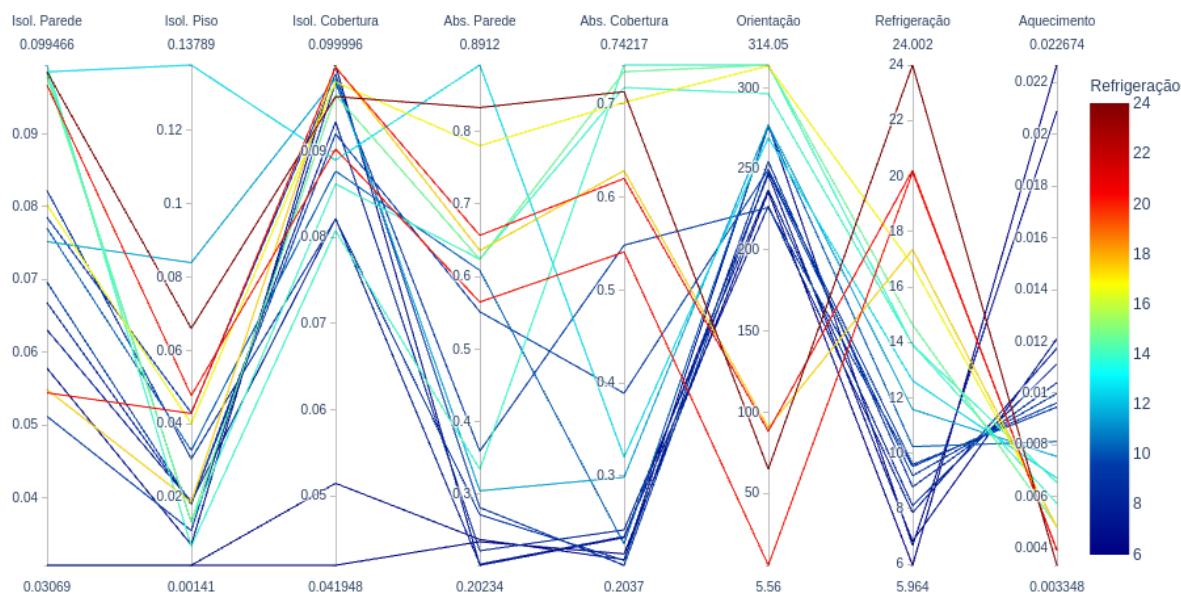
Fonte: Autora (2021).

Figura 62: Gráfico de coordenadas paralelas com a combinação das soluções que compõem a Fronteira de Pareto para a ZB3

(a) Tipologia Padrão



(b) Tipologia L



Fonte: Autora (2021).

Verifica-se através destes gráficos que os parâmetros com maior variação entre as tipologias seriam àqueles relacionados com a composição das paredes externas, provavelmente devido a maior área de envoltória que este sistema representa. Nessa situação, a espessura do isolante térmico e a absorvência solar das paredes apresentam características distintas entre as tipologias analisadas. O contrário pode ser observado na cobertura, que apresenta elevadas espessuras de isolante térmico e a indicação de materiais altamente refletivos, onde a maioria apresenta uma variação de absorvência solar de 0,2 a 0,4. Na ZB2 ainda podem ser observadas algumas combinações com absorvências médias, no entanto, não caracterizam as soluções mais eficientes.

Com relação à orientação solar, ambas tipologias apresentam características bastante variadas para cada ZB de implantação, sendo na ZB2 a maior ocorrência de variação desse parâmetro para Tipologia L. Através destes resultados ainda pode-se observar a influência que o eixo de resfriamento exerce sobre o de aquecimento durante as análises evolutivas, sendo que a garantia do menor consumo por energia elétrica não representa necessariamente os melhores resultados para ambos eixos de otimização, já que os mesmos são inversamente proporcionais.

4.5. Análise do desempenho computacional da ferramenta multiobjetivo

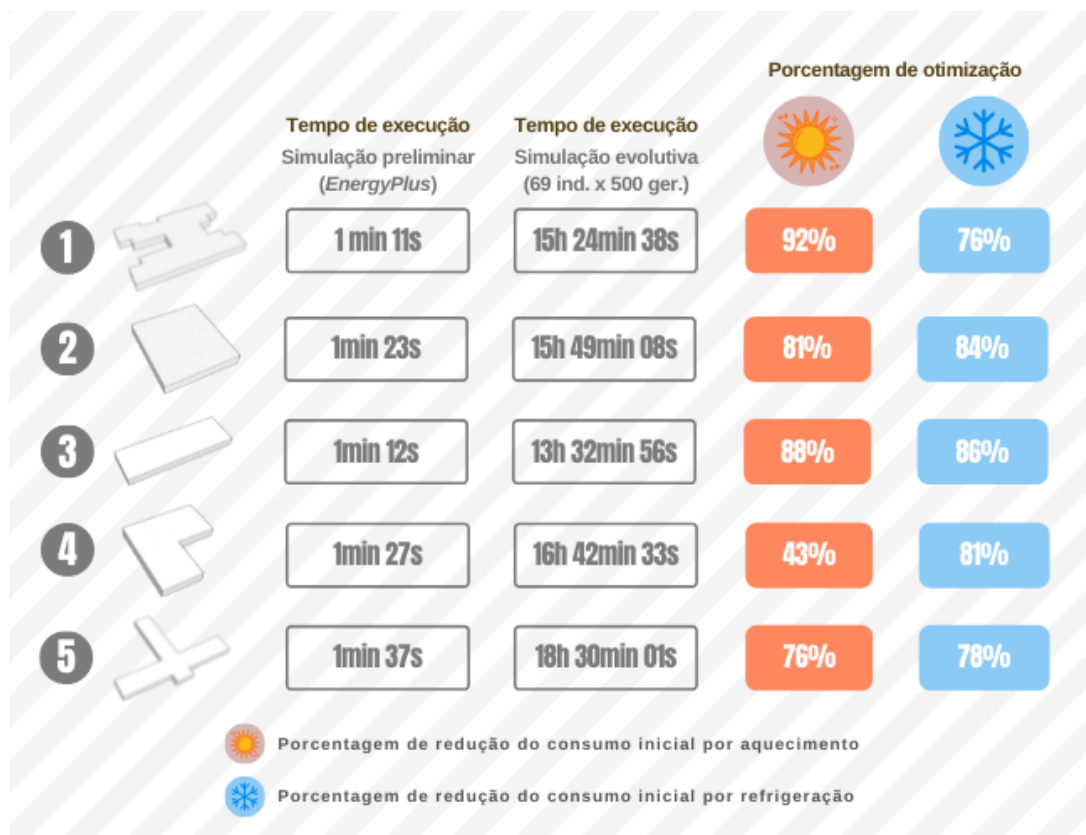
Além de proporcionar o aumento da complexidade dos cenários simulados, a abordagem multiobjetivo é capaz de reduzir o tempo de análise necessário para utilização de métodos convencionais de avaliação. Considerando as variáveis otimizadas e seus respectivos intervalos limítrofes, o espaço de busca da otimização foi equivalente a 3.456.000 possibilidades de composições para cada tipologia. Isso quer dizer que, para a mesma análise ser realizada através da simulação convencional (*software EnergyPlus*), seria necessário a realização de cerca de 17.280.000 simulações, algo impossível de ser realizado manualmente. Na simulação preliminar, o tempo médio de execução para as tipologias foi aproximadamente o mesmo, variando entre 1 minuto e 11 segundos e 1 minuto e 37 segundos. Na simulação evolutiva, as soluções foram executadas em um contexto de 100 indivíduos em 500 gerações. Isso significa que foram realizadas cerca de 50.000 simulações por tipologia e 250.000 por ZB, totalizando 750.000 simulações.

Essas soluções foram executadas paralelamente em todos os núcleos de processamento disponíveis no computador, e ainda considera a possibilidade de paralelização a nível de instrução proporcionada pela plataforma BESOS. Nessas condições as abordagens custaram em tempo de execução aproximadamente 97 horas por ZB, o que representa algo em torno de 4 dias, ou cerca de 2 semanas para execução de todas as abordagens propostas pelo estudo.

Esses resultados enfatizam o avanço que a otimização multiobjetivo traz para a área da construção civil pela possibilidade da investigação preliminar das variáveis influentes no desempenho das edificações. No sentido computacional, também demonstra a importância de considerar o uso de paralelismo computacional para as execuções finais, já que sem essa estratégia, na melhor das hipóteses, seriam necessários aproximadamente 694 dias para execução da mesma quantidade de simulações, o que representa cerca de 2 anos.

Exemplificando essa discussão, a Figura 63 apresenta um resumo das tipologias, dos respectivos resultados alcançados através da análise multiobjetivo e do custo computacional necessário para execução das abordagens. São apresentados os resultados referentes a uma ZB de aplicação, considerando que o tempo de execução das demais é aproximado.

Figura 63: Representação do custo computacional necessário para execução das estratégias de otimização no contexto da Zona Bioclimática 1



Fonte: Autora (2021).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de utilizar a técnica de otimização multiobjetivo como auxílio à tomada de decisão de parâmetros geométricos e projetuais, visando a discussão sobre adequação de um edifício escolar com projeto-padrão Proinfância ao contexto climático das ZBs 1, 2 e 3.

A análise visou maximizar o potencial exploratório da utilização de uma ferramenta baseada nos princípios de Inteligência Artificial durante o processo inicial de projeto, contando com o estudo de parâmetros formais e tecnológicos. Além disso, a discussão metodológica foi desenvolvida com vistas a sanar um dos objetivos estipulados inicialmente, que seria a discussão do processo de análises evolutivas multiobjetivo sob o olhar de um projetista não-programador, dada a complexidade e incipiência da implementação dessas ferramentas em um mesmo contexto.

A aplicação desse tipo de ferramenta durante as etapas iniciais do processo de projeto permite a avaliação de aspectos que não possuem caráter visual ao projetista, como no caso da redução do consumo de energia elétrica. Levando em conta a discussão apresentada, pode-se afirmar que a utilização de algoritmos evolutivos multiobjetivo como ferramentas de otimização podem contribuir de forma relevante na concepção de edificações mais eficientes, desde que os resultados obtidos através da ferramenta sejam cuidadosamente ponderados.

Mediante as funções objetivo estipuladas, todos os modelos foram otimizados e apresentaram soluções capazes de reduzir a IUE da edificação tanto para aquecimento, quanto para resfriamento. Para o contexto das ZBs analisadas, a tipologia padrão otimizada foi a mais eficiente, sendo que, em ambos os contextos o índice de redução foi de cerca de 80% em relação ao consumo inicial do projeto-padrão com as características estipuladas pelo FNDE. Ainda que as tipologias tenham sido avaliadas no contexto de ZBs frias, os resultados obtidos indicam maior necessidade de refrigeração, o que pode ocorrer em função de dois principais fatores, a alta carga interna que costuma ser recorrente em instituições escolares e a necessidade de maior renovação de ar, ainda que seja utilizada a ventilação híbrida.

Apesar das demais tipologias apresentarem consumo superior ao observado na tipologia padrão, todas apresentaram resultados satisfatórios, inclusive ultrapassando o índice de redução da melhor solução, apresentando uma IUE cerca de 88% inferior ao consumo inicial da edificação não otimizada, como é o caso da tipologia radial. Entre estas, a tipologia denominada L foi a menos eficiente em termos de redução.

As soluções foram avaliadas sob a ótica de uma edificação que utiliza um sistema de ventilação híbrido, com o revezamento entre ventilação natural e climatização artificial. Nesse contexto, a otimização indicou que, para atingir os melhores resultados para redução de consumo por climatização, a espessura do isolante térmico e a absorvância solar das paredes externas foram os parâmetros mais influentes. Para inserção desses edifícios em um contexto frio, foi possível constatar que o isolamento adequado do sistema referente a cobertura é importante, sendo que, o mesmo deve possuir elevada espessura de isolante térmico e baixos valores de absorvância solar. Nesse caso, não é necessário que o piso receba isolamento, pois o mesmo não foi influente nos resultados. Com base nos fluxos térmicos, conclui-se

também que a orientação solar e a composição das esquadrias foram parâmetros que influenciaram significativamente o comportamento das edificações, onde as janelas apresentaram grande sensibilidade em relação aos ganhos de calor do edifício.

Constata-se ainda que, na área da arquitetura, o termo “compacto” geralmente é associado apenas a dimensão reduzida dos espaços, no entanto, a compacidade deve ser dada pela relação entre suas partes. Através dos resultados provenientes da otimização multiobjetivo, observa-se que a tipologia padrão apresenta um IC consideravelmente inferior as demais propostas e, ainda assim, é a tipologia mais eficiente energeticamente. A tipologia Central, por exemplo, apresenta a menor área de envoltória, o menor FF e o maior IC, no entanto, não representa as soluções mais eficientes para o contexto de implantação analisado.

Assim como o que foi mencionado durante a avaliação das soluções, mais que a compacidade, a organização dos espaços dentro da composição formal das tipologias foi extremamente influente nos resultados obtidos, o que ocorre devido aos ganhos provenientes pela radiação solar em que estes espaços foram expostos. A otimização conjunta dos parâmetros relacionados à tecnologia da envoltória com aqueles referentes a sua geometria pode reduzir a troca de energia entre o interior e o exterior de uma edificação de forma muito mais eficiente.

Considerando a grande quantidade de definições do projetista em relação a fase de concepção de projetos, pode-se observar uma evolução das técnicas, ferramentas e conhecimentos envolvidos durante o processo de projeto dos edifícios. Ao modificar o método projetual tradicional, a inserção de novas tecnologias como ferramenta de apoio a tomada de decisão demonstra a necessidade da investigação do papel da tecnologia no ato de projetar arquitetura. Nesse sentido, considerando o baixo desempenho que tem sido observado nas edificações, seria interessante que esse tipo de otimização passe a integrar as etapas do processo de projeto, uma vez que a ferramenta possibilita a compreensão das variáveis sob o desempenho dos edifícios antes mesmo da sua construção.

Esse estudo solidifica a ideia de que a complexidade do desempenho de uma edificação varia em função de incontáveis fatores e é justamente isso que faz com que um edifício seja caracterizado como um sistema complexo e único, no qual sua efetividade pode ser alcançada através de inúmeras possibilidades de composição.

Por outro lado, ainda que essa integração entre simulação e projeto seja desejada, os resultados demonstram que essa associação ainda precisa evoluir para uma efetiva aplicação em edifícios reais. Essa abordagem não surge com a intenção de substituição dos métodos tradicionais de projeto, mas sim como uma ferramenta facilitadora do processo, sendo necessária uma cuidadosa avaliação do processo e da utilização de ferramentas de simulação na otimização das edificações.

5.1. Limitações do trabalho

A otimização multiobjetivo com a utilização de algoritmos evolutivos consiste em um campo de pesquisa recente. Por esse motivo, certamente ainda há um aprofundamento a ser realizado para melhoria dos processos de implementação, principalmente no que diz respeito as possibilidades de variação dos parâmetros relacionados à tomada de decisão de um projeto arquitetônico. Assim como para a autora do trabalho, a aplicação dessa estratégia ainda representa um desafio à formação de um Arquiteto e Urbanista devido a necessidade de aperfeiçoamento a área de programação. Nesse sentido, a presente pesquisa contou com algumas limitações, que são relacionadas logo abaixo:

- a) A plataforma de otimização utilizada (BESOS) não proporciona uma vasta gama de possibilidades para variação dos parâmetros a serem otimizados, o que ocorre devido a necessidade de interoperabilidade com os objetos do *software EnergyPlus*, que precisam possuir um parâmetro quantitativo para variação. Nesse sentido, foram otimizadas poucas variáveis;
- b) Devido a primeira limitação, a seleção das variáveis de otimização não foi realizada através de uma análise de sensibilidade, e sim com base no que preconiza a literatura, o que pode acabar suprimindo outras características influentes;
- c) Não foi configurado um revestimento de proteção do isolamento térmico aplicado as paredes externas. Recomenda-se que para esse tipo de composição seja considerado uma camada de argamassa de regularização com espessura mínima de 5 milímetros,

- d) Apesar de ser mais eficiente, a utilização de um sistema de ventilação híbrido não representa uma aplicação real sem a utilização de um sistema de automação;
- e) Devido aos resultados obtidos, acredita-se que a taxa de renovação de ar adotada não seja suficiente para ventilação necessária a população da EMEI;
- f) Devido ao alto custo computacional das análises e a ausência de equipamentos com grandes recursos de processamento, os modelos foram avaliados sem a presença de dispositivos de sombreamento, permitindo que o setor pedagógico pudesse ser direcionado para qualquer orientação. Além disso, o processo de simulação também não considerou a influência do entorno na ventilação e sombreamento das tipologias;
- g) O estudo se concentrou no consumo de energia por climatização durante a fase operacional da edificação e, por esse motivo, as tipologias foram avaliadas apenas para as zonas bioclimáticas frias.

5.2. Trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros:

- a) Estender a pesquisa para todas as ZBs através do estudo de outras funções objetivo contrastantes, como:
 - i. O número de horas em desconforto térmico e o número de renovações por hora;
 - ii. Desempenho térmico e Iluminação natural.
- b) Utilizar a associação da linguagem de programação visual *Grasshopper* com o método de modelagem tridimensional do *software Rhinoceros* para a investigação da eficiência dos projetos-padrão Proinfância, considerando a parametrização da geometria do edifício.

Referências

- ABDALLAH, M. A. B. **Optimizing the selection of sustainability measures for existing buildings**. Urbana, Illinois, 2014. 223f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014.
- ALEXANDER, C. **The Determination of Components for an Indian Village**. In: **Conference on Design Methods** (Edição por John Chris Jones e D. G. Thornley). Oxford: Pergamon Press, 1963.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2013.
- ARANTES, P. F. **Arquitetura na era digital-financeira: Desenho, canteiro e renda da forma**. Sao Paulo: Editora 34, 2012.
- ARCHER, B. **Systematic Method for Designers**. Londres: Council of Industrial Design, 1965).
- ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo**. Campinas, 2002. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- ASADI, E. et al. A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. **Building and Environment**, v. 56, p. 370-378, 2012.
- ASCIONE, F. et al. A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance. **Energy and Buildings**, v. 88, p. 78-90, 2015.
- ASCIONE, F. et al. Multi-stage and multi-objective optimization for energy retrofitting a developed hospital reference building: A new approach to assess cost-optimality. **Applied Energy**, v. 174, p. 37-68, 2016.
- ASCIONE, F. et al. CASA, cost-optimal analysis by multi-objective optimisation and artificial neural networks: A new framework for the robust assessment of cost-optimal energy retrofit, feasible for any building. **Energy and Buildings**, v. 146, p. 200–219, 2017a.

ASCIONE F. et al. Resilience of robust costoptimal energy retrofit of buildings to global warming: a multi-stage, multi-objective approach. **Energy and Buildings**, v. 153, p. 150-167, 2017b.

ASCIONE, F. et al. Retrofit of villas on Mediterranean coastlines: Pareto optimization with a view to energy-efficiency and cost-effectiveness. **Applied Energy**, v. 254, 2019.

ASCIONE et al. A real industrial building: Modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit. **Journal of Building Engineering**, v. 29, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15.575**. Norma Brasileira de Edifícios habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações: parte 2: métodos de cálculos da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações). Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações: parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações de unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.

ATTIA S. et al. Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. **Energy and Buildings**, v. 60, p. 110-124, 2013.

BATRA, U.; SINGHAL, S. Optimum level of insulation for energy efficient envelope of office buildings. **International Journal Of Environmental Science And Technology**, v. 14, n. 11, p.2389-2398, 2017.

BELTRAMIN, R. M. G. **Caracterização e sistematização de quatro modelos de análise gráfica: Clark, Pause, Ching, Baker e Unwin**. Campinas, 2015. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

BERLEZE, A. S.; BRASILEIRO, A. de B. H.; SILVOSO, M. M. Multi-objective optimization of the geometry of single-family housing to improve thermal performance. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 2, p. 41-65, 2021.

BORGES, P. S. S. **Notas e transparências de sala de aula**. Belém: CESUPA, Curso de Pós Graduação em Inteligência Computacional - Parte 1 Computação Evolucionária, 2000.

BRASIL. Ministério da Educação. Fundo Nacional para o Desenvolvimento da Educação. **Resolução nº 6, 24 de abril de 2007**. Brasília, 2007. Disponível em: <https://www.fnde.gov.br/index.php/acesso-ainformacao/institucional/legislacao/item/3130-resolu%C3%A7%C3%A3o-cd-fnde-n%C2%BA-6-de-24-de-abril-de-2007>. Acesso em: 23 dez. 2020.

BRASIL. Ministério da Educação. Fundo Nacional para o Desenvolvimento da Educação. **Projeto Proinfância Tipo 2**. Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação – FNDE. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.fnde.gov.br/index.php/programas/proinfancia/eixos-de-atuacao/projetos-arquitetonicos-para-construcao/item/6413-proinfancia-tipo-2>. Acesso em: 20 ago. 2020.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, 1996.

BRASIL. Tribunal de Contas da União (TCU). **TC 011.441/2012-7: relatório de auditoria**. Brasília, 2012b. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A8182A24E08D405014E0D3E62EB30B3>. Acesso em: 12 fev. 2021.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Inmetro. Portaria nº 42, de 24 de fevereiro de 2021. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)**. Diário Oficial da União, Brasília - DF, 2021.

BRE, F. et al. Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 853-866, 2016.

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

BRE, F.; ROMAN, N.; FACHINOTTI, V. D. An efficient metamodel-based method to carry out multi-objective building performance optimizations. **Energy and Buildings**, v. 206, p. 109576, 2020.

BROWNLEE, A. E. I.; WRIGHT, J. A. Constrained, mixed-integer and multi-objective optimisation of building designs by NSGA-II with fitness approximation. **Applied Soft Computing**, v 33, p. 114-126, 2015.

CABEZA, L. F. et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 394-416, 2014.

CARLUCCI, S. et al. Multiobjective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). **Energy and Buildings**, v. 104, p. 378-394, 2015.

CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R.; BERTÉ, E. J. Avaliação de desempenho térmico e lumínico de elementos de controle solar projetados através de modelagem paramétrica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16. **Anais...** São Paulo, 2016. p. 604-619.

CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT. **About mixed-mode**. Disponível em: <https://cbe.berkeley.edu/mixedmode/index.html>. Acesso em: 07 out. 2020.

CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. **AM13 Mixed mode ventilation**. Grã-Bretanha, 2000.

CHEN, S.; MONTGOMERY, J.; BOLUFÉ-RÖHLER, A. Measuring the curse of dimensionality and its effects on particle swarm optimization and differential Evolution. **Applied Intelligence**, v. 42, p. 514-526, 2015.

CHEN, X.; YANG, H.; & SUN, K. A holistic passive design approach to optimize indoor environmental quality of a typical residential building in Hong Kong. **Energy**, v. 113, p. 267-281, 2016.

CHEN, X.; YANG, H.; Integrated energy performance optimization of a passively designed high-rise residential building in different climatic zones of China. **Applied Energy**, v. 215, p. 145-158, 2018.

CHEN, X. et al. (2019). Approaching low-energy high-rise building by integrating passive architectural design with photovoltaic application. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 313-330, 2019.

CHING, F. D. K. **Arquitetura: forma, espaço e ordem**. São Paulo: Martins Fontes, 2005.

COAKLEY, D.; RAFTERY, P.; KEANE, M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. **Renewable and sustainable energy reviews**, v.37, p.123-141, 2014.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VAN VELDHUIZEN, D. A. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. Springer, v. 5, 2007.

COHON, J. L. **Multiobjective Programming and Planning**. Academic Press, 1978.

DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. John Wiley & Sons, v. 16, 2001.

DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE transactions on evolutionary computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.

DALBEM, R. **Desempenho de edificação residencial no Sul do Brasil sob a ótica energética e econômica: da NBR 15575 à Passive House**. Pelotas, 2018. 124 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

DALBEM, R. et al. Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept. **Energy**, v. 167, p. 1278–1296, 2019.

DELGARM, N. et al. Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). **Applied Energy**, v. 170, p. 293-303, 2016a.

DELGARM, N. et al. A novel approach for the simulation-based optimization of the buildings energy consumption using NSGA-II: Case study in Iran. **Energy and Buildings**, v. 127, p. 552-560, 2016b.

DELGARM, N. SAJADI, B. DELGARM, S. Multi-objective Optimization of Building Energy Performance and Indoor Thermal Comfort: A New Method using Artificial Bee Colony (ABC). **Energy and Buildings**, v. 131, p. 42-53, 2016.

DIDONÉ, E. L. PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 139-154, 2010.

DUBOIS, D.; DUBOIS, E. F. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. **Archives Internal Medicine**, v. 17, n. 862, 1916.

ECHENAGUCIA, T. M. et al. The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. **Applied Energy**, v.154, p. 577-591, 2015.

EINI, S. et al. Multi-objective optimization of a cascade refrigeration system: Exergetic, economic, environmental, and inherent safety analysis. **Applied Thermal Engineering**, v. 107, p. 804-817, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço energético nacional: relatório síntese 2020 - Ano base 2019**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço energético nacional: relatório síntese 2021 - Ano base 2020**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2021.

ENERGY INCITIES. **Building and Energy Systems Optimization and Surrogate-modelling – BESOS**. Disponível em: <https://gitlab.com/energyincities/besos/>. Acesso em: 7 out. 2020.

EVINS, R. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 22, p. 230-245, 2013.

FERRARA, M. et al. EDeSSOpt – Energy Demand and Supply Simultaneous Optimization for cost-optimized design: Application to a multi-family building. **Applied Energy**, v. 236, p. 1231-1248, 2019.

FERDYN-GRYGIEREK, J.; GRYGIEREK, K. Multi-Variable Optimization of Building Thermal Design Using Genetic Algorithms. **Energies**, v. 10, n. 1570, p. 1-20, 2017.

FOGEL, L. J. Autonomous automata. **Industrial research**, v.4, p.14-19, 1962.

FONSECA, L. P. G. et al. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 267-288, 2017.

GASTINES, M.; CORREA, É.; PATTINI, A. Heat transfer through window frames in EnergyPlus: model evaluation and improvement. **Advances in Building Energy Research**, v.13, n.1, p.138-155, 2019.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Addison Wesley, 1989.

GOU, S. et al. Passive design optimization of newly-built residential buildings in Shanghai for improving indoor thermal comfort while reducing building energy demand. **Energy and Buildings**, v. 169, p. 484-506, 2018.

GOUVEIA, L. B. et al. Algoritmos genéticos: aplicando a teoria a um estudo de caso Genetic algorithms: applying theory to a case study. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n.3, p. 21053-21077, 2021.

GRANADEIRO, V.; CORREIA, J. R.; LEAL, V. M. S.; DUARTE, J. P. Envelope-related energy demand: A design indicator of energy performance for residential buildings in early design stages. **Energy And Buildings**, v. 61, p. 215-223, 2013.

GUARDA, E. L. A. et al. Influência da absorvância em sistemas verticais: Diagnóstico do impacto no consumo energético de um edifício comercial na cidade de Sinop-MT. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 20845-20859, 2019.

GYLLING, G. et al. Holistic evaluation of sustainable buildings through a symbiosis of quantitative and qualitative assessment methods. In: 27^a Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve: **PLEA - 2011**. p. 11-16.

HAMDY, M.; HASAN, A.; SIREN, K. Impact of adaptive thermal comfort criteria on building energy use and cooling equipment size using a multi-objective optimization scheme. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 2055-2067, 2011a.

HAMDY, M.; HASAN, A.; & SIREN, K. Applying a multi-objective optimization approach for Design of low-emission cost-effective dwellings. **Building and Environment**, v. 46, p. 109-123, 2011b.

HAMDY, M.; NGUYEN, A.; HENSEN, J. L. M. A performance comparison of multi-objective optimization algorithms for solving nearly-zero-energy-building design problems. **Energy and Buildings**, v. 121, p. 57-71, 2016.

HOLLAND, J. **Adaptation in natural and artificial systems**, 1 ed. Ann Arbor: The University of Michigan, 1975.

HUANG, Z. et al. Back-analysis and parameter identification for deep excavation based on Pareto multiobjective optimization. **Journal of Aerospace Engineering**, v. 28, n. 6, 2015.

JAVANROODI, K.; NIK, V. M.; MAHDAVINEJAD, M. A novel design-based optimization framework for enhancing the energy efficiency of high-rise office buildings in urban areas. **Sustainable Cities and Society**, 2019.

JAVID, A. S. et al. Multi objective planning for sustainable retrofit of educational buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 24, 2019.

JIANG, J. et al. A study on pupils' learning performance and thermal comfort of primary schools in China. **Building and Environment**, v. 134, p. 102-113, 2018.

JONES, J. C. **Design Methods**. New York: John Wiley & Sons, 1992.

JU, C.; NING, Y.; PAN, W. A Review of Interdependence of Sustainable Building. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 56, p. 120-127, 2016.

KARMELLOS, M.; KIPRAKIS, A.; MAVROTAS, G. A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies. **Applied Energy**, v. 139, p. 131-150, 2015.

KATS, G. **Tornando nosso ambiente construído mais sustentável. Custos, benefícios e estratégias**. São Paulo: Island Press, 2014.

KHOROSHILTSEVA, M.; SLANZI, D.; POLI, I. A Pareto-based multi-objective optimization algorithm to design energy-efficient shading devices. **Applied Energy**, v. 184, p. 1400-1410, 2016.

KIRIMTAT, A. et al. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 23-49, 2016.

KIRIMTAT, A. et al. Multi-objective energy and daylight optimization of amorphous shading devices in buildings. **Solar Energy**, v. 185, p. 100-111, 2019.

KONIS, K.; GAMAS, A.; KENSEK, K. Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. **Solar Energy**, v. 125, 161-179, 2016.

KOWALTOWSKI, D. C. **Arquitetura e escolar o projeto do ambiente de ensino**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura, 3 ed.** Rio de Janeiro, PW, 2013.

LARTIGUE, B.; LASTERNAS, B.; LOFTNESS, V. Multi-objective optimization of building envelope for energy consumption and daylight. **Indoor and Built Environment**, p. 23, p. 70-80, 2013.

LAWSON, B. Como arquitetos e designers pensam. **Oficina de textos**, 2011.

LEGORBURU, G.; SMITH, A. D. Incorporating Observed Data into Early Design Energy Models for Life Cycle Cost and Emissions Analysis of Campus Buildings. **Energy and Buildings**, 2020.

LEITZKE, R. K. et al. Algoritmo para análise evolutiva multiobjetivo em simulações termoenergéticas. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, v.16, n.1, p.24-42, 2021.

LI, X.; MALKAWI, A. Multi-objective optimization for thermal mass model predictive control in small and medium size commercial buildings under summer weather conditions. **Energy**, v. 112, p. 1194-1206, 2016.

LIEBICH, T. A design grammar for architectural languages. **Automation In Construction**, v. 2, n. 4, p.261-273, abr. 1994.

LINCZUK, V. C. C.; BASTOS, L. E. G. Otimização multiobjetivo orientada ao desempenho térmico para o projeto de edificações de baixo consumo de energia na Região Sul do Brasil. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 509-529, 2020.

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos**, 2 ed. Brasport, 2008.

LONGO, S., MONTANA, F., & RIVA SANSEVERINO, E. A review on optimization and costoptimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations. **Sustainable Cities and Society**, v. 45, p. 87-104, 2019.

LOPES, A. F. O. **Da Simulação ao Projeto: Avaliação de conforto térmico em ambiente escolar padronizado**. Brasília, 2020. 153 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

LU, Y. et al. Renewable energy system optimization of low/zero energy buildings using single-objective and multi-objective optimization methods. **Energy and Buildings**, v. 89, p. 61-75, 2015.

MACIEL, T. dos S. et al. Análise Termoenergética e do Nível de Conforto Térmico de Projetos-padrão de Unidades Proinfância. **Cadernos PROARQ**, v. 1, p. 202-221, 2019.

MACIEL, T. dos S. et al. Considerações iniciais sobre a utilização de otimização multiobjetivo em um projeto-padrão Proinfância implantado na zona bioclimática 2. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020.

MACIEL, T. dos S. et al. Otimização termoenergética de uma edificação escolar: discussão sobre o desempenho de quatro algoritmos evolutivos multiobjetivo. **Ambiente Construído**, 2021.

MACHAIRAS, V.; TSANGRASSOULIS, A.; AXARLI, K. Algorithms for optimization of building design: a review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 101-112, 2014.

MARTINS, T. **De condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano: Otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical**. Rio de

Janeiro, 2014. 393f. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. G. M.

MAURO, M. et al. A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category. **Energy and Buildings**, v.107, p. 456-478, 2015.

MIETTINEN, K. **Nonlinear multiobjective optimization**. Springer Science & Business Media, v.12, 2012.

MODLER, N. L. **Arquitetura e Educação infantil: Abordagem experiencial em um estudo de caso no norte do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro, 2020. 333 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

MUSTAPA, M. S. et al. Thermal comfort and occupant adaptive behaviour in Japanese university buildings with free running and cooling mode offices during summer. **Building and Environment**, v. 105, p. 332-342, 2016.

NADERI, E. et al. Multi-objective simulation-based optimization of controlled blind specifications to reduce energy consumption, and thermal and visual discomfort: Case studies in Iran. **Building and Environment**, v. 169, 2020.

NIEMELÄ, T.; KOSONEN, R.; JOKISALO, J. Cost-effectiveness of energy performance renovation measures in Finnish brick apartment buildings. **Energy and Buildings**, v. 137, p. 60-75, 2017.

NIMLYAT, P.; DASSAH, E.; ALLU, E. Computer simulations in buildings: implications for Building energy performance. **Computer**, v. 4, n. 3, 2014.

NGUYEN, A.T.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v.113, p.1043-1058, 2014.

OCHOA, J. H.; ARAÚJO, D. L.; SATTler, M. A.; Análise do conforto ambiental em salas de aula: comparação entre dados técnicos e a percepção do usuário. **Ambiente Construído**, v. 12, p. 91-114, 2012.

OLIVEIRA, E. A. S. et al. **Human thermal comfort and architectural volume**. Acta Scientiarum - Technology, v. 38, n. 2, p. 129-135, 2016.

PAL, S. K. et al. A life cycle approach to optimizing carbon footprint and costs of a residential building. **Building and Environment**, v. 123, p. 146-162, 2017.

PAN, L. et al. Multi-objective optimization for building performance design considering thermal comfort and energy consumption. In: CHINESE CONTROL CONFERENCE, Chengdu, 2016. **Proceedings [...]** Chengdu, 2016.

PAPAMICHAEL, K. M. **Design Process and Knowledge Possibilities and Limitations of Computer-Aided Design**. Berkeley, 1991. Thesis (Ph.D.) – University of California, Berkeley, 1991.

PARETO, V. **Cours D'économie Politique**. Pichon Libraire (Paris) and Duncker & Humbolt (Leipzig). Lausanne, 1896.

RHEINGANTZ, P. A. **Arquitetura escolar para a educação infantil: abordagem transdisciplinar para a avaliação e a concepção de creches para a Prefeitura Municipal de Pelotas e Região Sul do Rio Grande do Sul**. Relatório de atividades Vinculado ao Proc. Capes 23038009722201321. 2013. 2016.

RHEINGANTZ, P. A. et al. Place, Architecture Design and Thermal Comfort: A Municipal Day Care Childhood Center in Colônia Z3, Pelotas/RS, Brazil. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 11, p. 364-379, 2017.

SAKR, D. A.; SHERIF, A.; EL-HAGGAR, S. M. Environmental management systems' awareness: an investigation of top 50 contractors in Egypt. **Journal of cleaner production**, v. 18, n. 3, p. 210-218, 2010.

SALIMI, S.; HAMMAD, A. Optimizing Energy Consumption and Occupants Comfort in Open-plan Offices Using Local Control based on Occupancy Dynamic Data. **Building and Environment**, 2020.

SAMPAIO, P. R. **Teoria, métodos e aplicações de otimização multiobjetivo**. São Paulo, 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SANTANA, L. O. **Otimização multiobjetivo da geometria de edificações residenciais energeticamente eficientes por meio de algoritmos genéticos**. Viçosa, 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SANTANA, L. O.; GUIMARÃES, I. B. B.; CARLO, J. C. Parametrização Aplicada ao Desempenho Energético de Edificações. **V!RUS**, v. 11, 2015.

SARTORI, G. **Avaliação do impacto da orientação solar no conforto e desempenho térmico de projeto padrão de pré-escola do Programa Proinfância nas zonas bioclimáticas brasileiras**. Porto Alegre, 2019. 180 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SCHITO, E. et al. Multi-objective optimization of HVAC control in museum environment for artwork preservation, visitors' thermal comfort and energy efficiency. **Building and Environment**, 2020.

SHADRAM, F., & MUKKAVAARA, J. An integrated BIM-based framework for the optimization of the trade-off between embodied and operational energy. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1189-1205, 2018.

SHADRAM, F.; MUKKAVAARA, J. Exploring the effects of several energy efficiency measures on the embodied/operational energy trade-off: A case study of Swedish residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 183, 283-296, 2019.

SHARIF, S. A.; HAMMAD, A. Simulation-Based Multi-Objective Optimization of Institutional Building Renovation Considering Energy Consumption, Life-Cycle Cost and Life-Cycle Assessment. **Journal of Building Engineering**, v. 21, 2018.

SHARIF, S. A.; HAMMAD, A. Developing surrogate ANN for selecting near-optimal building energy renovation methods considering energy consumption, LCC and LCA. **Journal of Building Engineering**, v. 25, 2019.

SHI, X. et al. A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 65, p. 872-884, 2016.

SOUSA, J. Energy simulation software for buildings: review and comparison. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INFORMATION TECHNOLOGY FOR ENERGY APPLICATIONS, Lisboa, 2012. **Proceedings [...]** Lisboa: Ordem dos Engenheiros, 2012.

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

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY – DOE. **EnergyPlus Documentation: Input Output References**. US Department of Energy, 2021.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM. **Sustainable building**. Disponível em: <https://www.unenvironment.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/sustainable-buildings>. Acesso em: 20 ago. 2020.

VILCEKOVA, S. et al. Indoor environmental quality of classrooms and occupants' comfort in a special education school in Slovak Republic. **Building and Environment**, v. 120, p. 29-40, 2017.

VELDHUIZEN, D. A. V.; LAMONT, G. B. Multiobjective evolutionary algorithms: analyzing the state-of-the-art. **Evolutionary Computation**, v. 8, n. 2, p. 125-147, 2000.

VENÂNCIO, R.; PEDRINI, A. Investigando o projeto de envoltória: questionário sobre prática arquitetônica e desempenho térmico. In: Encontro Nacional e Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, 11. **Anais...** Búzios, 2011. p. 1-10.

YANG, D. et al. Multi-disciplinary and multi-objective optimization problem re-formulation in computational design exploration: A case of conceptual sports building design. **Automation in Construction**, v. 92, p. 242-269, 2018.

YIGIT, S.; OZORHON, B. A simulation-based optimization method for designing energy efficient buildings. **Energy and Buildings**, v. 178, p. 216–227, 2018.

YU, W. et al. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. **Energy and Buildings**, v. 88, p. 135-143, 2015.

ZALUSKI, P. R. da S.; DANTAS, M. J. P. Aplicação de softwares de simulação na educação em engenharia: um relato de experiências internacionais exitosas em cursos de modelagem e simulação de sistemas. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 1, p. 170-181, 2018.

ZEMERO, B. R. **Metodologia para o projeto preliminar de edifícios utilizando otimização multiobjetivo baseada na simulação de desempenho**. Belém, 2019. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

ZHAI, Y. et al. A multi-objective optimization methodology for window design considering energy consumption, thermal environment and visual performance. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1190-1199, 2019.

ZHANG, L.; ZHANG, L.; WANG, Y. Shape optimization of free-form buildings based on solar radiation gain and space efficiency using a multi-objective genetic algorithm in the severe cold zones of China. **Solar Energy**, v. 132, p. 38-50, 2016.

ZHU, L.; WANG, B.; SUN, Y. Multi-objective optimization for energy consumption, daylighting and thermal comfort performance of rural tourism buildings in north China. **Building and Environment**, v. 176, 2020.

ZITZLER, E.; LAUMANN, M.; THIELE, L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. **TIK-report**, v.103, 2001.

WANG, X. et al. Collaborative optimization between passive design measures and active heating systems for building heating in Qinghai-Tibet plateau of China. **Renewable Energy**, v. 147, p. 683-694, 2020.

WEBER, F. da S. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para uso no programa EnergyPlus**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

WBCSD. World Business Council for Sustainable Development. Transforming the Built Environment. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/Programs/Cities-and-Mobility/Sustainable-Cities/Transforming-the-Built-Environment>. Acesso em: 12 fev. 2021.

WU, M. H.; NG, T. S.; SKITMORE, M. R. Sustainable building envelope design by considering energy cost and occupant satisfaction. **Energy for Sustainable Development**, v. 31, p. 118-129, 2016.

Apêndices

Apêndice A – Protocolo de revisão

1. Objetivo		
Identificar como estão sendo aplicadas as estratégias de otimização multiobjetivo na análise de eficiência de projetos de arquitetura.		
2. Questões de pesquisa		
1. Como estratégias de otimização multiobjetivo são aplicadas na análise de eficiência de um projeto? <ul style="list-style-type: none">• Objetivo;• Método de otimização/algoritmos;• Softwares utilizados;• Funções-objetivo;• Variáveis de otimização;• Número de indivíduos/gerações;• Método de análise/resultados;		
2. Quais os benefícios da Otimização Baseada em Simulação?		
3. Palavras-chave		
<i>multi-objective simulation-based optimization</i>	OR	<i>simulation based optimization</i>
<i>genetic algorithm</i>		<i>evolutionary algorithm</i>
<i>thermal comfort</i>		<i>energy efficiency</i>
4. Base de artigos		
<i>Science Direct</i>	http://www.sciencedirect.com	
5. Strings de busca		
<i>(“multi-objective simulation-based optimization” OR “simulation based optimization”) AND (“genetic algorithm” OR “evolutionary algorithm”) AND (“thermal comfort” OR “energy efficiency”)</i>		
6. Critérios de inclusão		7. Critérios de Exclusão
<ul style="list-style-type: none">• Área de Pesquisa: Arquitetura, Construção e Computação• Idioma: Inglês ou Português• Ano de Publicação: 2010 a 2020• Tipo de publicação: artigos científicos• Disponibilidade: texto completo		<ul style="list-style-type: none">• Não ser das áreas selecionadas• Não estar escrito nos idiomas selecionados• Não ter sido publicado no período selecionado• Não ser artigo científico• Texto completo não encontrado• Não tratar do tema

Apêndice B – Memória de cálculo das principais propriedades da envoltória conforme a metodologia da NBR 15.220-2

B.1. Cálculo da parede equivalente externa com tijolos de nove furos de 14 cm x 19 cm x 39 cm, assentados em ½ vez

Resistência térmica (RT)

$$R1 = \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}} + \frac{e_{arg}}{\lambda_{arg}} + \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}} \rightarrow R1 = \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,14}{1,15} + \frac{0,03}{1,15} \rightarrow R1 = 0,1739 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R2 = \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}} + \frac{e_{cer}}{\lambda_{cer}} + \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}} \rightarrow R2 = \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,14}{0,90} + \frac{0,03}{1,15} \rightarrow R2 = 0,2077 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R3 = \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}} + \frac{e_{cer}}{\lambda_{cer}} + ar + \frac{e_{cer}}{\lambda_{cer}} + ar + \frac{e_{cer}}{\lambda_{cer}} + ar + \frac{e_{cer}}{\lambda_{cer}} + \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}}$$

$$R3 = \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,007}{0,90} + 0,16 + \frac{0,007}{0,90} + 0,16 + \frac{0,007}{0,90} + 0,16 + \frac{0,007}{0,90} + \frac{0,03}{1,15}$$

$$R3 = 0,5633 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$A1 (\text{arg. assentamento}) = (0,02 \times 0,41) + 0,02 \times 0,19 \rightarrow A1 = 0,0120 \text{ m}^2$$

$$A2 (\text{cerâmica}) = (0,007 \times 0,39) \times 4 \rightarrow A2 = 0,0109 \text{ m}^2$$

$$A3 (\text{abertura tijolo}) = (0,054 \times 0,39) \times 3 \rightarrow A3 = 0,0632 \text{ m}^2$$

$$rt = \frac{A1 + A2 + A3}{\frac{A1}{R1} + \frac{A2}{R2} + \frac{A3}{R3}} \rightarrow rt = \frac{0,0120 + 0,0109 + 0,0632}{\frac{0,0120}{0,1739} + \frac{0,0109}{0,2077} + \frac{0,0632}{0,5633}} \rightarrow rt = 0,3684 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Rreal = Requivalente

$$RT = Rse + rt + Rsi \rightarrow RT = 0,04 + 0,3684 + 0,13 \rightarrow \mathbf{RT = 0,5384 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{RT} \rightarrow U = \frac{1}{0,5384} \rightarrow \mathbf{U = 1,86 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Capacidade térmica (CT)

$$Ct = e \cdot c \cdot \rho \rightarrow Ct1 = 0,20 \times 1 \times 2000 \rightarrow Ct1 = 400 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

$$Ct2 = (0,03 \times 1 \times 2000) \times 2 + (0,14 \times 0,92 \times 1600) \rightarrow Ct2 = 326,08 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

$$Ct3 = (0,03 \times 1 \times 2000) \times 2 + (0,007 \times 0,92 \times 1600) \times 4 \rightarrow Ct3 = 161,22 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

$$CT = \frac{A1 + A2 + A3}{\frac{A1}{Ct1} + \frac{A2}{Ct2} + \frac{A3}{Ct3}} \rightarrow CT = \frac{0,0120 + 0,0109 + 0,0632}{\frac{0,0120}{400} + \frac{0,0109}{326,08} + \frac{0,0632}{161,22}} \rightarrow CT = 189,05 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

Espessura equivalente (e)

$$rt = R_{reb} + R_{cer eq} + R_{ar} + R_{cer eq} + R_{reb}$$

$$0,3684 = \frac{0,03}{1,15} + \frac{e_{cer}}{0,90} + 0,16 + \frac{e_{cer}}{0,90} + 0,16 + \frac{0,03}{1,15} \rightarrow 0,3684 = 0,2122 + \frac{2 e_{cer}}{0,90}$$

$$0,1562 = \frac{2 e_{cer}}{0,90} \rightarrow e_{cer} = 0,0702 \text{ m}$$

Densidade (ρ)

$$CT = 2 (e \times c \times \rho)_{argamassa} + 2 (e \times c \times \rho)_{cerâmica}$$

$$189,05 = (0,03 \times 1 \times 2000) \times 2 + (0,0702 \times 0,92 \times \rho) \times 2 \rightarrow 189,05 = 120 + 0,1292\rho$$

$$69,05 = 0,1292\rho \rightarrow \rho = 534,44 \text{ Kg/m}^3$$

B.2. Cálculo da parede equivalente interna com tijolos de nove furos de 9 cm x 19 cm x 39 cm, assentados em 1/2 vez

Resistência térmica (RT)

$$R1 = \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}} + \frac{e_{arg}}{\lambda_{arg}} + \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}} \rightarrow R1 = \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,09}{1,15} + \frac{0,03}{1,15} \rightarrow R1 = 0,1304 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R2 = \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}} + \frac{e_{cer}}{\lambda_{cer}} + \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}} \rightarrow R1 = \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,09}{0,90} + \frac{0,03}{1,15} \rightarrow R2 = 0,1522 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R3 = \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}} + \frac{e_{cer}}{\lambda_{cer}} + ar + \frac{e_{cer}}{\lambda_{cer}} + ar + \frac{e_{cer}}{\lambda_{cer}} + \frac{e_{reb}}{\lambda_{reb}}$$

$$R3 = \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,007}{0,90} + 0,16 + \frac{0,007}{0,90} + 0,16 + \frac{0,007}{0,90} + \frac{0,03}{1,15}$$

$$R3 = 0,3955 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$A1 (\text{arg. assentamento}) = (0,02 \times 0,41) + 0,02 \times 0,19 \rightarrow A1 = 0,0120 \text{ m}^2$$

$$A2 (\text{cerâmica}) = (0,007 \times 0,39) \times 4 \rightarrow A2 = 0,0109 \text{ m}^2$$

$$A3 (\text{abertura tijolo}) = (0,054 \times 0,39) \times 3 \rightarrow A3 = 0,0632 \text{ m}^2$$

$$rt = \frac{\frac{A1}{R1} + \frac{A2}{R2} + \frac{A3}{R3}}{\frac{A1}{R1} + \frac{A2}{R2} + \frac{A3}{R3}} \rightarrow rt = \frac{\frac{0,0120}{0,1304} + \frac{0,0109}{0,1522} + \frac{0,0632}{0,3955}}{\frac{0,0120}{0,1304} + \frac{0,0109}{0,1522} + \frac{0,0632}{0,3955}} \rightarrow rt = 0,2663 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Rreal = Requivalente

$$RT = Rse + rt + Rsi \rightarrow RT = 0,04 + 0,2663 + 0,13 \rightarrow \mathbf{RT = 0,4363 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{RT} \rightarrow U = \frac{1}{0,4363} \rightarrow \mathbf{U = 2,29 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Capacidade térmica (CT)

$$Ct = e.c.\rho \rightarrow Ct1 = 0,15 \times 1 \times 2000 \rightarrow Ct1 = 300 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

$$Ct2 = (0,03 \times 1 \times 2000) \times 2 + (0,09 \times 0,92 \times 1600) \rightarrow Ct2 = 252,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

$$Ct3 = (0,03 \times 1 \times 2000) \times 2 + (0,007 \times 0,92 \times 1600) \times 3 \rightarrow Ct3 = 150,91 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

$$CT = \frac{\frac{A1}{Ct1} + \frac{A2}{Ct2} + \frac{A3}{Ct3}}{\frac{A1}{Ct1} + \frac{A2}{Ct2} + \frac{A3}{Ct3}} \rightarrow CT = \frac{\frac{0,0120}{300} + \frac{0,0109}{252,5} + \frac{0,0632}{150,91}}{\frac{0,0120}{300} + \frac{0,0109}{252,5} + \frac{0,0632}{150,91}} \rightarrow \mathbf{CT = 151,53 \text{ kJ/m}^2\text{K}}$$

Espessura equivalente (e)

$$rt = R_{reb} + R_{cer\ eq} + R_{ar} + R_{cer\ eq} + R_{reb}$$

$$0,2663 = \frac{0,03}{1,15} + \frac{e_{cer}}{0,90} + 0,16 + \frac{e_{cer}}{0,90} + \frac{0,03}{1,15} \rightarrow 0,2663 = 0,2122 + \frac{2 e_{cer}}{0,90}$$

$$0,0541 = \frac{2 e_{cer}}{0,90} \rightarrow e_{cer} = \mathbf{0,0243\ m}$$

Densidade (ρ)

$$CT = 2 (e x c x \rho)_{argamassa} + 2 (e x c x \rho)_{cerâmica}$$

$$151,53 = (0,03 x 1 x 2000) x 2 + (0,0243 x 0,92 x \rho) x 2 \rightarrow 151,53 = 120 + 0,0447\rho$$

$$31,53 = 0,0447\rho \rightarrow \rho = \mathbf{705,37\ Kg/m^3}$$

B.3. Cálculo da transmitância térmica do piso vinílico

Resistência térmica (RT)

$$RT = R_{si} + R_{concreto} + R_{vinilico} + R_{si} \rightarrow RT = 0,04 + \frac{0,10}{1,75} + \frac{0,004}{0,20} + 0,10$$

$$\mathbf{RT = 0,2171\ m^2K/W}$$

Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{RT} \rightarrow U = \frac{1}{0,2171} \rightarrow \mathbf{U = 4,61\ W/m^2K}$$

B.4. Cálculo da transmitância térmica do piso cerâmico

Resistência térmica (RT)

$$RT = R_{se} + R_{concreto} + R_{cerâmica} + R_{si} \rightarrow RT = 0,04 + \frac{0,10}{1,75} + \frac{0,01}{0,90} + 0,10$$

$$\mathbf{RT = 0,2082\ m^2K/W}$$

Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{RT} \rightarrow U = \frac{1}{0,2082} \rightarrow \mathbf{U = 4,80\ W/m^2K}$$

B.5. Cálculo da transmitância térmica da cobertura com telha termoacústica com preenchimento em PIR

Resistência térmica (RT)

$$RT = R_{se} + R_{telha} + R_{ar} + R_{gesso} + R_{si} \rightarrow RT = 0,04 + \frac{0,05}{0,022} + 0,61 + \frac{0,0125}{0,35} + 0,17$$

$$RT = 3,1284 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{RT} \rightarrow U = \frac{1}{3,1284} \rightarrow U = 0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Anexos

Anexo A – Código de programação utilizado para otimização dos modelos (Interface gráfica *Jupyter Notebook*)

BASE + NSGA II - Zona Bioclimática 1

```
In [1]: from besos import eppy_funcs as ef
from besos.problem import EPPProblem
from besos.objectives import VariableReader, MeterReader
from besos.evaluator import EvaluatorEP
from besos.parameters import wwr, RangeParameter, FieldSelector, FilterSelector, GenericSelector, Parameter, expand_plist
from besos.optimizer import NSGAI, SPEA2
from platypus.evaluator import MapEvaluator
import platypus
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from platypus.evaluator import MapEvaluator
import time
from dask.distributed import Client
from datetime import datetime
import warnings
```

```
In [2]: warnings.filterwarnings('ignore')
building = ef.get_building('Base_EPS_ZB1.idf') # Carregando o modelo do E+;
```

```
In [3]: parameters = []

parameters.append(
    Parameter(
        selector=FieldSelector(
            class_name="MATERIAL",          # Classe do E+;
            object_name="ParedeIsolamento", # Nome do objeto;
            field_name="Thickness", # Campo do objeto;
        ),
        name='Isol. Parede',
        value_descriptor=RangeParameter(min_val=0.001, max_val=0.10) # Limites;
    )
)

parameters.append(
    Parameter(
        selector=FieldSelector(
            class_name="MATERIAL",          # Classe do E+;
            object_name="PisoIsolamento",  # Nome do objeto;
            field_name="Thickness", # Campo do objeto;
        ),
        name='Isol. Piso',
        value_descriptor=RangeParameter(min_val=0.001, max_val=0.15) # Limites;
    )
)

parameters.append(
    Parameter(
        selector=FieldSelector(
            class_name="MATERIAL",          # Classe do E+;
            object_name="TelhaIsolamento", # Nome do objeto;
            field_name="Thickness", # Campo do objeto;
        ),
        name='Isol. Cobertura',
        value_descriptor=RangeParameter(min_val=0.001, max_val=0.10) # Limites;
    )
)
```

```

parameters.append(
    Parameter(
        selector=FieldSelector(
            class_name="MATERIAL",
            object_name="ParedeIsolamento",
            field_name="Solar Absorptance",
        ),
        name='Abs. Parede',
        value_descriptor=RangeParameter(min_val=0.2, max_val=0.9)
    )
)

parameters.append(
    Parameter(
        selector=FieldSelector(
            class_name="MATERIAL",
            object_name="TelhaAco",
            field_name="Solar Absorptance",
        ),
        name='Abs. Cobertura',
        value_descriptor=RangeParameter(min_val=0.2, max_val=0.9)
    )
)

parameters.append(
    Parameter(
        selector=FieldSelector(
            class_name="BUILDING",
            object_name="EMEIT2",
            field_name="North Axis",
        ),
        name='Orientação',
        value_descriptor=RangeParameter(min_val=0, max_val=359)
    )
)

```

```

In [4]: heating = MeterReader('Heating:Electricity', name="Aquecimento")
        cooling = MeterReader('Cooling:Electricity', name="Refrigeração")

        EPobjectives = [cooling, heating] # Heating e Cooling como objetivos;

        problem = EPPProblem(parameters, EPobjectives, minimize_outputs=[True, True]) # Criando uma instância do problema;

```

```

In [5]: evaluator = EvaluatorEP(problem, building, epw="BRA_PR_Curitiba.838420_INMET.epw") # Função de avaliação com o problema e o modelo
        startTime = datetime.now()
        results = NSGAII(evaluator, evaluations=500, population_size=100) # rodando o NSGA II;
        print(datetime.now() - startTime)

```

15:24:38.058847

```

In [6]: results

```

```

Out[6]:

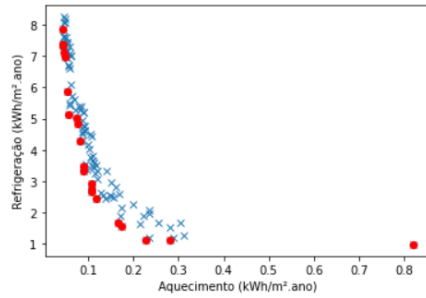
```

	Isol. Parede	Isol. Piso	Isol. Cobertura	Abs. Parede	Abs. Cobertura	Orientação	Refrigeração	Aquecimento	violation	pareto-optimal
0	0.003568	0.001783	0.014053	0.237014	0.280730	286.183179	9.645915e+08	8.122585e+08	0	True
1	0.096132	0.076027	0.093411	0.801854	0.885411	336.015016	7.796624e+09	4.284394e+07	0	True
2	0.061483	0.001099	0.071308	0.446001	0.376212	99.588519	1.111669e+09	2.780341e+08	0	True
3	0.070242	0.028405	0.079600	0.843106	0.725858	345.844989	5.815492e+09	5.301272e+07	0	True
4	0.076878	0.007005	0.083456	0.764513	0.450590	58.867551	2.415283e+09	1.162525e+08	0	True
...
95	0.070242	0.029036	0.076753	0.822367	0.239113	42.665807	3.563600e+09	1.125920e+08	0	False
96	0.084763	0.053520	0.091245	0.798296	0.708306	66.769944	6.955313e+09	5.996827e+07	0	False
97	0.069833	0.031885	0.064245	0.755627	0.839750	33.140301	7.322012e+09	5.299023e+07	0	False
98	0.074126	0.077067	0.099990	0.710438	0.811423	347.637336	7.362960e+09	5.228999e+07	0	False
99	0.084777	0.078959	0.077847	0.888195	0.760110	356.714463	8.114409e+09	4.764996e+07	0	False

100 rows × 10 columns

```
In [7]: results['Refrigeração'] = (results['Refrigeração']/3600000)/275.15 # Transformando J em EUI;
results['Aquecimento'] = (results['Aquecimento']/3600000)/275.15
```

```
In [8]: optres = results.loc[results['pareto-optimal']==True,:] # pareto-ótimo
plt.plot(results['Aquecimento'], results['Refrigeração'],'x') # Plot de todos os resultados em 'x'
plt.plot(optres['Aquecimento'], optres['Refrigeração'],'ro') # Plot das melhores soluções em vermelho
plt.xlabel('Aquecimento (kWh/m².ano)')
plt.ylabel('Refrigeração (kWh/m².ano)')
plt.axis([12,39,-0.9,5]) #Seta a dimensão do grafico
plt.savefig('100x500.png')
```



```
In [13]: optres
```

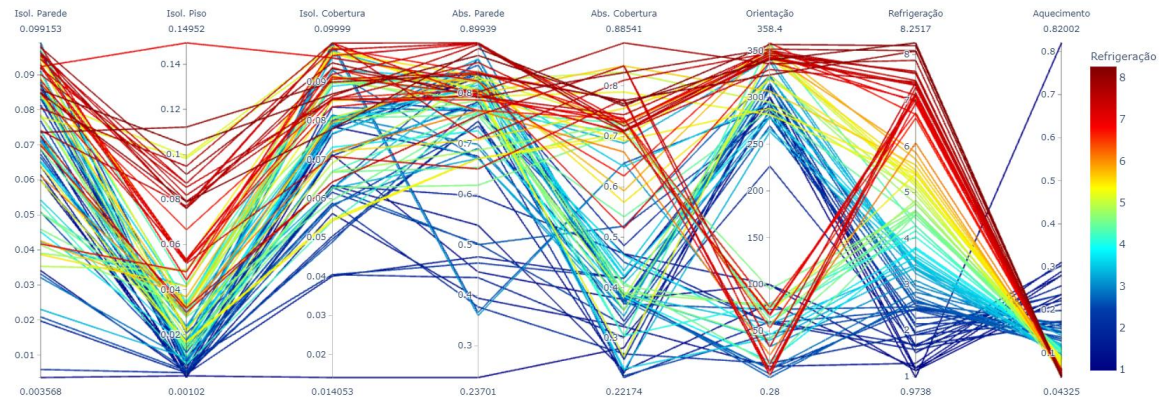
```
Out[13]:
```

	Isol. Parede	Isol. Piso	Isol. Cobertura	Abs. Parede	Abs. Cobertura	Orientação	Refrigeração	Aquecimento	violation	pareto-optimal
0	0.003568	0.001783	0.014053	0.237014	0.280730	286.183179	0.973804	0.820016	0	True
1	0.096132	0.076027	0.093411	0.801854	0.885411	336.015016	7.871084	0.043253	0	True
2	0.061483	0.001099	0.071308	0.446001	0.376212	99.588519	1.122286	0.280689	0	True
3	0.070242	0.028405	0.079600	0.843106	0.725858	345.844989	5.871031	0.053519	0	True
4	0.076878	0.007005	0.083456	0.764513	0.450590	58.867551	2.438350	0.117363	0	True
5	0.090861	0.010375	0.067023	0.761963	0.726403	76.083193	4.273707	0.081004	0	True
6	0.072520	0.001024	0.076593	0.831680	0.373506	299.472741	1.124766	0.227675	0	True
7	0.068745	0.003517	0.077922	0.831680	0.483129	288.659469	1.670211	0.166470	0	True
8	0.041725	0.047949	0.096719	0.898110	0.729104	345.337833	6.973134	0.049107	0	True
9	0.087342	0.001738	0.085716	0.764513	0.466830	58.541367	1.576898	0.174106	0	True
10	0.065009	0.016915	0.062593	0.824744	0.433539	321.440728	3.476736	0.090043	0	True
11	0.089100	0.021222	0.080728	0.830564	0.725812	345.844989	5.136125	0.056047	0	True
12	0.084749	0.014849	0.066810	0.687063	0.726317	57.952055	4.827988	0.077431	0	True
13	0.065370	0.022200	0.096598	0.898436	0.372323	278.799646	2.905034	0.106861	0	True
14	0.098876	0.007272	0.071828	0.777815	0.686325	342.103251	3.324805	0.090595	0	True
15	0.091877	0.087185	0.098248	0.898927	0.711088	343.224537	7.363653	0.044512	0	True
16	0.078521	0.018749	0.069172	0.824972	0.827367	294.752748	5.037851	0.074863	0	True
17	0.092871	0.053343	0.090645	0.840507	0.770398	7.929217	7.125211	0.046638	0	True
18	0.086099	0.009580	0.078346	0.855630	0.387440	0.281380	2.659821	0.108281	0	True
19	0.059898	0.017572	0.092914	0.670190	0.355751	315.075847	2.732965	0.107959	0	True
20	0.085005	0.076027	0.091905	0.898920	0.711088	341.969747	7.328216	0.044889	0	True

```
In [14]: min_cons = results['Refrigeração']+results['Aquecimento']
min_cons[min_cons == min_cons.min() ]
```

```
Out[14]: 6      1.352441
dtype: float64
```

```
In [15]: import plotly
plotly.offline.init_notebook_mode(connected=True)
import plotly.express as px
fig = px.parallel_coordinates(results,color="Refrigeração", dimensions=[
    "Isol. Parede",
    "Isol. Piso",
    "Isol. Cobertura",
    "Abs. Parede",
    "Abs. Cobertura",
    "Orientação",
    "Refrigeração",
    "Aquecimento"],
    color_continuous_scale=px.colors.sequential.Jet)
fig.show()
```

```
In [16]: import plotly
plotly.offline.init_notebook_mode(connected=True)
import plotly.express as px
fig = px.parallel_coordinates(optres,color="Refrigeração", dimensions=[
    "Isol. Parede",
    "Isol. Piso",
    "Isol. Cobertura",
    "Abs. Parede",
    "Abs. Cobertura",
    "Orientação",
    "Refrigeração",
    "Aquecimento"],
    color_continuous_scale=px.colors.sequential.Jet)
fig.show()
```

