

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

**Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo**



Dissertação

**Avaliação de materiais de mudança de fase em uma
habitação com fechamentos leves nas Zonas
Bioclimáticas 1, 2 e 3 com base em algoritmos
evolutivos multiobjetivo**

Rodrigo Karini Leitzke

Pelotas, 2021

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



Dissertação

**Avaliação de materiais de mudança de fase em uma habitação com
fechamentos leves nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 com base em algoritmos
evolutivos multiobjetivo**

Rodrigo Karini Leitzke

Pelotas, 2021

Rodrigo Karini Leitzke

Avaliação de materiais de mudança de fase em uma habitação com fechamentos leves nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 com base em algoritmos evolutivos multiobjetivo

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha

Coorientador: Prof. MSc. Anderson Priebe Ferrugem

Pelotas, 2021

Rodrigo Karini Leitzke

Avaliação de materiais de mudança de fase em uma habitação com fechamentos leves nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 com base em algoritmos evolutivos multiobjetivo

Dissertação aprovada, como requisito parcial, 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: 29/11/2021

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (Orientador)

Doutorado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Celina Maria Britto Correa

Doutorado em Arquitetura pela Universidade Politécnica de Madri

Prof. Dr. Enedir Ghisi

Doutorado em Engenharia Civil pela University of Leeds

Prof. Dr. Leandro Carlos Fernandes

Doutorado em Tecnologia e Sociedade pela Internship at BGU - Israel

Dedico este trabalho para meus familiares, amigos e toda comunidade científica brasileira, que embora constantemente atacada e ameaçada, continua buscando a excelência nas produções que contribuirão para um futuro melhor.

Agradecimentos

Profissionalmente agradeço a Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo subsídio que garantiu o desenvolvimento desta pesquisa. Estendo os agradecimentos ao grupo de pesquisa GES3E, representado na figura do prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha por todo o apoio, amizade e pelos mais de seis anos de aprendizado científico que me foram oportunizados. Ao LABCEE e ao LINSE, com representação nas figuras do prof. Dr. Antonio César Silveira Baptista da Silva, MSc. Liader da Silva Oliveira, Esp. Antônio Carlos Cleff e MSc. Juliana Al-Alam Pouey por todos os desafios profissionais e acadêmicos relacionados com a temática da eficiência energética de edificações nos quais tive o privilégio de contribuir. Agradecimentos estendidos também ao GAIA, na figura do prof. MSc. Anderson Priebe Ferrugem, pelo período que precede este trabalho, permitindo com que fosse possível atuar de alguma forma com a comunicação científica entre as áreas da Ciência da Computação e da Arquitetura e Urbanismo na UFPel. As(os) colegas dos laboratórios de pesquisa supracitados (muitas(os) desde 2015), pelo compartilhamento de ideias, contribuições, aprendizados e atravessamentos durante os anos de iniciação científica e também de elaboração desta dissertação.

Pessoalmente agradeço aos meus pais, Marinês e Gilmar, e igualmente aos meus avós, Marina e Pedro, pela criação, suporte, incentivo, amor e participação em todos os momentos da minha vida. Agradeço também a minha noiva e companheira Andressa, por se fazer presente com cumplicidade e de forma tão prestativa e amorosa nos momentos mais e menos complicados. E, por fim, ao meu irmão Leonardo e ao meu tio Antônio, pela fiel amizade e carinho.

A utopia está lá no horizonte. Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos. Caminho dez passos, e o horizonte corre dez passos. Por mais que eu caminhe, jamais alcançarei. Para que serve a utopia? Serve para isso: para que eu não deixe de caminhar.

— Eduardo Galeano

Resumo

LEITZKE, Rodrigo Karini Leitzke. **Avaliação de materiais de mudança de fase em uma habitação com fechamentos leves nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 com base em algoritmos evolutivos multiobjetivo**. 2021. 143f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

Dentre as problemáticas da construção civil nacional, destaca-se a necessidade de mecanismos que contribuam com a regulação da temperatura dos ambientes internos em situações de envelopes com baixos níveis de capacidade térmica na composição de seus fechamentos, em especial no caso das construções leves. Como uma das tecnologias adequadas para esta situação, os Materiais de Mudança de Fase (ou *Phase Change Materials* - PCM) estão sendo utilizados na composição de envelopes de edifícios em diferentes contextos climáticos ao redor do mundo. O uso do PCM como armazenador de calor latente faz com que o seu processo de mudança de fase atue a partir das condições de temperatura na qual este material está exposto. Temperaturas elevadas fazem com o material entre na fase de fusão, armazenando calor latente enquanto se liquefaz. Temperaturas baixas fazem com que o material entre na fase de congelamento, liberando calor latente para os ambientes enquanto se solidifica. Este trabalho apresenta uma revisão sobre as tecnologias de PCMs para aplicação na construção civil, junto a uma análise quanto ao uso de uma destas tecnologias em uma habitação com composição leve para as Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3. Para escolha das melhores combinações de PCM aplicadas na edificação foram utilizadas simulações computacionais termoenergéticas evolutivas com a combinação da ferramenta *EnergyPlus* e do algoritmo evolutivo NSGA-II. Os resultados identificados a partir da aplicação dos PCMs otimizados mostram que a utilização deste componente construtivo nas faces internas das paredes externas e/ou cobertura contribuem com a redução das demandas energéticas para aquecimento e refrigeração na habitação nas três zonas bioclimáticas, mesmo em invólucros termicamente isolados.

Palavras-chave: PCM, Inércia térmica, Simulação computacional, Algoritmos evolutivos

Abstract

LEITZKE, Rodrigo Karini. **Assessment of phase change materials in light steel framing house in Bioclimatic Zones 1, 2 and 3 based on multiobjective evolutionary algorithms using.** 2021. 143f. Dissertation (Master degree in Architecture and Urbanism) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

Among the problems of national civil construction, there is the need for mechanisms that contribute to the regulation of the temperature of indoor environments in situations with low levels of thermal capacity in the composition of their enclosures, especially in the case of light constructions. As one of the technologies to overcome this situation, the Phase Change Materials (or Phase Change Materials - PCM), are being used in the composition of building envelopes in different climatic contexts around the world. The use of PCM as a latent heat store makes its phase change process act based on the temperature conditions to which this material is exposed. Elevated temperatures cause the material to enter the melting phase, storing latent heat as it liquefies. Low temperatures cause the material to enter the freezing phase, releasing latent heat into the environments as it solidifies. This work presents a review of PCM technologies for application in civil construction, together with an analysis of the use of one of these technologies in a housing with light composition for Bioclimatic Zones 1, 2 and 3. To choose the best combinations of PCM applied in the building, evolutionary energy simulations were used with the combination of the EnergyPlus and the NSGA-II evolutionary algorithm. The results identified from the application of optimized PCMs show that the use of this constructive component on the internal faces of the external walls and/or roof contributes to the reduction of energy demands for heating and cooling in the dwelling of the three bioclimatic zones, even in thermally insulated envelopes.

Keywords: PCM, Thermal inertia, Computer simulation, Evolutionary Algorithms

Lista de Figuras

Figura 1	Ciclos do processo de mudança de fase	27
Figura 2	Esquema para a classificação do PCM	28
Figura 3	Exemplo de PCM micro encapsulado	31
Figura 4	Exemplo de PCM macro encapsulado	32
Figura 5	Comportamento da frente de Pareto na análise multiobjetivo	40
Figura 6	Estrutura da implementação vigente do NSGA-II nas bibliotecas de programação	42
Figura 7	Mapa de co-ocorrência das palavras-chave a partir das strings de busca	51
Figura 8	Mapa de correlação entre os temas a partir das strings de busca	52
Figura 9	Países de origem das produções selecionadas a partir das strings de busca	52
Figura 10	Ano de publicação das produções selecionadas a partir das strings de busca	53
Figura 11	Fluxograma do nível geral da pesquisa	60
Figura 12	Fluxograma com as etapas, procedimentos e atividades do método de pesquisa	61
Figura 13	Plantas baixas dos pavimentos térreo e superior	62
Figura 14	Modelo tridimensional do projeto arquitetônico na ferramenta <i>Sketchup</i>	67

Figura 15	Ocupação - Dias úteis	68
Figura 16	Ocupação – Finais de semana e feriados	68
Figura 17	Iluminação – Dias úteis	68
Figura 18	Iluminação – Finais de semana e feriados	69
Figura 19	Informações sobre os campos de preenchimento do objeto <i>MaterialProperty:PhaseChangeHysteris</i>	73
Figura 20	Bibliotecas de programação utilizadas na implementação do cenário evolutiva	76
Figura 21	Leitura do modelo de simulação de entrada	77
Figura 22	Inserção de um dos parâmetros para a análise evolutiva	77
Figura 23	Definição dos objetivos e criação da instância do problema	78
Figura 24	Definição da função de avaliação e execução do algoritmo evolutivo	78
Figura 25	Infográfico com os processos de execução da análise evolutiva	80
Figura 26	Resultados de IUE para os modelos iniciais A, B, C e D na ZB1	82
Figura 27	Resultados de IUE para os modelos iniciais A, B, C e D na ZB2	83
Figura 28	Resultados de IUE para os modelos iniciais A, B, C e D na ZB3	84
Figura 29	Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas para ZB1	86
Figura 30	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' - Paredes externas para ZB1	87
Figura 31	Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas para ZB2	88

Figura 32	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' - Paredes externas na ZB2	88
Figura 33	Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas para ZB3	89
Figura 34	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' - Paredes externas na ZB3	90
Figura 35	Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM na cobertura na ZB1	91
Figura 36	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' – Cobertura na ZB1	91
Figura 37	Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM na cobertura na ZB2	92
Figura 38	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' – Cobertura na ZB2	93
Figura 39	Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM na cobertura na ZB3	93
Figura 40	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' – Cobertura na ZB3	94
Figura 41	Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB1	95
Figura 42	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB1	95
Figura 43	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB1	96

Figura 44	Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB2	97
Figura 45	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB2	98
Figura 46	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB2	99
Figura 47	Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB3	100
Figura 48	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB3	100
Figura 49	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB3	101
Figura 50	Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas para ZB1	105
Figura 51	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' - Paredes externas na ZB1	105
Figura 52	Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas para ZB2	106
Figura 53	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' - Paredes externas na ZB2	107
Figura 54	Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas para ZB3	107

Figura 55	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' - Paredes externas na ZB3	108
Figura 56	Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM na cobertura na ZB1	109
Figura 57	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' – Cobertura na ZB1	109
Figura 58	Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM na cobertura na ZB2	110
Figura 59	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' – Cobertura na ZB2	111
Figura 60	Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM na cobertura na ZB3	111
Figura 61	Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' – Cobertura na ZB3	112
Figura 62	Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB1	113
Figura 63	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB1	114
Figura 64	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB1	114
Figura 65	Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB2	115

Figura 66	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB2	115
Figura 67	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB2	116
Figura 68	Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB3	117
Figura 69	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB3	119
Figura 70	Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB3	120
Figura 71	Resultados de IUE para os modelos com maior nível de isolamento térmico na ZB1 (A, C e C')	124
Figura 72	Resultados de IUE para os modelos com menor nível de isolamento térmico na ZB1 (B, D e D')	125
Figura 73	Resultados de IUE para os modelos com maior nível de isolamento térmico na ZB2 (A, C e C')	126
Figura 74	Resultados de IUE para os modelos com menor nível de isolamento térmico na ZB2 (B, D e D')	127
Figura 75	Resultados de IUE para os modelos com maior nível de isolamento térmico na ZB3 (A, C e C')	128
Figura 76	Resultados de IUE para os modelos com menor nível de isolamento térmico na ZB3 (B, D e D')	129

Lista de Tabelas

Tabela 1	Recorte de produções com estratégias de otimização junto com a simulação	38
Tabela 2	Palavras-chave e sinônimos considerados para elaboração dos termos de busca	49
Tabela 3	Critérios de inclusão e exclusão das produções	50
Tabela 4	Resultados das buscas das <i>strings</i> nas bases de dados	50
Tabela 5	Composição das paredes externas para o Modelo A	63
Tabela 6	Composição da laje de piso para o Modelo A	64
Tabela 7	Composição da cobertura para o Modelo A	64
Tabela 8	Requisitos de desempenho térmico do envelope opaco para as ZB1, ZB2 e ZB3	64
Tabela 9	Composição das paredes externas para o Modelo B	65
Tabela 10	Composição da laje de piso para o Modelo B	65
Tabela 11	Composição da cobertura para o Modelo B	65
Tabela 12	Composição das paredes externas para o Modelo C	66
Tabela 13	Composição das paredes externas para o Modelo D	66
Tabela 14	Variáveis e limites para otimização multiobjetivo	74
Tabela 15	Análises evolutivas dos diferentes cenários de aplicação	101
Tabela 16	Síntese dos resultados de consumo obtidos nos melhores casos	102

Tabela 17	Análises evolutivas dos diferentes cenários de aplicação	118
Tabela 18	Síntese dos resultados de consumo obtidos nos melhores casos	119

Lista de Quadros

Quadro 1	Modelo da ficha de leitura utilizado	48
Quadro 2	<i>Strings</i> de busca utilizadas para revisão sistematizada	49

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AE	Algoritmo Evolutivo
AEMO	Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo
AG	Algoritmo Genético
APP	Ambiente de permanência prolongada
CO ₂	Dióxido de Carbono
CFD	<i>Conduction finite difference</i>
COP	Coeficiente de performance
CTF	Função de transferência por condução
DPI	Densidade de potência instalada
EP	<i>EnergyPlus</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
eppy	<i>EnergyPlus Python library</i>
epw	<i>EnergyPlus Weather file</i>
FS	Fator solar
IA	Inteligência artificial
idf	<i>Input data file</i>
IUE	Intensidade do uso de energia elétrica
LSF	<i>Light steel frame</i>
MO	Multiobjetivo
NBR	Norma Técnica Brasileira
NSGA-II	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
nZEB	<i>Nearly zero energy buildings</i>
PCM	<i>Phase Change Material</i>
RTQ-C	Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SINAT	Sistema Nacional de Avaliações Técnicas
SPEA2	<i>Stength Pareto Evolutionary Algorithm</i>

UE	União Européia
UFPel	Universidade Federal de Pelotas
ZB	Zona Bioclimática brasileira

Sumário

1. INTRODUÇÃO	24
1.1 Problema e questões de pesquisa	26
1.2 Objetivos	27
1.3 Estrutura da dissertação	28
2. REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1 Materiais de Mudança de Fase (PCMs)	29
2.1.1 PCMs orgânicos	31
2.1.1.1 Parafínicos	31
2.1.1.2 Ácidos graxos (Não-parafínicos)	31
2.1.2 PCMs Inorgânicos	31
2.1.2.1 Sais hidratados.....	31
2.1.2.2 Metais.....	32
2.1.3 PCMs eutéticos	32
2.1.4 Mudança de fase, faixa de fusão e histerese	32
2.1.5 PCMs micro encapsulados e macro encapsulados.....	33
2.1.5.1 PCMs micro encapsulados.....	33
2.1.5.2 PCMs macro encapsulados.....	34
2.1.6 Comercialização dos PCMs	34
2.1.7 PCMs na Construção Civil	34
2.2 Simulação Computacional.....	37
2.2.1 Simulação termoenergética de edifícios.....	38
2.2.2 Estratégias de Otimização	39
2.2.3 Algoritmos Genéticos	41
2.2.4 Algoritmos Evolutivos	41
2.2.5 Algoritmos multiobjetivo	41
2.2.6 Algoritmo Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)	43
2.2.7 Aplicações relacionadas com o uso de algoritmos multiobjetivo em edificações por simulação	44
2.3 Inércia Térmica nos Edifícios	47
2.3.1 PCM como um isolante capacitivo	48
2.3.2 A inércia térmica em fechamentos edificadas a partir da aplicação de PCMs	

2.4 Avaliação sistematizada da Literatura	50
2.5 Análise bibliométrica	52
2.6 Recorte e discussão das produções elencadas no protocolo de RSL.....	55
3. MÉTODO	62
3.1 Nível geral da pesquisa.....	62
3.2 Detalhamento das etapas da pesquisa	62
3.3 Etapa exploratória	63
3.3.1 Definição e configuração dos modelos iniciais	63
3.3.1.1 Aspectos gerais.....	63
3.3.1.2 Composição dos fechamentos no Modelo A	65
3.3.1.3 Composição dos fechamentos no Modelo B	66
3.3.1.4 Composição dos fechamentos no Modelo C	67
3.3.1.5 Composição dos fechamentos no Modelo D	68
3.3.1.6 Modelagem e configurações dos modelos de simulação	68
3.3.1.7 Configuração da ventilação híbrida	71
3.3.2 Adaptação climática para os modelos iniciais	72
3.3.3 Definição e aplicação das tecnologias de PCMs.....	73
3.3.3.1 Recorte dos limites de temperatura a partir da definição da tecnologia .	73
3.3.3.2 Aplicação dos PCMs nos modelos de simulação	74
3.4 Etapa de desenvolvimento	76
3.4.1 Caracterização e implementação do AEMO.....	77
3.5 Etapa de análise e reflexões	80
4. RESULTADOS	83
4.1 Estudo piloto.....	83
4.1.1 Avaliação dos modelos iniciais para ZB1 (Curitiba/PR)	83
4.1.2 Avaliação dos modelos iniciais para ZB2 (Santa Maria/RS)	84
4.1.3 Avaliação dos modelos iniciais para ZB3 (Florianópolis/SC)	85
4.1.4 Discussão sobre os modelos iniciais A, B, C e D para as três ZBs consideradas.....	86
4.2 Modelo C' – Parede Externa: Avaliação da aplicação do PCM nas paredes externas	87
4.2.1 Modelo C' – Parede Externa: ZB1 (Curitiba/PR)	87
4.2.2 Modelo C' – Parede Externa: ZB2 (Santa Maria/RS)	89
4.2.3 Modelo C' – Parede Externa: ZB3 (Florianópolis/SC)	91
4.3 Modelo C' – Cobertura: Avaliação da aplicação do PCM na cobertura.....	92

4.3.1 Modelo C' – Cobertura: ZB1 (Curitiba/PR)	92
4.3.2 Modelo C' – Cobertura: ZB2 (Santa Maria/RS)	94
4.3.3 Modelo C' – Cobertura: ZB3 (Florianópolis/SC)	95
4.4 Modelo C' – Parede externa e Cobertura: Avaliação da aplicação do PCM nas paredes externas e cobertura	96
4.4.1 Modelo C' – Parede externa e Cobertura: ZB1 (Curitiba/PR)	96
4.4.2 Modelo C' – Parede externa e Cobertura: ZB2 (Santa Maria/RS)	98
4.4.3 Modelo C' – Parede externa e Cobertura: ZB3 (Florianópolis/SC)	100
4.5 Síntese da análise dos cenários relacionados ao modelo C'	102
4.6 Modelo D' – Parede Externa: Avaliação da aplicação do PCM nas paredes externas	105
4.6.1 Modelo D' – Parede Externa: ZB1 (Curitiba/PR)	105
4.6.2 Modelo D' – Parede Externa: ZB2 (Santa Maria/RS)	107
4.6.3 Modelo D' – Parede Externa: ZB3 (Florianópolis/SC)	108
4.7 Modelo D' – Cobertura: Avaliação da aplicação do PCM na cobertura	109
4.7.1 Modelo D' – Cobertura: ZB1 (Curitiba/PR)	109
4.7.2 Modelo D' – Cobertura: ZB2 (Santa Maria/RS)	111
4.7.3 Modelo D' – Cobertura: ZB3 (Florianópolis/SC)	112
4.8 Modelo D' – Parede externa e Cobertura: Avaliação da aplicação do PCM nas paredes externas e cobertura	113
4.8.1 Modelo D' – Parede externa e Cobertura: ZB1 (Curitiba/PR)	113
4.8.2 Modelo D' – Parede externa e Cobertura: ZB2 (Santa Maria/RS)	115
4.8.3 Modelo D' – Parede externa e Cobertura: ZB3 (Florianópolis/SC)	117
4.9 Síntese da análise dos cenários relacionados ao modelo D'	119
4.10 Avaliação geral sobre os resultados apresentados	122
5. CONCLUSÕES	130
Referências	132

1. INTRODUÇÃO

O balanço térmico e energético das edificações é composto pela iteração de múltiplas variáveis que determinam a dinâmica dos fluxos de calor entre os ganhos e perdas do edifício em relação ao exterior. Uma das principais variáveis neste sentido é a envolvente opaca, responsável por caracterizar a composição do invólucro que separa o contexto interior do exterior, tendo como propriedades fundamentais em sua composição as absorptâncias, a transmitância térmica e a capacidade térmica. Trabalhos como Dornelles e Roriz (2004), Oliveira (2012a), Marques (2013), Soares (2014), Brito (2015) e Silva (2016), discutem o papel e a importância da inércia térmica para edifícios de escritórios e residenciais em diferentes contextos climáticos, destacando a massa térmica do edifício, caracterizada pela capacidade térmica dos componentes construtivos, como a responsável por regular a inércia térmica dos ambientes internos.

No sul do Brasil os sistemas construtivos tradicionais com fechamentos em alvenaria cerâmica proporcionam a massa térmica necessária para que o edifício possua inércia térmica, de modo que este fenômeno é responsável pela manutenção das condições internas de temperatura por um determinado período a partir da variação das temperaturas no contexto exterior.

Como uma alternativa ao modelo construtivo tradicional, composto geralmente por alvenaria estrutural com blocos cerâmicos e/ou de concreto (SANTOS et al., 2015), os sistemas *Light Steel Framing* (LSF), caracterizados pelo uso de perfis leves na fabricação de estruturas e fechamentos (OLIVIERI et al., 2017), recebem cada vez mais espaço no mercado da construção civil em países desenvolvidos. Parte atrativa do uso desta tecnologia construtiva está na possibilidade da sua aquisição de forma pré-fabricada, estruturação modular e com rápida montagem no canteiro de obras, reduzindo prazos e custos (VELJKOVIC; JOHANSSON, 2006).

Perkins (2009), Gomes (2012) e Nogueira, Callejas e Durante (2018) apresentam a viabilidade de um bom desempenho térmico e energético de sistemas leves em *Steel Framing* para diferentes climas, ainda que estes estejam relacionados a necessidade de um bom nível de isolamento térmico. Quanto ao cumprimento das normativas nacionais ao utilizar estes sistemas, uma parede em LSF possui em torno de $40 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ de capacidade térmica, de acordo com a revisão de Soares et al. (2017), valor este abaixo do limite mínimo de $130 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ para as Zonas Bioclimáticas de 1 a 7 definido pela ABNT NBR 15.575-4 (2021) para paredes de

edificações residenciais. Todavia, embora a ABNT NBR 15.575-4 (2021) não aprove sistemas construtivos com Capacidade Térmica inferior a $130 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$, o fato de possibilitar a incorporação de isolamento térmico nas paredes faz com que as composições em LSF possam ser aprovadas pelo método de Simulação Computacional da mencionada norma.

Em regiões onde sistemas LSF são amplamente utilizados (grande parte da Europa e nos Estados Unidos), busca-se contornar esta situação da baixa inércia térmica com a utilização de *radiers* em concreto armado ou por intermédio de PCMs (*Phase Change Materials*, ou em tradução literal, Materiais em Mudança de Fase) (FIGUEIREDO, 2016).

Os PCMs são compostos que armazenam calor latente quando liquefazem e liberam este calor quando solidificam. O armazenamento de energia deste tipo de material funciona com a alteração da sua fase, caracterizando um processo endotérmico que reorganiza as moléculas e pausa a curva de aquecimento até o encerramento da etapa de fusão do material. Ao resfriar se observa o oposto, o PCM libera energia continuamente sem que varie a sua temperatura até o momento da solidificação completa do material. Na mudança de estado sólido para líquido pode ocorrer dilatação, já na mudança de estado líquido para sólido, contração. As variações no volume do PCM podem ou não ser ignoradas, dependendo do tipo de PCM utilizado (MEHLING; CABEZA, 2008).

Para a utilização deste material na envoltória, quando corretamente aplicado, este efeito de armazenar energia no aquecimento e de liberar energia no resfriamento causa um fenômeno que retarda e minimiza variações de temperatura no ambiente. Ainda, pode gerar uma economia no consumo de energia elétrica por conta do atraso nos gastos em horários de pico, visto a redução no uso de resfriadores no verão e de aquecedores no inverno (MAVRIGIANNAKI; AMPATZI, 2016).

A configuração dos PCMs envolve pelo menos seis variáveis: as faixas de temperatura de fusão e solidificação, calor específico, densidade quando sólido, densidade quando líquido e a capacidade térmica do material. Como estratégias para avaliar a combinação destas variáveis junto aos diferentes tipos de PCMs que podem ser aplicados em um fechamento, apresentam-se na literatura duas abordagens com discussões que avaliam estes cenários por meio de protótipos em modelos físicos ou através de simulações computacionais.

A avaliação por prototipação requer uma estrutura laboratorial pré-estabelecida para a realização dos experimentos. Além disso, como nos trabalhos de Lazaro et al. (2009) e Costa (2019), que utilizam protótipos em suas análises de PCMs, costuma-se adotar alguma estratégia de refinamento prévia, seja por intermédio de métodos numéricos, por revisão bibliográfica ou por simulação computacional, reduzindo assim os riscos do experimento.

A análise por meio de simulação computacional, ainda que restrita quanto as variações dos fenômenos físicos em relação ao meio em que está inserida, permite com que os PCMs sejam avaliados considerando uma ampla variação de suas composições. Através da simulação é possível testar a aplicação dos PCMs em diferentes estratégias de ventilação, climatização, características do edifício, variações nas condições de contorno e climas. No Brasil, considerando apenas parte do seu vasto perímetro territorial, as zonas bioclimáticas (ZB) mais frias (1, 2, 3) possuem estações do ano bem definidas (ABNT, 2005b), implicando em uma grande amplitude das temperaturas observadas ao longo do ano, o que pode ser interessante para a análise do comportamento dos PCMs nos fechamentos edificados.

Embora a simulação computacional execute as avaliações pretendidas de forma eficaz e em tempo hábil, análises mais complexas como, por exemplo, identificar o PCM ideal para o fechamento de um determinado edifício em um contexto climático específico, resultam na necessidade da realização de inúmeras simulações dentro de um contexto pré-definido. Como contorno podem ser utilizadas estratégias de parametrização, otimização e ferramentas de inteligência artificial (IA) para a obtenção de dados de saída mais precisos em intervalos de tempo menores.

1.1 Problema e questões de pesquisa

A falta de massa térmica nos fechamentos dos edifícios residenciais em LSF possibilita a aplicação dos materiais de mudança de fase (PCM) como um possível elemento regulatório para uma melhor inércia térmica nas superfícies opacas. Ainda assim, é necessário entender se a aplicação dos PCMs pode ou não ser considerada uma estratégia suficiente para suprir a baixa capacidade térmica destes fechamentos, e garantir um melhor desempenho termoenergético para edificações residenciais localizadas nas zonas bioclimáticas brasileiras 1, 2 e 3.

Como questão principal de pesquisa, este trabalho busca responder: *Os PCMs podem minimizar os efeitos da baixa de massa térmica em fechamentos externos*

verticais quanto ao consumo de energia elétrica operacional de um edifício residencial localizado nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3?

Da mesma forma, como questões específicas:

- a) *Quais tecnologias de PCMs devem ser utilizadas em fechamentos leves tendo em vista as especificidades das três zonas bioclimáticas consideradas?*
- b) *Quais são as melhores composições químicas de PCMs para prática construtiva?*
- c) *Quais estratégias de otimização são consideradas nas produções que avaliam por simulação a aplicação de PCMs em fechamentos?*
- d) *Quais algoritmos, parâmetros e instrumento de análise são combinados com a simulação térmica e energética para avaliação das diferentes tecnologias de PCMs?*
- e) *Qual o impacto no desempenho energético de uma habitação residencial localizada nos climas das ZBs 1, 2 e 3, a partir da aplicação de PCMs nos fechamentos opacos?*

Para responder à questão principal e as específicas serão caracterizados os conceitos sobre PCMs e a sua utilização em edifícios, bem como a revisão de estratégias e ferramentas para análises por simulação computacional, incluindo os métodos de otimização.

1.2 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é verificar, a partir de simulações computacionais otimizadas, o impacto da utilização de PCMs como elementos regulatórios para inércia térmica nas paredes externas e cobertura de edificações leves em *Steelframing* nas ZBs 1, 2 e 3.

Como objetivos específicos da pesquisa é possível apontar os seguintes:

- a) *Identificar*, a partir da revisão bibliográfica, as melhores tecnologias de PCMs para aplicação em fechamentos edificados.
- b) *Implementar* algoritmos que permitam a otimização das variáveis que caracterizam os PCMs em fechamentos opacos de uma habitação.
- c) *Contrastar* o desempenho de diferentes composições de PCMs em fechamentos opacos de uma edificação residencial nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 frente aos resultados dos mesmos modelos sem a adição do PCM.
- d) *Caracterizar* o papel das composições de PCMs otimizadas em fechamentos opacos de uma edificação residencial.

- e) *Realizar* um estudo comparativo testando o uso de PCMs em 4 distintas composições de envoltória, englobando envelopes com maior inércia térmica (alvenaria cerâmica) e envelopes com menor inércia térmica (*steelframing*), ambos com maior e menor nível de isolamento térmico.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho de dissertação é dividido em cinco capítulos, com o primeiro capítulo subdividido em seções que para além da contextualização introdutória da temática, apresentam o problema e as questões de pesquisa, bem como os objetivos e a estrutura da dissertação. No segundo capítulo é apresentada a revisão de literatura, dividida em seções que abordam os principais conceitos e elementos do trabalho, uma análise sistematizada da literatura e uma avaliação bibliométrica. No terceiro capítulo é apresentado o método do trabalho, com seções que destacam a tipologia estudada, características construtivas, instrumentos de avaliação computacional, ferramentas e procedimentos. No quarto capítulo são apresentados os resultados, subdivididos em seções com um estudo piloto relacionado aos modelos iniciais da avaliação, os resultados dos cenários de aplicação dos PCMs e as discussões destes resultados. O quinto e último capítulo apresenta a conclusão do trabalho, contrastando os resultados obtidos frente aos objetivos e o problema pesquisa.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Com o propósito de avaliar as produções existentes na literatura com a temática deste trabalho foram realizadas três análises: uma revisão geral sobre a contextualização dos principais elementos que permeiam a temática pesquisada, uma segunda revisão com aspectos sistematizados com enfoque nos objetivos e perguntas da pesquisa e, por fim, uma análise bibliométrica na busca de uma visão macro e crítica do tema de pesquisa frente ao conjunto de produções elencadas na análise sistematizada.

2.1 Materiais de Mudança de Fase (PCMs)

Grande parte dos materiais realizam uma interação com o ambiente em que estão inseridos, porém, poucos possuem a capacidade de alterar o seu estado físico conforme variam as condições climáticas deste ambiente (CUNHA et al., 2015). Os Materiais de Mudança de Fase ou Armazenadores de Calor Latente (*Phase Change Materials* (PCM) ou *Latent Heat Storage* (LHS)), são compostos que alteram o seu estado físico à medida que percebem variações na temperatura a qual estão expostos. O aumento na temperatura que permita o alcance do ponto de fusão do material faz com que ele mude o seu estado de sólido para líquido, realizando um processo de armazenamento do calor latente. A queda da temperatura de exposição, por sua vez, pode permitir o alcance do ponto de solidificação do PCM, alterando o seu estado de líquido para sólido e fazendo com que a energia nele armazenada seja liberada (SILVA, 2009). A Figura 1 apresenta o comportamento do ciclo da mudança de fase dos PCMs.

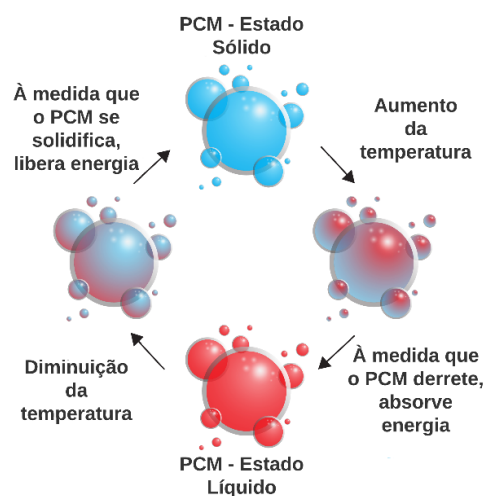


Figura 1 – Ciclos do processo de mudança de fase.

Fonte: Adaptado de Ramaiah et al., 2019.

Quanto ao processo de mudança de fase do PCM, as temperaturas de fusão costumam variar entre 18 e 35°C, a depender da tecnologia de PCM utilizada (OLIVEIRA, 2012b). Estima-se ainda que, em média, a temperatura usual para o ponto de fusão do material é próxima de 26°C, variando de acordo com as condições climáticas do local de aplicação (HARVEY, 2010).

Os PCMs dividem-se em três principais grupos: Orgânicos, Inorgânicos e Misturas Eutéticas. Os compostos orgânicos apresentam uma subdivisão em parafínicos e ácidos graxos (ou não-parafínicos), enquanto os compostos inorgânicos se subdividem em sais-hidratados e metais. As misturas eutéticas são caracterizadas pela composição de dois ou mais componentes que se fundem e cristalizam (SILVA, 2009).

A Figura 2 apresenta uma esquematização dos PCMs quanto a suas divisões e subdivisões. As sequências em cinza escuro no fluxo representam os tipos de PCMs utilizados no processo de armazenamento de calor latente (foco deste trabalho), as sequências em cinza claro representam outras possibilidades de uso para o PCM (armazenamento de calor sensível, de energia química ou a realização de outras mudanças no estado físico do componente). Os itens em **negrito** serão discutidos com maior atenção na sequência deste capítulo.

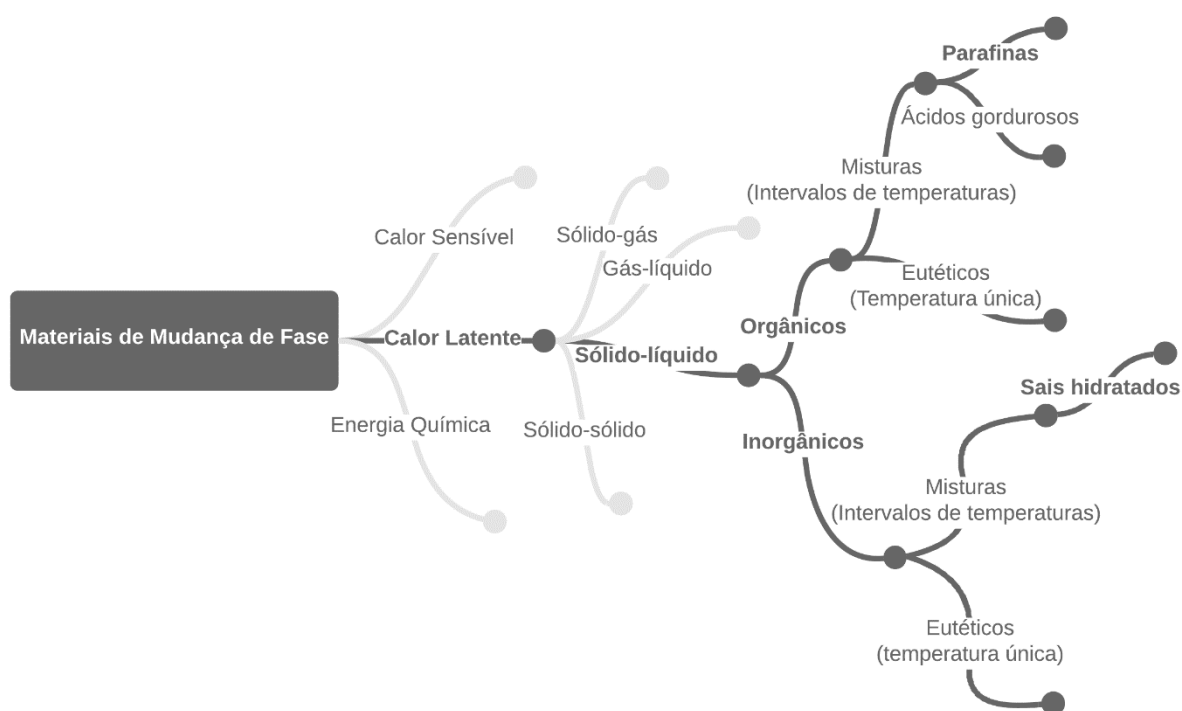


Figura 2 – Esquema para a classificação do PCM.
Fonte: Adaptado de Oliveira, 2012b.

2.1.1 PCMs orgânicos

Os Materiais de Mudança de Fase orgânicos, subdivididos em parafínicos e não parafínicos, apresentam vantagens quanto à sua estabilidade química e baixos índices de toxicidade e corrosividade (CASTILHO, 2014).

2.1.1.1 Parafínicos

Os PCMs orgânicos parafínicos, geralmente extraídos de derivados do petróleo, são compostos que apresentam alta estabilidade volumétrica, baixa pressão de vapor, são recicláveis, não sofrem segregação de suas fases, estão disponíveis em diversas faixas de ponto de fusão, comercialmente se apresentam com um custo mais baixo quando comparado com outras tecnologias de PCMs e, por consequência, são amplamente difundidos na composição de materiais de construção (LI, 2013). Suas principais desvantagens estão relacionadas com a sua baixa condutividade térmica e o seu alto nível de inflamabilidade (MEMON, 2014).

2.1.1.2 Ácidos graxos (Não-parafínicos)

Os PCMs orgânicos ácidos graxos (ou não-parafínicos), são misturas vegetais oleosas (principalmente de soja, palma e coco) ou glicerinadas, este tipo de PCM apresenta vantagem por possuir alta possibilidade de armazenamento do calor latente. Como pontos negativos é possível apontar o potencial corrosivo graças à composição de seus ácidos graxos, a condutividade térmica baixa e a dificuldade de sua aquisição por conta da utilização nas indústrias cosméticas e alimentícias (JEONG et al., 2013).

2.1.2 PCMs Inorgânicos

Os PCMs inorgânicos podem ser classificados como sais hidratados ou metais com ponto de fusão baixo.

2.1.2.1 Sais hidratados

Os sais hidratados são misturas supersaturadas que costumam apresentar condutividade térmica maior e calor latente semelhante quando comparados com PCMs parafínicos. Estes PCMs apresentam os menores valores comerciais por conta da facilidade encontrada na sua fabricação. Os pontos que costumam inviabilizar o seu uso estão relacionados com a segregação de fases que ocorre para altas quantidades de ciclos de mudança de fase em função da sua baixa estabilidade química (HADJIEVA; STOYKOV; FILIPOVA, 2000).

2.1.2.2 Metais

Caracterizados por metais como Césio e o Gálio, costumam ser materiais com baixa estabilidade química (um empecilho para o seu uso na construção civil). Alguns PCMs compostos por estes metais podem causar reações explosivas ao realizar contato com a água, além disso, o hidróxido destes materiais costuma danificar vidros, comprometendo a estrutura dos fechamentos translúcidos se aplicado em uma edificação. Ademais, possuem alta condutividade térmica e baixo índice de expansividade (EMSLEY, 2011).

2.1.3 PCMs eutéticos

Os PCMs eutéticos são compostos por misturas eutéticas de dois ou mais tipos de PCMs, podendo ser realizadas entre PCMs orgânicos ou inorgânicos. As principais vantagens da utilização desta classe de PCMs relacionam-se com sua curta e estável faixa de fusão, além do seu alto índice de calor latente. Normalmente as misturas eutéticas não sofrem segregação em suas fases, entretanto, as propriedades termo físicas destes materiais pode variar consideravelmente em determinadas misturas (MEMON, 2014).

2.1.4 Mudança de fase, faixa de fusão e histerese

Das propriedades dos PCMs, a mudança de fase, a faixa de fusão e a histerese, podem ser consideradas as particularidades químicas e físicas responsáveis pela diferença dos PCMs frente a outros materiais. Quanto a mudança de fase, conforme mostra a Equação 1 (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009), o Calor Latente (L), pode ser representado pela quantidade de energia (Q) necessária para mudar de fase uma quantidade (m) de massa em um determinado material, este dado costuma ser apresentado em cal/g, KJ/mol ou KJ/Kg.

$$L = Q/m \quad (1)$$

Onde:

L = Calor Latente;

Q = Quantidade de energia;

m = Massa.

A faixa de fusão ou ponto de fusão, refere-se ao valor de temperatura no qual

o material começa a fundir. Quando atingida, esta faixa é a responsável por mudar a inclinação da curva de aquecimento do material e, conseqüentemente, sua fase (LINDEMANN et al., 2002).

A histerese, fenômeno que ocorre geralmente no magnetismo, está relacionada com a capacidade de um determinado sistema conservar suas propriedades na ausência de um estímulo primário. Este fenômeno também pode ser observado em determinadas composições de PCMs, especialmente nos parafínicos. Trata-se de uma dependência da condição de temperatura inicial na qual as faixas de temperatura de fusão e congelamento apresentam intervalos distintos. Ou seja, nestes casos, as temperaturas da faixa de fusão não apresentarão intervalos semelhantes aos da faixa de congelamento, devido a interações prévias realizadas entre as moléculas do material (BISWAS et al., 2018).

2.1.5 PCMs micro encapsulados e macro encapsulados

Ainda como característica dos PCMs cabe salientar a distinção quanto ao encapsulamento destes materiais em dois grupos: micro encapsulados e macro encapsulados.

2.1.5.1 PCMs micro encapsulados

O PCM micro encapsulado é caracterizado pela forma de pequenas partículas de PCM armazenadas em polímeros com alto desempenho. Estas pequenas capsulas costumam apresentar um formato esférico ou assimétrico, com diâmetro menor que 1cm (CABEZA et al., 2011). O micro encapsulamento do PCM é considerado uma estratégia interessante à medida que o polímero que reveste o material atua como uma barreira que o protege durante as mudanças de fase, aumentando as possibilidades de aplicação e misturas com outros materiais como gesso e argamassas (CUNHA; AGUIAR; TADEU, 2017). A Figura 3 apresenta um exemplo de PCM micro encapsulado.



Figura 3 – Exemplo de PCM micro encapsulado.

Fonte: Pons e Stanescu, 2017.

2.1.5.2 PCMs macro encapsulados

O macro encapsulamento é dado pela introdução de PCM em *pouches*, tubos, módulos, sachês ou outros tipos de invólucros que armazenam o conteúdo do PCM no seu interior. Desta forma, ele pode ser aplicado como uma camada de uma determinada composição. Geralmente estes invólucros possuem mais de 1cm de diâmetro, o que facilita o seu manuseio e aplicação (CABEZA et al., 2011). A Figura 4 apresenta um exemplo de PCM macro encapsulado.



Figura 4 – Exemplo de PCM macro encapsulado.

Fonte: Pons e Stanescu, 2017.

2.1.6 Comercialização dos PCMs

Segundo a lista disponibilizada pelo *Laurent Pilon's Research Group* da Universidade da Califórnia no Estados Unidos (LAURENT PILON'S, 2021), 17 fabricantes ofertam comercialmente materiais de mudança de fase no mundo atualmente, sendo a maioria em países da Ásia, Europa e América do Norte. Nenhum na América Latina.

Os fornecedores costumam disponibilizar catálogos com as propriedades dos materiais chamados de *datasheets*, porém, a maioria destes fabricantes não disponibiliza todas as propriedades dos materiais nestes catálogos. Da lista de fabricantes, a *RubiTherm GmbH* é uma das empresas da lista que disponibiliza através dos seus *datasheets* todas as propriedades térmicas dos PCMs por eles ofertados. O Anexo A apresenta um exemplo de *datasheet* disponibilizado pela empresa.

2.1.7 PCMs na Construção Civil

A utilização dos PCMs como uma camada ou parte da composição de fechamentos externos de edifícios pode ser considerada uma das principais

aplicações deste tipo de material (SILVA, 2009). A busca, nestes casos, é pela redução da amplitude térmica encontrada nos ambientes internos do edifício. À medida que o PCM exerce seu papel regulatório quanto a capacidade térmica dos fechamentos em que é aplicado, reduzem-se os picos mínimos e máximos de temperatura aferidos dentro da edificação (PONS; STANESCU, 2017).

Segundo a ampla revisão realizada por Zhu et al. (2009), em geral, quando aplicados corretamente, os PCMs atuam de maneira positiva no desempenho térmico e energético do edifício como armazenadores térmicos. Costuma-se observar melhoras no conforto térmico e redução na necessidade do uso de climatização artificial. Todavia, a capacidade de transmitir calor de alguns invólucros de PCMs pode resultar em problemas de desempenho em algumas aplicações, sendo necessário nestes casos a utilização de materiais com baixa transmitância térmica para reduzir as oscilações a partir da aplicação do material.

A revisão de Zhu et al. (2009) aponta também que a aplicação de PCMs para resfriar os ambientes do edifício está sujeita às condições climáticas do local de aplicação, uma alta amplitude térmica entre a noite e o dia favorecem o uso de PCMs para esta finalidade (característica que pode ser observada nas zonas bioclimáticas brasileiras 1, 2 e 3). A seleção correta do PCM também é considerada uma etapa essencial para o bom funcionamento do sistema.

Quanto aos tipos, os PCMs costumam ser testados em trabalhos científicos que relacionam o seu uso com a construção civil através da adoção de estratégias micro e macro encapsulados. Quando avaliado de forma micro encapsulada, o PCM é misturado na composição da argamassa, gesso ou elemento responsável pelo revestimento interno do fechamento (CABEZA et al., 2011). Quando testado de forma macro encapsulada, o PCM aparece no fechamento como uma camada da composição, envolvido por um recipiente que armazena o PCM, como por exemplo, Kong et al. (2013) que utilizou uma placa de alumínio vazada para avaliar o desempenho de um envelope cubículo com PCM na China.

Brito et al. (2017) salienta que diversos autores têm pesquisado os efeitos do uso de PCMs como elemento de resfriamento passivo em edificações localizadas na América do Norte e em alguns países da Europa, porém, no hemisfério sul, em especial nos climas tropicais como é o caso do Brasil, existe uma escassez de referências que discutam a aplicabilidade desta tecnologia.

Internacionalmente, trabalhos como o de Athienitis et al. (1997) apontam já na segunda metade da década de 1990 que o uso de PCM incorporado a placa de gesso que compõe o envelope consegue reduzir em até 4°C a temperatura durante o dia, além de diminuir a carga de aquecimento da noite significativamente no clima sul do Canadá.

Trabalhos como Silva (2009), Oliveira (2012b), Castilho (2014), Figueiredo (2016) e Cunha et al. (2017), avaliaram o desempenho de diferentes edifícios com a utilização de tecnologias de PCMs. Os pesquisadores apontaram que a utilização dos materiais de mudança de fase nos fechamentos externos dos ambientes pode resultar em uma diminuição de 1 a 4°C nas suas temperaturas internas quando comparado com estruturas compostas apenas por materiais convencionais. Ademais, reduções no consumo de energia elétrica também foram observadas, estas variando de acordo com a tecnologia e contexto de aplicação.

Para o clima do sul de Portugal, Vicente e Silva (2014) avaliaram o uso de um PCM macro encapsulado entre duas camadas de isolamento em uma parede de tijolos maciços, os resultados apontam que mesmo em uma estrutura que já possui certa inércia térmica, as macros cápsulas de PCM tiveram um papel importante, auxiliando no aumento do calor armazenado nas paredes do experimento. Os resultados apresentados neste trabalho somados aos pontos semelhantes entre o clima do sul de Portugal e as zonas bioclimáticas brasileiras 1, 2 e 3 (DALBEM; FREITAS; CUNHA, 2015) salientam a necessidade de avaliar o papel da aplicação de PCMs nos envelopes dos edifícios brasileiros, sobretudo nos climas frios.

Para o clima brasileiro, Pons e Stanescu (2017) avaliaram o potencial de redução do consumo de energia elétrica para manter em conforto térmico uma sala comercial de 40m² nas 8 zonas bioclimáticas brasileiras. Para realização dos testes, foi aplicado um PCM de origem orgânica natural nos fechamentos, os resultados apresentaram uma possibilidade de redução no consumo de energia de 13,33% para Curitiba-PR (Zona Bioclimática 1) e 4,28% para Santa Maria-RS (Zona Bioclimática 2).

Quanto às características dos PCMs para as edificações brasileiras, Brito et al. (2017) desenvolveram um estudo que visa apresentar as propriedades térmicas ideais visando o melhor armazenamento de calor latente e ponto de fusão. Os resultados mostram que os PCMs são mais promissores para melhorar o desempenho em ambientes com sistemas construtivos leves, situados em locais onde

a inércia térmica é apontada como estratégia passiva para um melhor desempenho do edifício. Os testes com os PCMs chamados de originais pelo trabalho (com ponto de fusão em 22°C e capacidade de armazenamento térmico latente de 315 kJ/m²), apresentaram as mudanças menos significativas em todas as 8 zonas bioclimáticas brasileiras, o que segundo os autores indica a necessidade de avaliar a composição ideal de PCM para cada zona bioclimática. Quanto ao ponto de fusão, para as zonas bioclimáticas de 1 a 5, o valor ideal ficou na ordem de 30°C, já para as zonas bioclimáticas de 6 a 8, 34°C. Quanto à capacidade de armazenamento térmico latente, o trabalho sugere que os PCMs possuam um valor superior à 315 kJ/m², especialmente nas zonas bioclimáticas de 1 a 5.

2.2 Simulação Computacional

Segundo Pegden et al. (1995), simular é o ato de projetar um modelo computacional que se baseie em um sistema real, realizando experimentos em cima deste modelo a fim de interpretar o seu comportamento.

Gavira (2003) realizou uma revisão sobre as possibilidades de utilização da simulação computacional ou digital, destacando:

- A experimentação e avaliação, a fim de prever e analisar as consequências da aplicação antes do seu desenvolvimento real, reduzindo custos e garantindo resultados direcionados;
- Estudo de novos sistemas, com o objetivo de viabilizá-los ou refiná-los;
- Compreensão de sistemas reais;
- Ferramenta para treinamento de grupos e equipes;
- Análise de variações no meio ambiente a partir do funcionamento de um sistema;
- Resolução de problemas ou apresentação de soluções;
- Verificação e/ou comparação de soluções analíticas com as obtidas através da simulação;
- Estudo de sistemas dinâmicos em tempo real e projeção do futuro ou previsão de demanda.

Parte dos itens levantados pela autora como possíveis objetivos em análises que envolvem o uso de simulação computacional se enquadram na perspectiva deste trabalho, em especial o item de experimentação e avaliação, que reitera a possibilidade de avaliar as tecnologias de PCMs no contexto pretendido antes de qualquer proposta de prototipação.

2.2.1 Simulação termoenergética de edifícios

Os softwares simulam o comportamento térmico das edificações observando a 2ª lei da termodinâmica. As trocas de calor do edifício com o meio ocorrem por radiação, condução, convecção e evaporação. No balanço térmico entram as cargas internas das edificações, ganhos por radiação solar direta, ganhos ou perdas pela ventilação, assim como os ganhos ou perdas por condução. Nimlyat, Dassah e Allu (2014) apontam que a avaliação do desempenho energético de edificações é uma tarefa complexa que envolve uma grande quantidade de variáveis e diferentes conceitos. Neste cenário, o computador assume um papel importantíssimo à medida que possibilita que a grande quantidade de cálculos relacionadas com o desempenho térmico e energético das edificações possa ser realizada por meio de uma simulação computacional.

Para análise do funcionamento de uma edificação, seja pelas características construtivas, ou por aspectos técnicos como o uso de estratégias específicas que proporcionem um aumento no conforto térmico dos usuários ou uma redução no consumo de energia elétrica, diferentes ferramentas computacionais foram desenvolvidas ao longo das últimas décadas. Segundo a base de dados mantida pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos no site *BEST Directory - Building Energy Software Tools* e publicada inicialmente por Crawley (1997), hoje, mais de 290 programas de simulação do desempenho de edificações desenvolvidos no mundo inteiro estão disponíveis na plataforma.

Através de uma fusão das ferramentas BLAST e DOE-2, o Departamento de Energia dos Estados Unidos criou o software *EnergyPlus* (EP), ferramenta *open-source* que realiza através de simulação computacional um balanço térmico de diversos aspectos construtivos em um modelo tridimensional, avaliando também o consumo energético dos sistemas de climatização (CRAWLEY et al., 2000). O EP apresenta características que o colocam a frente dos demais softwares de simulação termoenergética, como a possibilidade de realizar a simulação de um mesmo edifício em diferentes contextos climáticos, variar o *timestep*, ou seja, o intervalo dos cálculos da simulação, a possibilidade de avaliações específicas em cada ambiente (zona térmica), além da contínua integração de sistemas complexos (fotovoltaico, tubos enterrados, ventilação híbrida, materiais de mudança de fase, etc...), inseridos regularmente nas atualizações da ferramenta.

Para geração das edificações utilizadas como entrada no EP, as ferramentas *Sketchup*, *DesignBuilder*, *Rhinoceros* e *OpenStudio* (softwares mais utilizados pela comunidade, sendo as três primeiras ferramentas pagas em suas versões completas), juntamente com os seus *plug-ins*, apresentam como resultado da modelagem tridimensional um arquivo de texto no formato *.idf (*Input Data File*), este arquivo contém todas informações geométricas, construtivas e técnicas correspondentes ao modelo em formato textual. O arquivo *.idf junto com o arquivo *.epw (*Energy Weather File*) - arquivo que contém os dados climáticos - compõem as informações utilizadas como entrada para simulação.

2.2.2 Estratégias de Otimização

Um dos maiores desafios encontrados pelos usuários do EP pode ser observado no momento de automatizar, parametrizar ou otimizar as informações que serão simuladas. A aplicação das variações necessárias em um estudo que envolva o uso da ferramenta não é uma tarefa tão simples quanto poderia, muito pelo fato de que as simulações termoenergéticas realizadas pelo EP, mesmo sendo executadas de forma eficiente para análise pretendida, não apresentam ao usuário uma interface capaz de alterar em larga escala as informações inseridas como entrada para o programa.

Quando diferentes características da edificação precisam ser alteradas para aplicação de interesse, os usuários da ferramenta precisam buscar alternativas que evitem a necessidade de realizar as mudanças pretendidas de forma manual, como por exemplo, a utilização de rotinas ou algoritmos. A partir da condição limitante na variação das entradas apresentadas pelo EP, uma biblioteca na linguagem de programação de computadores *Python*, código aberto, chamada *EnergyPlus Python* (eppy), foi desenvolvida em 2011 por Santosh Philip e sua equipe, a qual encontra-se na versão 0.5.56 de 2021 (PHILIP; TRAN; TANJUATCO, 2021). Sua ideia principal é fornecer aos usuários do EP a possibilidade de utilizar múltiplas variações das características inicialmente adotadas para o projeto, facilitando assim o processo de automatização, parametrização e otimização nos mais variados estudos que utilizam a ferramenta.

A Tabela 1 apresenta um recorte de trabalhos que utilizaram diferentes estratégias de otimização associadas às simulações termoenergéticas do EP. Através

dela é possível observar um aumento na complexidade das produções científicas com esta temática na última década.

Tabela 1 – Recorte de produções com estratégias de otimização junto com a simulação.

Autores	Objetivo	Estratégia
(ZHANG; KOROLIJA, 2010)	Apresentar a ferramenta JEPlus desenvolvida para análises paramétricas com o EP	Paramétrica
(CALAFIORE et al., 2017)	Utilização de um software matemático relacionado com o EP para análise paramétrica	Paramétrica
(WIJESURIYA; BRANDT; TABARES-VELASCO, 2018)	Análise paramétrica para materiais de mudança de fase em climas quentes e úmidos com o EP	Paramétrica
(DAHLAN; ARIS, 2018)	Avaliação do desempenho de um edifício de escritório utilizando programação evolucionária	Evolutiva
(YU et al., 2015)	Aplicação genética multiobjetivo para avaliação do conforto térmico e consumo de energia em edifícios	Multiobjetiva
(DELGARM et al., 2016)	Otimização multiobjetivo para avaliação da edificação com o EP por meio de enxame de partículas	Multiobjetiva
(OHTA; SATO, 2018)	Abordagem evolucionária multiobjetiva para determinar agendas de funcionamento para o ar condicionado	Evolutiva/Multiobjetiva

Em determinados casos como nos trabalhos de Yu et al. (2015), Delgarm et al. (2016), Dahlan e Aris (2018) e Ohta e Sato (2018) apresentados na Tabela 1, os autores propõem a utilização de recursos de Inteligência Artificial (IA) para definir as estratégias que determinarão o comportamento das simulações.

Como um instrumento de avaliação que faz a interface entre as simulações térmicas e energéticas com as principais estratégias de inteligência artificial, a ferramenta BESOS (FAURE et al., 2019) desenvolvida e mantida pelo *Energy In Cities Group* em parceria com a Universidade de Victoria (Canadá), possibilita a execução de cenários de simulação de edificações considerando o uso das diferentes ferramentas de IA. Com uma implementação em *Python* e *JupyterLab*, a sua execução em formato de *notebooks* permite a execução e visualização dos cenários simulados com poucas linhas de código.

Dentre as técnicas de IA utilizadas nas análises que visam avaliar o desempenho térmico e energético dos edifícios, destacam-se os algoritmos genéticos, evolutivos e multiobjetivos.

2.2.3 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AG) são métodos de busca que relacionam os mecanismos de evolução natural das espécies com um processo matemático e computacional, compreendendo processos de evolução genética de populações como a sobrevivência e adaptação dos indivíduos (CHEUNG, 2004). As aplicações que envolvem AG podem ser vistas em diferentes áreas do conhecimento, sobretudo nos casos onde busca-se encontrar um conjunto de soluções satisfatórias para um determinado critério, partindo de um conjunto pré-definido de informações.

2.2.4 Algoritmos Evolutivos

Como uma vertente dos AG, os Algoritmos Evolutivos (AE) surgem a partir do conceito de Programação Evolutiva, proposto inicialmente por Fogel em 1962 (FOGEL, 1962). Assim como os AG, baseiam-se nos mecanismos da evolução biológica, motivados pela necessidade de distribuir recursos para que sejam solucionados problemas, algo comum para a sobrevivência de uma espécie, por exemplo. Esta classe de algoritmos infere que a natureza otimiza seus recursos para resolver um ou mais problemas (VIKHAR, 2016).

Uma das principais características dos AE modernos é a utilização de múltiplas funções-objetivo. Deb (2001) discute em seu livro as diferenças entre as análises com apenas um objetivo e análises com múltiplos objetivos, onde segundo o autor, a evolução de um indivíduo em um determinado contexto é dada pelo resultado da combinação de diferentes características deste indivíduo com o meio em que ele está inserido, de modo que analisar isoladamente a evolução de apenas uma dessas características possa ser pouco representativa. Como possibilidade para melhor representar essas análises, os algoritmos evolutivos multiobjetivo buscam maximizar ou minimizar duas ou mais funções-objetivo conflitantes de um determinado problema (COELLO et al., 2007).

2.2.5 Algoritmos multiobjetivo

De acordo com Deb (2001), para cada problema numérico há um conjunto de soluções multiobjetivo eficientes, chamadas de *Pareto front* (ou frente de Pareto). Neste sentido, os métodos de otimização multiobjetivo ou algoritmos

genéticos/evolutivos multiobjetivo têm como principal finalidade minimizar a distância entre a frente não dominada e a frente ótima de Pareto, encontrando um conjunto de soluções variadas para um determinado problema (BARBOSA; RIBEIRO; ARANTES, 2010).

Esta abordagem costuma ser utilizada em problemas com duas ou mais funções-objetivo conflitantes, que podem ser minimizadas ou maximizadas de acordo com o que se pretende com a análise. Exemplificando este comportamento, a Figura 5 apresenta a curva de Pareto em uma análise multiobjetivo onde $f_1(x)$ e $f_2(x)$ são as duas funções-objetivo, a curva em cinza representa a frente de Pareto formada a partir do tracejamento dos pontos ótimos (círculos) e os pontos quadriculados representam as soluções dominadas, ou seja, os pontos que não apresentaram resultados próximos da curva ótima naquela iteração da análise. A solução ideal (ou utópica) em um cenário de minimização de ambas as funções-objetivo (como é o caso da Figura 5) seria a origem do gráfico (0,0). O que se busca, portanto, ao utilizar a otimização multiobjetivo em combinação com algoritmos genéticos ou evolutivos é que com o passar das gerações do algoritmo a curva ótima de Pareto se aproxime da solução ideal, bem como as soluções dominadas se aproximem da frente de Pareto.

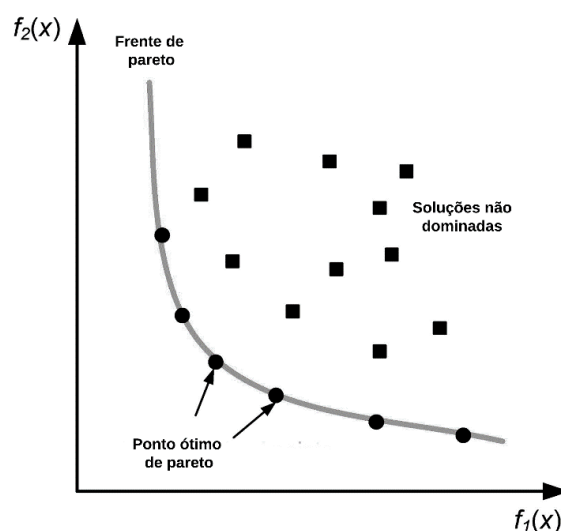


Figura 5 – Comportamento da frente de Pareto na análise multiobjetivo.

Fonte: Adaptado de Huang et al., 2015.

No contexto da simulação termoenergética, o uso dos algoritmos multiobjetivo em abordagens genéticas ou evolutivas permite a aplicação de diferentes combinações e/ou variações das características construtivas iniciais, estas mudanças

poderão resultar em um conjunto ótimo de resultados baseado em dois ou mais critérios estabelecidos.

2.2.6 Algoritmo Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

A necessidade dos AG e AE em identificar estratégias com rápida convergência dos dados, utilizando por vezes o conceito de elitismo para que a preferência seja dada para os indivíduos mais aptos (SOUSA SOBRINHO, 2014), ampliou a busca por métodos genéticos e evolutivos que priorizassem o desempenho da curva de convergência ótima em uma quantidade menor de gerações, em detrimento de um maior potencial exploratório dos seus indivíduos.

O maior destaque para os algoritmos implementados com esta finalidade é dado ao *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) (DEB et al., 2002) com mais de 37 mil citações segundo a base de trabalhos acadêmicos do *Google Scholar* até outubro de 2021.

O NSGA-II (DEB et al., 2002) se utiliza do conceito de Dominância para avaliar cada indivíduo da sua população, de modo que, sendo p e q dois indivíduos da população P , p domina q se p for melhor do que q em pelo menos um dos seus objetivos, sendo também o restante dos objetivos de p não piores do que os de q . Essa estratégia permite que o algoritmo faça uma classificação dos indivíduos mais aptos e determine a distância (algoritmo de *crowding distance sorting*) de cada um deles para o ponto ótimo (origem do plano de representação no caso das funções de minimização ou a constante ampliação dos valores identificados para as funções de maximização). Assim, quanto maior o número de indivíduos dominados por p e menor a sua distância para o ponto ótimo, melhor será a sua classificação.

A implementação do NSGA-II conta também com uma estrutura de dados Q , que armazena os indivíduos não-dominados, ou seja, aqueles que em dado momento da execução fizeram parte do conjunto P , porém foram descartados na execução da geração atual em função da identificação de melhores resultados. A existência de Q permite com que os elementos ordenados não percam características interessantes em dado momento da execução, garantindo a heterogeneidade do conjunto populacional e evitando os aspectos elitistas que desconsideram a diversidade dos indivíduos. A Figura 6 apresenta a implementação corrente do NSGA-II comumente utilizada nas bibliotecas de IA das linguagens de programação modernas, apresentando a população P ao final da execução como o resultado do recorte das

soluções ótimas de acordo com a curva de Pareto, incluindo a exclusão dos indivíduos não aptos.

Figura 6 – Estrutura da implementação vigente do NSGA-II nas bibliotecas de programação.

2.2.7 Aplicações relacionadas com o uso de algoritmos multiobjetivo em edificações por simulação

Bre e Fachinotti (2017), realizaram uma otimização evolutiva multiobjetivo com uso do algoritmo NSGA-II através de simulações computacionais em uma edificação residencial de dois pavimentos situada na região litorânea da Argentina. Os objetivos definidos foram a redução do consumo de energia para aquecimento e resfriamento. Os autores consideraram a variação de 12 parâmetros, sendo a orientação, o nível de sombreamento das janelas, a absorvância solar das esquadrias externas, o nível de infiltração pelas esquadrias e portas, o percentual de abertura das esquadrias para

ventilação, o tamanho das esquadrias, o tipo de esquadrias e a composição das paredes externas, internas, do piso e da cobertura. Os resultados apontam uma redução do consumo de energia elétrica para climatização de 82%, quando comparado com o modelo inicialmente definido.

No contexto nacional de análises evolutivas com a utilização de simulações computacionais termoenergéticas, Linczuk e Bastos (2020) realizaram um estudo de otimização evolutiva multiobjetivo em uma única zona térmica com o objetivo de otimizar o conforto térmico e o desempenho energético deste espaço edificado, variando a orientação solar, as propriedades térmicas dos materiais opacos e transparentes da envoltória, as dimensões da janela e da proteção solar. Como instrumentos de avaliação foram utilizadas simulações com o software *EnergyPlus* e a otimização com a ferramenta *JEPlus+EA* com uso do algoritmo NSGA-II. Os objetivos selecionados, portanto, foram a redução dos graus-hora para aquecimento e resfriamento. Os resultados, discutidos para o clima de Curitiba/PR (ZB1), mostram que as soluções ótimas apresentaram a orientação solar para norte e isolamento térmico de 100 mm, com transmitância térmica de 0,38 W/m²K para as paredes externas. Além disso, nenhuma das soluções ótimas considerou a porcentagem de área de janela acima de 80% em relação à área de parede, bem como um brise horizontal com dimensões acima de 80% da largura da janela. Para o contexto avaliado pelos autores as variáveis combinadas proporcionaram uma redução de graus-hora para aquecimento e resfriamento.

Berleze, Brasileiro e Silvosso (2021), por sua vez, avaliaram aspectos referentes a geometria de habitações residenciais em Chapecó/SC (ZB3) para a contribuição de um melhor desempenho térmico. Os autores fizeram uso de otimizações multiobjetivo, tendo como as duas funções-objetivo os valores de graus-hora de resfriamento e aquecimento. A análise foi realizada com a integração das ferramentas *Rhinoceros*, *Archsim*, *Grasshopper* e *EnergyPlus*. A implementação evolutiva adotou o algoritmo Galápagos como recurso para a avaliação. As variações realizadas em duas tipologias unifamiliares residenciais consideraram variações na absorvância das paredes externas, área dos ambientes de permanência prolonga (APPs), PAFT das janelas dos APPs, e a orientação solar de aplicação das janelas dos APPs. As condições de ganhos internos foram configuradas de acordo com o RTQ-R. A recomendação da análise evolutiva do ponto de vista térmico sugeriu a adoção de coberturas com transmitância térmica menor ou igual a 0,85 W/m²K e com uma

composição pesada (capacidade térmica maior que 200 kJ/m²K e atraso térmico maior que 8 horas). Para as paredes externas a recomendação foi de uma transmitância menor que 2,00 W/m²K e composição pesada (maior que 150 kJ/m²K e atraso térmico maior que 4,5 horas), indicando uma melhora de 49% nas condições internas no período frio a partir das otimizações observadas na análise evolutiva.

Leitzke et al. (2021) aplicaram a avaliação evolutiva multiobjetivo associada a simulação com o *EnergyPlus* em uma habitação de interesse social situada em Pelotas/RS (ZB2). Os autores consideram para o processo evolutivo o uso de uma implementação autoral com duas abordagens de avaliação denominadas AND e OR. A primeira abordagem faz um recorte acentuado entre os melhores indivíduos dos dois objetivos (conforto térmico e consumo de energia elétrica), enquanto a segunda abordagem faz um recorte menos acentuado, selecionando os indivíduos melhores em apenas um dos dois objetivos (conforto térmico ou consumo de energia elétrica). No estudo foram variadas as transmitâncias térmicas das paredes externas, piso e cobertura, a orientação solar e as absorptâncias solares das paredes externas e cobertura. Os resultados apresentados apontam que no melhor cenário da análise um conforto térmico de 79% para as horas do ano em ocupação foi observado, segundo as condições adaptativas da ASHRAE 55 para 80% de aceitabilidade (ASHRAE, 2013). Da mesma forma, a solução otimizada apontou uma intensidade do uso de energia elétrica de 32 kWh/m².ano.

Maciel et al. (2021) apresentam um estudo de otimização evolutiva multiobjetivo considerando quatro algoritmos para a análise, sendo os supracitados AND e OR (Leitzke et al. 2021), juntamente com os algoritmos da literatura SPEA2 e NSGA-II. O estudo considera como modelo de avaliação um projeto de EMEI padrão tipo 2, na ZB2. As funções-objetivo de intensidade do uso de energia (IUE) para aquecimento e refrigeração foram consideradas pelo estudo, juntamente com a variação da espessura do isolamento térmico das paredes externas e do piso, a absorptância solar das paredes externas e cobertura e a orientação solar. Dentre os quatro algoritmos avaliados o SPEA2 e o NSGA-II apresentaram melhores resultados em relação às funções-objetivo, representando uma redução de 92% da IUE para aquecimento e 52% para resfriamento em relação ao caso base.

2.3 Inércia Térmica nos Edifícios

De acordo com Lamberts, Ghisi e Papst (2016), a inércia térmica é caracterizada pela utilização de elementos construtivos com maior capacidade térmica, fazendo com que eventuais picos de temperatura externa não sejam brevemente percebidos internamente.

Estes componentes construtivos são indicados para climas quentes, secos e onde há uma alta amplitude térmica entre o dia e a noite. O papel da capacidade térmica dos componentes, nestes casos, está relacionado com o atraso da onda de calor, de modo a permitir a sua incidência no espaço interior apenas no período da noite. Os mesmos autores apontam que a inércia térmica associada com outras estratégias como o aquecimento solar passivo e o isolamento térmico, podem auxiliar na diminuição da perda de calor de um ambiente em climas frios.

Segundo o trabalho de Papst (1999), que realizou durante 9 meses medições quanto à temperatura de bulbo seco em três edificações com características construtivas distintas localizadas na cidade de Florianópolis-SC (que apresenta ao longo do ano estações com o clima quente e úmido, assim como constantes entradas de frentes frias), a inércia térmica mostrou-se uma estratégia eficaz no inverno e também no verão quando considerada nos fechamentos verticais das edificações.

Granja (2002), buscou descrever de forma analítica o fenômeno da inércia térmica em fechamentos opacos de edifícios localizados em Campinas-SP, observando se o nivelamento dos picos térmicos pode ou não auxiliar na redução da carga térmica dos equipamentos de condicionamento e climatização. Para realização da análise foram utilizadas equações diferenciais parciais para a condução de calor, considerando séries de Fourier em intervalos de 24 horas. Como resultado, o autor aponta que reduções nos gastos energéticos podem ser observadas com a utilização de componentes que utilizam a inércia térmica como estratégia passiva para a localidade do trabalho.

Oliveira (2012a), em um estudo sobre os limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos de acordo com a NBR 15.220 (ABNT, 2005) para uma habitação de interesse social localizada na ZB2, aponta que um edifício com baixa transmitância térmica nos fechamentos opacos verticais, pode considerar a inércia térmica uma estratégia benéfica à medida que permite com que o calor absorvido ao longo do dia seja devolvido para o ambiente à noite.

Soares (2014), que avaliou os limites da norma de desempenho NBR 15.575 (ABNT, 2013) para habitações de interesse social na Zona Bioclimática 2, indica que, tanto no período quente quanto no período frio, uma alta inércia térmica, fazendo uso de composições pesadas nas paredes e cobertura, mostra-se uma estratégia interessante quando combinada com a ventilação (nos períodos quentes) e o aquecimento solar (nos períodos frios) para Zona Bioclimática 2.

2.3.1 PCM como um isolante capacitivo

Alawadhi (2008) aponta que os PCMs podem ser classificados como isolantes capacitivos em função da sua atuação na diminuição do fluxo de calor ocorrida após o processo de absorção. Desta forma, durante o dia, o PCM absorve parte do calor através do processo de derretimento e, à noite, o PCM solidifica e libera esse calor armazenado. Ou seja, assim como aponta Zöld e Szokolay (1997), o isolante capacitivo atua a partir da oscilação periódica da temperatura, à medida que uma composição pesada ou com alta capacidade de armazenamento de calor latente nos fechamentos externos contribuirá com o acúmulo de energia, resultando em isolamento capacitivo.

Contudo, cabe diferenciar o papel do isolante capacitivo e do isolante resistivo (comumente utilizado na construção civil como o elemento que proporciona um maior nível de resistência térmica para os fechamentos), já que o primeiro, como mencionado anteriormente, tem um papel de absorção durante o fluxo de calor, enquanto o segundo busca evitar as trocas, atuando com um elemento de obstrução.

La Rosa et al. (2014) em um estudo sobre o tipo ideal de isolante resistivo em fechamentos edificados, destacam que os isolantes leves, com baixa condutividade térmica, alta resistência térmica e, conseqüentemente, baixa transmitância térmica, apresentam os resultados mais promissores do ponto de vista de atuação do isolante.

Este é um potencial cenário de comum ocorrência, à medida que a presença do PCM como isolante capacitivo em um fechamento leve ou sem a massa térmica necessária para proporcionar de forma efetiva o fenômeno da inércia térmica pode contribuir conjuntamente com a aplicação do isolante resistivo, utilizado tanto em fechamentos leves quanto em fechamentos pesados.

2.3.2 A inércia térmica em fechamentos edificadas a partir da aplicação de PCMs

O estudo de Wi, Chang e Kim (2020), buscou identificar o impacto da inércia térmica nas condições internas de temperatura de uma edificação residencial na Coreia do Sul. Para tanto os autores propuseram 22 composições distintas de um PCM parafínico aplicado na parte interna das paredes externas com baixa capacidade térmica com uma espessura de 20mm. Os principais resultados da avaliação mostram que além de uma economia de 5% no consumo de energia para aquecimento no período frio, a adição da inércia térmica no balanço da edificação reduziu a temperatura do pico no verão em 4,1°C.

Rahimpour et al. (2017) avaliaram para um edifício residencial em cinco cidades australianas o papel da inércia térmica com a aplicação de um PCM parafínico macro encapsulado com espessura de 20mm nas paredes externas, piso e cobertura. Os resultados obtidos pelos autores mostram que a diminuição na oscilação das temperaturas internas nos dois climas mais frios implicou nas reduções do uso de HVAC anual em 21,8% na cidade de Hobart e 16,7% em Melbourne.

Hichem et al. (2013) propõem em seu estudo uma avaliação numérica com dinâmica de fluídos computacionais (CFD) na ferramenta FLUENT para identificar o impacto da aplicação de PCMs nos furos de tijolos cerâmicos, visando ampliar a capacidade térmica destes compostos densos. Para a avaliação foi desenvolvido um modelo de transferência de calor transiente bidimensional, que consiste na aplicação de PCMs nos furos quadrados do tijolo cerâmico usado comumente como material de construção para edifícios residenciais na Argélia. Os resultados mostraram que a estratégia de aplicação do PCM com o intuito de aumentar a inércia térmica do tijolo mostram que em envelopes opacos verticais com baixo nível de isolamento térmico, a variação de temperatura em 24 horas após a aplicação dos PCMs nos furos foi de 27,0 para 27,3°C, enquanto a mesma avaliação para o tijolo com a manutenção do ar nos furos mostrou ao longo das 24 horas analisadas uma flutuação de 27,0 para 30,9°C. Desta forma, os autores apontam que a redução da flutuação dos ganhos de temperatura nas superfícies opacas verificais externas contribui com a redução das demandas internas para refrigeração, à medida que são reduzidos os ganhos indesejados pelo envelope opaco.

2.4 Avaliação sistematizada da Literatura

A revisão sistematizada realizada neste trabalho consistiu na elaboração de um protocolo de revisão e identificação das produções científicas através das bases de dados, considerando a combinação de termos de busca com os objetivos da revisão. Em um segundo momento as produções selecionadas foram identificadas e fichadas, conforme o modelo apresentado no Quadro 1. Em seguida, foi realizada a relação entre as produções lidas e a identificação dos pontos de interesse. Por fim, foi elaborada uma análise a partir das produções selecionadas.

Quadro 1 – Modelo da ficha de leitura utilizado

Produção -	Número da Ficha: XX	Código da Leitura: GRI0X
Resumo -	Argumento/Observações Ligações com outros autores -	

A constituição deste protocolo foi baseada no método de revisão sistemática de literatura (RSL) de Kitchenham et al. (2009), que determina como elementos de composição do protocolo o objetivo, as questões de pesquisa, as palavras-chave, os sinônimos, as bases de artigos científicos, os termos de busca (*strings*), os critérios de inclusão e os critérios de exclusão.

O objetivo da RSL foi determinado a partir do estabelecimento de uma questão preliminar:

“Identificar as características de configuração e avaliação das produções que utilizam PCMs na composição de fechamentos edificados por intermédio de simulações computacionais evolutivas.”.

Como questão principal da pesquisa de revisão:

“Os PCMs podem minimizar os efeitos da falta de massa térmica em fechamentos externos verticais quanto ao consumo de energia elétrica operacional de edifícios?”

Da mesma forma, como questões específicas:

“Quais são os tipos de PCMs mais adequados para construção civil?”

“Quais são as melhores composições químicas de PCMs para prática construtiva?”

“Quais estratégias de otimização evolutiva são consideradas nas produções que avaliam por simulação a aplicação de PCMs em fechamentos?”

“Quais algoritmos, parâmetros e instrumentos de análise são combinados com as simulações térmicas e energéticas para avaliação das diferentes tecnologias de PCMs?”.

A Tabela 2 apresenta as palavras-chave e os sinônimos considerados para elaboração dos termos de busca.

Tabela 2 – Palavras-chave e sinônimos considerados para elaboração dos termos de busca.

Palavras-chave	Sinônimos
<i>PCM</i>	<i>phase change materials; latent heat storage materials; LHS</i>
<i>Building energy simulation</i>	<i>building simulation; energy simulation</i>
<i>Optimization</i>	<i>optimize; optimizing; streamline; evaluation</i>
<i>Multi-objective Evolutionary Algorithms</i>	<i>MOEA; pareto-front based algorithm</i>
<i>Thermal inertia</i>	<i>thermal capacity; thermal mass</i>
<i>Energy consumption</i>	<i>electricity consumption</i>

Como bases de artigos científicos a Science@Direct e a SCOPUS foram consideradas, sendo ambas internacionais e vinculadas com periódicos de alto fator de impacto. Nenhuma base nacional foi considerada em função da ausência de produções a partir das *strings* de busca estipuladas em testes realizados preliminarmente. As *strings* de busca utilizadas podem ser vistas no Quadro 2.

Quadro 2 – *Strings* de busca utilizadas para revisão sistematizada.

STR1 ("PCM" OR "phase change materials" OR "latent heat storage materials") AND ("Building energy simulation" OR "building simulation" OR "energy simulation") AND ("Optimization" OR "optimize" OR "evaluation")
Comentário STR1: String sobre otimização de PCMs em simulações termoenergéticas.
STR2 ("PCM" OR "phase change materials" OR "latent heat storage materials") AND ("Building energy simulation" OR "building simulation" OR "energy simulation") AND ("Multi-objective Evolutionary Algorithms" OR "pareto-front based algorithm")
Comentário STR2: String sobre algoritmos evolutivos em simulações termoenergéticas com PCMs
STR3 ("PCM" OR "phase change materials" OR "latent heat storage materials" OR "LHS") AND ("Building energy simulation" OR "building simulation" OR "energy simulation") AND ("Thermal inertia" OR "thermal capacity" OR "thermal mass")
Comentário STR3: String sobre a inércia térmica em simulações termoenergéticas com PCMs

STR4 ("PCM" OR "phase change materials" OR "latent heat storage materials" OR "LHS") AND ("Building energy simulation" OR "building simulation" OR "energy simulation") AND ("energy consumption" OR "electricity consumption")

Comentário STR4: String sobre o consumo de energia em simulações termoenergéticas com PCMs

A Tabela 3 mostra os critérios de inclusão e exclusão das produções identificadas a partir das buscas.

Tabela 3 – Critérios de inclusão e exclusão das produções.

Critérios de inclusão	Critérios de Exclusão
Termos da busca no título, resumo/abstract e/ou palavras-chave	Anais de congresso, capítulos de livros ou artigos submetidos
Produções dos últimos 20 anos (2000+)	Produções antigas
Inglês, português e espanhol	
Artigos em periódicos ou livros	
Revisão por pares	

O total das produções identificadas em cada base por *string* de busca pode ser observado na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Resultados das buscas das *strings* nas bases de dados.

String	SCOPUS	SCIENCE DIRECT	Total
STR1	25	31	56
STR2	2	9	11
STR3	12	21	33
STR4	22	37	59

Após as buscas pelas duas bases um total de 159 produções foram identificadas, sendo nestas aplicadas um filtro de leitura dos *abstracts* para considerar ao final da aplicação do protocolo um total de 68 produções que foram lidas e fichadas de forma integral.

2.5 Análise bibliométrica

A partir do conjunto de produções selecionadas na análise de RSL, algumas informações gerais acerca destes trabalhos foram selecionadas em uma avaliação bibliométrica com o uso das ferramentas Bilbiometrix e a linguagem de programação de computadores R (DERVIŞ, 2019).

A Figura 7 apresenta um mapa de co-ocorrência das palavras-chave identificadas de forma comum entre as produções selecionadas. A análise divide a relação da produção selecionada em três grupos: em vermelho o grupo que relaciona os PCMs com os sistemas energéticos e seus desempenhos em edificações, em verde os sistemas e instrumentos utilizados para avaliação dos cenários e em azul os aspectos construtivos e térmicos que compõem os espaços edificados. O PCM aparece como tema de destaque neste mapa em função da sua comum ocorrência (*phase change materials*), fazendo conexões entre a utilização de energia (*energy utilization*), eficiência energética (*energy efficiency*), edificações (*buildings*) e conservação de energia (*energy conservation*). No grupo azul cabe destaque também para a forte ocorrência do tema de armazenamento de calor (*heat storage*) enquanto propriedade dos PCMs, além da simulação de edifícios (*building simulation*) como instrumento de avaliação.

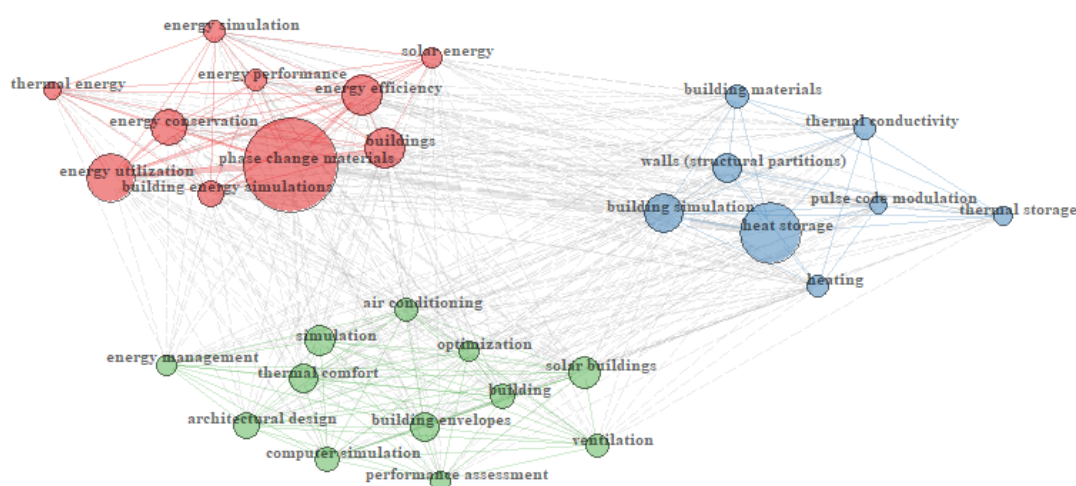


Figura 7 – Mapa de co-ocorrência das palavras-chave a partir das strings de busca.
Fonte: Gerado a partir da ferramenta Bibliometrix (DERVIS, 2019).

A Figura 8 apresenta um mapa de correlação entre os temas de destaque das produções. Também dividido em três grupos, o mapa indica uma forte relação simultânea entre a temática dos PCMs, edificações, desempenho energético e seus sistemas.

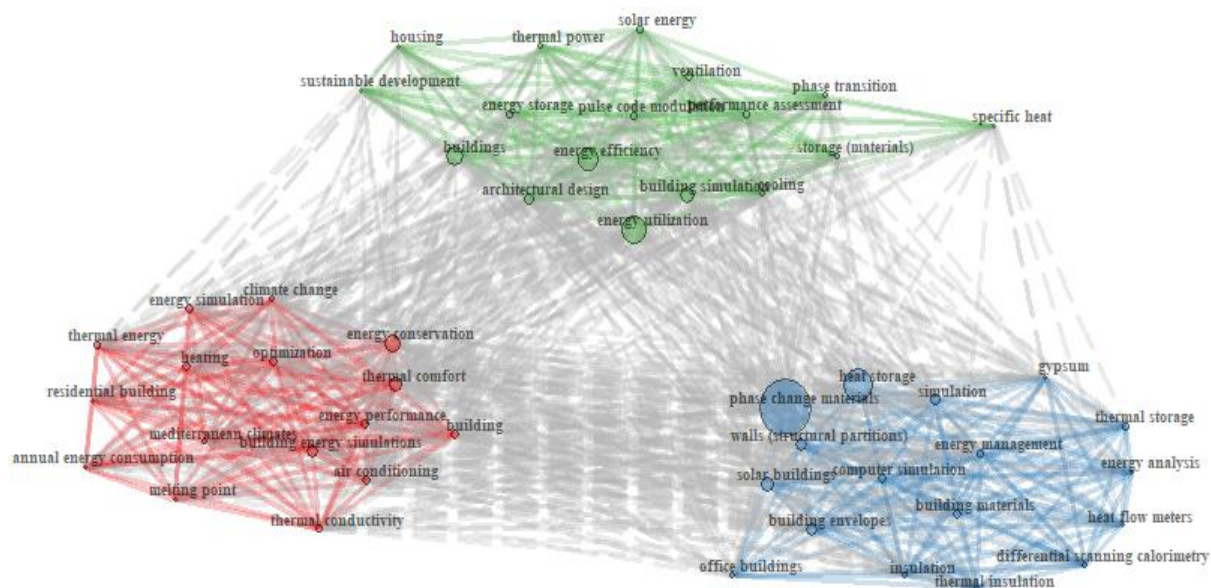


Figura 8 – Mapa de correlação entre os temas a partir das strings de busca.
 Fonte: Gerado a partir da ferramenta Bibliometrix (DERVIŞ, 2019).

Com relação a localização das produções selecionadas, a Figura 9 apresenta um gráfico com a localidade das produções recortadas na RSL. Observa-se nele uma predominância chinesa quanto a otimização de PCMs para aplicação em edifícios, com quase o dobro das produções identificadas na Itália que aparece logo em seguida. Ainda sobre a Figura 9, vale destacar a espacialidade global identificada nesta revisão, com volume de produções na Ásia (oriental e meridional), Europa, América do Norte e Oceania.

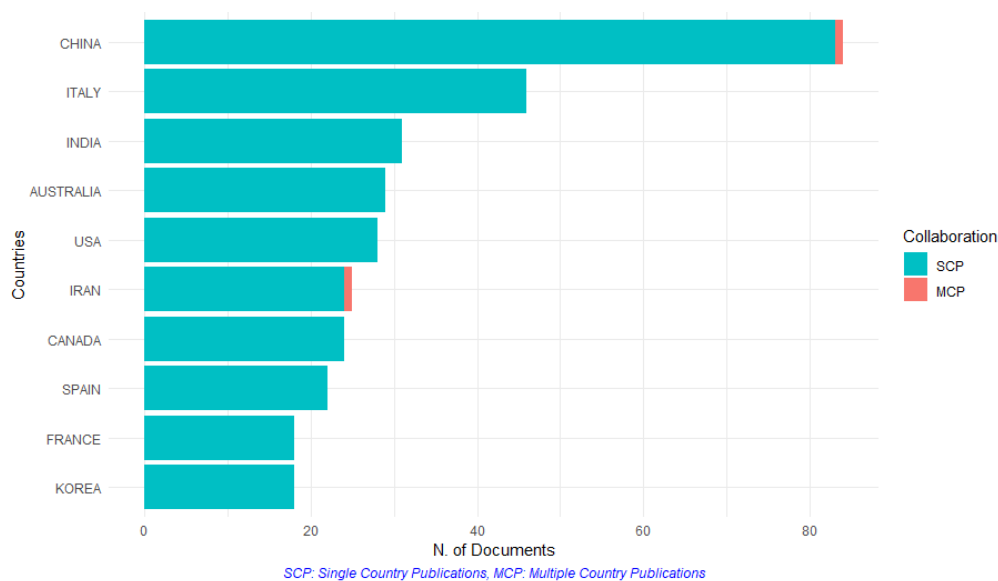


Figura 9 – Países de origem das produções selecionadas a partir das strings de busca.
 Fonte: Gerado a partir da ferramenta Bibliometrix (DERVIŞ, 2019).

Quanto aos períodos de publicação das produções identificadas, percebe-se a partir da Figura 10, que o tema de otimização dos materiais em mudança de fase para aplicação em fechamentos edificados se encontra em uma crescente dentro da literatura global na área. A produção com o tema apresenta uma escala exponencial desde 2011, com o pico nos últimos 2~3 anos, ou seja, trata-se de um tema emergente e atual.

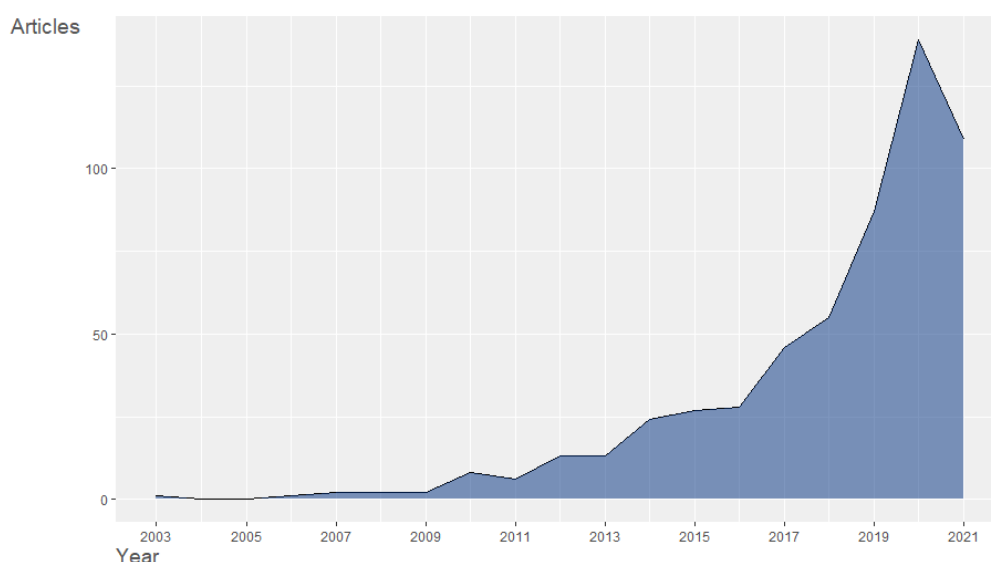


Figura 10 – Ano de publicação das produções selecionadas a partir das strings de busca.

Fonte: Gerado a partir da ferramenta Bibliometrix (DERVIS, 2019).

2.6 Recorte e discussão das produções elencadas no protocolo de RSL

Para o detalhamento e discussão foram identificadas temáticas das produções que porventura se repetiram em duas ou mais *strings* de busca, bem como nas duas bases de dados para o mesmo termo de pesquisa. Desta forma, as produções apresentadas a seguir fazem parte do grupo de produções alinhadas com as condicionantes do protocolo.

Para os objetivos de otimização da envoltória de edificações com o uso de PCMs, a maior parte das pesquisas encontradas estão voltadas para economia de energia da edificação, para o controle dos picos de demanda energética e para a avaliação do fluxo de calor do edifício. Cabe destaque também para otimizações na ótica da conservação de energia, utilização de energia térmica, aspectos mecânicos, econômicos e ambientais.

Os Métodos de otimização (baseados em simulação) destacam o uso das ferramentas *MATLAB*, *ANSYS*, *FLUENT* e *EnergyPlus*, combinadas com os métodos

de entalpia 1D e métodos de capacidade de calor 1D, como principais tecnologias adotadas nas pesquisas que avaliam os PCMs, ainda que exista a ressalva de que, embora os modelos de transferência de calor 1D possuam boa precisão, os fenômenos de super resfriamento e convecção natural do PCM podem não ser bem representados, havendo maior fidelidade dos fenômenos de representação do comportamento dos PCMs em simulações com a consideração de diferenças finitas.

Para a seleção de otimização de parâmetros de mudança de fase, a maioria dos(as) pesquisadores(as) estuda apenas a otimização de um ou dois parâmetros. Neste sentido, ainda que a escolha dos objetivos de otimização voltados para performance térmica e energética predominem nas avaliações, as sugestões das produções destacam que novos objetivos para as produções futuras serão relacionados de forma mais habitual com a performance mecânica, econômica e ambiental, visto que as avaliações multiobjetivo são apontadas como de importância significativa para trabalhos futuros.

Da mesma forma, a discussão pontuada em parte das produções destaca a incompletude da análise que determina o parâmetro de mudança de fase ótimo, muito em função da dificuldade escalável e replicável das condições alcançadas para um determinado contexto. Por consequência, as produções reforçam o papel da revisão literária na escolha do PCM com parâmetros de mudança de fase apropriados para melhoria de características energéticas e de conforto térmico.

quanto aos estudos em destaque do protocolo de revisão, como observado na análise bibliométrica, a China aparece como o contexto global de maior quantidade de ensaios científicos sobre a aplicação de PCMs em fechamentos edificados. Cai et al. (2021) apresentam uma revisão bibliográfica sobre as possibilidades de implantação de PCMs em envoltórias de edificações residenciais chinesas. Quatro pontos principais foram destacados pelos autores: os parâmetros de otimização, os objetivos de otimização, os métodos de otimização e os modelos de transferência de calor utilizados. Os autores fazem uso do produto da revisão bibliográfica para realizar uma descrição textual dos diversos métodos, locais e informações descritas. A partir desse apanhado, foram geradas tabelas apontando dados para cada um dos quatro pontos principais observados. Quanto aos parâmetros de otimização para os materiais em mudança de fase, a temperatura dos pontos de fusão e solidificação durante a mudança de fase é, segundo os autores, o parâmetro mais importante quanto ao afeito de sua variação na aplicação de composição dos fechamentos,

sendo os limites destas variáveis sensíveis ao contexto climático. Os autores apontam que a seleção/escolha de PCM pode ser considerada um problema de otimização, ainda que os PCMs micro encapsulados, aplicados nos revestimentos das faces internas do edifício tenham sido os mais recorrentes entre os trabalhos analisados, os quatro pontos observados pela pesquisa bibliográfica realizada são necessários na consideração deste problema.

Song et al. (2018) realizaram um estudo sobre a aplicação de PCM como um sistema de armazenamento de energia térmica para uma edificação. Para aplicação na envoltória foi considerada a utilização de PCM em diferentes composições: nas paredes junto ao gesso de revestimento, junto a argamassa de reboco, concreto e tijolo e em coberturas com a adição em forros de gesso, somado ao uso de placas fotovoltaicas e em pisos concretados com sistema de aquecimento por radiação. Os autores consideraram PCMs parafínicos e ácidos orgânicos binários como tecnologias para aplicação, avaliando o comportamento a partir de diferentes softwares: *ANASYS*, *EnergyPlus*, *FEM*, *FLUENT* e *TRNSYS*. Os resultados do trabalho mostram que as temperaturas ideais para maximização de geração da energia térmica se deram com a variação de temperatura da mudança de fase do PCM entre 17~29°C nos componentes da envoltória.

Liu et al. (2020) apresentam uma otimização de PCM estabelecida em níveis micro e macro encapsulados, com uso de nano tubos de carbono e tiras metálicas. O experimento consiste na aplicação de parafina líquida nos nano tubos de carbono para encontrar a razão entre as quantidades dos dois elementos de forma a melhorar a condutividade térmica do composto, identificando assim o aparecimento de rotas de transferência de calor que indicam as melhorias no processo de armazenamento de calor. Já para as tiras metálicas foram otimizados os parâmetros geométricos, fazendo com que o processo de transferência de calor fosse mais rápido e homogêneo. A parede composta analisada com painel de PCM otimizado apresentou melhorias quanto a temperatura da face interna e maior valor de pico para transferência de calor, apresentando maior estabilidade térmica, sobretudo na solução micro encapsulada.

Em outro contexto climático, Bagheri-Esfah, Safikhani e Motahar (2020) propõem um novo método para otimizar a especificação dos PCMs, visando solucionar o problema relativo à aplicação da tecnologia nos períodos de calor e de frio, partindo da premissa de que as produções consideram soluções apenas para o

período frio. O estudo realiza uma otimização de dois objetivos, identificando a partir das simulações os pontos ótimos de Pareto. O objetivo principal da pesquisa está relacionado com a minimização das cargas de resfriamento e aquecimento em uma edificação residencial em Tehran - Irã, considerando a aplicação de PCMs parafínicos.

Quanto as tecnologias utilizadas, foram realizadas modelagens numéricas, redes neurais artificiais e a utilização do algoritmo de otimização multiobjetivo NSGA-II. O *EnergyPlus* (EP) foi utilizado como instrumento para o treinamento da rede neural. Após a obtenção dos dados de saída da rede, a execução do modelo evolutivo apontou para os casos ótimos de Pareto, indicando pontos de fusão e solidificação do PCM entre 22 e 29°C, bem como fechamentos com um maior nível de isolamento térmico, mesmo em cenários com a condição de baixa inércia térmica, contribuem com a redução das demandas energéticas da edificação quando combinados com o uso de PCMs.

Kishore et al. (2020) investigaram numericamente através da utilização de um modelo matemático bidimensional para fluxo de calor com apoio de simulação numérica feita com o *software COMSOL Multiphysics 5.4* a integração do PCM na composição das paredes, a fim de encontrar condições adequadas para uso o efetivo do PCM na melhora do desempenho da edificação em diferentes localidades. Como variantes da análise foram alteradas as faixas de transição de temperatura, a localização da posição do PCM na parede e potencial de economia energética das edificações com integração de PCM.

Diversos pontos que influenciam na performance do PCM foram identificados e analisados:

- Variações de temperatura diurna, interferindo em como o PCM se comporta para regular temperaturas internas;
- Temperatura de transição, já que se a mesma for constantemente muito alta ou muito baixa, o PCM não sofre mudança de fase;
- A posição do PCM dentro da parede, afetando o nível de interação do material com a temperatura do ambiente interno ou externo, o que também afeta o armazenamento de energia para posterior troca com a parte interna da edificação.

Os resultados mostram que o impacto térmico do PCM nas paredes é limitado, não sendo positivo em todos os climas, mas vantajoso para uso em climas moderados se observados os pontos acima.

Cascone, Capozzoli e Perino (2018) propuseram uma análise para otimização multiobjetivo em um *retrofit* energético em edifícios de escritórios com adição de PCM nos fechamentos opacos. O estudo considerou duas condições climáticas na Itália onde as edificações estudadas estão inseridas (Csa e Cfa). Para o *retrofit*, foram consideradas as seguintes mudanças: adição de PCM e isolamento nas paredes externas e cobertura, troca das janelas com mudança de posição dos elementos de sombreamento de internos por externos, instalação de sistema de ventilação mecânica, reforma do sistema de aquecimento e refrigeração, instalação de controle de iluminação (*dimming lighting control*). As intervenções para a parte interna e externa das paredes foram realizadas por meio de um modelo paramétrico. Como ferramenta de simulação o *EnergyPlus* v8.0 foi escolhido para análise energética. Para necessidades energéticas relativas a aquecimento e resfriamento, o sistema foi modelado com *IdealLoadsAirSystem* com capacidade auto dimensionada para as duas condições. O Algoritmo de *ConductionFiniteDifference* foi adotado para modelagem do PCM, junto ao modelo de *ConductionTransferFunction* para os casos onde houve a ausência do PCM a fim de reduzir o tempo de cálculo. Para realização das otimizações, o Algoritmo Evolutivo NSGA-II foi utilizado, encontrando ao final da execução os valores para *Pareto front*.

A partir dos resultados obtidos foram utilizados para investigação dois objetivos de comparação a respeito da aplicação do PCM nos fechamentos quanto ao consumo de energia e custo global, visando ampliar a investigação de três objetivos: redução de gastos energéticos para aquecimento, resfriamento e custo de investimento. Os autores concluem que a aplicação do PCM tem melhor performance energética quando na parte interna das paredes para os dois contextos climáticos italianos, bem como como elemento ou parte do revestimento interno da cobertura. Na análise multiobjetivo, o consumo de energia primário foi reduzido com o aumento de espessura do PCM. Por fim, o calor latente e as temperaturas de fusão e solidificação foram apontados como aspectos de grande influência para indicar a eficiência do PCM.

Markarian e Fazelpour (2019) adotaram uma estratégia de otimização multiobjetivo para encontrar o tipo e localização do PCM ideais a fim de minimizar cargas de aquecimento e resfriamento em cinco cidades do Irã com climas distintos. O estudo foi feito através de simulação das edificações com o *software DesignBuilder/EnergyPlus*, sendo adotado em seguida o uso de um algoritmo

multiobjetivo para otimização de performance energética com mudanças de tipo e localização do PCM. As otimizações foram analisadas a partir de objetivos ambientais e econômicos na ótica da avaliação de riscos. Os algoritmos *conduction finite difference algorithm* – CondFD e o método evolutivo proposto pelo algoritmo NSGA-II foram utilizados. Os PCMs considerados para o estudo possuem disponibilidade comercial e obtidos em catálogos de empresas manufactureiras.

Quanto aos resultados, a aplicação de PCM apresentou benefícios ambientais que o colocam a frente de outras estratégias capacitivas, no entanto, mostra-se ainda como uma tecnologia economicamente inviável no Irã. A integração do PCM para os climas árido, semiárido e temperado apresentou viabilidade de aplicação e se mostrou benéfica para economia energética. Para todos os climas, o uso de PCM resultou em economia de eletricidade. Além disso, também houve redução de pegada de carbono anual.

Kuznik et al. (2015) apresentam uma metodologia com o objetivo de identificar soluções de composições projetuais para aplicação de PCM. O foco do trabalho é na redução energia para aquecimento, visto que é o aspecto responsável pelo maior consumo de energia na Europa, contexto climático de avaliação do trabalho. Segundo os autores, a metodologia desenvolvida para o caso de aquecimento também é válida para redução de resfriamento. A premissa considerada é de que a aplicação desejada parta de uma consideração cuidadosa quanto a definição das características do material, desta forma, para análise de comportamento térmico e requerimentos para aquecimento, foi utilizado um modelo de residência de baixas necessidades energéticas (*low-energy*) localizado em Chambéry, França. Em seguida, foi realizada a modelagem numérica para parede de PCM é integrada a parte interna da parede externa e cobertura. Para análise de impacto da placa de PCM foi observada a demanda de aquecimento anual, comparando os resultados de consumo de aquecimento para os modelos com e sem PCM na parede.

Os resultados obtidos quanto as propriedades térmicas do PCM destacam que o calor latente apresenta influência na redução da demanda de aquecimento anual, a condutividade térmica afeta o armazenamento e a liberação de calor, influenciando também o consumo de energia. O consumo anual de aquecimento apresenta 23% de redução de energia, aplicadas propriedades específicas para a parede com PCM. Houve ainda uma maximização de capacidade de armazenamento de calor e de condutividade.

Novamente em um aspecto geral sobre as produções selecionadas, algumas condições de relação podem ser apontadas, bem como situações de amplitude do ponto de vista geográfico e de contextos para aplicação dos PCMs.

Iniciando pelo contexto climático, as aplicações e testes por simulação com relação a localização dos experimentos se mostraram amplas no sentido da diversidade de climas e características. Embora os PCMs tenham um conhecido papel de atendimento satisfatório em construções situadas em climas predominantemente frios, parte das produções apontam para possibilidade de aplicação do material como um elemento capaz auxiliar nas condições internas dos ambientes, tanto nos períodos frios quanto nos períodos quentes, agindo como um armazenador de calor latente não apenas no ponto de vista do fornecimento da carga térmica necessária para suprir a ausência que os fechamentos porventura não compreendam, mas também como um material capaz de absorver a carga interna nos períodos de sobreaquecimento destes mesmos ambientes.

É possível apontar também a avaliação do uso destes materiais em diferentes contextos climáticos, inclusive em localidades com estações do ano bem definidas e grande amplitude térmica diária.

Quanto às tecnologias de PCMs utilizadas, observa-se um predomínio dos PCMs parafínicos, em especial os micro encapsulados. A aplicação deste PCM pôde ser observada constantemente na composição de elementos das paredes e cobertura, sendo testado tanto em revestimentos, como também no próprio elemento de vedação.

Para questão das ferramentas de simulação os softwares *ANSYS*, *EnergyPlus* e *DesignBuilder* foram os mais recorrentes nas produções destacadas, sendo o instrumento de otimização mais frequente o algoritmo evolutivo NSGA-II em combinação com avaliações uni objetivo, biobjetivo e multiobjetivo.

Ainda que algumas informações tenham sido observadas de forma comum entre as produções, os trabalhos sugerem (sobretudo os de revisão de literatura) a necessidade de ampliação dos cenários de avaliação dos PCMs na composição de elementos da construção civil, sendo a simulação computacional uma aliada na identificação dos impactos térmicos e energéticos da aplicação destes componentes no desempenho dos edifícios.

3. MÉTODO

O método experimental é utilizado como estratégia de pesquisa neste trabalho. Ele é caracterizado pela manipulação de diferentes variáveis relacionadas com o objeto de estudo, permitindo o teste de hipóteses que se relacionam com as premissas estabelecidas. Como elementos característicos deste método de pesquisa, encontram-se os grupos de controle para o acompanhamento dos experimentos, a seleção aleatória e a manipulação de variáveis (RODRIGUES, 2007).

O que se busca, portanto, são generalizações por meio de técnicas de coleta de amostragem realizadas ao longo do experimento.

3.1 Nível geral da pesquisa

Em um nível geral, é possível dividir a execução do trabalho em 4 etapas: a) definição dos modelos para a simulação termoenérgica; b) definição das condições de contorno para a simulação dos PCMs; c) implementação e execução da análise evolutiva multiobjetivo para a otimização das simulações; d) análise de resultados e considerações. A Figura 11 apresenta a sequência das atividades gerais da pesquisa.

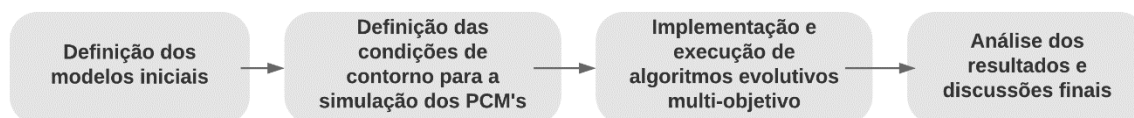


Figura 11 – Fluxograma do nível geral da pesquisa.

3.2 Detalhamento das etapas da pesquisa

A Figura 12 apresenta de forma pormenorizada as etapas, procedimentos e atividades associadas com o método da pesquisa. O trabalho pode ser compreendido em 3 níveis, sendo todos eles acompanhados por uma etapa de revisão bibliográfica em bases de dados acadêmicos, acervos digitais e trabalhos relacionados com a temática proposta.

Nível 1) Etapa exploratória, responsável pela definição e caracterização dos elementos que serão utilizados/testados durante a execução dos experimentos propostos pelo trabalho.

Nível 2) Etapa de desenvolvimento, engloba a execução das atividades e procedimentos definidos preliminarmente, assim como estrutura os fluxos de execução, a realização dos experimentos e a ordem em que estes devem ocorrer.

Nível 3) Etapa de análise e reflexões, avalia e discute, de acordo com os objetivos e problemas definidos na origem do trabalho, os resultados obtidos através dos experimentos. Também é a etapa responsável por elencar, destacar e apresentar os pontos de sucesso e insucesso encontrados através da pesquisa.

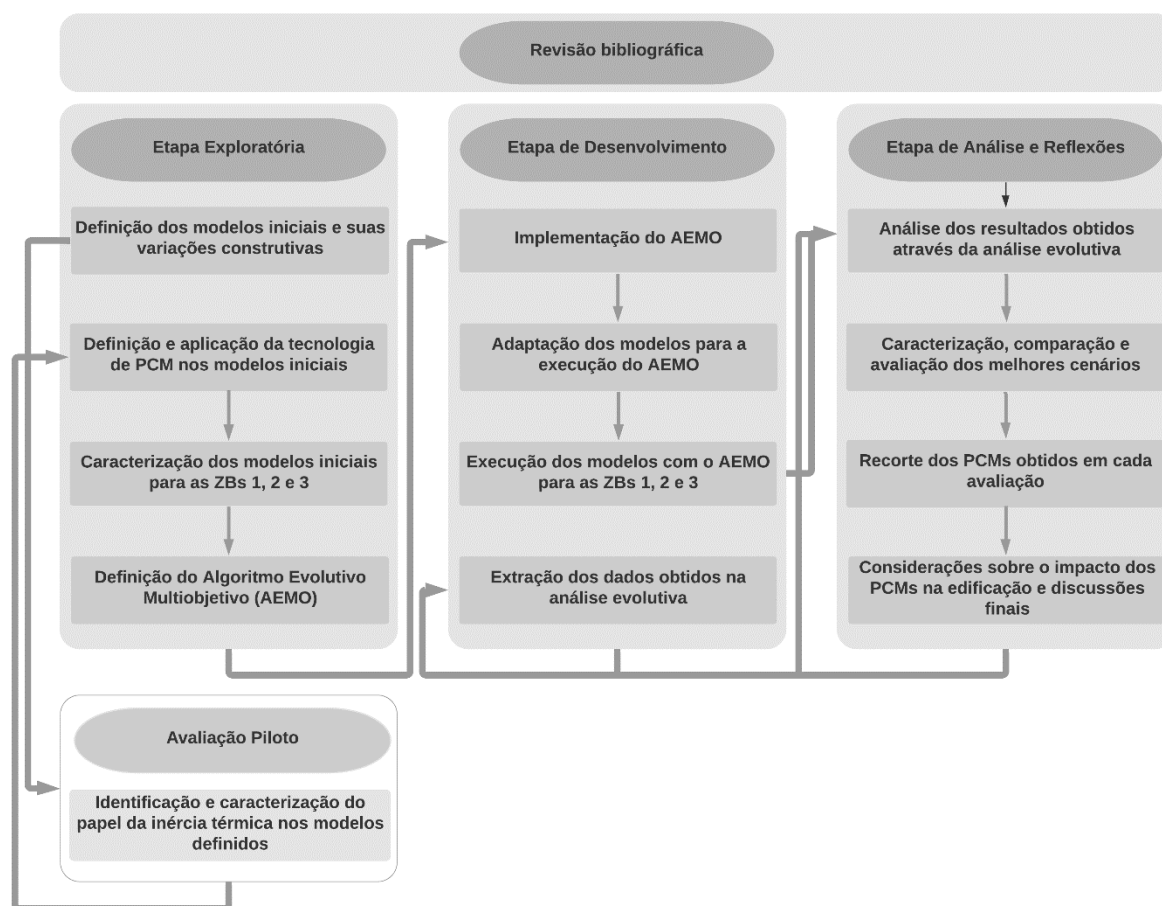


Figura 12 – Fluxograma com as etapas, procedimentos e atividades do método de pesquisa.

3.3 Etapa exploratória

3.3.1 Definição e configuração dos modelos iniciais

Como objeto para o estudo foi utilizado um projeto arquitetônico de uma edificação residencial desenvolvida na pesquisa "Casa Bioclimática nZEB e Qualidade do Lugar: Entrelaçando experiências: Portugal e Rio Grande do Sul/Brasil". Seu desempenho foi verificado nos trabalhos de Dalbem et al. (2015) e (2017), comprovando o atendimento às normativas nacionais, em especial o RTQ-R.

3.3.1.1 Aspectos gerais

A edificação estudada é uma residência unifamiliar (Figura 13), com 126,45 m² alocados em dois pavimentos. No térreo encontra-se a cozinha e a sala de estar

integrados, um solário, dois dormitórios e um banheiro. No pavimento superior, estão a área de trabalho, a área técnica e um lavabo. O projeto ainda contempla um abrigo para automóvel. O solário está posicionado na orientação norte, com cobertura e paredes translúcidas com a finalidade de aumentar os ganhos de radiação solar através do aquecimento passivo no inverno, para o verão o solário pode ser sombreado e integralmente aberto, auxiliando em uma melhor exploração da ventilação natural.



Figura 13 – Plantas baixas dos pavimentos térreo e superior.

Fonte: Dalbem et al., 2015

Como estratégia passiva relacionada com a posição do edifício, salienta-se o fato de que o projeto foi orientado sobre o eixo leste-oeste, maximizando a fachada norte. O objetivo, segundo Dalbem et al. (2017), é aumentar os ganhos de radiação solar no inverno, reduzindo, através das menores fachadas para leste e oeste, possíveis ganhos indesejados no verão. A área envidraçada para a orientação norte corresponde a 33,20% da área opaca da edificação para a fachada em questão, com esquadrias compostas por vidros duplos e caixilharia em PVC, na cor branca. As esquadrias possuem também elementos de proteção solar com a finalidade de permitir o controle seletivo da radiação solar.

A partir deste projeto arquitetônico, quatro composições de fechamentos foram estabelecidas, sendo elas:

Modelo A) Edifício com elevado nível de isolamento térmico, acompanhando a composição utilizada por Dalbem et al. (2015) e (2017). Neste modelo os fechamentos externos verticais apresentam alvenaria na sua composição (Item 3.3.1.2);

Modelo B) Edifício com baixo nível de isolamento térmico, acompanhando a composição utilizada por Soares (2014) que visa o atendimento dos requisitos mínimos de transmitância e capacidade térmica da NBR 15.575 (Item 3.3.1.3);

Modelo C) Edifício com elevado nível de isolamento térmico, análogo ao Modelo A, entretanto, com composição dos fechamentos externos verticais em LSF conforme as indicações da diretriz do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT) para sistemas leves do tipo Light Steel Framing (SINAT, 2016) (Item 3.3.1.4);

Modelo D) Edifício com baixo nível de isolamento térmico, análogo ao modelo B, entretanto, com composição dos fechamentos externos verticais em LSF conforme as indicações da diretriz do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT) para sistemas leves do tipo Light Steel Framing (SINAT, 2016) (Item 3.3.1.5).

3.3.1.2 Composição dos fechamentos no Modelo A

Conforme o trabalho de Dalbem et al. (2015), os elementos construtivos da edificação foram adotados seguindo os princípios da *Standard Passive House* que recomenda uma transmitância térmica próxima a $0,30 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ para todos os elementos da envolvente opaca em climas quentes. A escolha deste trabalho como instrumento para elaboração do Modelo A foi pautada na avaliação proposta pelos autores em condicionantes climáticas análogas, além do uso de estratégias evolutivas multiobjetivo durante a avaliação, alcançando nos resultados otimizados $12,8 \text{ kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ para demanda anual de aquecimento na ZB2, valor este do limite de atendimento de $15 \text{ kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ da *Standard Passive House*. As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam a espessura, a condutividade térmica e a resistência térmica dos materiais utilizados na composição das paredes externas, laje de piso e cobertura, assim como o resultado da transmitância térmica total e da capacidade térmica total do elemento de construção, conforme a NBR 15.220 (ABNT, 2005a). As esquadrias utilizadas no modelo são compostas de vidros duplos com fator solar (FS) de 0,87 e transmitância térmica de $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

Tabela 5 – Composição das paredes externas para o Modelo A.

Constituição	e (m)	λ (W/(m.K))	R ($\text{m}^2/(\text{W.K})$)	U (W/($\text{m}^2.\text{K}$))	CT (KJ/($\text{m}^2.\text{K}$))
--------------	-------	---------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------

Gesso acartonado	0,01	0,35	0,03	0,31	273
Tijolo Térmico	0,24	0,22	1,07		
EPS	0,08	0,04	2,00		
Reboco externo	0,02	1,15	0,02		

Fonte: Adaptado de Dalbem et al., 2015

Tabela 6 – Composição da laje de piso para o Modelo A.

Constituição	e (m)	λ (W/(m.K))	R (m ² /(W.K))	U (W/(m ² .K))	CT (KJ/(m ² .K))
Revestimento cerâmico	0,01	0,90	0,01	0,40	310
Argamassa de assentamento	0,04	1,15	0,02		
EPS	0,08	0,04	2,00		
Laje pré-moldada	0,25	-	0,19		

Fonte: Adaptado de Dalbem et al., 2015

Tabela 7 – Composição da cobertura para o Modelo A.

Constituição	e (m)	λ (W/(m.K))	R (m ² /(W.K))	U (W/(m ² .K))	CT (KJ/(m ² .K))
Gesso acartonado	0,01	0,35	0,03	0,41	357
Laje pré-moldada	0,25	-	0,19		
EPS	0,08	0,04	2,00		
Reboco externo	0,02	1,15	0,02		

Fonte: Adaptado de Dalbem et al., 2015

Legenda das Tabelas 5, 6 e 7: e = espessura; λ = condutividade térmica; R = resistência térmica; U = transmitância térmica total e CT = capacidade térmica total.

3.3.1.3 Composição dos fechamentos no Modelo B

O Modelo B utiliza na composição dos fechamentos as características do trabalho de dissertação de Soares (2014), que avalia os requisitos mínimos de transmitância e capacidade térmica para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 da NBR 15.575, conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – Requisitos de desempenho térmico do envelope opaco para as ZB1, ZB2 e ZB3

Zona Bioclimática	Paredes externas		Cobertura
	U (W/m ² .K)	CT (kJ/m ² .K)	U (W/m ² .K)
1	U ≤ 2,5	CT ≥ 130	U ≤ 2,3
2	U ≤ 2,5		U ≤ 2,3
3	U ≤ 3,7 se $\alpha \leq 0,6$, ou U ≤ 2,5 se $\alpha > 0,6$		U ≤ 2,3 se $\alpha \leq 0,6$, ou U ≤ 1,5 se $\alpha > 0,6$

Fonte: ABNT, 2013

As paredes externas são compostas a alvenaria cerâmica com blocos de 6 furos nas dimensões 14x19x29cm, com 2 cm de espessura de reboco em ambas as faces. A cobertura é composta por telhas de fibrocimento de 0,8 cm fixadas sobre estrutura de madeira. Todos os ambientes apresentam forro de madeira de 2 cm, fixado sobre uma estrutura. A laje de piso é composta por um radier de concreto armado com 10 cm de espessura, tendo sobre as execuções da argamassa de assentamento e do piso cerâmico (SOARES, 2014).

As Tabelas 9, 10 e 11 informam a composição das paredes externas, laje de piso e cobertura para o Modelo B.

Tabela 9 – Composição das paredes externas para o Modelo B.

Constituição	e (m)	λ (W/(m.K))	R (m ² /(W.K))	U (W/(m ² .K))	CT (KJ/(m ² .K))
Gesso acartonado	0,01	0,35	0,03		
Bloco cerâmico 6 furos	0,14	0,70	0,20	2,47	150
Argamassa	0,02	1,15	0,02		

Fonte: Adaptado de Soares et al., 2014

Tabela 10 – Composição da laje de piso para o Modelo B.

Constituição	e (m)	λ (W/(m.K))	R (m ² /(W.K))	U (W/(m ² .K))	CT (KJ/(m ² .K))
Radier	0,10	1,75	0,06		
Argamassa	0,02	1,15	0,02	3,42	278
Rev. cerâmico	0,08	0,04	2,00		

Fonte: Adaptado de Soares et al., 2014

Tabela 11 – Composição da cobertura para o Modelo B.

Constituição	e (m)	λ (W/(m.K))	R (m ² /(W.K))	U (W/(m ² .K))	CT (KJ/(m ² .K))
Telha de fibrocimento	0,008	0,65	0,01		
Câmara de ar	> 0,05	-	0,14	2,18	24
Gesso acartonado	0,01	0,35	0,03		

Fonte: Adaptado Soares et al., 2014

Legenda das Tabelas 9, 10 e 11: e = espessura; λ = condutividade térmica; R = resistência térmica; U = transmitância térmica total e CT = capacidade térmica total.

3.3.1.4 Composição dos fechamentos no Modelo C

O Modelo C utiliza as mesmas composições de cobertura e piso do Modelo A (Tabelas 7 e 6), entretanto, para as paredes externas, a composição segue os

preceitos indicados pela diretriz SINAT que apresenta estratégias de sistemas construtivos estruturados em perfis leves com fechamentos em chapas (sistema *Light Steel Framing*). A Tabela 12 apresenta a composição da parede externa adaptada de um dos exemplos para este tipo de fechamento disponíveis na diretriz (SINAT, 2016).

Tabela 12 – Composição das paredes externas para o Modelo C.

Constituição	e (m)	λ (W/(m.K))	R (m ² /(W.K))	U (W/(m ² .K))	CT (KJ/(m ² .K))
Gesso acartonado	0,01	0,35	0,03	0,31	81
OSB	0,03	0,12	0,25		
Lã de vidro	0,10	0,04	2,22		
OSB	0,03	0,12	0,25		
Placa cimentícia	0,05	0,95	0,05		

Fonte: Adaptado de SINAT, 2016.

Legenda da Tabela 12: e = espessura; λ = condutividade térmica; R = resistência térmica; U = transmitância térmica total e CT = capacidade térmica total.

3.3.1.5 Composição dos fechamentos no Modelo D

O Modelo D utiliza as mesmas composições de cobertura e piso do Modelo B (Tabelas 11 e 10), entretanto, para as paredes externas, da mesma maneira que o Modelo C, a composição segue os preceitos indicados pela diretriz SINAT que apresenta estratégias de sistemas construtivos estruturados em perfis leves com fechamentos em chapas (sistema *Light Steel Framing*), porém, sem considerar a camada do isolante (lã de vidro). A Tabela 13 apresenta a composição deste fechamento.

Tabela 13 – Composição das paredes externas para o Modelo D.

Constituição	e (m)	λ (W/(m.K))	R (m ² /(W.K))	U (W/(m ² .K))	CT (KJ/(m ² .K))
Gesso acartonado	0,01	0,35	0,03	2,47	31
OSB	0,02	0,12	0,20		
Placa cimentícia	0,01	0,95	0,01		

Fonte: Adaptado de SINAT, 2016.

Legenda da Tabela 13: e = espessura; λ = condutividade térmica; R = resistência térmica; U = transmitância térmica total e CT = capacidade térmica total.

3.3.1.6 Modelagem e configurações dos modelos de simulação

Para a modelagem da edificação foi utilizada a interface gráfica do *software Sketchup* 2017 com acréscimo do *plug-in Euclid* 0.9.4.1. A simulação dos modelos foi realizada através do *software EnergyPlus*, versão 9.0.1. Após a modelagem, realizou-

se a configuração dos quatro modelos de acordo com os valores padrão apresentados no RTQ-R, para ocupação, iluminação, equipamentos (INMETRO, 2010). Para a climatização das residências adotou-se uma estratégia híbrida, alternando o uso da ventilação natural a partir da abertura de janelas, com o condicionamento de ar artificial.

Cabe salientar que a escolha do RTQ-R como documento condicionante para configuração das características operacionais do edifício passou pela indefinição em relação à nova instrução normativa do INMETRO para edificações residenciais (INI-R) durante o período de realização deste trabalho, visto que a sua proposta de aplicação de 2018 (CB3E, 2018) ainda será condicionada e readequada aos pontos estabelecidos pela nova norma de desempenho NBR 15.575 (ABNT, 2021).

A Figura 14 apresenta a modelagem tridimensional da edificação, cada ambiente da edificação foi representado como uma zona térmica.



Figura 14 – Modelo tridimensional do projeto arquitetônico na ferramenta *Sketchup*.

Fonte: Dalbem, 2017.

Para configuração dos modelos foram utilizados os valores padrão apresentados no RTQ-R para ocupação, iluminação e uso de equipamentos. Os dormitórios utilizam o padrão mínimo de duas pessoas. Já na sala, foi realizada a soma dos usuários da edificação. As agendas de ocupação foram definidas considerando as diferenças preconizadas pelo RTQ-R para os dias úteis e finais de semana (ou feriados), conforme mostram as Figuras 15 e 16.

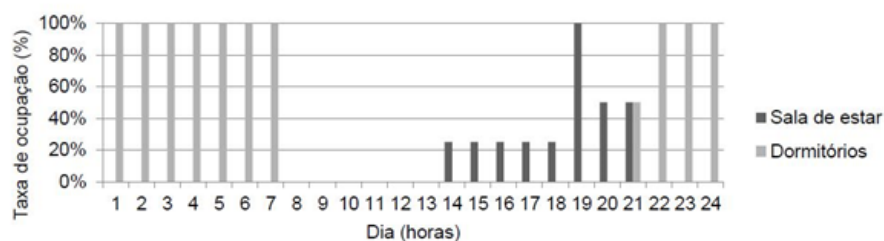


Figura 15 – Ocupação - Dias úteis.

Fonte: INMETRO, 2010.

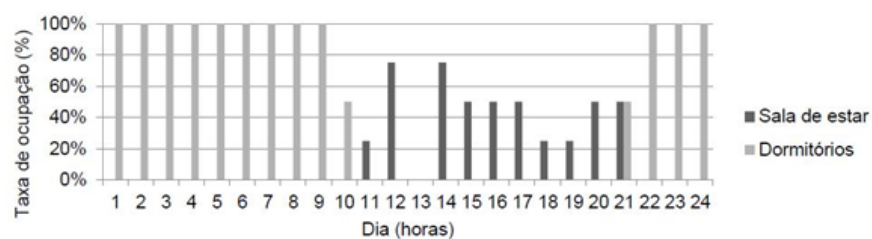


Figura 16 – Ocupação – Finais de semana e feriados.

Fonte: INMETRO, 2010.

A taxa metabólica foi configurada considerando os padrões adotados pelo RTQ-R de acordo com o tipo de atividade realizada em cada ambiente, o que significa 81 W por pessoa nos dormitórios e 108 W por pessoa na sala de estar/cozinha.

A iluminação foi configurada apenas nos ambientes de permanência prolongada, com densidade de potência instalada (DPI) de 6 W/m² nas salas e 5 W/m² nos dormitórios (INMETRO, 2010). Quanto às agendas, os padrões seguem o regulamento de modo que os dias úteis e final de semana (ou feriados) apresentam distinções. As Figuras 17 e 18 apresentam os padrões de iluminação para os dias úteis e finais de semana/feriados, respectivamente, conforme o RTQ-R.

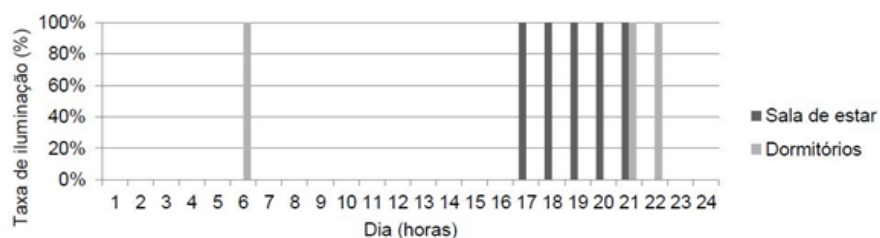


Figura 17 – Iluminação – Dias úteis.

Fonte: INMETRO, 2010.

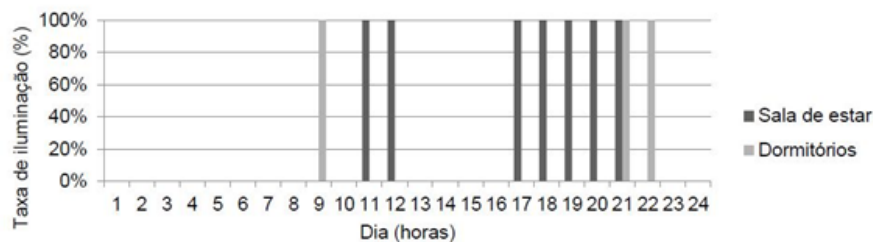


Figura 18 – Iluminação – Finais de semana e feriados.

Fonte: INMETRO, 2010.

A densidade de carga interna com equipamentos adotada foi de $1,5 \text{ W/m}^2$ para a sala, considerada no período de 24 horas (INMETRO, 2010).

Também foi configurado o sombreamento das janelas através de persianas externas que utilizam uma agenda para determinar o período de sombreamento durante a primavera e o verão. O período estabelecido foi de 21 de setembro até 20 de março, entre as 8:00h às 18:00h. O dispositivo é uma persiana com aletas horizontais com refletância de 0,8, condutividade de $0,90 \text{ W/m.K}$ e espessura de 0,001m. Cabe salientar, sobretudo para os Modelos B e D, que o sombreamento das janelas não é uma estratégia exigida pela NBR 15.575 (ABNT, 2013), porém foi considerada para beneficiar o desempenho da edificação (DALBEM, 2018).

3.3.1.7 Configuração da ventilação híbrida

Os quatro modelos apresentados possuem ventilação natural configurada de acordo com os objetos *AirflowNetwork* do EP em todos os ambientes que possuem aberturas. Ainda, contam com um sistema de ar condicionado para os ambientes de permanência prolongada com um coeficiente de performance (COP) para o sistema de aquecimento de 2,75 e de 3,0 para o sistema de refrigeração. A taxa de fluxo de ar por pessoa é de $0,00944 \text{ m}^3/\text{s}$, a eficiência do motor é de 0,90 e a do ventilador é de 0,70.

Para realizar o controle destas duas estratégias de ventilação evitando a operação concomitante dos sistemas, foi configurado o objeto do EP *AvailabilityManager:HybridVentilation*. Segundo o manual de referência da ferramenta, este objeto de ventilação híbrida tem por objetivo avaliar as condições externas e alterar o controle/operação das aberturas com base em um ou mais critérios, maximizando o uso da ventilação natural e, por consequência, reduzindo o uso do sistema de climatização artificial à medida que os critérios sejam atendidos (DOE, 2018).

O *AvailabilityManager:HybridVentilation* apresenta oito estratégias de controle para a operação dos sistemas de ventilação, de modo que, para este trabalho, foi considerada a opção 5:

5 = Operative temperature control using adaptive comfort 80% acceptability - Neste controle se a temperatura operativa estiver dentro dos limites superior e inferior de aceitabilidade de 80% especificados pela ASHRAE Standard 55 - 2010, a ventilação natural é habilitada e a operação do ar condicionado é forçada a desligar. Já se a temperatura operativa estiver além dos limites superior e inferior, a operação do sistema de climatização artificial é permitida e a ventilação natural é desligada;

Para os modelos utilizados neste trabalho a opção 5, que adota os limites de conforto adaptativo da Standard ASHRAE 55 para 80% de aceitabilidade foi utilizada. A motivação para escolha desta estratégia passa pelo fato de que os sistemas artificiais de climatização só serão utilizados quando, nas horas ocupadas, os ambientes de permanência prolongada não apresentarem condições de conforto compatíveis com os limites do padrão da ASHRAE 55.

A configuração da ventilação híbrida com a opção de controle 5 torna possível visualizar o comportamento das estratégias nos modelos de edificação propostos com o objetivo de reduzir o consumo de energia pelos sistemas de climatização, sem interferir negativamente no conforto térmico dos usuários.

3.3.2 Adaptação climática para os modelos iniciais

Para a avaliação realizada neste trabalho foram considerados os climas das Zonas Bioclimáticas brasileiras 1, 2 e 3 (ABNT, 2005), representadas pelos arquivos climáticos no formato INMET de 2018 para as cidades de Curitiba/PR (ZB1), Santa Maria/RS (ZB2) e Florianópolis/SC (ZB3) disponíveis na base de dados climáticos *Climate OneBuilding* (CLIMATE ONEBUILDING, 2021).

A cidade de Curitiba/PR (ZB1), com latitude de -25,42, longitude de 49,27 e altitude de 934 metros está localizada na Zona Bioclimática 1 de acordo com a divisão proposta pela parte 3 da ABNT NBR 15.220 (ABNT, 2005). Para a caracterização climática proposta pela mesma normativa, o clima de Curitiba se encaixa no tipo ABCF, sendo A para necessidade de aquecimento artificial, B para aquecimento solar, C inércia para aquecimento e F para desumidificar e renovar o ar interior no inverno.

A cidade de Santa Maria (ZB2), com latitude de -29,58°, longitude de 53,80° e altitude de 151 metros está localizada na Zona Bioclimática 2 de acordo com a divisão

proposta pela parte 3 da ABNT NBR 15.220 (ABNT, 2005). Para a caracterização climática proposta pela mesma normativa, o clima de Santa Maria se encaixa no tipo ABCFI, sendo A para necessidade de aquecimento artificial, B para aquecimento solar, C inércia para aquecimento, F para desumidificar e renovar o ar interior no inverno e I para ventilação cruzada no verão.

A cidade de Florianópolis (ZB3), com latitude de -27,59, longitude de 48,54 e altitude de 3 metros está localizada na Zona Bioclimática 3 de acordo com a divisão proposta pela parte 3 da ABNT NBR 15.220 (ABNT, 2005). Para a caracterização climática proposta pela mesma normativa, o clima de Florianópolis se encaixa no tipo BCFIJ, sendo B para aquecimento solar, C inércia para aquecimento, F para desumidificar e renovar o ar interior no inverno, e para o verão, I com indicação de ventilação cruzada e J para maximização da ventilação.

As três cidades consideradas representam climas frios, com indicações construtivas que sugerem predominantemente contornos para o período de inverno. Além disso, as três cidades possuem a indicação de inércia térmica para aquecimento como solução para contornar a condição de inverno, o que as coloca como contextos climáticos interessantes para a avaliação dos modelos C e D (composições leves) com a aplicação de PCMs.

3.3.3 Definição e aplicação das tecnologias de PCMs

A partir das discussões apresentadas na etapa de revisão bibliográfica, sobretudo as análises de Zhu et al. (2009) e Brito et al. (2017), entende-se que os PCMs orgânicos, parafínicos, micro ou macro encapsulados são os que apresentam as características mais interessantes para aplicação na construção civil, seja por aspectos econômicos, térmicos ou químicos. Para além, os trabalhos apresentados informam que as temperaturas do ponto de fusão próximas de 30°C e capacidade de armazenamento de calor latente superior à 315 KJ/m² nos climas considerados por este trabalho, são as condições ideais para o bom desempenho do PCM como armazenador de calor latente na composição dos fechamentos.

3.3.3.1 Recorte dos limites de temperatura a partir da definição da tecnologia

Os *datasheets* das empresas *RubiTherm GmbH* apresentados e contextualizados na etapa de revisão, possuem tecnologias de PCMs que satisfazem as premissas estabelecidas pela literatura. Neles são disponibilizadas informações sobre produtos com pontos de fusão e solidificação que variam de -9 a 100°C. Para

a avaliação realizada neste trabalho foram coletadas as informações dos PCMs orgânicos parafínicos micros encapsulados da linha RT com marcação HC (*High Heat Storage Capacity*, ou em tradução livre, alta capacidade de armazenamento de calor).

Estes PCMs apresentam temperaturas de fusão/solidificação que variam entre 18 e 35°C, o que satisfaz os limites de Brito et al. (2017) para todas as zonas bioclimáticas do clima brasileiro e também os de outros contextos climáticos de aplicação dos PCMs, como os estabelecidos por Oliveira (2012a) e Harvey (2010).

Os limites e tecnologias escolhidas com base em catálogos de empresas/fornecedores nesta avaliação buscam direcionar os experimentos para um cenário que se aproxime da realidade da construção civil.

3.3.3.2 Aplicação dos PCMs nos modelos de simulação

Por se tratar de um PCM orgânico, parafínico e micro encapsulado, os testes realizados com as simulações farão a mistura deste material com a placa de gesso acartonado utilizada na face interna das paredes externas e cobertura dos Modelos B e D.

Quanto a proporção de PCM na mistura, segundo Oliveira (2012b), que avaliou as mudanças das propriedades térmicas de placas de revestimento em gesso acartonado com 10, 16 e 20% da sua composição com PCM orgânico, em termos de armazenamento de calor da placa, a adição de PCM na proporção de até 1/5 da composição das placas de revestimento em gesso pode ser considerada uma estratégia vantajosa tendo em vista uma melhor qualidade térmica interior do edifício. O autor salienta, contudo, que o aumento da densidade da placa de revestimento (inerente ao aumento do PCM na composição), implicará em um aumento de calor específico e da condutividade térmica deste material. Para este trabalho serão testadas proporções de PCMs orgânicos, parafínicos, micro encapsulados que variam de 1 a 20% da composição da placa de gesso acartonado.

Para a configuração dos PCMs no *EnergyPlus* o objetivo *MaterialProperty:PhaseChangeHysteris* foi utilizado. Segundo o manual de referência da ferramenta para versão 9.0.1 (DOE, 2018), o *MaterialProperty:PhaseChangeHysteris* é usado para descrever um nível avançado da física de materiais de mudança de fase utilizados na composição de envelopes. Este objeto de entrada adiciona um efeito de histerese na simulação, permitindo que o processo de fusão/solidificação siga diferentes curvas e represente um efeito

comumente observado nas aplicações reais de materiais de mudança de fase. Possibilita ainda, que os usuários insiram propriedades características dos processos, ao invés de uma descrição detalhada da curva temperatura/entalpia, o que torna a configuração mais acessível para estudos em que o usuário não possua os dados detalhados para geração destas curvas.

A Figura 19 apresenta as informações sobre os campos de preenchimento obrigatório para configuração do *MaterialProperty:PhaseChangeHysteris* no ambiente de entrada dos dados do EP. Os valores utilizados para a realização das simulações deste trabalho estão detalhados no Item 3.4.1.

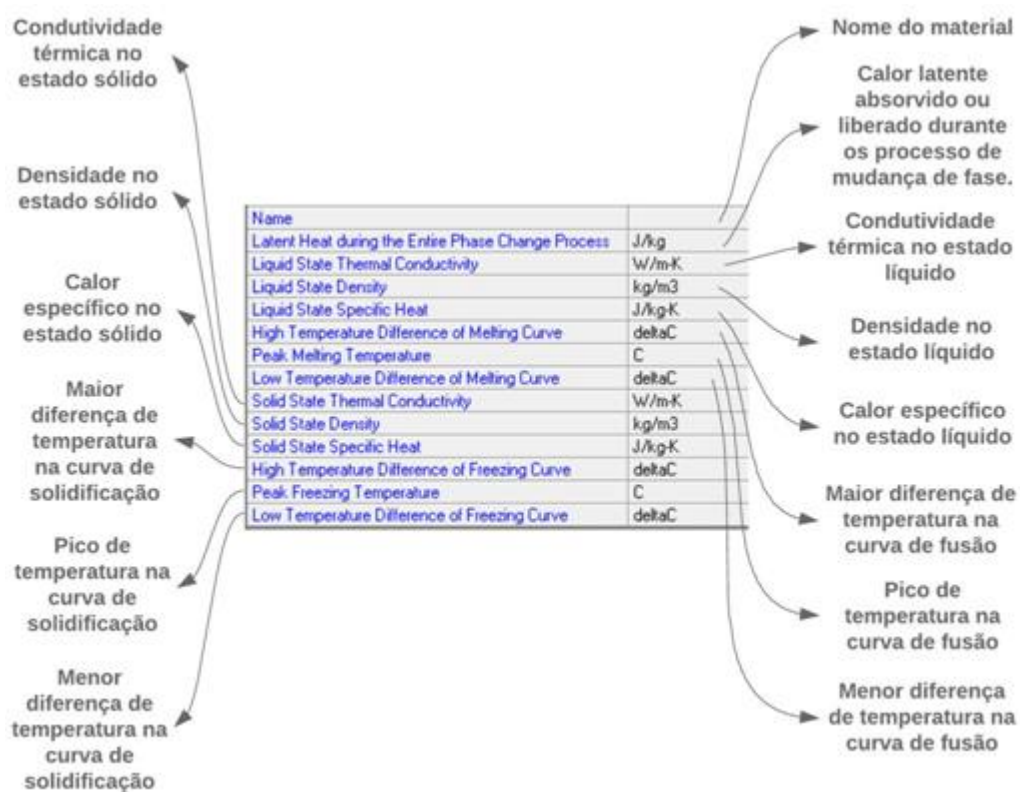


Figura 19 – Informações sobre os campos de preenchimento do objeto *MaterialProperty:PhaseChangeHysteris*.

O objeto *MaterialProperty:PhaseChangeHysteris* necessita que o algoritmo de balanço de calor utilizado na simulação (*HeatBalanceAlgorithm*) seja alterado para a opção de Condução por Diferenças Finitas (*ConductionFiniteDifference* ou CFD). A justificativa apresentada no manual da ferramenta (DOE, 2018), é de que à medida que o campo de análise de energia avança na simulação de construções, como é o caso dos materiais de mudança de fase, a função de transferência de condução (CTF)

transportada da ferramenta de simulação BLAST, mesmo seguindo os princípios fundamentais do balanço de calor, não consegue reproduzir determinadas condições da simulação. Assim, torna-se necessária a utilização de um algoritmo de condução por diferenças finitas para representar de maneira fidedigna o comportamento de simulações que utilizam condutividade térmica variável ou PCMs.

3.4 Etapa de desenvolvimento

Como etapa preliminar para as implementações dos algoritmos que realizarão as simulações e otimizações, é necessário definir as variáveis e os limites que serão testados durante o experimento.

A Tabela 14 mostra um conjunto de 14 variáveis utilizadas nas otimizações multiobjetivo e seus respectivos intervalos. Reitera-se que os valores utilizados como limites para a composição da Tabela 14 são baseados nas discussões e informações apresentadas ao longo do trabalho, sobretudo nos itens da revisão bibliográfica sobre PCM e suas tecnologias e do método de pesquisa sobre a aplicação dos PCMs nos modelos de simulação.

Tabela 14 – Variáveis e limites para otimização multiobjetivo.

N	Variável	Limite	Constante
1	Porcentagem de PCM no gesso acartonado	1 a 20%	Não
2	Capacidade de armazenamento do calor latente	190 a 315 KJ/Kg	Não
3	Condutividade térmica quando líquido	0,2 W/m.K	Sim
4	Densidade quando líquido	700 a 770 Kg/m ³	Não
5	Calor específico quando líquido	2000 J/kg.K	Sim
6	Maior diferença de temperatura na curva de fusão	1 a 3°C	Não
7	Pico de temperatura na curva de fusão	18 a 35°C	Não
8	Menor diferença de temperatura na curva de fusão	1 a 3°C	Não
9	Condutividade térmica quando sólido	0,2 W/m.K	Sim
10	Densidade quando sólido	760 a 880 Kg/m ³	Não
11	Calor específico quando sólido	2000 J/kg.K	Sim
12	Maior diferença de temperatura na curva de solidificação	1 a 3°C	Não
13	Pico de temperatura na curva de solidificação	17 a 34°C	Não
14	Menor diferença de temperatura na curva de solidificação	1 a 3°C	Não

Quanto as variáveis apresentadas na Tabela 14, apenas a primeira (porcentagem de PCM no gesso acartonado) não se relaciona com o objeto

MaterialProperty:PhaseChangeHysteris e configurações, as demais (de 2 a 14), referem-se aos campos de preenchimento dos PCMs no ambiente de simulação.

3.4.1 Caracterização e implementação do AEMO

Para a definição do algoritmo evolutivo utilizado neste trabalho como instrumento de otimização dos cenários estipulados para aplicação dos PCMs foram consideradas as soluções observadas na literatura e apresentadas na etapa de revisão bibliográfica, além da filtragem das possibilidades de execução com melhor uso do *hardware*.

Com relação ao algoritmo NSGA-II (Estado da Arte para avaliação evolutiva multiobjetivo), uma complexidade computacional no espaço de trabalho requerido de $O(M \times N^2)$ (MANSOUR, 2009) é observada, ou seja, trata-se de um algoritmo quadrático e computacionalmente custoso, à medida que realiza M vezes as operações contidas em N^2 .

No mesmo sentido, cabe uma contextualização com relação ao processo de seleção do algoritmo evolutivo para otimização de simulações computacionais, já que diferente da maior parte dos problemas evolutivos solucionados com os algoritmos amplamente caracterizados na literatura, que consideram apenas conjuntos numéricos como dados de entrada, a realização de uma simulação computacional para cada indivíduo que compõe o conjunto populacional de entrada encarece computacionalmente a análise, trazendo a necessidade de soluções que explorem o paralelismo para execução das simulações junto ao melhor uso do *hardware*.

Os algoritmos evolutivos AND e OR, apresentados na revisão pelas produções de Leitzke et al. (2020) e Maciel et al. (2021), possuem complexidade computacional menor ($O(N^2)$), ou seja, são algoritmos quadráticos que realizam operações em potência ao longo da execução, à medida que buscam em sua proposta uma maior exploração do conjunto amostral em detrimento da execução de um número maior de gerações (os cenários avaliados pelos estudos consideraram no máximo 5 gerações). Como condição de paralelismo para estas implementações, o recurso *multiprocessing* da linguagem de programação de computadores *Python* foi utilizado. Através desta inserção, cada simulação foi atribuída à uma das unidades de processamento (*cores*) disponível no *hardware*, executando desta forma tantas simulações quanto possíveis dada a configuração do computador em questão.

Como alternativa à estratégia de paralelismo no nível da simulação, a biblioteca *BESOS* (FAURE et al., 2019) propôs a exploração do paralelismo a nível de instrução, fazendo uso da ferramenta *Dask* da linguagem *Python*. Desta forma, ao invés de atribuir para cada unidade de processamento ociosa um modelo de simulação do *EnergyPlus*, a implementação sugere a subdivisão das instruções de um mesmo modelo de simulação em todas unidades de processamento disponíveis, executando de forma mais rápida cada indivíduo simulado. Os espaços de execução suprimidos através desta implementação permitem com que seja possível executar os algoritmos da literatura (como o NSGA-II) com populações de modelos de simulação com 100, 300 ou até mesmo 500 gerações, bem como custos computacionais aceitáveis em uma escala de tempo (de 1 a 3 dias, a depender do tamanho populacional).

Como é possível observar na Figura 20, diversas bibliotecas foram utilizadas para implementação do algoritmo NSGA-II no ambiente da *BESOS* neste trabalho. Inicialmente foram importadas as funções da biblioteca *eppy* para alteração das características de configuração do modelo do EP (*eppy_funcs*). Também foram importadas da *BESOS* as funções definem o problema a ser executado (*problem*), os objetivos da análise evolutiva (*objectives*), a função de avaliação para simulação (*evaluator*), os parâmetros disponíveis pela biblioteca (*parameters*) e a função de otimização desejada (*optimizer*), sendo escolhido para este trabalho o NSGA-II.

A solução importa também outras bibliotecas como o *platypus*, que implementa os algoritmos evolutivos em suas versões mais atuais, a *pandas* que permite a análise e o tratamento dos dados, *matplotlib* para plotagem dos gráficos de saída, *datetime* para identificar o tempo de execução de cada solução, a já mencionada *dask* para explorar o paralelismo instrucional das simulações e, por fim, *warnings* para identificar eventuais problemas de execução do código de programação.

```
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
from platypus.evaluator import MapEvaluator
import platypus
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from datetime import datetime
from dask.distributed import Client
import warnings
```

Figura 20 – Bibliotecas de programação utilizadas na implementação do cenário evolutiva.

Em um segundo momento, como mostra a Figura 21, os avisos são filtrados a partir do uso da biblioteca *warning*. Além disso, a variável *building* recebe o modelo de simulação no formato *.idf através da inserção do nome do arquivo localizado no mesmo diretório.

```
warnings.filterwarnings('ignore')
building = ef.get_building('ZB1_VH_LSF_CI+PCM_PAR-COB.idf') # Carregando o modelo do E+;
```

Figura 21 – Leitura do modelo de simulação de entrada.

Para a definição dos 14 parâmetros definidos para a análise, como mostra a Figura 22, uma lista chamada *parameters* foi criada, nela são inseridos todos os pontos que serão otimizados durante a análise evolutiva. Inicialmente é inserido o nome da classe do EP (*class_name*), seguido pelo nome do objeto do EP (*object_name*), o campo de alteração das condições de configuração (*field_name*), o nome da variável dentro da otimização (*name*) e o intervalo com os limites mínimo e máximo aceitáveis para a variável (*value_descriptor*). Cada inserção na lista (*append*) indica um novo elemento que será variado durante a execução.

```
parameters = []

parameters.append(
    Parameter(
        selector=FieldSelector(
            class_name="MATERIALPROPERTY:PHASECHANGEHYSTERESIS", # Classe do E+;
            object_name="Forro Gesso_acartonado com PCM", # Nome do objeto;
            field_name="Latent Heat during the Entire Phase Change Process", # Campo do objeto;
        ),
        name="CT_cob",
        value_descriptor=RangeParameter(min_val=190000, max_val=315000) # limites;
    )
)
```

Figura 22 – Inserção de um dos parâmetros para a análise evolutiva.

A Figura 23 apresenta a definição dos objetivos da análise evolutiva, neste caso, a definição das variáveis que determinarão o consumo de energia elétrica para aquecimento e refrigeração. Também na Figura 23 é definido o problema da análise, informando como dados os parâmetros estabelecidos (Figura 22), os objetivos de otimização e o contexto de convergência das soluções, marcado como verdadeiro para minimização das duas saídas, ou seja, espera-se que análise contribua com a redução dos dois consumos de energia elétrica por climatização (aquecimento e refrigeração).

```

heating = MeterReader('Heating:Electricity', name="Aquecimento (kWh/m².ano)")
cooling = MeterReader('Cooling:Electricity', name="Refrigeração (kWh/m².ano)")

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

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

```

Figura 23 – Definição dos objetivos e criação da instância do problema.

Para a Figura 24 é estabelecida condição de avaliação, informando como parâmetros a instância do problema (Figura 23), o modelo edificado para simulação (Figura 21) e o contexto climático de avaliação através do arquivo no formato *.epw. A variável *results* recebe o conjunto de soluções geradas a partir da execução do algoritmo NSGA-II com as condições de avaliação estabelecidas, em 500 gerações e um tamanho populacional de 100 indivíduos, baseado nos mesmos limites estabelecidos por Chaturvedi, Rajasekar e Natarajan (2020) e Vukadinovic et al. (2021) em análises com uso do NSGA-II para otimização das simulações de edifícios.

```

evaluator = EvaluatorEP(problem, building, epw="1_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)

```

Figura 24 – Definição da função de avaliação e execução do algoritmo evolutivo.

3.5 Etapa de análise e reflexões

A partir a implementação do *template* de execução para a análise evolutiva com o algoritmo NSGA-II apresentado no item 3.4.1, o processo de análise dos dados de saída das simulações foi iniciado por um estudo piloto, considerando os resultados das simulações unitárias quanto a intensidade do uso de energia elétrica (IUE) para aquecimento e refrigeração nos quatro modelos apresentados (A, B, C e D) para as três zonas bioclimáticas (1, 2 e 3).

De posse dos resultados iniciais com relação ao desempenho energético dos modelos com envelopes com maior e menor massa térmica/isolamento térmico, para verificar o comportamento da aplicação dos PCMs nos modelos com fechamentos leves (C e D) foram gerados outros seis modelos:

Modelo C' – Parede externa: Modelo que segue a composição do C (composição leve com maior nível de isolamento térmico) com a adição do PCM na face interna das paredes externas junto ao gesso acartonado que reveste o fechamento.

Modelo C' – Cobertura: Modelo que segue a composição do C (composição leve com maior nível de isolamento térmico) com a adição do PCM na face interna da cobertura junto ao gesso acartonado que reveste o fechamento.

Modelo C' – Parede externa e Cobertura: Modelo que segue a composição do C (composição leve com maior nível de isolamento térmico) com a adição do PCM na face interna das paredes externas e cobertura junto ao gesso acartonado que reveste os dois fechamentos.

Modelo D' – Parede externa: Modelo que segue a composição do D (composição leve com menor nível de isolamento térmico) com a adição do PCM na face interna das paredes externas junto ao gesso acartonado que reveste o fechamento.

Modelo D' – Cobertura: Modelo que segue a composição do D (composição leve com menor nível de isolamento térmico) com a adição do PCM na face interna da cobertura junto ao gesso acartonado que reveste o fechamento.

Modelo D' – Parede externa e Cobertura: Modelo que segue a composição do D (composição leve com menor nível de isolamento térmico) com a adição do PCM na face interna das paredes externas e cobertura junto ao gesso acartonado que reveste os dois fechamentos.

Para os seis modelos foram realizadas as análises evolutivas multiobjetivo com uso do algoritmo NSGA-II, visando identificar o PCM otimizado para cada um dos casos nas ZBs 1, 2 e 3. A partir destas execuções foi possível observar as diferenças na IUE provocadas pela inserção do PCM parafínico micro encapsulado nestas composições, além de caracterizar o PCM que contribui de forma mais assertiva com o desempenho energético da habitação nos diferentes contextos climáticos testados.

A seleção do melhor indivíduo em cada análise realizada foi baseada na estratégia de *Pareto knee front* (LI et al., 2020), ou seja, busca-se dentro da curva de Pareto a região do “joelho” das melhores soluções, sendo aquela que apresenta o melhor resultado em ambos os eixos de avaliação simultaneamente. Para o contexto deste trabalho, o ponto ótimo entre os eixos será aquele localizado na curva de Pareto com menor valor absoluto da soma das intensidades de uso energia elétrica para aquecimento e refrigeração.

A Figura 25 apresenta um infográfico síntese da análise evolutiva proposta, destacando o modelo de avaliação as estratégias construtivas testadas e o ciclo do processo de avaliação evolutiva através do algoritmo NSGA-II em combinação com as simulações com o EnergyPlus e a análise dos dados de saída com as ferramentas Pandas e Jupyter Notebook.

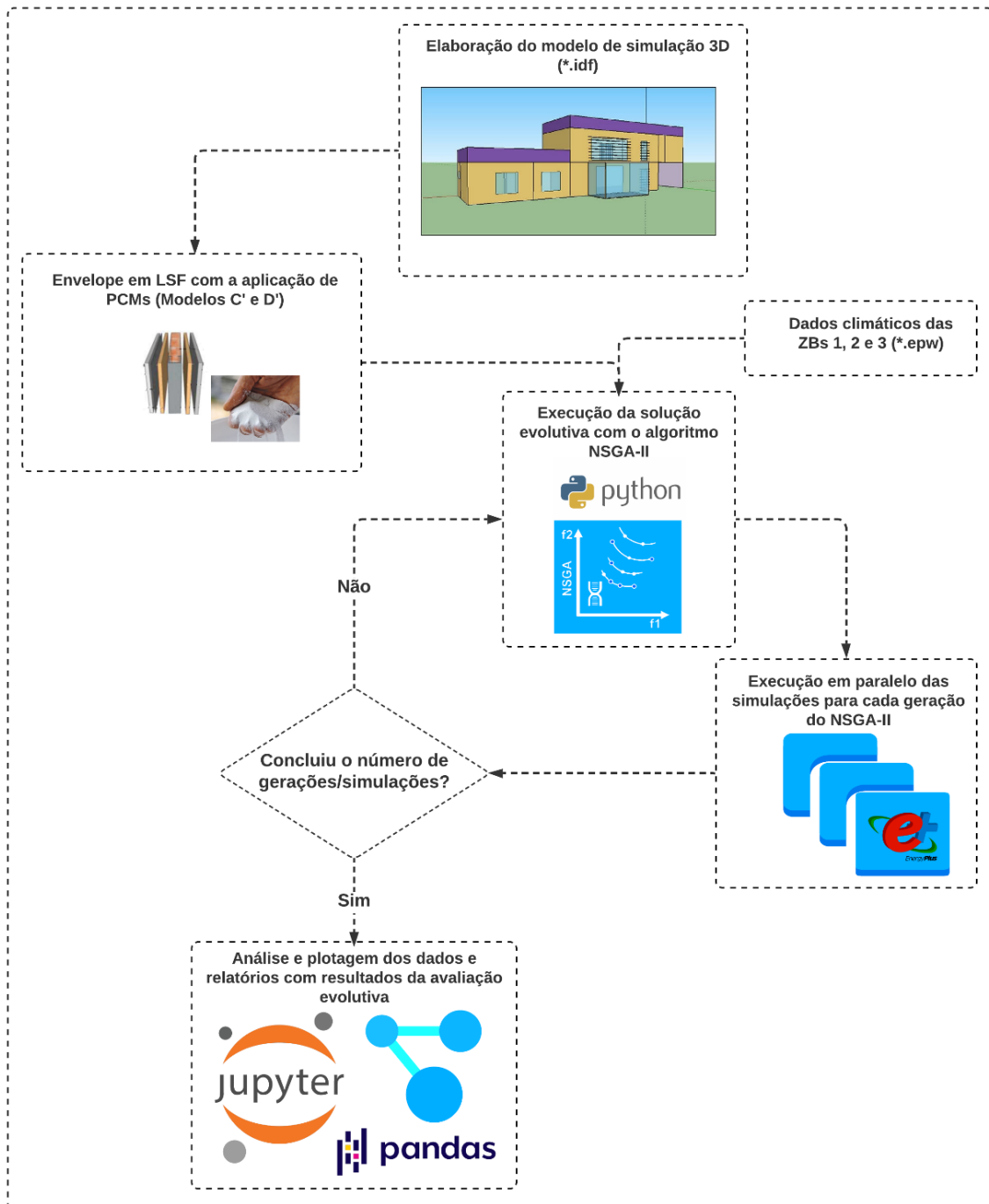


Figura 25 – Infográfico com os processos de execução da análise evolutiva.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir das avaliações propostas estão apresentados a seguir de forma pormenorizada em cada situação considerada. Inicialmente, a seção 4.1 apresenta o estudo piloto e a avaliação inicial dos modelos A, B, C e D. Em seguida, as seções 4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7 e 4.8, apresentam em detalhes as simulações evolutivas realizadas para os seis modelos testados. Cabe salientar que as seções 4.5, 4.9 e 4.10 **sintetizam** os resultados de modo a facilitar a leitura e a interpretação das principais contribuições das avaliações realizadas.

4.1 Estudo piloto

Com o objetivo de verificar a influência da densidade da composição do envelope, foram simulados no EP os modelos A, B, C e D, buscando comparar entre as soluções a intensidade do uso de energia elétrica para aquecimento e resfriamento ao longo do ano para cada contexto climático.

4.1.1 Avaliação dos modelos iniciais para ZB1 (Curitiba/PR)

Para a avaliação dos resultados iniciais de IUE para a ZB1 a Figura 26 apresenta o comportamento energético da habitação com as diferentes composições de envelope opaco utilizadas.

Com início pela apresentação dos casos com maior nível de isolamento térmico, os modelos A (com composição em alvenaria cerâmica e maior massa térmica) e C (com composição em *light steel frame* e menor massa térmica), apresentaram 7,75 kWh/m².ano e 8,10 kWh/m².ano de IUE para aquecimento e 0,70 kWh/m².ano e 0,83 kWh/m².ano de IUE para refrigeração, respectivamente. Trata-se de uma diferença de 0,35 kWh/m².ano para aquecimento e 0,13 kWh/m².ano para refrigeração, o que indica um desempenho energético semelhante da edificação nestes dois modelos quando situada na ZB1, muito em função do elevado nível de isolamento térmico em ambos os cenários. Além disso, percebe-se que a diferença da massa térmica nas paredes externas destes modelos com maior isolamento pouco impactou no seu desempenho energético, ainda que o modelo em alvenaria cerâmica tenha apresentado IUE menor, tanto para aquecimento, quanto para refrigeração.

Quanto aos casos com menor nível de isolamento, os modelos B (com composição em alvenaria cerâmica e maior massa térmica) e D (com composição em *light steel frame* e menor massa térmica), apresentam 34,29 kWh/m².ano e 40,32

kWh/m².ano e IUE para aquecimento, bem como 1,22 kWh/m².ano e 4,81 kWh/m².ano para refrigeração, respectivamente. Trata-se, portanto, de uma diferença de 6,03 kWh/m².ano para aquecimento e 3,59 kWh/m².ano para refrigeração. Desta forma, além da elevada demanda energética para aquecimento observada nos dois modelos com menor nível de isolamento térmico, destaca-se a acentuação da diferença entre as duas composições mencionadas, tanto para aquecimento, quanto para refrigeração.

Assim como observado na revisão da literatura (Oliveira, 2012; Soares, 2014), é possível perceber que um envelope com maior massa térmica aplicado em um clima frio com baixo nível isolamento térmico, apresenta demandas energéticas menores que um envelope leve, ainda que as diferenças absolutas para aquecimento em relação aos modelos com massa térmica semelhante porém isolados termicamente sejam maiores, 26,54 kWh/m².ano em relação aos modelos A e B em alvenaria cerâmica e 32,22 kWh/m².ano em relação aos modelos C e D.

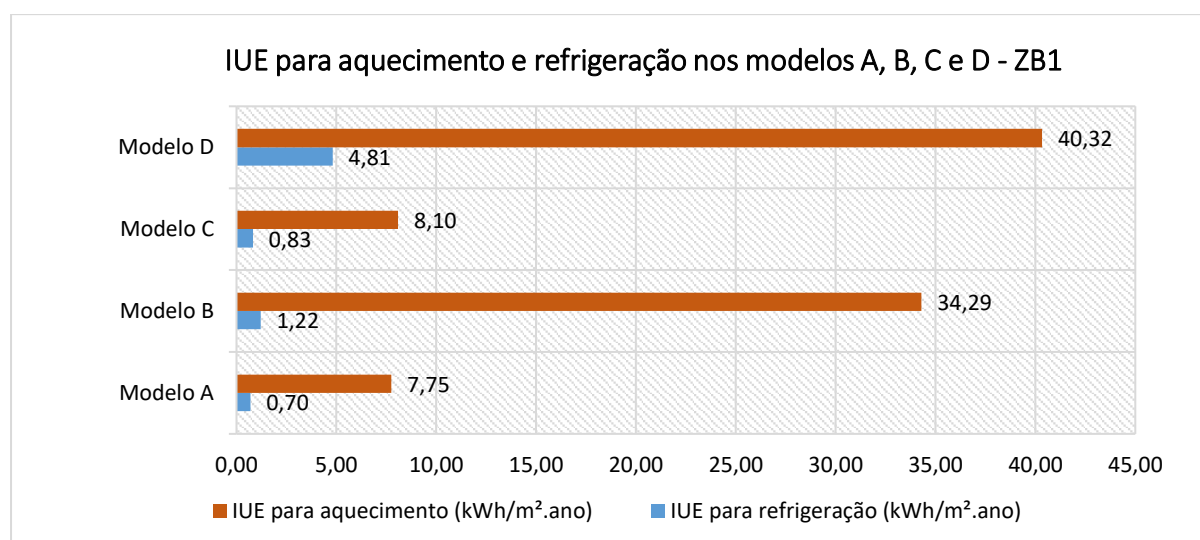


Figura 26 – Resultados de IUE para os modelos iniciais A, B, C e D na ZB1.

4.1.2 Avaliação dos modelos iniciais para ZB2 (Santa Maria/RS)

Para a avaliação das simulações iniciais para os modelos A, B, C e D na ZB2, a Figura 27 apresenta os resultados energéticos da habitação para aquecimento e refrigeração nos quatro cenários estipulados.

A partir os modelos com maior nível de isolamento térmico (A e C), novamente, assim como visto para ZB1, as demandas energéticas para aquecimento foram maiores, sendo 7,86 kWh/m².ano no modelo A e 8,64 kWh/m².ano no modelo C, ou

seja, mais uma vez a diferença entre as demandas energéticas para aquecimento foi baixa (0,78 kWh/m².ano), sendo o desempenho neste sentido do modelo A (alvenaria cerâmica) melhor do que o modelo C (LSF). Para a questão da refrigeração, os consumos energéticos foram de 3,64 kWh/m².ano no modelo A e 3,56 kWh/m².ano para o modelo C, uma diferença de 0,08 kWh/m².ano, com melhor desempenho no modelo C. Percebe-se, portanto, que assim como visto na Figura 26 para ZB1, as demandas energéticas entre os dois modelos com maior nível de isolamento foram semelhantes, destacando também para ZB2 o papel do isolamento térmico nos fechamentos opacos.

Para os modelos B e D, com menor nível de isolamento térmico, novamente a demanda para aquecimento foi maior, com 33,64 kWh/m².ano para o modelo B e 38,33 kWh/m².ano para o modelo D, indicando uma diferença de 4,69 kWh/m².ano entre as duas soluções e reforçando na ZB2 o comportamento observado na ZB1. Para refrigeração o modelo B apresentou 3,36 kWh/m².ano para o modelo B e 4,64 kWh/m².ano para o modelo D, indicando uma diferença de 1,28 kWh/m².ano entre as duas soluções. Mais uma vez o modelo em alvenaria cerâmica apresentou necessidades energéticas menores com climatização em relação ao modelo em LSF.

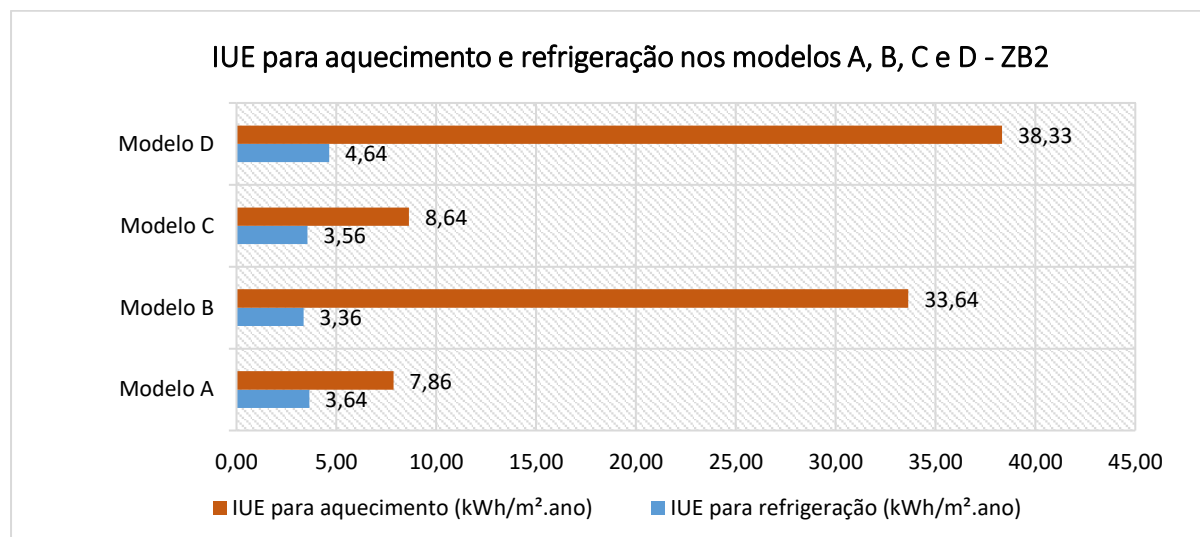


Figura 27 – Resultados de IUE para os modelos iniciais A, B, C e D na ZB2.

4.1.3 Avaliação dos modelos iniciais para ZB3 (Florianópolis/SC)

A Figura 28 apresenta as simulações dos modelos iniciais para ZB3 no que tange os consumos de energia para aquecimento e refrigeração.

A respeito dos modelos A e C com maior isolamento térmico, as demandas para aquecimento foram maiores novamente, assim como observado nos itens anteriores para as ZB1 e ZB2, apresentando 4,98 kWh/m².ano para o modelo A e 5,65 kWh/m².ano para o modelo B, com uma diferença de 0,67 kWh/m².ano entre as duas composições. Com relação a refrigeração nestes modelos, o modelo A apresentou o consumo de 0,99 kWh/m².ano e o modelo C 0,93 kWh/m².ano, uma diferença de 0,06 kWh/m².ano, com desempenho energético levemente superior no modelo C.

Para os modelos B e D com menor nível de isolamento térmico, assim como nas demais zonas bioclimáticas e modelos, a demanda para aquecimento foi maior, apresentando 23,15 kWh/m².ano para o modelo B e 28,01 kWh/m².ano para o modelo D, uma diferença de 4,86 kWh/m².ano, sendo o modelo A com menor uso de energia para aquecimento. Quanto a refrigeração, os modelos B e D apresentaram 0,74 kWh/m².ano e 1,94 kWh/m².ano, respectivamente. O modelo B neste cenário apresentou 1,20 kWh/m².ano a menos que o modelo D para refrigeração.

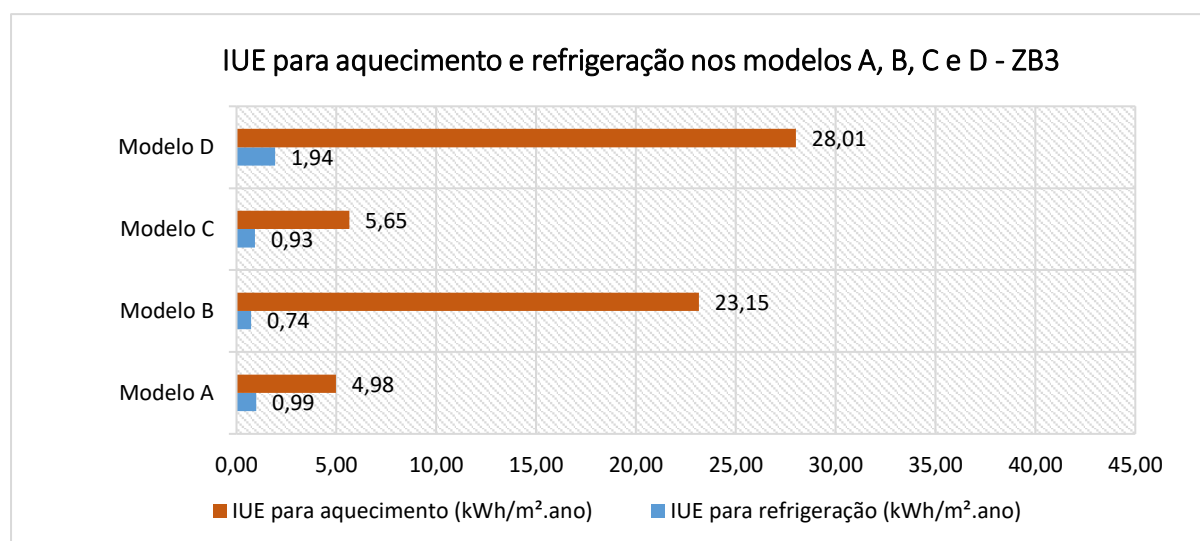


Figura 28 – Resultados de IUE para os modelos iniciais A, B, C e D na ZB3.

4.1.4 Discussão sobre os modelos iniciais A, B, C e D para as três ZBs consideradas

Com relação aos resultados iniciais apresentados nas Figuras 26, 27 e 28, observa-se a predominância das necessidades de aquecimento em todos os modelos e contextos climáticos analisados. Para a ZB1, com maior rigidez para o frio, os valores absolutos de consumo para aquecimento foram os maiores, seguidos pela ZB2 e, por fim, pela ZB3, que apresentou consumos com essa finalidade inferiores a 10,00 kWh/m².ano em relação aos seus pares na ZB2.

Os dados das análises iniciais trazem também um padrão quanto ao comportamento dos modelos em relação ao nível de isolamento térmico dos fechamentos. Nos casos dos modelos A e C, as diferenças entre as soluções foram baixas nos modelos para as três zonas bioclimáticas, sendo sempre positiva para o modelo A em relação ao C na soma das duas variáveis. Quanto aos modelos B e D, a ausência do isolamento resultou para todos os casos em um aumento no consumo para aquecimento em pelo menos cinco vezes o valor obtido na composição com massa térmica semelhante e menor nível de isolamento térmico, diferença essa que não ocorreu da mesma forma na questão da refrigeração.

Ainda como um ponto de destaque, conforme apresentado na discussão da subseção 4.1.1, os modelos em LSF com menor massa térmica em sua composição, em especial nos casos com menor nível de isolamento térmico, apresentaram maiores consumos energéticos para aquecimento do que os modelos com transmitância térmica equivalente e maior massa térmica. A diferença entre essas soluções para as três ZBs avaliadas foi próxima ou superior ao consumo por refrigeração do modelo com menor massa térmica (C ou D), indicando a importância do isolamento térmico no desempenho de habitações em climas frios.

A partir deste recorte de desempenho inicial da habitação estudada, as análises apresentadas a seguir buscam identificar o papel da aplicação dos PCMs nas faces internas dos fechamentos externos desta edificação, avaliando qual o impacto do material em mudança de fase nas diferenças de desempenho energético entre as composições identificadas ao longo do estudo piloto.

4.2 Modelo C' – Parede Externa: Avaliação da aplicação do PCM nas paredes externas

A primeira avaliação realizada com a inserção dos PCMs na composição dos modelos simulados foi a partir do modelo C', que mantém as mesmas condições construtivas do modelo C, com envelope em LSF e elevado isolamento térmico, porém com a adição do PCM parafínico micro encapsulado junto a composição do gesso acartonado que reveste a face interna das paredes externas.

4.2.1 Modelo C' – Parede Externa: ZB1 (Curitiba/PR)

Com relação a aplicação do PCM nas paredes externas do modelo C' na ZB1, a Figura 29 apresenta o comportamento da simulação evolutiva a partir das 500 gerações executadas com o algoritmo NSGA-II. Os indivíduos com 'x' em azul

representam as soluções dominadas identificadas na última geração da simulação, enquanto os pontos vermelhos representam a frente de Pareto-ótimo.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 0,19 kWh/m².ano para refrigeração e 4,40 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 0,64 kWh/m².ano para refrigeração e 3,70 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo C, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 48,61% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

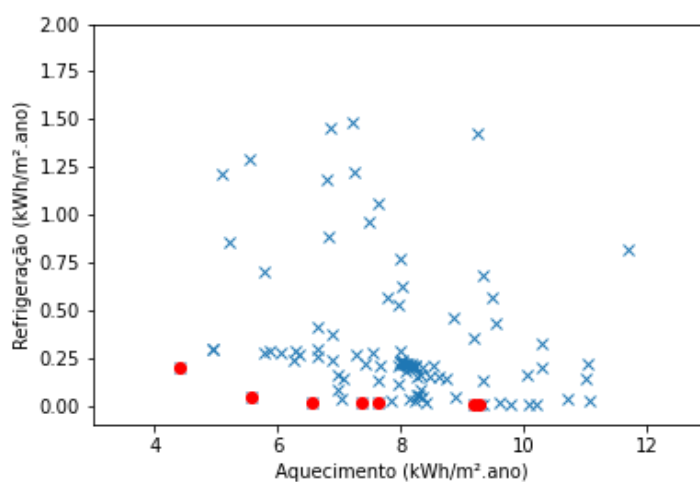


Figura 29 – Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas para ZB1.

A Figura 30 traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação da parede externa na ZB1, apresentado o comportamento das principais variáveis relacionadas à capacidade de armazenamento de calor latente, o pico de temperatura na curva de derretimento, o pico de temperatura na curva de congelamento, a espessura do PCM aplicado na parede e como funções-objetivo, a IUE para aquecimento e a refrigeração. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso (linha com o tom mais intenso de verde do gráfico) apresentou 281 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 204 e 281 KJ/Kg na frente de Pareto), com 27,8°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 22,8 e 27,8°C), 22,1°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 18,2 e 30,4°C) e 18,83% para o percentual de espessura do PCM na composição do gesso acartonado (com variação entre 10,63 e 18,83%).

O gráfico de coordenadas paralelas destaca também a conflitualidade no comportamento das duas funções objetivo, de modo que o PCM otimizado que maior representou diminuição da IUE para aquecimento (principal demanda de energia da habitação), foi o que apresentou menor diminuição da IUE para refrigeração, caracterizando o aspecto multiobjetivo conceitual da literatura que preza por funções-objetivo conflitantes.

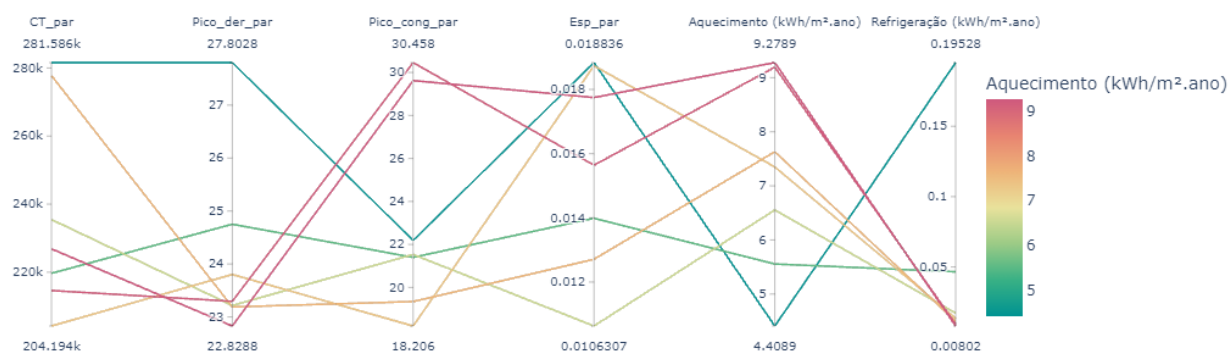


Figura 30 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' - Paredes externas para ZB1.

4.2.2 Modelo C' – Parede Externa: ZB2 (Santa Maria/RS)

Para ZB2, a Figura 31 apresenta a aplicação do PCM nas paredes externas do modelo C', destacando o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 1,64 kWh/m².ano para refrigeração e 5,93 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 1,92 kWh/m².ano para refrigeração e 2,71 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo C, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 37,93% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

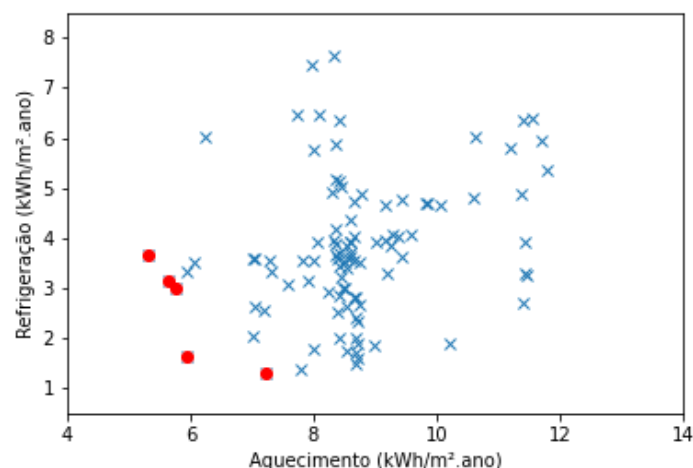


Figura 31 – Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas para ZB2

A Figura 32 traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação da parede externa na ZB2, apresentado o comportamento das principais variáveis analisadas. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso apresentou 245 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 238 e 303 KJ/Kg na frente de Pareto), com 25,3°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 24,9 e 31,4°C), 21,1°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 18,3 e 22,4°C) e 18,64% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 14,74 e 18,64%).

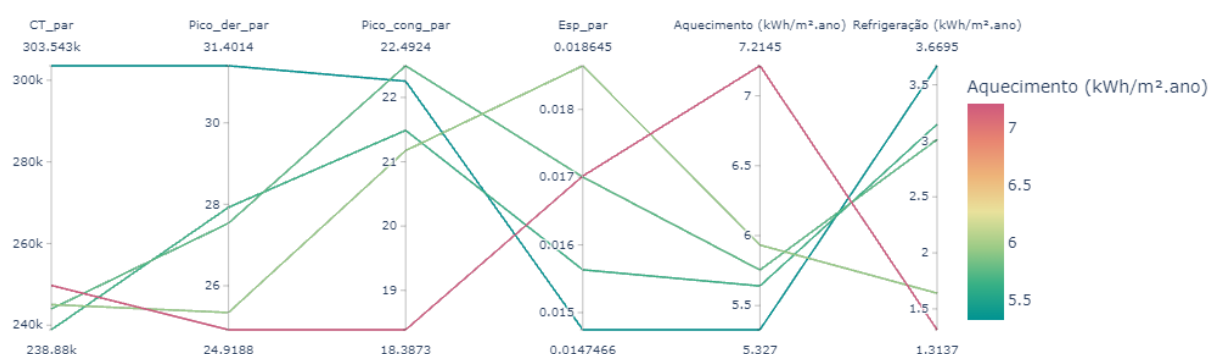


Figura 32 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' - Paredes externas na ZB2.

4.2.3 Modelo C' – Parede Externa: ZB3 (Florianópolis/SC)

Para a aplicação do PCM nas paredes externas do modelo C' na ZB3, a Figura 33 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 0,22 kWh/m².ano para refrigeração e 3,71 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 0,71 kWh/m².ano para refrigeração e 1,94 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo C, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 40,26% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

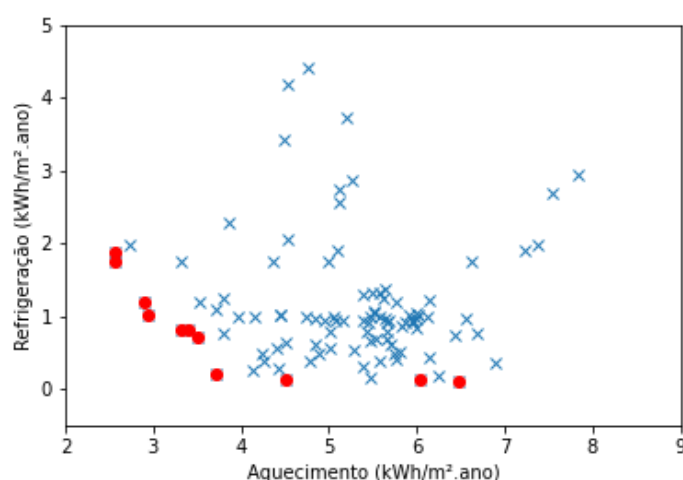


Figura 33 – Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas para ZB3.

A Figura 34, assim como visto para as ZBs 1 e 2, traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação da parede externa na ZB3, apresentado o comportamento das principais variáveis analisadas. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso apresentou 196 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 196 e 294 KJ/Kg na frente de Pareto), com 24,8°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 22,5 e 33,8°C), 20,5°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 19,3 e 31,5°C) e 19,53% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 7,61 e 19,55%).

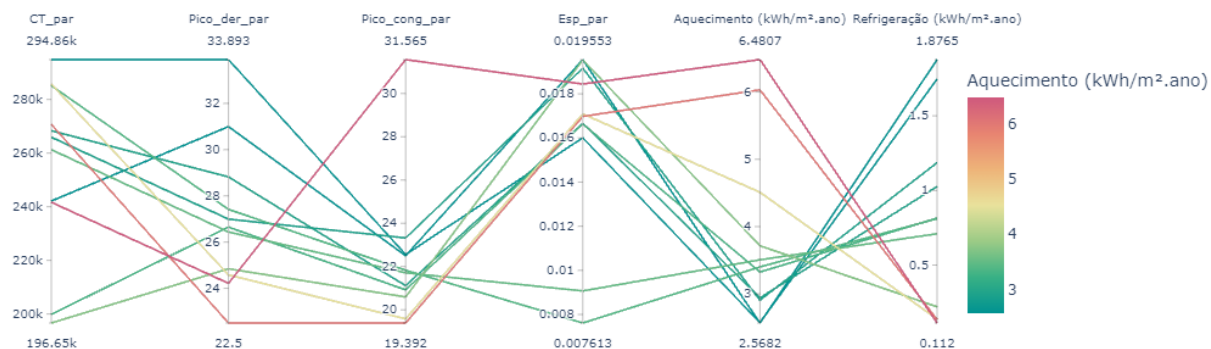


Figura 34 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' - Paredes externas na ZB3

4.3 Modelo C' – Cobertura: Avaliação da aplicação do PCM na cobertura

A segunda avaliação realizada com a inserção dos PCMs na composição dos modelos simulados foi a partir do modelo C', que mantém as mesmas condições construtivas do modelo C, com envelope em LSF e elevado isolamento térmico, porém com a adição do PCM parafínico micro encapsulado junto a composição do gesso acartonado que reveste a face interna da cobertura.

4.3.1 Modelo C' – Cobertura: ZB1 (Curitiba/PR)

Com relação a aplicação do PCM na cobertura do modelo C' na ZB1, a Figura 35 apresenta o comportamento da simulação evolutiva a partir das 500 gerações executadas com o algoritmo NSGA-II.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 0,28 kWh/m².ano para refrigeração e 6,31 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 0,55 kWh/m².ano para refrigeração e 1,79 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo C, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 26,21% a partir da aplicação de PCMs na cobertura.

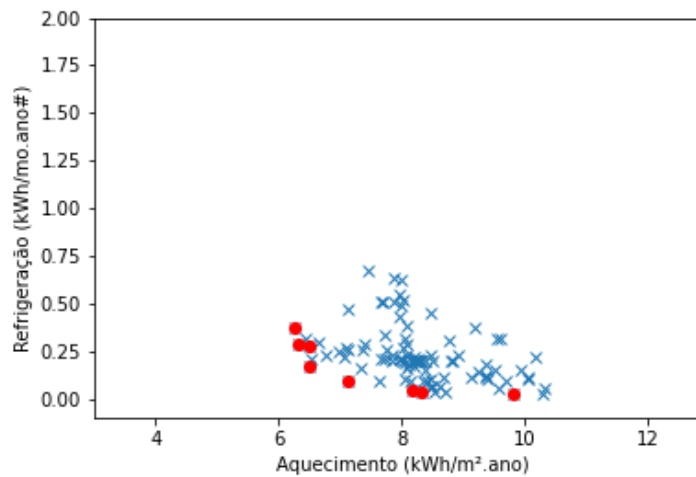


Figura 35 – Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM na cobertura na ZB1

A Figura 36 traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação na cobertura a partir das principais variáveis na ZB1. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico aplicado na cobertura no melhor caso apresentou 212 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 212 e 314 KJ/Kg na frente de Pareto), com 30,5°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 21,6 e 34,4°C), 21,8°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 17,6 e 29,6°C) e 13,48% de espessura do PCM (com variação entre 11,69 e 18,65%).

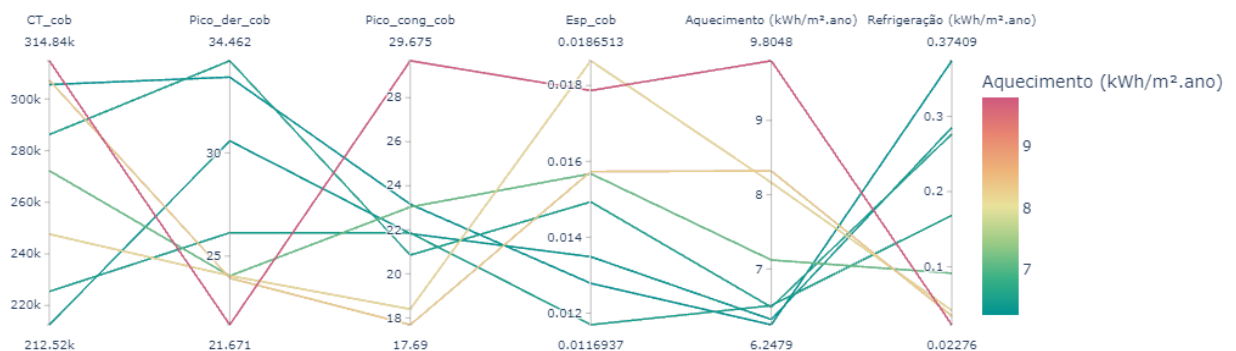


Figura 36 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' – Cobertura na ZB1.

4.3.2 Modelo C' – Cobertura: ZB2 (Santa Maria/RS)

Com relação a aplicação do PCM na cobertura do modelo C' na ZB2, a Figura 37 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 2,65 kWh/m².ano para refrigeração e 6,85 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 0,91 kWh/m².ano para refrigeração e 1,80 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo C, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 22,19% a partir da aplicação de PCMs na cobertura.

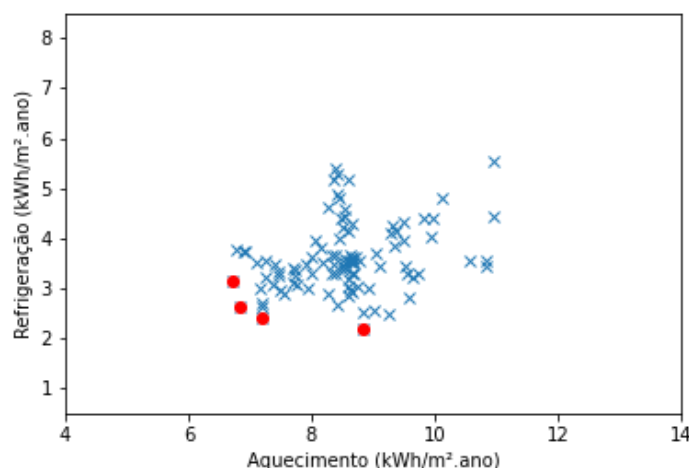


Figura 37 – Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM na cobertura na ZB2.

A Figura 38 traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação na cobertura a partir das principais variáveis para ZB2. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico aplicado na cobertura no melhor caso apresentou 272 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 261 e 314 KJ/Kg na frente de Pareto), com 26,9°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 23,9 e 27,2°C), 20,7°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 20,6 e 32,2°C) e 16,20% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 13,56 e 16,19%).

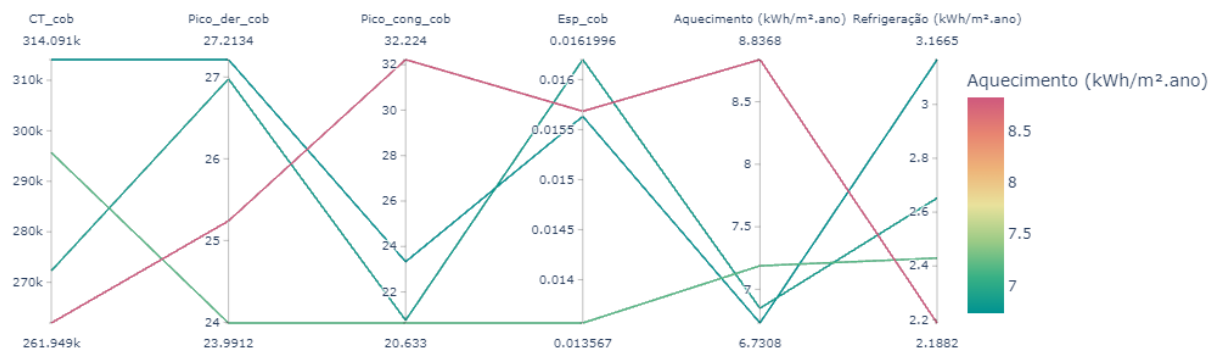


Figura 38 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' – Cobertura na ZB2.

4.3.3 Modelo C' – Cobertura: ZB3 (Florianópolis/SC)

Com relação a aplicação do PCM na cobertura do modelo C' na ZB3, a Figura 39 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 1,07 kWh/m².ano para refrigeração e 3,32 kWh/m².ano para aquecimento, um aumento de 0,14 kWh/m².ano para refrigeração e uma diminuição de 2,33 kWh/m².ano em relação ao modelo C, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 33,27% a partir da aplicação de PCMs na cobertura.

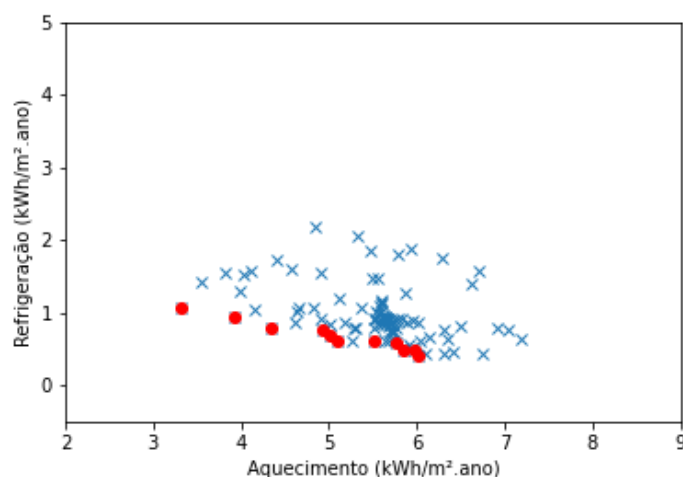


Figura 39 – Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM na cobertura na ZB3.

A Figura 40 traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação na cobertura a partir das principais variáveis para ZB3. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico

aplicado na cobertura no melhor caso apresentou 275 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 196 e 308 KJ/Kg na frente de Pareto), com 34,8°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 21,9 e 34,8°C), 22,3°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 20,3 e 28,8°C) e 16,64% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 2,77 e 19,45%).

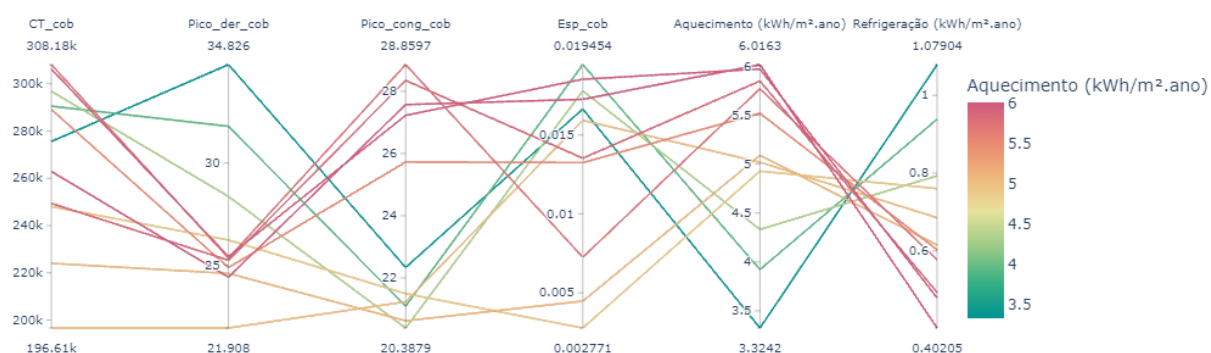


Figura 40 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo C' – Cobertura na ZB3.

4.4 Modelo C' – Parede externa e Cobertura: Avaliação da aplicação do PCM nas paredes externas e cobertura

A terceira avaliação realizada com a inserção dos PCMs na composição dos modelos simulados foi a partir do modelo C', que mantém as mesmas condições construtivas do modelo C, com envelope em LSF e elevado isolamento térmico, porém com a adição do PCM parafínico micro encapsulado junto a composição do gesso acartonado que reveste a face interna das paredes externas e da cobertura.

4.4.1 Modelo C' – Parede externa e Cobertura: ZB1 (Curitiba/PR)

Com relação a aplicação do PCM nas paredes externas e cobertura do modelo C' na ZB1, a Figura 41 apresenta o comportamento da simulação evolutiva a partir das 500 gerações executadas com o algoritmo NSGA-II.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 0,85 kWh/m².ano para refrigeração e 4,04 kWh/m².ano para aquecimento, um aumento de 0,02 kWh/m².ano para refrigeração e uma redução de 4,06 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo C, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 45,19% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

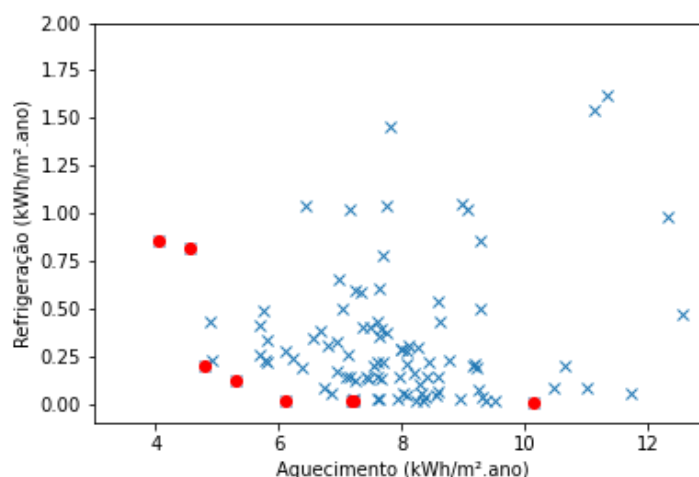


Figura 41 – Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB1

As Figuras 42 e 43 trazem os gráficos de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação de PCM nas paredes externas e cobertura a partir das principais variáveis para ZB1.

Com início pela Figura 42, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso apontou para 314 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 190 e 314 KJ/Kg na frente de Pareto), com 32,1°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 22,7 e 32,1°C), 22,3°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 19,5 e 29,6°C) e 14,24% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 5,50 e 19,13%).

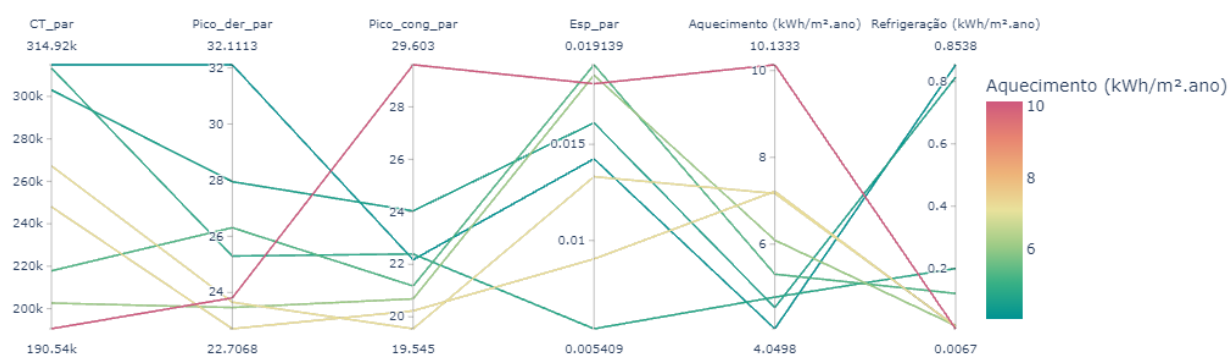


Figura 42 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB1.

Para Figura 43, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado na cobertura no melhor caso apontou para 195 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 195 e 314 KJ/Kg na frente de Pareto), com 33,5°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 18,3 e 33,5°C), 25,2°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 17,5 e 33,7°C) e 15,19% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 0,79 e 19,78%).

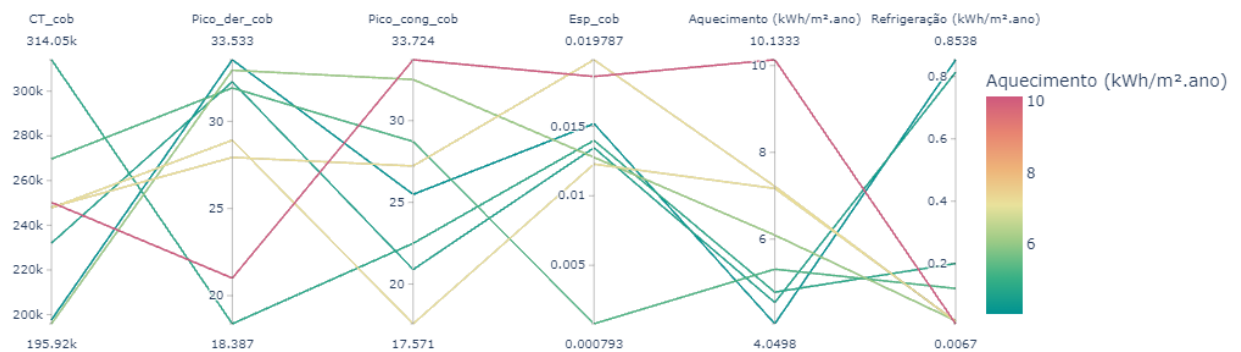


Figura 43 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB1.

4.4.2 Modelo C' – Parede externa e Cobertura: ZB2 (Santa Maria/RS)

Com relação a aplicação do PCM nas paredes externas e cobertura do modelo C' na ZB2, a Figura 44 apresenta o comportamento da simulação evolutiva a partir das 500 gerações executadas com o algoritmo NSGA-II.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 1,80 kWh/m².ano para refrigeração e 5,82 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 1,76 kWh/m².ano para refrigeração e de 2,82 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo C, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 37,52% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

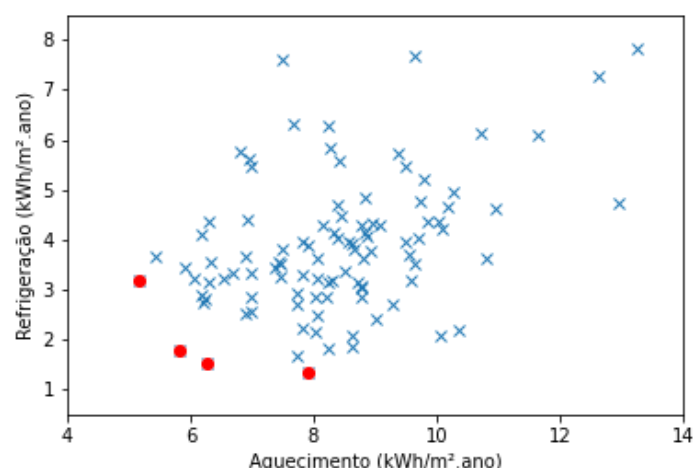


Figura 44 – Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB2.

As Figuras 45 e 46 trazem os gráficos de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação de PCM nas paredes externas e cobertura a partir das principais variáveis para ZB2.

Com início pela Figura 45, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso apontou para 259 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 230 e 259 KJ/Kg na frente de Pareto), com 25,5°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 25,5 e 31,2°C), 22,8°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 20,3 e 33,8°C) e 15,51% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 6,33 e 16,79%).

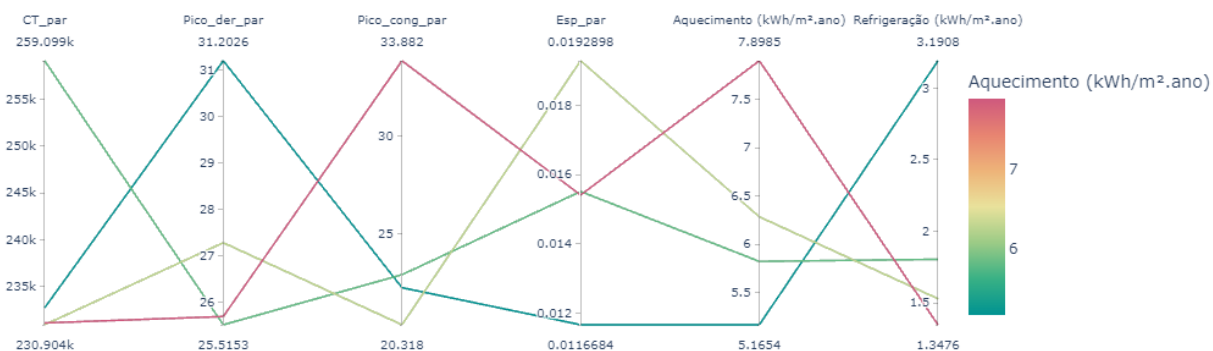


Figura 45 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB2.

Para Figura 46, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado na cobertura no melhor caso apontou para 312 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 228 e 312 KJ/Kg na frente de Pareto), com 33,7°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 24,4 e 33,7°C), 17,2°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 17,2 e 21,4°C) e 6,33% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 6,33 e 16,79%).

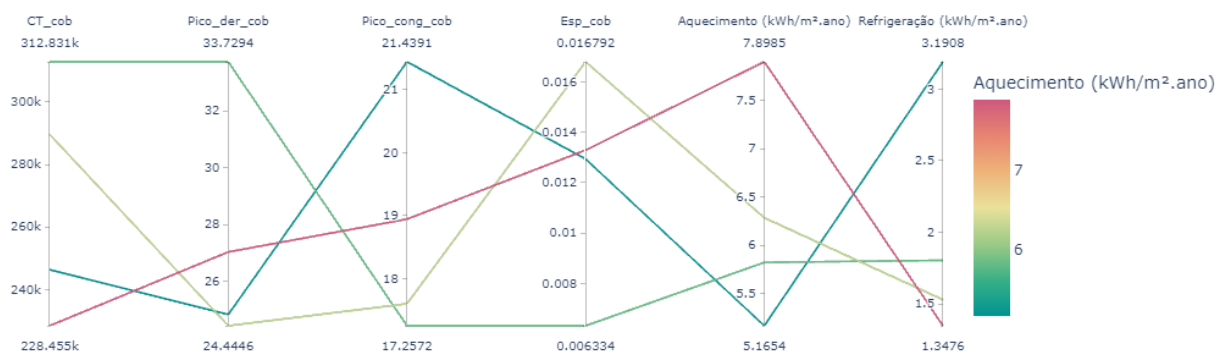


Figura 46 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB2

4.4.3 Modelo C' – Parede externa e Cobertura: ZB3 (Florianópolis/SC)

Com relação a aplicação do PCM nas paredes externas e cobertura do modelo C' na ZB3, a Figura 47 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 0,47 kWh/m².ano para refrigeração e 3,18 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 0,46 kWh/m².ano para refrigeração e 2,47 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo C, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 44,52% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

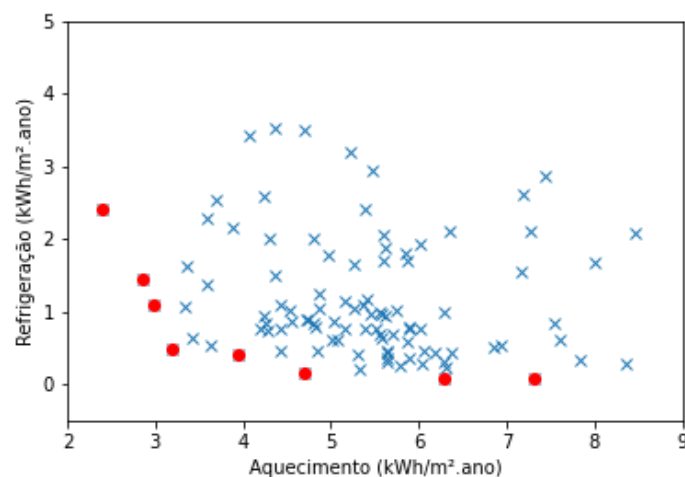


Figura 47 – Resultados da análise evolutiva para o modelo C' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB3.

As Figuras 48 e 49 trazem os gráficos de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação de PCM nas paredes externas e cobertura a partir das principais variáveis para ZB3.

Com início pela Figura 48, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso apontou para 238 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 213 e 307 KJ/Kg na frente de Pareto), com 33,8°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 24,0 e 34,5°C), 21,8°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 19,7 e 29,3°C) e 16,58% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 2,51 e 18,83%).

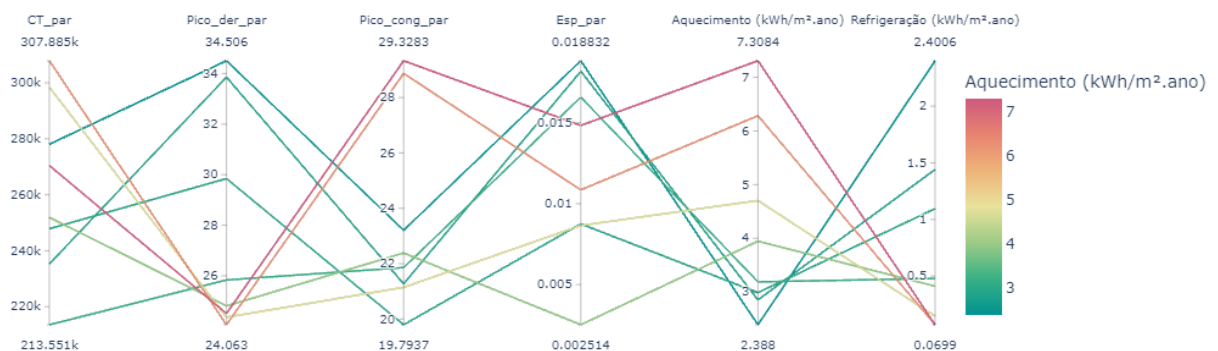


Figura 48 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB3.

Para Figura 49, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado na cobertura no melhor caso apontou para 298 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 203 e 306 KJ/Kg na frente de Pareto), com 18,9°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 18,9 e 33,2°C), 28,9°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 19,4 e 32,9°C) e 1,40% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 1,40 e 18,50%).

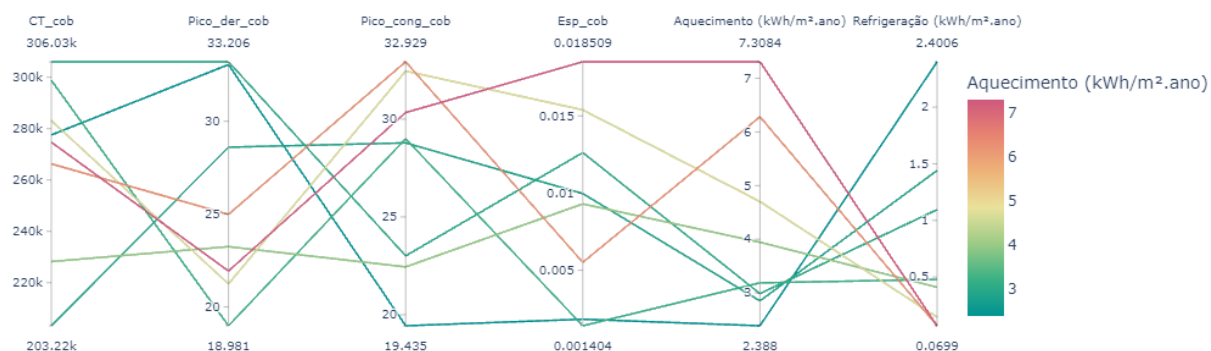


Figura 49 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo C' - Paredes externas e cobertura para ZB3.

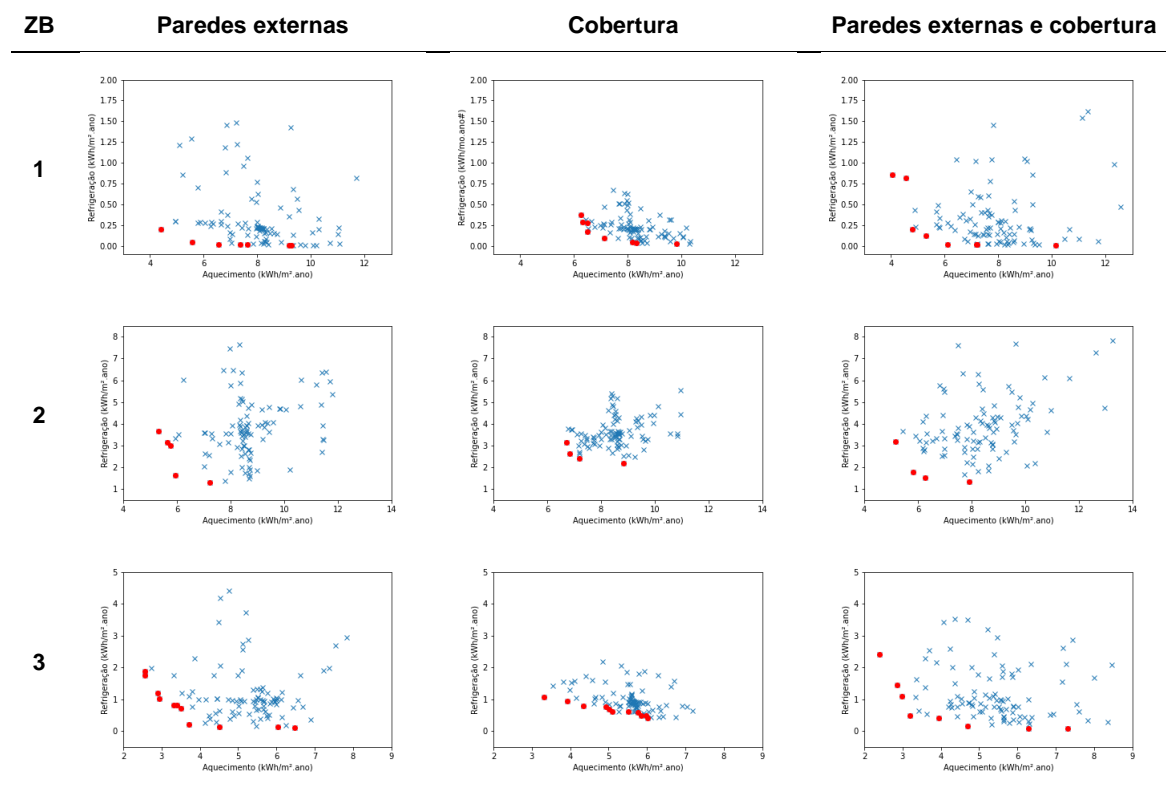
4.5 Síntese da análise dos cenários relacionados ao modelo C'

A partir da aplicação do PCM nas paredes externas e coberturacobertura do modelo construtivo em LSF maior nível de isolamento térmico (C'), os resultados apresentados acima mostram diferentes discussões possíveis sobre o papel do PCM no edifício avaliados nas ZBs 1, 2 e 3.

Iniciando pelo comportamento evolutivo quanto ao posicionamento do PCM nos fechamentos (Tabela 15), em geral, a estratégia de aplicação nas paredes externas e nas paredes externas e cobertura apresentaram uma distribuição mais variante na curva de Pareto para o modelo C', indicando por consequência uma redução maior nas necessidades energéticas para climatização. As aplicações dos PCMs na cobertura, por outro lado, apresentaram um comportamento menos explorativo do conjunto amostral, retornando pontos concentrados em uma mesma região da distribuição, gerando curvas de Pareto com poucos pontos e muito próximos. O aspecto explorativo do conjunto, a partir da lógica evolutiva do algoritmo, garante a maior heterogeneidade dos resultados e, conseqüentemente, melhores

valores absolutos nas funções objetivo, comportamento este o que pôde ser observado tanto na aplicação dos PCMs nas paredes externas, quanto na aplicação nas paredes externas e cobertura.

Tabela 15 – Análises evolutivas dos diferentes cenários de aplicação.



Com relação aos gráficos de coordenadas paralelas apresentados nas análises individualizadas do modelo C' com os aspectos de configuração dos PCMs ótimos em cada cenário, foi possível traçar alguns padrões quanto às características do PCM escolhido pelo algoritmo evolutivo durante o processo de avaliação. Com relação a capacidade de armazenamento de calor latente, ainda que as melhores soluções tenham apontado para diferentes valores dentro do intervalo estabelecido, predominaram as soluções com valores maiores ou iguais à 300 KJ/Kg, da mesma forma que nos melhores casos as temperaturas de pico do processo de mudança de fase apresentaram em maioria valores acima de 31°C na curva de derretimento, e abaixo de 24°C na curva de solidificação. Com relação ao percentual da composição do gesso acartonado que corresponde à espessura dos PCMs, esta foi uma das variáveis em destaque com maior variação, ainda que muitas das melhores soluções tenham apresentado valores acima de 10%. Com relação aos resultados, foi unânime a questão da caracterização representativa do problema multiobjetivo dentro do estudo, já que em todos os cenários no modelo C' com estratégias de aplicação

positivas para redução das demandas energéticas com aquecimento foram inversamente proporcionais para questão da refrigeração, ou seja, as funções-objetivo são conflitantes dentro do contexto analisado, visto que o aumento de uma delas implica na diminuição da outra e vice-versa.

A Tabela 16 apresenta um resumo dos consumos obtidos nas soluções para os modelos C' e a suas diferenças em relação ao modelo C. Assim como mencionado na análise acima para o comportamento dos gráficos com as curvas de Pareto, observa-se na aplicação dos PCMs nas paredes externas e nas paredes externas + cobertura os melhores resultados em termos de redução de consumo em relação ao modelo C original. Em todos os cenários de aplicação a redução percentual foi superior à 22%, atingindo 48,61% com a aplicação dos PCMs nas paredes externas para a ZB1 no modelo C'. Para o aquecimento, a otimização em todos os casos reduziu o consumo, sendo o ela a função objetivo de maior impacto dentro da otimização. Para a refrigeração os valores também foram reduzidos a partir da otimização na maioria dos casos, exceto na aplicação de PCM nas paredes externas + cobertura na ZB2 (aumento de 0,02 kWh/m².ano) e na aplicação de PCMs na cobertura para ZB3 (aumento de 0,14 kWh/m².ano).

Os resultados de redução nas ZBs 1 e 2 trazem também um outro ponto importante para a análise, já que a aplicação dos PCMs nas paredes externas foi mais efetiva que a aplicação conjunta nas paredes externas e cobertura. Esta condição somada ao fato de que a aplicação na cobertura em todos os cenários foi a que apresentou o menor impacto mostra que, para as ZBs 1 e 2, a aplicação conjunta do PCM nos dois fechamentos não se faz necessária. Por outro lado, para a ZB3, uma redução de 4,26% a mais em relação ao modelo C foi observada na estratégia de aplicação das paredes externas + cobertura frente à aplicação exclusiva nas paredes externas.

Tabela 16 – Síntese dos resultados de consumo obtidos nos melhores casos

Modelo	Aquec. (kWh/m².ano)	Dif. no Aquec. (kWh/m².ano)	Ref. (kWh/m².ano)	Dif. na Ref. (kWh/m².ano)	Redução do C (%)
Par. Ext. (ZB1)	4,40	-3,70	0,19	-0,64	48,61
Cob. (ZB1)	6,31	-1,79	0,28	-0,55	26,21
Par. Ext. + Cob. (ZB1)	4,04	-4,06	0,85	+0,02	45,19
Par. Ext. (ZB2)	5,93	-2,71	1,64	-1,92	37,93
Cob. (ZB2)	6,85	-1,80	2,65	-0,91	22,19

Par. Ext. + Cob. (ZB2)	5,82	-2,82	1,80	-1,76	37,52
Par. Ext. (ZB3)	3,71	-1,94	0,22	-0,71	40,26
Cob. (ZB3)	3,32	-2,33	1,07	+0,14	32,27
Par. Ext. + Cob. (ZB3)	3,18	-2,47	0,47	-0,46	44,52

Por fim, é importante destacar que o modelo C', por se tratar da avaliação complementar de uma base com baixo consumo energético (modelo C), percebe-se que o PCM, enquanto isolante capacitivo, mesmo em um cenário com um bom nível de isolamento térmico, consegue contribuir com as reduções dos consumos de energia em uma composição leve nos três contextos climáticos analisados.

4.6 Modelo D' – Parede Externa: Avaliação da aplicação do PCM nas paredes externas

A quarta avaliação realizada com a inserção dos PCMs na composição dos modelos simulados foi a partir do modelo D', que mantém as mesmas condições construtivas do modelo D, com envelope em LSF e menor isolamento térmico, porém com a adição do PCM parafínico micro encapsulado junto a composição do gesso acartonado que reveste a face interna das paredes externas.

4.6.1 Modelo D' – Parede Externa: ZB1 (Curitiba/PR)

Com relação a aplicação do PCM nas paredes externas do modelo D' na ZB1, a Figura 50 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 1,00 kWh/m².ano para refrigeração e 22,63 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 3,81 kWh/m².ano para refrigeração e 17,69 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo D, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 47,65% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

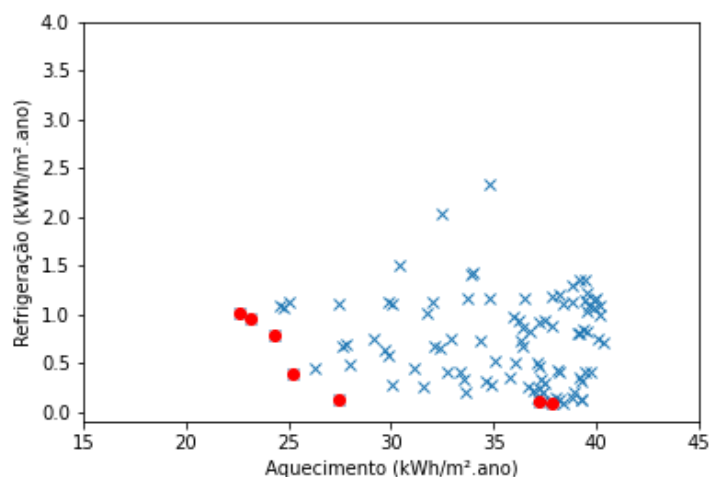


Figura 50 – Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas para ZB1

A Figura 51 traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo D' com aplicação da parede externa na ZB1, apresentado o comportamento das principais variáveis analisadas. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso apresentou 311 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 191 e 311 KJ/Kg na frente de Pareto), com 30,2°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 21,2 e 33,4°C), 22,3°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 19,5 e 29,3°C) e 14,52% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 12,52 e 19,32%).

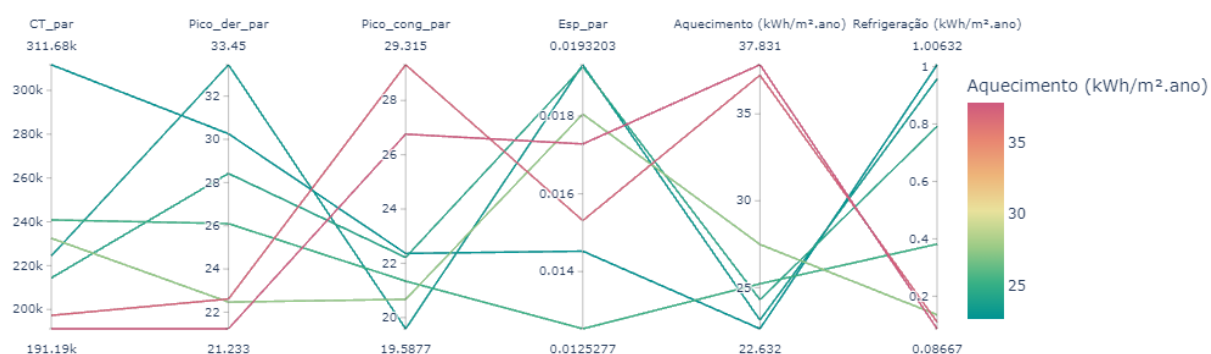


Figura 51 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' - Paredes externas na ZB1.

4.6.2 Modelo D' – Parede Externa: ZB2 (Santa Maria/RS)

Com relação a aplicação do PCM nas paredes externas do modelo D' na ZB2, a Figura 52 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 1,18 kWh/m².ano para refrigeração e 26,72 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 3,46 kWh/m².ano para refrigeração e 11,61 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo D, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 35,07% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

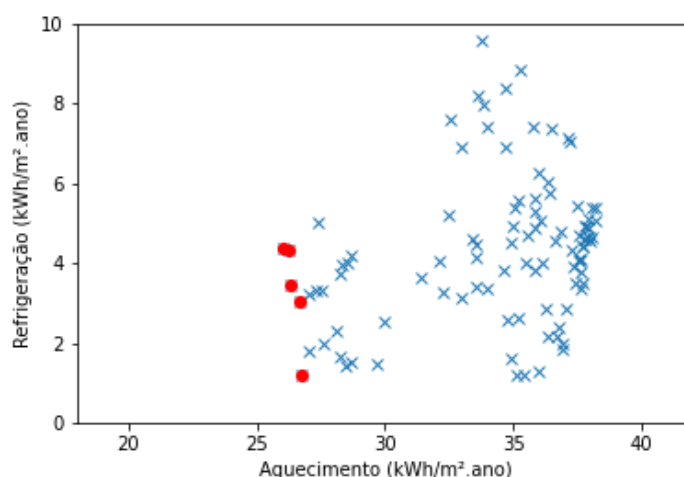


Figura 52 – Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas para ZB2.

A Figura 53 traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo D' com aplicação da parede externa na ZB2, apresentado o comportamento das principais variáveis analisadas. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso apresentou 192 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 192 e 270 KJ/Kg na frente de Pareto), com 24,4°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 24,4 e 34,35°C), 18,8°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 17,7 e 22,2°C) e 16,67% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 13,12 e 19,58%).

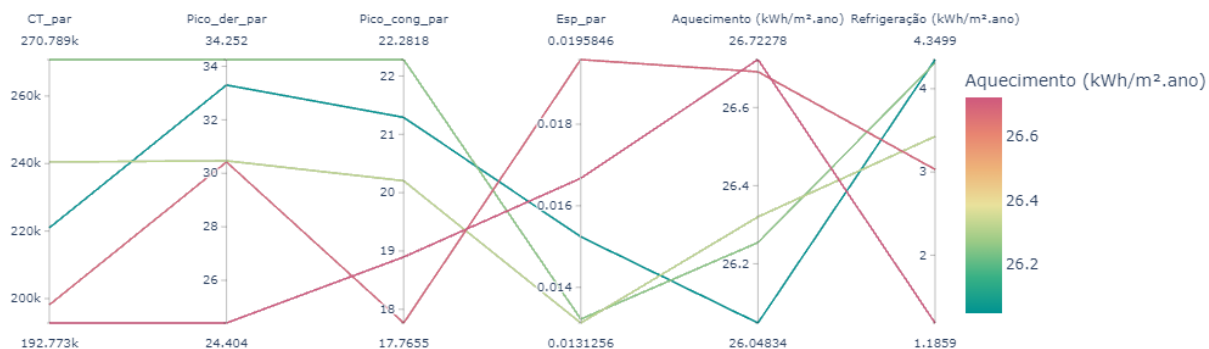


Figura 53 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' - Paredes externas na ZB2.

4.6.3 Modelo D' – Parede Externa: ZB3 (Florianópolis/SC)

Com relação a aplicação do PCM nas paredes externas do modelo D' na ZB3, a Figura 54 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objeto apresentou 1,98 kWh/m².ano para refrigeração e 13,22 kWh/m².ano para aquecimento, um aumento de 0,04 kWh/m².ano para refrigeração e uma redução de 14,79 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo D, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 49,24% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

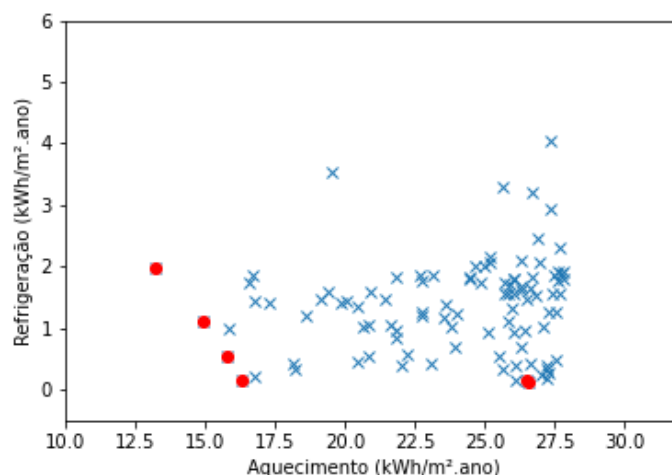


Figura 54 – Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas para ZB3.

A Figura 55 traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo D' com aplicação da parede externa na ZB3,

apresentado o comportamento das principais variáveis analisadas. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso apresentou 309 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 237 e 309 KJ/Kg na frente de Pareto), com 33,0°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 22,1 e 33,0°C), 23,5°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 20,1 e 33,4°C) e 19,96% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 12,21 e 19,96%).

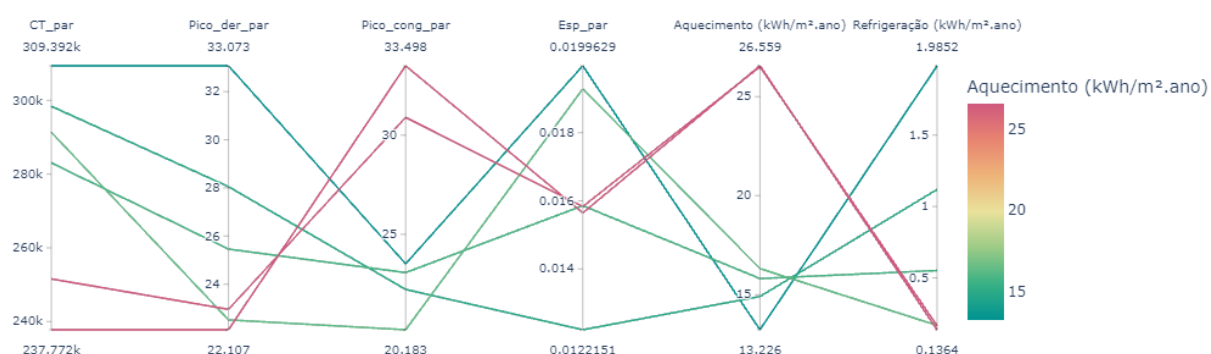


Figura 55 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' - Paredes externas na ZB3.

4.7 Modelo D' – Cobertura: Avaliação da aplicação do PCM na cobertura

A quinta avaliação realizada com a inserção dos PCMs na composição dos modelos simulados foi a partir do modelo D', que mantém as mesmas condições construtivas do modelo D, com envelope em LSF e menor isolamento térmico, porém com a adição do PCM parafínico micro encapsulado junto a composição do gesso acartonado que reveste a face interna da cobertura.

4.7.1 Modelo D' – Cobertura: ZB1 (Curitiba/PR)

Com relação a aplicação do PCM na cobertura do modelo D' na ZB1, a Figura 56 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 0,11 kWh/m².ano para refrigeração e 21,38 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 4,70 kWh/m².ano para refrigeração e 18,94 para aquecimento kWh/m².ano em relação ao modelo D, representando uma diminuição

no consumo total para climatização de 52,39% a partir da aplicação de PCMs na cobertura.

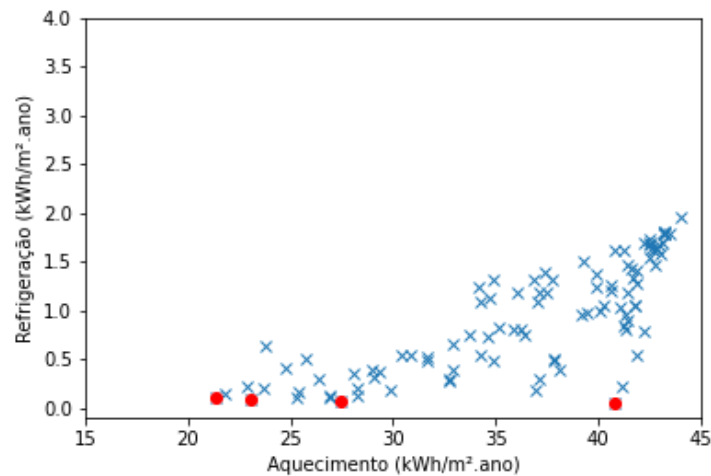


Figura 56 – Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM na cobertura na ZB1.

A Figura 57 traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo D' com aplicação na cobertura a partir das principais variáveis para ZB1. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico aplicado na cobertura no melhor caso apresentou 282 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 222 e 303 KJ/Kg na frente de Pareto), com 29,2°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 24,5 e 29,2°C), 23,2°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 19,4 e 29,9°C) e 19,02% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 17,65 e 19,56%).

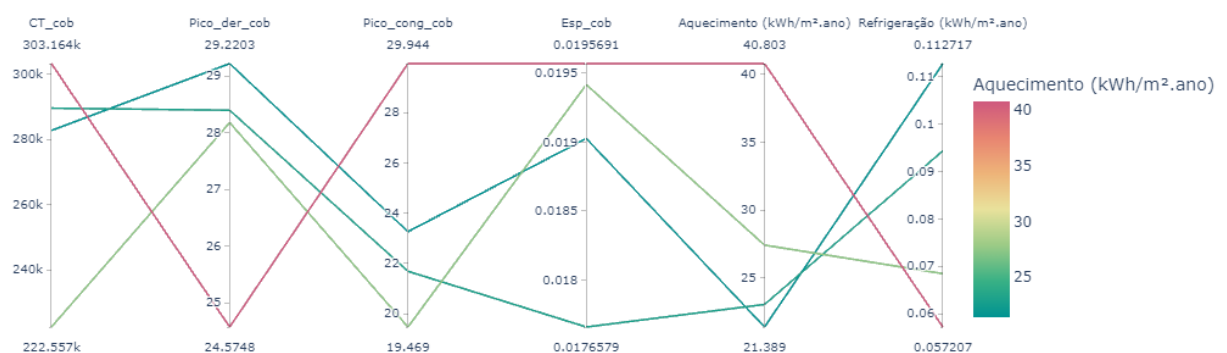


Figura 57 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' – Cobertura na ZB1.

4.7.2 Modelo D' – Cobertura: ZB2 (Santa Maria/RS)

Com relação a aplicação do PCM na cobertura do modelo D' na ZB2, a Figura 58 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 1,12 kWh/m².ano para refrigeração e 25,19 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 3,52 kWh/m².ano para refrigeração e 13,14 para aquecimento kWh/m².ano em relação ao modelo D, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 38,77% a partir da aplicação de PCMs na cobertura.

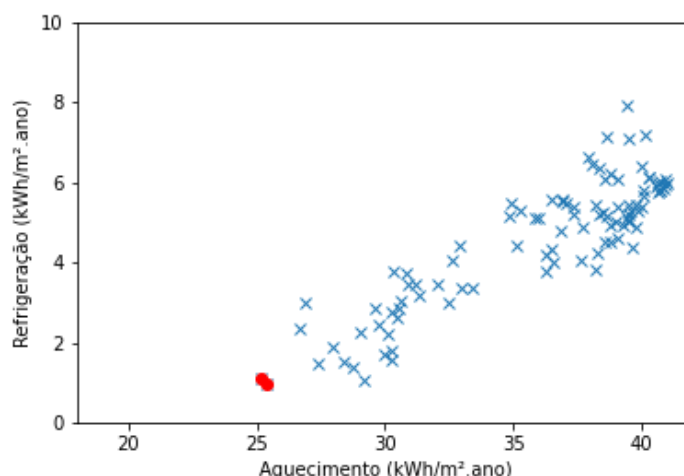


Figura 58 – Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM na cobertura na ZB2.

A Figura 58 traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo D' com aplicação na cobertura a partir das principais variáveis para ZB2. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico aplicado na cobertura no melhor caso apresentou 282 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 282 e 303 KJ/Kg na frente de Pareto), com 25,4°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 24,6 e 25,4°C), 21,3°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 20,3 e 21,3°C) e 17,82% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 17,82 e 19,50%).

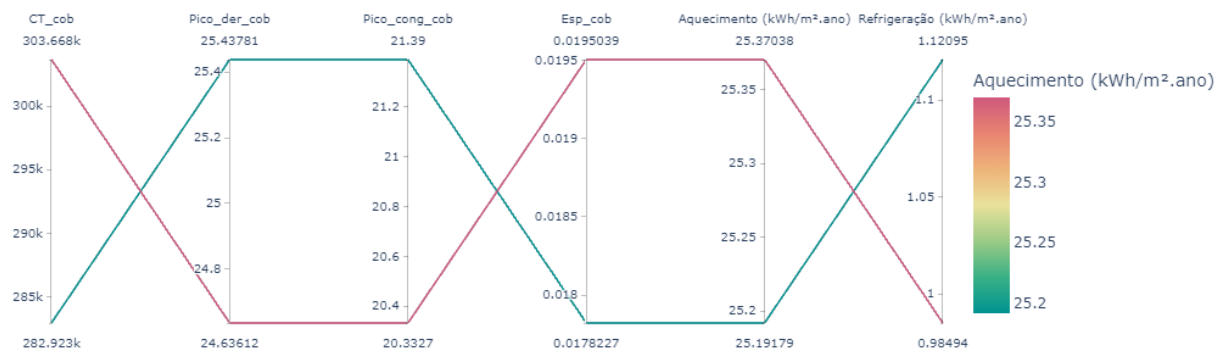


Figura 59 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' – Cobertura na ZB2.

4.7.3 Modelo D' – Cobertura: ZB3 (Florianópolis/SC)

Com relação a aplicação do PCM na cobertura do modelo D' na ZB3, a Figura 60 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 0,68 kWh/m².ano para refrigeração e 14,61 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 1,26 kWh/m².ano para refrigeração e 13,40 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo D, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 48,94% a partir da aplicação de PCMs na cobertura.

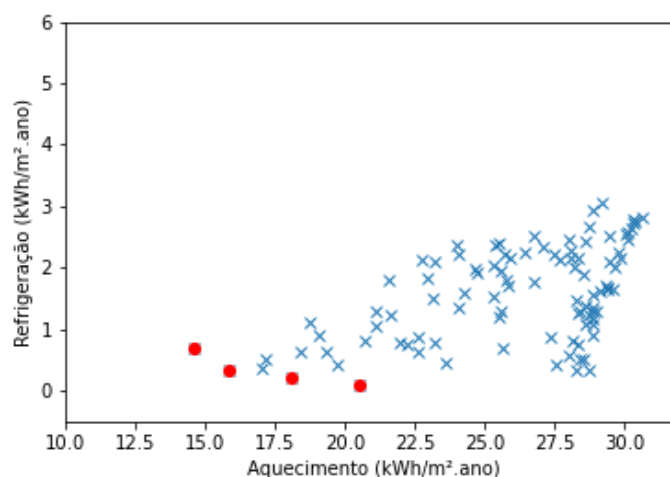


Figura 60 – Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM na cobertura na ZB3.

A Figura 61 traz o gráfico de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo D' com aplicação na cobertura a partir das principais variáveis para ZB3. Os resultados apresentados mostram que o PCM parafínico aplicado na cobertura no melhor caso apresentou 257 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 210 e 299 KJ/Kg na frente de Pareto), com 32,2°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 25,9 e 32,2°C), 24,6°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 19,1 e 24,6°C) e 18,48% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 13,02 e 18,48%).

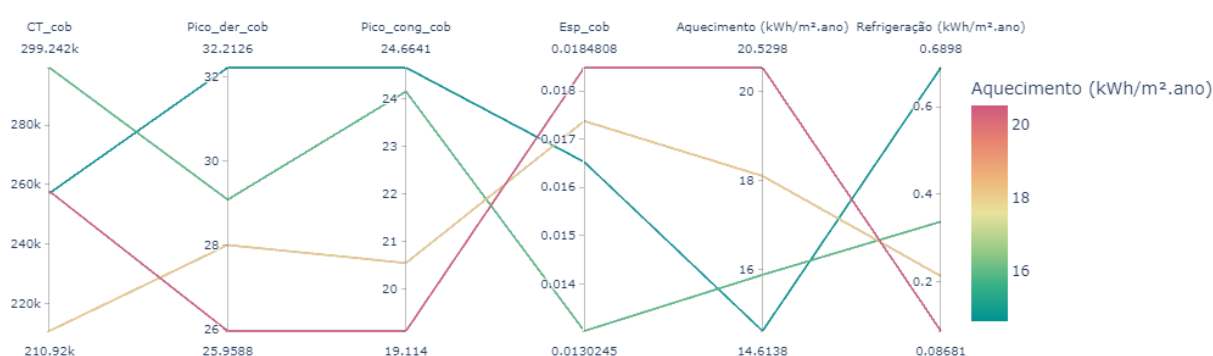


Figura 61 – Comportamento das variáveis testadas no gráfico de coordenadas paralelas para o modelo D' – Cobertura na ZB3.

4.8 Modelo D' – Parede externa e Cobertura: Avaliação da aplicação do PCM nas paredes externas e cobertura

A sexta e última avaliação realizada com a inserção dos PCMs na composição dos modelos simulados foi a partir do modelo D', que mantém as mesmas condições construtivas do modelo D, com envelope em LSF e menor isolamento térmico, porém com a adição do PCM parafínico micro encapsulado junto a composição do gesso acartonado que reveste a face interna das paredes externas e da cobertura.

4.8.1 Modelo D' – Parede externa e Cobertura: ZB1 (Curitiba/PR)

Com relação a aplicação do PCM nas paredes externas e cobertura do modelo D' na ZB1, a Figura 62 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 0,09 kWh/m².ano para refrigeração e 16,58 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 4,72 kWh/m².ano para refrigeração e 23,74

kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo D, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 63,09% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

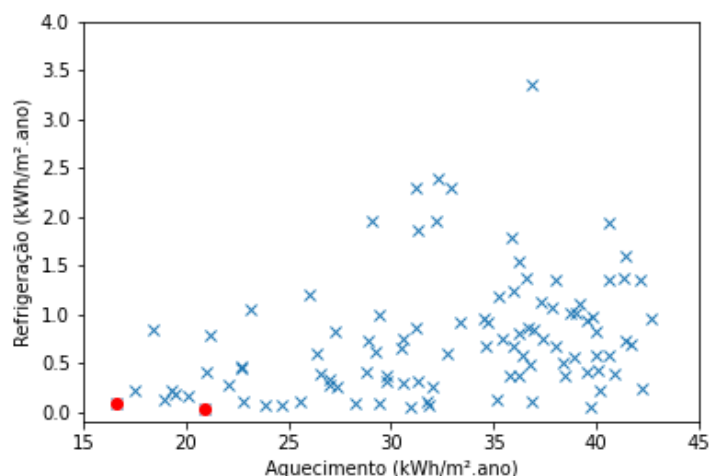


Figura 62 – Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB1.

As Figuras 63 e 64 trazem os gráficos de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação de PCM nas paredes externas e cobertura a partir das principais variáveis para ZB1.

Com início pela Figura 63, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso apontou para 231 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 231 e 252 KJ/Kg na frente de Pareto), com 27,3°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 25,5 e 27,3°C), 20,2°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 20,2 e 21,1°C) e 9,46% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 9,39 e 9,46%).

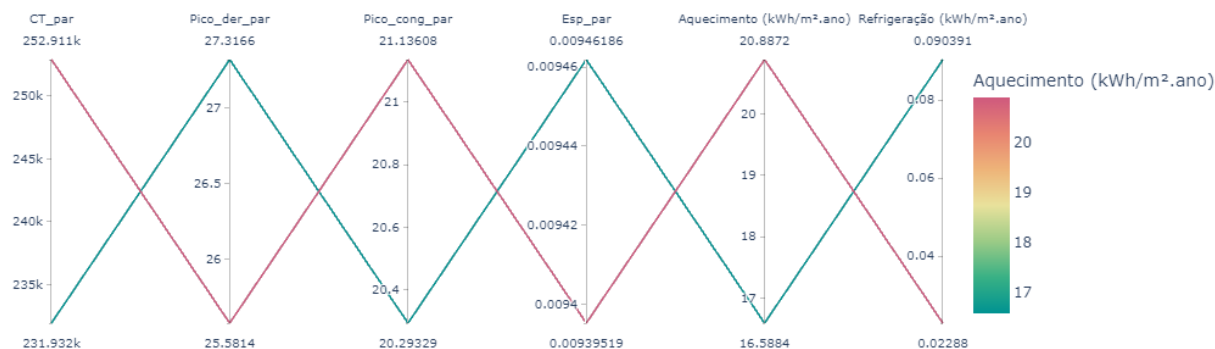


Figura 63 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB1.

Para Figura 64, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado na cobertura no melhor caso apontou para 295 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 262 e 295 KJ/Kg na frente de Pareto), com 26,4°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 26,4 e 28,4°C), 23,4°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 17,5 e 23,4°C) e 15,37% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 15,37 e 16,14%).

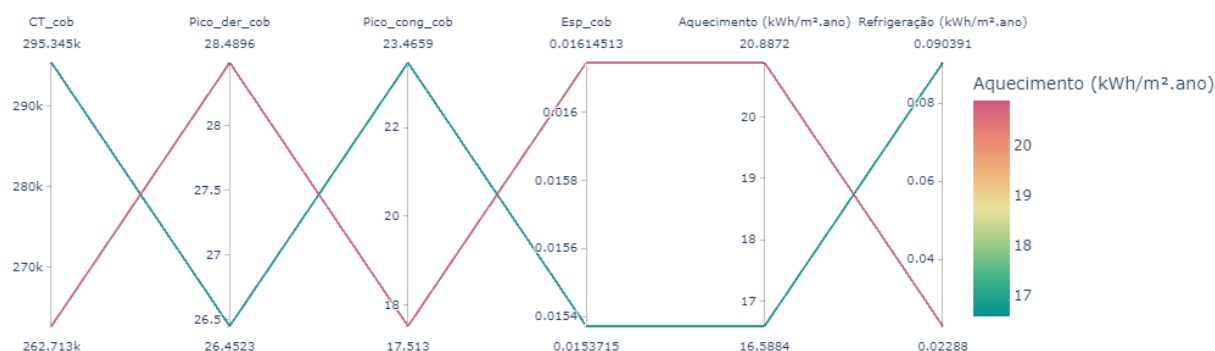


Figura 64 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB1.

4.8.2 Modelo D' – Parede externa e Cobertura: ZB2 (Santa Maria/RS)

Com relação a aplicação do PCM nas paredes externas e cobertura do modelo D' na ZB2, a Figura 65 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 0,85 kWh/m².ano para refrigeração e 18,95 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 3,79 kWh/m².ano para refrigeração e 19,38 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo D, representando uma

diminuição no consumo total para climatização de 53,92% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

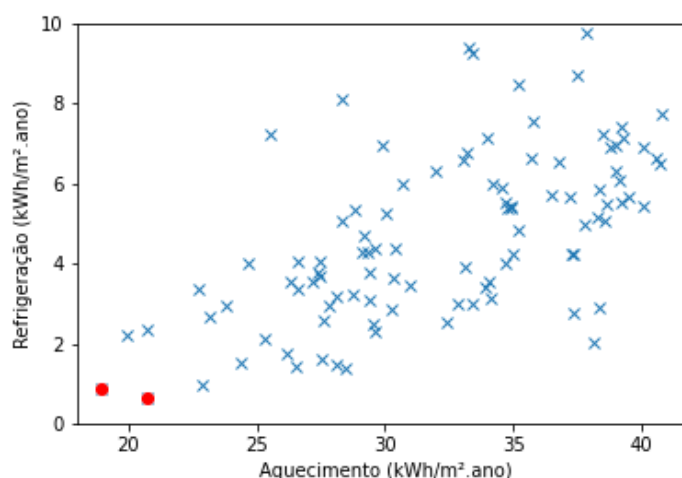


Figura 65 – Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB2.

As Figuras 66 e 67 trazem os gráficos de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação de PCM nas paredes externas e cobertura a partir das principais variáveis para ZB2.

Com início pela Figura 66, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso apontou para 220 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 220 e 313 KJ/Kg na frente de Pareto), com 27,6°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 25,7 e 27,6°C), 19,1°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 17,0 e 19,1°C) e 18,56% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 15,40 e 18,56%).

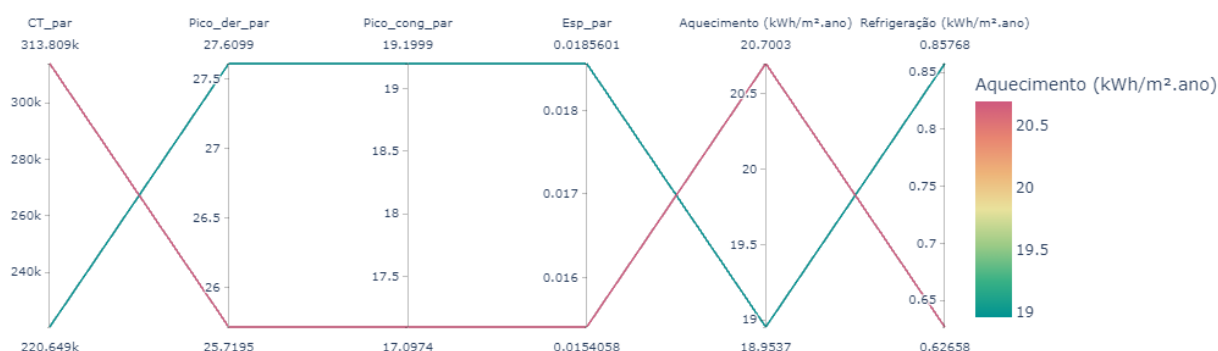


Figura 66 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB2.

Para Figura 67, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado na cobertura no melhor caso apontou para 258 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 227 e 258 KJ/Kg na frente de Pareto), com 25,8°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 25,8 e 27,6°C), 17,5°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 17,5 e 17,9°C) e 19,89% do percentual PCM na composição do revestimento (com variação entre 19,25 e 19,89%).



Figura 67 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB2.

4.8.3 Modelo D' – Parede externa e Cobertura: ZB3 (Florianópolis/SC)

Com relação a aplicação do PCM nas paredes externas e cobertura do modelo D' na ZB3, a Figura 68 apresenta o comportamento da simulação evolutiva.

A melhor solução observada na intersecção das duas funções-objetivo apresentou 0,45 kWh/m².ano para refrigeração e 9,76 kWh/m².ano para aquecimento, uma redução de 1,49 kWh/m².ano para refrigeração e 18,25 kWh/m².ano para aquecimento em relação ao modelo D, representando uma diminuição no consumo total para climatização de 65,91% a partir da aplicação de PCMs nas paredes externas.

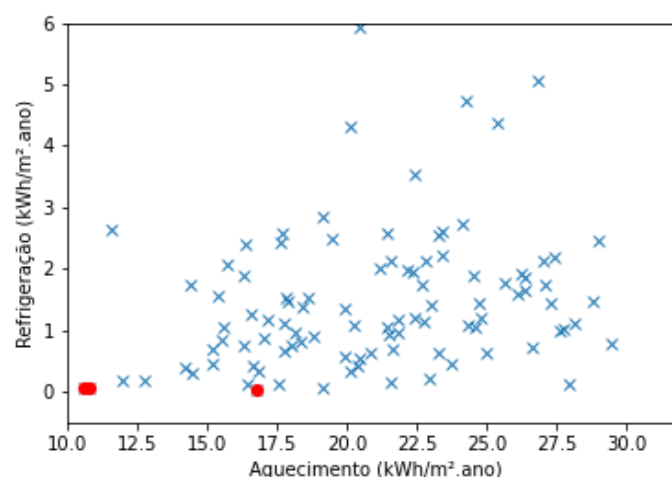


Figura 68 – Resultados da análise evolutiva para o modelo D' com PCM nas paredes externas e na cobertura na ZB3.

As Figuras 69 e 70 trazem os gráficos de coordenadas paralelas para os resultados de *Pareto front* obtidos no modelo C' com aplicação de PCM nas paredes externas e cobertura a partir das principais variáveis para ZB3.

Com início pela Figura 69, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado nas paredes externas no melhor caso apontou para 271 KJ/Kg de capacidade de armazenamento de calor latente (com variação entre 191 e 274 KJ/Kg na frente de Pareto), com 28,5°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 22,3 e 28,5°C), 21,3°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 19,1 e 30,2°C) e 17,43% de espessura do PCM (com variação entre 6,97% e 19,12%).

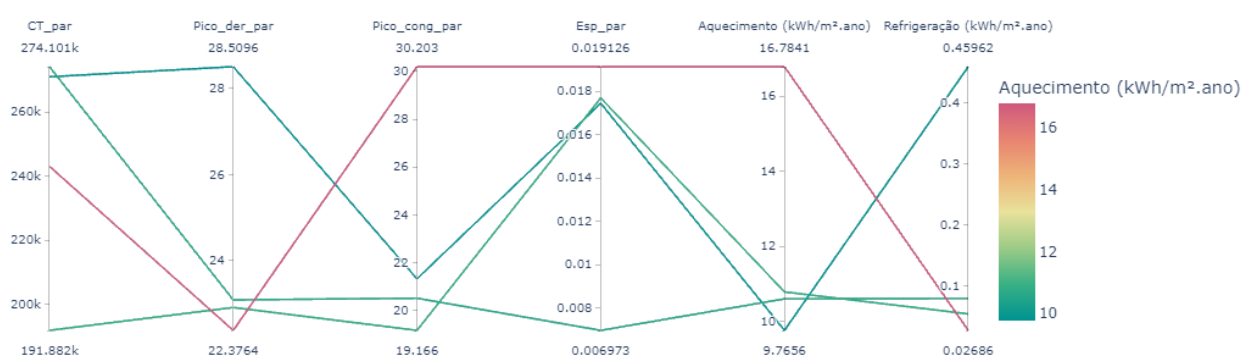


Figura 69 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado nas paredes externas para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB3.

Para Figura 70, o resultado apresentado com PCM parafínico aplicado na cobertura no melhor caso apontou para 293 KJ/Kg de capacidade de armazenamento

de calor latente (com variação entre 262 e 314 KJ/Kg na frente de Pareto), com 27,0°C de pico de temperatura para derretimento (com variação entre 27,0 e 34,2°C), 25,22°C de pico de temperatura para curva de congelamento (com variação entre 20,3 e 25,2°C) e 15,92% de espessura do PCM (com variação entre 10,49 e 16,96%).

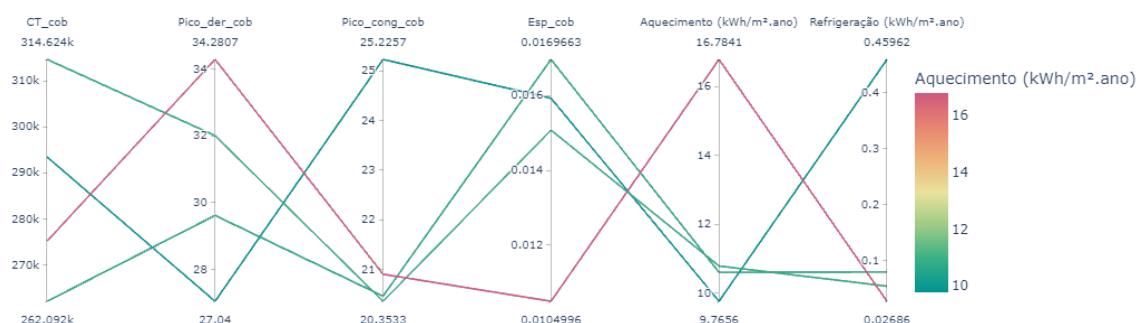


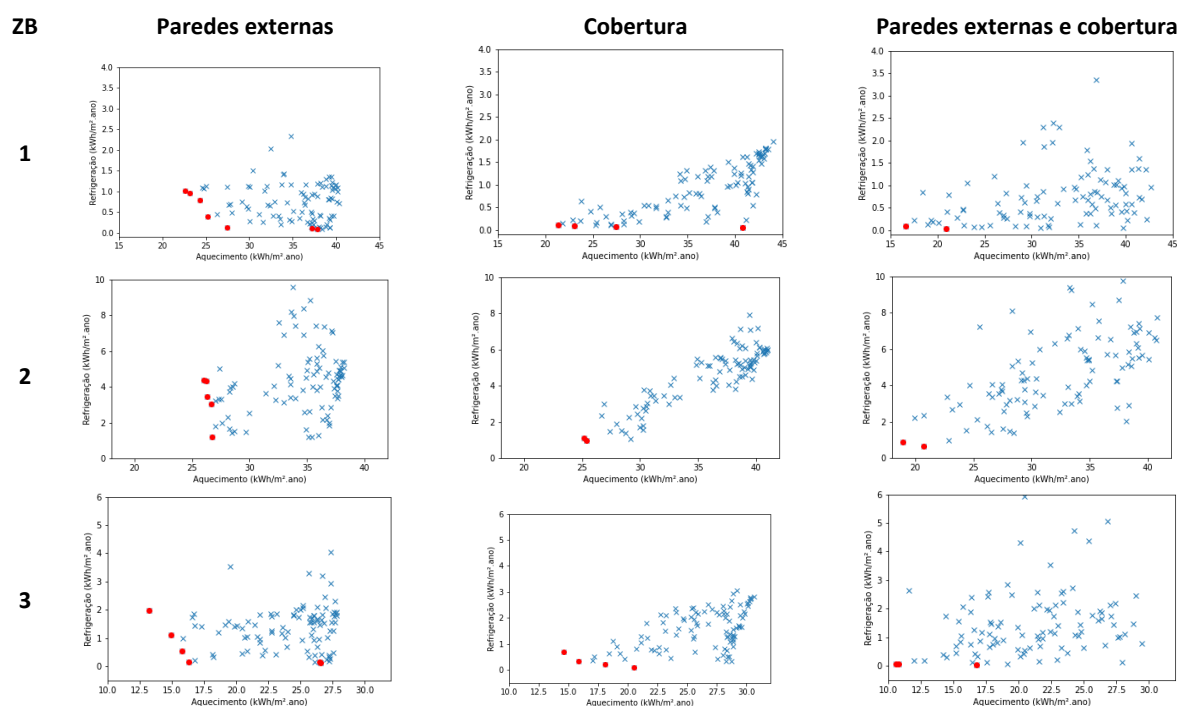
Figura 70 – Comportamento das variáveis testadas para o PCM aplicado na cobertura para o modelo D' - Paredes externas e cobertura para ZB3.

4.9 Síntese da análise dos cenários relacionados ao modelo D'

Assim como analisado para o modelo C', a partir da aplicação do PCM nas paredes externas, piso e cobertura do modelo construtivo em LSF com menor nível de isolamento térmico (C'), os resultados apresentados acima mostram diferentes discussões possíveis sobre o papel do PCM no edifício avaliados nas ZBs 1, 2 e 3.

Com início pelo comportamento evolutivo quanto ao posicionamento do PCM nos fechamentos (Tabela 17), para as análises do modelo D' o comportamento explorativo do conjunto populacional final foi melhor realizado na análise com aplicações nas paredes externas e cobertura, enquanto os melhores pontos de Pareto considerando a redução da demanda energética para aquecimento também foram observados nestes cenários de aplicação do PCM. Os modelos com as aplicações nas paredes externas e na cobertura apresentaram concentrações de resultados em região dominadas (não-ótimas), indicando uma dificuldade de convergência para as áreas de redução conjunta das duas funções-objetivo.

Tabela 17 – Análises evolutivas dos diferentes cenários de aplicação.



Com relação aos gráficos de coordenadas paralelas apresentados nas análises individualizadas do modelo D' com os aspectos de configuração dos PCMs ótimos em cada cenário, assim como visto para o modelo C', foi possível traçar alguns padrões quanto às características do PCM escolhido pelo algoritmo evolutivo durante o processo de avaliação. Com relação a capacidade de armazenamento de calor latente, ainda que as melhores soluções tenham apontado para diferentes valores dentro do intervalo estabelecido, predominaram as soluções com valores maiores ou iguais à 280 KJ/Kg, da mesma forma que nos melhores casos as temperaturas de pico do processo de mudança de fase apresentaram em maioria valores acima de 27°C na curva de derretimento, enquanto a curva de solidificação apresentou variações muito amplas nas melhores soluções. Com relação ao percentual da composição do gesso acartonado que corresponde à espessura dos PCMs, esta foi uma das variáveis em destaque com maior variação, ainda que muitas das melhores soluções tenham apresentado valores acima de 9%. Com relação aos resultados, novamente foi unânime a questão da caracterização representativa do problema multiobjetivo dentro do estudo, já que em todos os cenários no modelo D' com estratégias de aplicação positivas para redução das demandas energéticas com aquecimento foram inversamente proporcionais para questão da refrigeração.

A Tabela 18 apresenta um resumo dos consumos obtidos nas soluções para os modelos D' e a suas diferenças em relação ao modelo D. Como já apontado na análise do comportamento das análises evolutivas, os cenários com aplicações nas paredes externas e cobertura foram os mais impactantes, chegando à redução de consumo com climatização de 65,91% em relação ao modelo D na ZB3. Em todos os cenários testados reduções de consumo superiores à 35,07% foram observadas em relação ao modelo D, indicando um impacto positivo para a aplicação dos PCMs nas três zonas bioclimáticas. Quanto ao consumo para aquecimento, principal função-objetivo da análise em função dos maiores valores apresentados, mostrou uma redução superior à 11,00 kWh/m².ano em todos os cenários de aplicação, com uma redução de 23,74 kWh/m².ano para a aplicação realizada na parede externa e cobertura na ZB1. No caso da refrigeração, ainda que com valores absolutos menores de consumo, em geral foi observada uma redução, com exceção da aplicação nas paredes externas para ZB3 que apresentou um aumento de 0,04 kWh/m².ano.

Diferente do que foi observado nos cenários para o modelo C', a aplicação conjunta nas paredes e cobertura foi mais efetiva na redução do consumo, seguida pela aplicação na cobertura e nas paredes externas.

Tabela 18 – Síntese dos resultados de consumo obtidos nos melhores casos.

Modelo	Aquec. (kWh/m².ano)	Dif. no Aquec. (kWh/m².ano)	Ref. (kWh/m².ano)	Dif. na Ref. (kWh/m².ano)	Redução do D (%)
Par. Ext. (ZB1)	22,63	-17,69	1,00	-3,81	47,65
Cob. (ZB1)	21,38	-18,94	0,11	-4,70	52,39
Par. Ext. + Cob. (ZB1)	16,58	-23,74	0,09	-4,72	63,09
Par. Ext. (ZB2)	26,72	-11,61	1,18	-3,46	35,07
Cob. (ZB2)	25,19	-13,14	1,12	-3,52	38,77
Par. Ext. + Cob. (ZB2)	18,95	-19,38	0,85	-3,79	53,92
Par. Ext. (ZB3)	13,22	-14,79	1,98	+0,04	49,24
Cob. (ZB3)	14,61	-13,40	0,68	-1,26	48,94
Par. Ext. + Cob. (ZB3)	9,76	-18,25	0,45	-1,49	65,91

No caso dos modelos D', que partem de um base com menor nível de isolamento térmico (modelo D), percebe-se em geral um impacto positivo da aplicação do PCM nos fechamentos opacos da edificação, com reduções sempre maiores que 50% do consumo inicial nas 3 ZBs quando considerada a melhor estratégia avaliada (paredes externas + cobertura). Diferente do modelo C, aqui as coberturas pouco

isoladas estão mais representativas quando incorporado os PCMs, indicando um melhor desempenho no cenário de aplicação na cobertura + paredes externas.

4.10 Avaliação geral sobre os resultados apresentados

A partir das análises apresentadas acima, alguns apontamentos em um nível geral das avaliações podem ser feitos frente ao papel nos PCMs nos edifícios avaliados.

A começar pelas simulações realizadas para a habitação situada na Zona Bioclimática 1, os resultados para os modelos com maior nível de isolamento térmico (Figura 71) mostram que para além da melhora em relação ao modelo em LSF original (C), a aplicação dos PCMs proposta nos três modelos C' (parede, cobertura e parede + cobertura) apresentaram intensidades do uso de energia elétrica para aquecimento menores que a habitação em alvenaria cerâmica (A), mesmo com a aplicação de menor impacto positivo (cobertura). Com relação ao comportamento da IUE para refrigeração, as estratégias de aplicação do PCM também foram favoráveis na redução, exceto pelo cenário com aplicação nas paredes externas + cobertura, onde um aumento de 0,02 kWh/m².ano foi observado em relação ao modelo em LSF e 0,15 kWh/m².ano em relação em alvenaria.

Para um balanço da aplicação do PCM no envelope da habitação na ZB1 os resultados obtidos apontam para um papel de influência positiva no seu desempenho energético. Neste recorte, o melhor cenário avaliado considerou a aplicação do PCM apenas nas paredes externas como composição de melhor desempenho energético, considerando a soma dos dois consumos analisados.

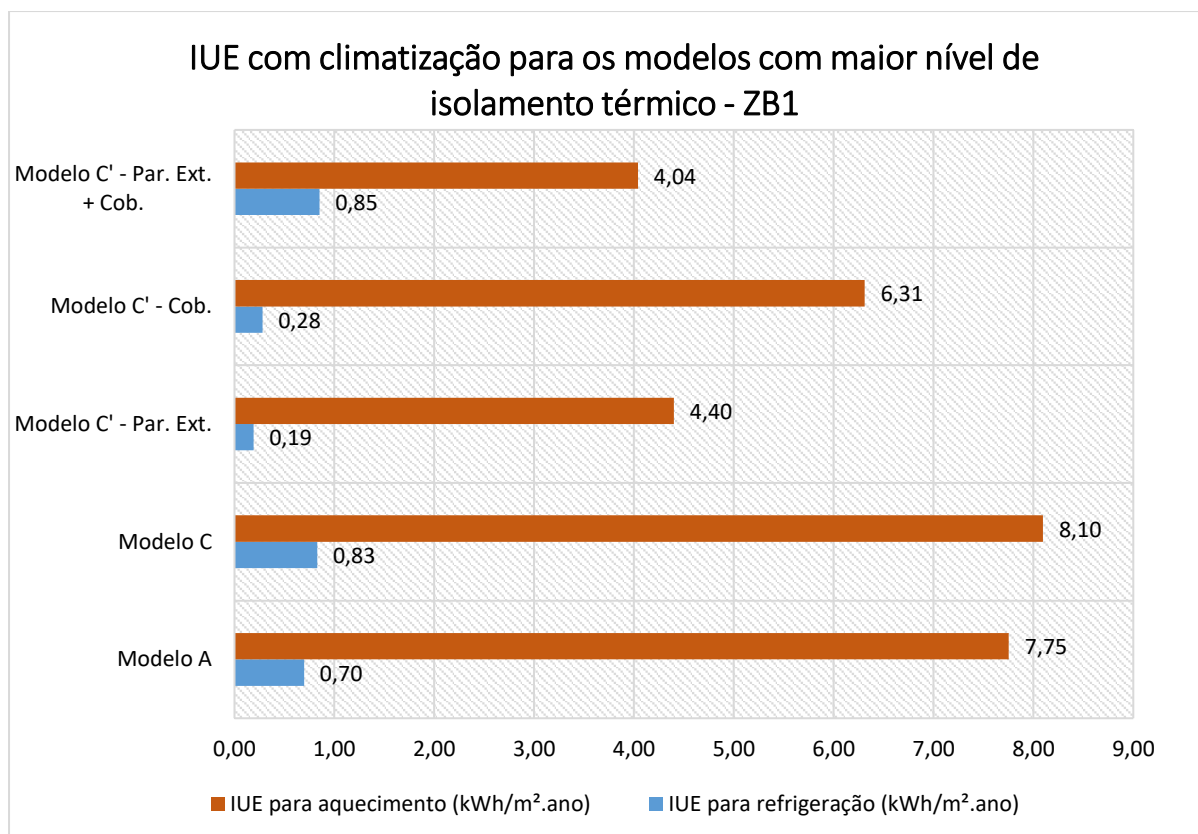


Figura 71 – Resultados de IUE para os modelos com maior nível de isolamento térmico na ZB1 (A, C e C').

Para a análise dos modelos com menor nível de isolamento térmico (B, D e D') na Zona Bioclimática 1 (Figura 72), os resultados mostram que tanto na redução da IUE para aquecimento quanto para refrigeração os resultados energéticos da habitação foram positivos em relação aos modelos iniciais em LSF (C) e alvenaria cerâmica (A). Para os modelos com menor nível de isolamento térmico na ZB1, o cenário mais impactante do ponto de vista energético considerando a soma das duas IUE, foi com a aplicação do PCM nas paredes externas + cobertura, com redução superior à 50% do consumo energético com climatização em relação modelo em alvenaria cerâmica (A).

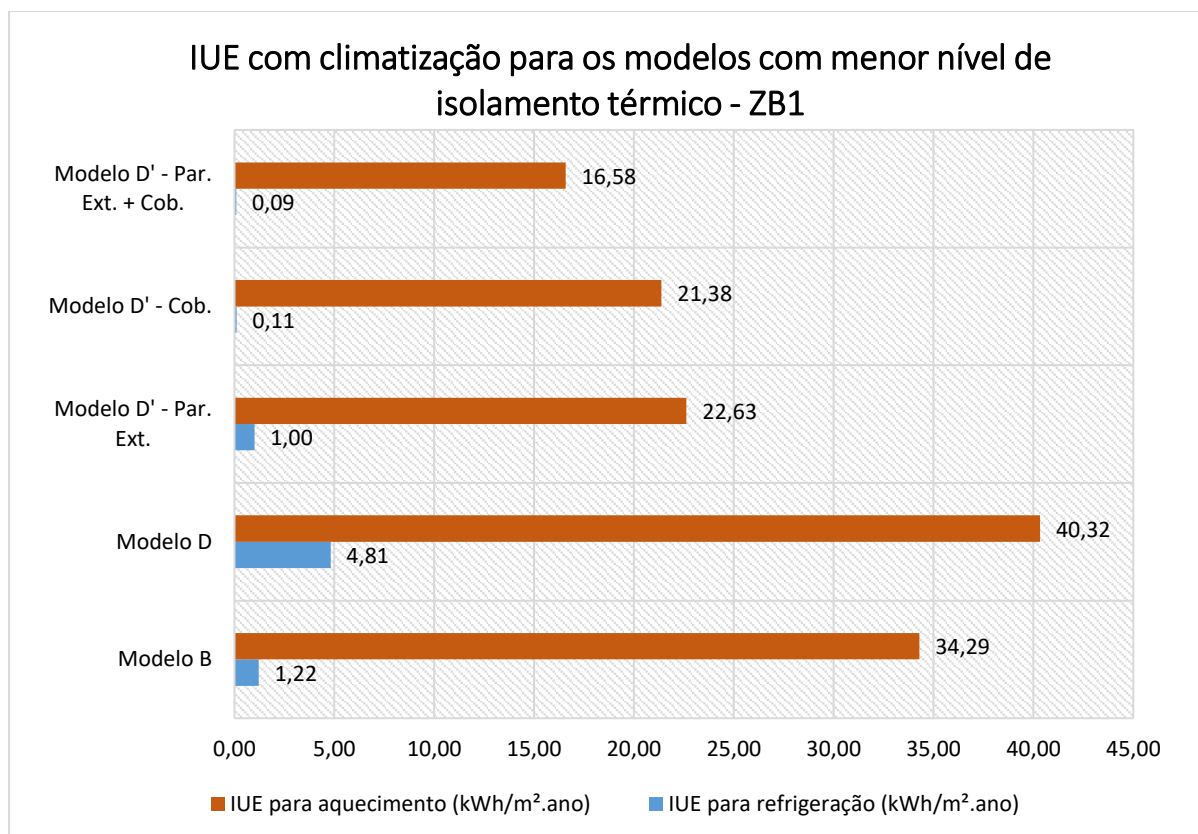


Figura 72 – Resultados de IUE para os modelos com menor nível de isolamento térmico na ZB1 (B, D e D').

Os modelos com maior nível de isolamento térmico na Zona Bioclimática 2 (Figura 72), assim como visto para ZB1, apresentaram resultados promissores quanto aos cenários de aplicação dos PCMs nos envelopes opacos. Em todos os cenários testados a aplicação do PCM apresentou IUE menores que os modelos em LSF (C) e alvenaria cerâmica (A), tanto para aquecimento, quanto para refrigeração. O cenário de aplicação nas Paredes Externas + Cobertura foi o mais eficaz, apresentando as menores demandas energéticas para aquecimento e refrigeração. Ainda que os valores com a IUE para aquecimento no modelo com a aplicação conjunta de paredes externas e cobertura seja menor do que o modelo com a aplicação apenas nas paredes externas, o aumento na IUE para refrigeração no modelo com a aplicação conjunta em relação ao modelo que aplica o PCM apenas nas paredes externas sobrepõe a economia de energia com aquecimento.

No caso da ZB2, por apresentar necessidades energéticas maiores para refrigeração, percebe-se com maior influência o papel do PCM para redução de ambas as necessidades energéticas, à medida que os valores de IUE para refrigeração acima de 3,5 kWh/m².ano foram reduzidos pela metade no cenário de

aplicação dos PCMs nas paredes externas, e reduzidos também, mesmo que em menor escala, no cenário de menor impacto (cobertura) em aproximadamente 1,00 kWh/m².ano.

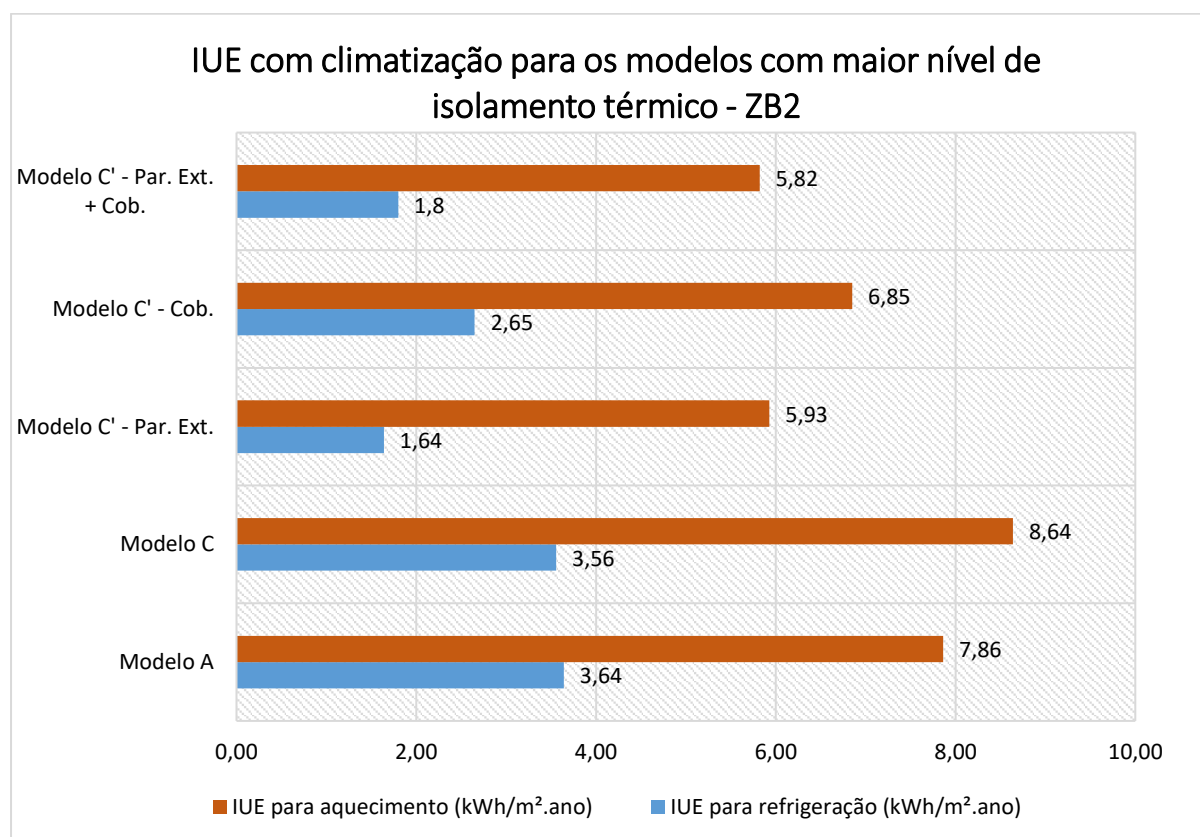


Figura 73 – Resultados de IUE para os modelos com maior nível de isolamento térmico na ZB2 (A, C e C').

Quanto aos modelos com menor nível de isolamento térmico na ZB2 (Figura 74), mais uma vez, assim como visto para a ZB1, os resultados com a aplicação dos PCMs resultaram em reduções da IUE para aquecimento e refrigeração em relação aos modelos originais em LSF (C) e alvenaria cerâmica (A). Sendo a necessidade para aquecimento o ponto mais influente dentre os eixos de avaliação, observa-se que a estratégia de aplicação dos PCMs de forma conjunta (paredes externas + cobertura) apresentou os melhores resultados, comportamento este que também foi percebido nas intensidades para refrigeração. Considerando os valores somados de IUE, a melhor estratégia de aplicação dos PCMs apresenta uma redução de IUE superior a 50% em relação ao modelo em alvenaria cerâmica (A).

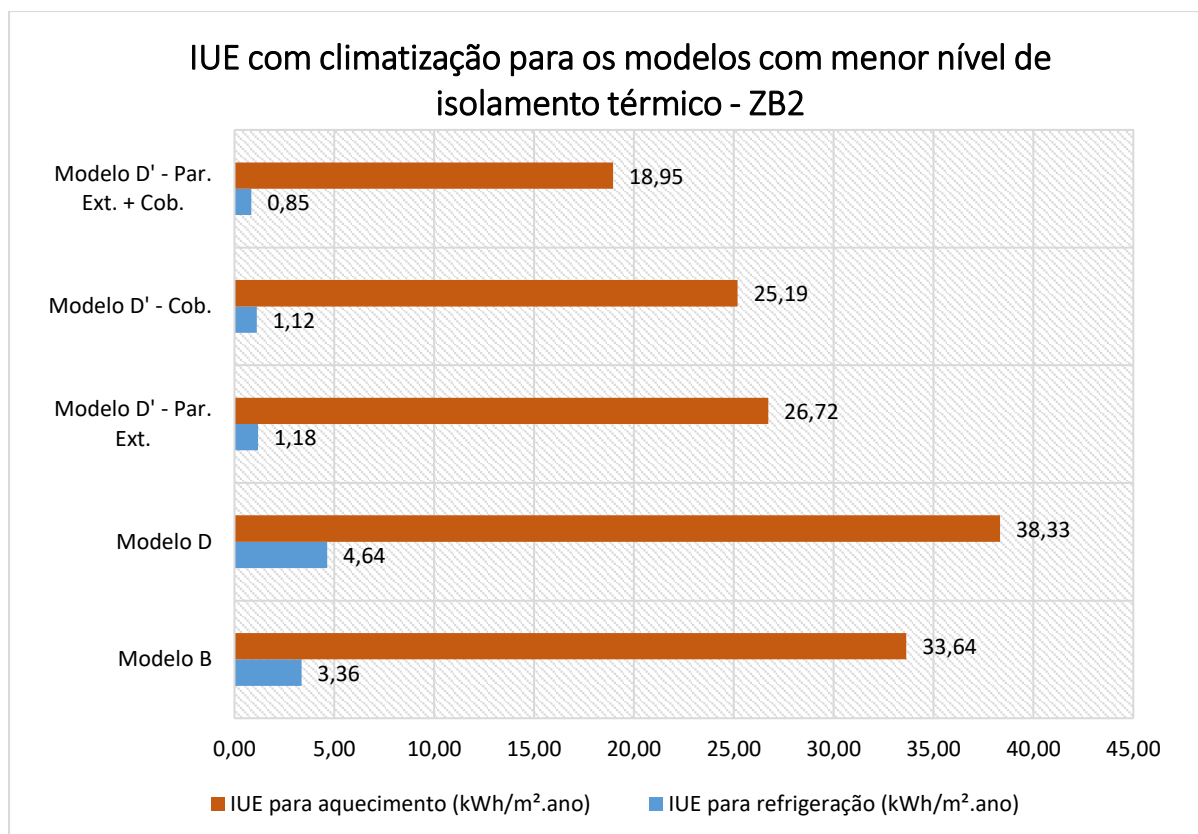


Figura 74 – Resultados de IUE para os modelos com menor nível de isolamento térmico na ZB2 (B, D e D').

Já para os modelos com maior nível de isolamento térmico na Zona Bioclimática 3 (Figura 75), assim como visto para as ZB1 e ZB2, resultados de melhora foram identificados quanto aos cenários de aplicação dos PCMs nos envelopes opacos. Em todos os cenários testados a aplicação do PCM apresentou IUE para aquecimento menores do que os modelos em LSF (C) e alvenaria cerâmica (A). Para refrigeração, a estratégia de aplicação do PCM na cobertura apresentou um aumento de 0,14 kWh/m².ano em relação ao modelo inicial em LSF (C), e de 0,08 kWh/m².ano em relação ao modelo alvenaria cerâmica. Nos demais casos a IUE com refrigeração reduziu a partir da aplicação dos PCMs. Para ZB2, diferentemente do que foi observado na ZB1, o modelo com a aplicação conjunta de PCM foi o mais efetivo no sentido da redução com a climatização. Ainda que a IUE para refrigeração do modelo com aplicação apenas nas paredes externas tenha sido menos do que a metade do gasto com o modelo com a aplicação conjunta de PCM para esta finalidade, a diferença de 0,53 kWh/m².ano a mais para o modelo com a aplicação de PCM apenas nas paredes externas mostra que na ZB3 o balanço é positivo para o cenário de aplicação conjunta. A aplicação de PCMs nos envelopes mais isolados na

ZB3 foi positiva em todos contextos de aplicação, inclusive para a aplicação na cobertura que demandou maior necessidade energética para refrigeração.

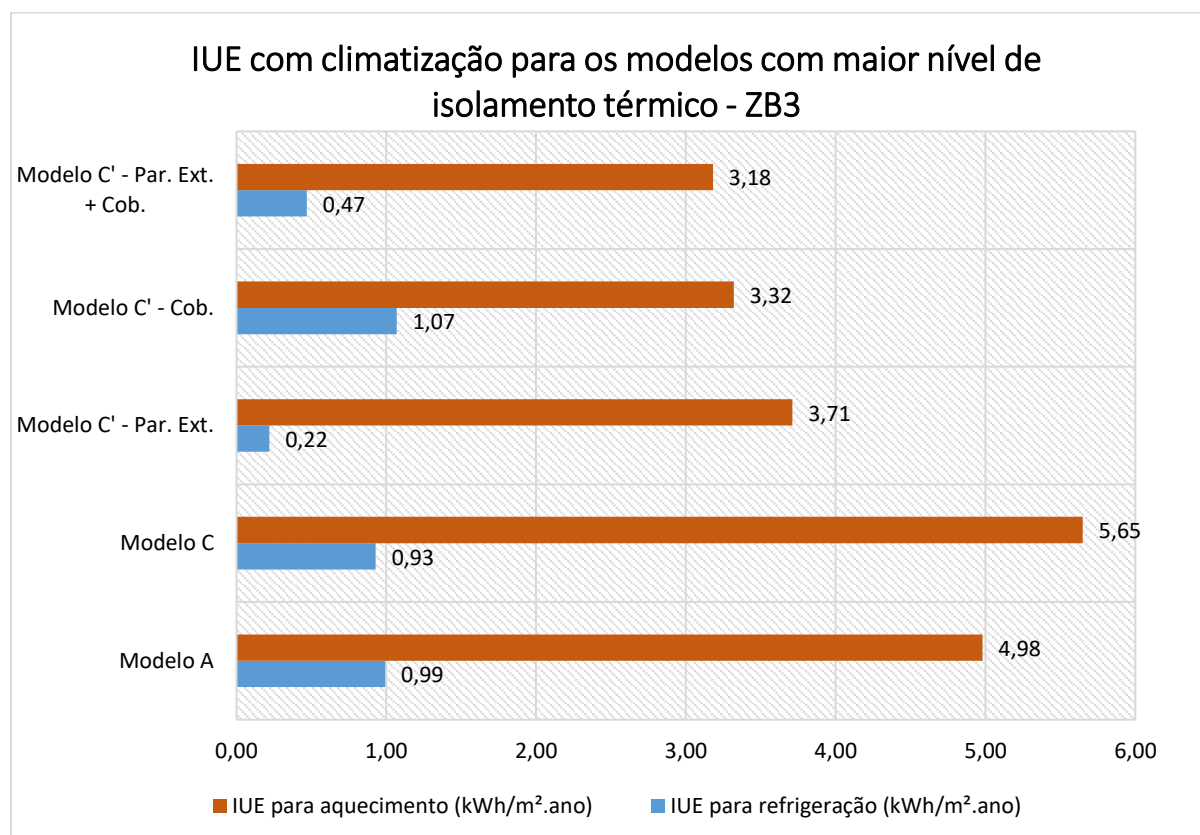


Figura 75 – Resultados de IUE para os modelos com maior nível de isolamento térmico na ZB3 (A, C e C').

Para os modelos com menor nível de isolamento térmico na ZB3 (Figura 76), mais uma vez, assim como visto para a ZB1 e ZB2, os resultados com a aplicação dos PCMs implicaram em reduções da IUE para aquecimento e refrigeração em relação aos modelos originais em LSF (C) e alvenaria cerâmica (A). Com a necessidade para aquecimento mais uma vez sendo o ponto mais influente dentre os eixos de avaliação, observa-se que a estratégia de aplicação dos PCMs de forma conjunta (paredes externas + cobertura) apresentou os melhores resultados, comportamento este que também foi percebido nas intensidades para refrigeração. A partir dos valores somados de IUE, a melhor estratégia de aplicação dos PCMs apresenta uma redução de IUE superior a 50% em relação ao modelo em alvenaria cerâmica (A), assim como visto para as demais ZBs.

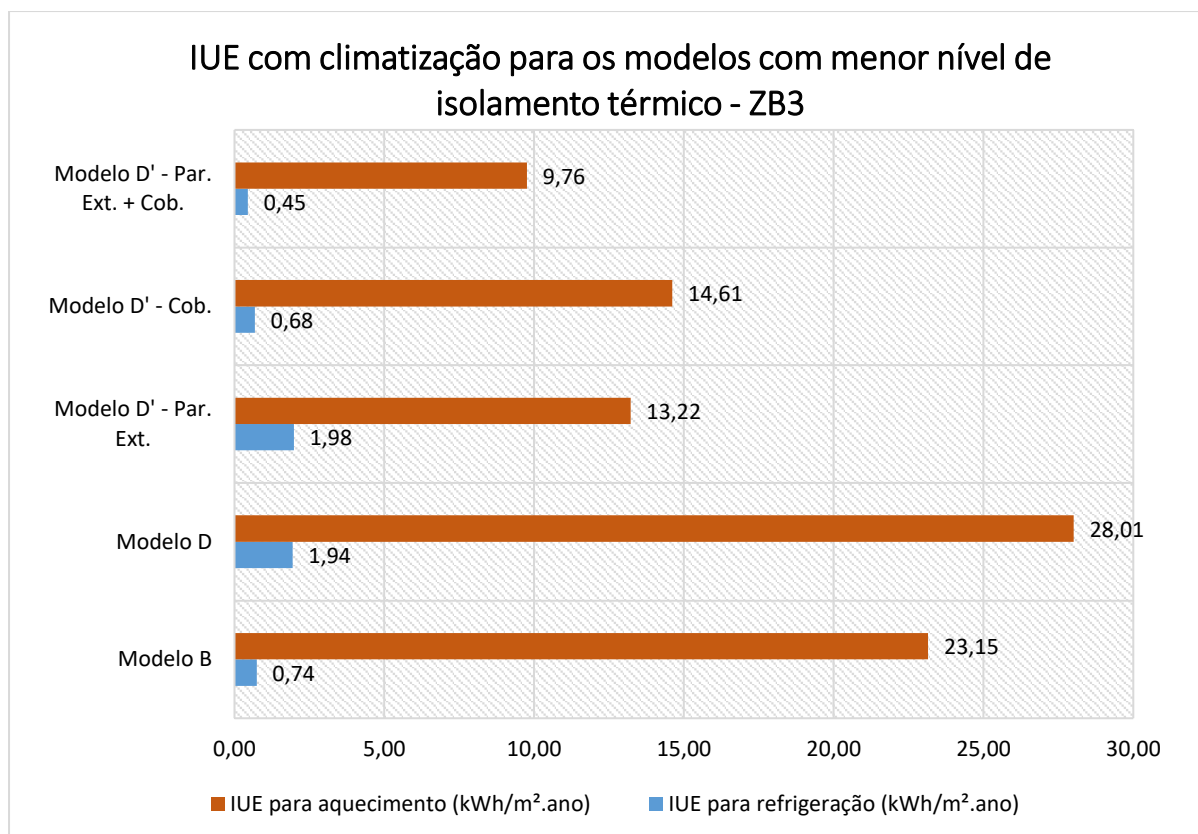


Figura 76 – Resultados de IUE para os modelos com menor nível de isolamento térmico na ZB3 (B, D e D').

O resultado das 18 avaliações realizadas quanto à aplicação dos PCMs nos três climas selecionados como recorte de avaliação destaca positivamente o papel deste componente construtivo de forma micro encapsulada nos revestimentos internos das faces externas, frente aos dois envelopes estabelecidos inicialmente em LSF e alvenaria cerâmica, modelos C e A, respectivamente.

A partir dos resultados analisados acima é possível concluir algumas condições macro acerca das avaliações realizadas:

- Os melhores contextos de aplicação dos PCMs foram mais impactantes nas reduções energéticas com climatização na Zona Bioclimática 3 para o envelope com menor nível de isolamento térmico e na Zona Bioclimática 1 para o envelope com maior isolamento térmico. Estes dados mostram que, tanto no cenário de avaliação menos crítico para o período frio considerando um envelope com menor nível de isolamento (ZB3), quanto em uma condição mais rigorosa nos períodos frios considerando um envelope com maior nível de isolamento térmico, o papel do PCM como instrumento regulatório das condições internas se mostrou efetivo, em especial

nas reduções energéticas com aquecimento, principal demanda observada nas avaliações;

- Quanto às reduções percentuais das necessidades energéticas da habitação após a aplicação dos PCMs, observa-se que os cenários não tão isolados termicamente foram mais impactados positivamente do que os cenários com maior nível de isolamento térmico, ainda que ambos tenham apresentado reduções energéticas com climatização entre 26 e 65% em todos os cenários da avaliação. Neste mesmo sentido, o isolante capacitivo se mostrou um importante elemento na composição dos fechamentos, não apenas nos casos com menor isolamento térmico onde ele foi mais efetivo, mas também nos modelos mais isolados termicamente, destacando a importância da capacidade térmica das paredes externas e cobertura nos climas das ZBs 1, 2 e 3.

- A inclusão dos PCMs nos modelos com composições leves tornou as edificações mais eficientes energeticamente do que as composições iniciais testadas com alvenaria cerâmica (maior capacidade térmica) em todos os casos, independentemente do nível de isolamento térmico. Este ponto destaca o papel positivo deste composto como um elemento de absorção e liberação do calor latente frente ao que a própria alvenaria cerâmica realiza durante o fenômeno da inércia térmica. De qualquer modo, é importante frisar que o isolante capacitivo nas condições testadas por este trabalho não apresentou o mesmo impacto que o isolante resistivo nas reduções energéticas, ainda que a atuação conjunta destes dois tipos de isolante tenha proporcionado as melhores condições energéticas gerais identificadas pelo trabalho.

5. CONCLUSÕES

A partir do objetivo de verificação do impacto da utilização de PCMs como elementos regulatórios para inércia térmica nas paredes externas e cobertura de uma edificação de composição leve em LSF nas ZBs 1, 2 e 3, os resultados apresentados na avaliação proposta por este trabalho mostram que a aplicação dos PCMs como elementos capacitivos em fechamentos leves contribuiu com a redução das necessidades energéticas da habitação estudada. Quanto aos objetivos específicos, o PCM parafínico micro encapsulado recomendado para prática da construção civil se mostrou eficaz nas proporções de aplicação de 20% da composição do revestimento interno apontada na literatura, apresentando resultados de redução da IUE de até 63,09% em relação ao modelo base. Da mesma forma, as análises com o algoritmo evolutivo multiobjetivo NSGA-II proporcionaram a verificação de múltiplas combinações PCMs até a identificação dos cenários ótimos discutidos nos resultados.

Com relação às estratégias de otimização, a avaliação evolutiva multiobjetivo como instrumento para identificação dos PCMs otimizados permitiu com que fosse possível recortar as melhores soluções de PCMs em um cenário de potenciais 900 mil simulações (18 avaliações x 100 gerações x 500 indivíduos) frente à uma incalculável explosão combinatória dado os limites das 14 variáveis consideradas com cinco casas decimais em ponto flutuante.

Quanto ao papel do PCM como isolante capacitivo nas análises, os resultados mostram que estes materiais podem ser importantes em localidades com características climáticas análogas as zonas bioclimáticas brasileiras 1, 2 e 3, pensando em reduzir as demandas com climatização. Ainda, o PCM contribuiu com a regulação das condições internas de temperatura nestas localidades, visto as reduções energéticas observadas nos cenários com ventilação híbrida controlada pelo conforto adaptativo da ASHRAE 55 com 80% de aceitabilidade.

Para os modelos com maior nível de isolamento térmico, assim como previamente apontado pela literatura para outros contextos climáticos, o papel capacitivo do PCM em um fechamento leve contribuiu para melhoria das condições energéticas da habitação, atuando também no processo regulatório das temperaturas internas. Da mesma forma, como observado na revisão de literatura, os resultados obtidos neste trabalho destacam a possibilidade de comum ocorrência destes dois

isolantes (térmico e capacitivo) na contribuição de um melhor nível de desempenho energético da edificação nas ZBs 1, 2 e 3, ainda que conforme apontado pelas simulações da avaliação inicial, o isolamento térmico tenha impactado de forma mais enfática nas condições de IUE da habitação.

Como limitações deste trabalho de dissertação é possível destacar a ausência de uma análise econômica sobre os custos atrelados a aplicação dos PCM na edificação avaliada, a avaliação do papel dos PCMs em climas (em especial os predominantemente quentes) bem como a avaliação de outras tecnologias de PCM para contrastar com as avaliações realizadas com a tecnologia considerada. Estes três pontos estão sendo considerados como potenciais trabalhos futuros para a sequência deste estudo.

Por fim, salienta-se que este trabalho se posiciona como uma das discussões iniciais sobre a aplicação de PCMs em fechamentos edificados no contexto do sul do Brasil, de modo que as soluções e considerações aqui apresentadas buscaram contribuir com a ampliação da discussão sobre esta tecnologia construtiva e os seus potenciais desdobramentos em habitações no contexto nacional.

Referências

- ABNT. **NBR 15220** – Desempenho térmico de edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, v.7, 2005.
- ABNT. **NBR 15220** – Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, v.7, 2005.
- ABNT. **NBR 15575** – Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos– Partes 1–6. Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas, v.2, 2013.
- ABNT. **NBR 15575** – Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos– Partes 1–6. Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas, v.1, 2021.
- ALAWADHI, E. M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 351-357, 2008.
- AN-NAGGAR, A. S.; IBRAHIM, M. A.; KHALIL, E. E. Energy performance simulation in residential buildings. **Procedia Engineering**, v.205, p.4187–4194, 2017.
- ASHRAE. **Standard 55 — Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. ASHRAE, Atlanta, 2013.
- ATHIENTIS, A. LIU, C.; HAWES, D.; BANU, D.; FELDMAN, D. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. **Building and environment**, v.32, n.5, p.405– 410, 1997.
- BAGHERI-ESFEH, H.; SAFIKHANI, H.; MOTAHAR, S. Multi-objective optimization of cooling and heating loads in residential buildings integrated with phase change materials using the artificial neural network and genetic algorithm. **Journal of Energy Storage**, v. 32, p. 101772, 2020.
- BARBOSA, A. M.; RIBEIRO, L. de C.; ARANTES, J. M. de O. Algoritmo genético multiobjetivo: Sistema adaptativo com elitismo. 9ª Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications, **Anais...**, v. 2, p. 16, 2010.
- BISWAS, K.; SHUKLA, Y.; DESJARLAIS, A.; RAWAL, R. Thermal characterization of full-scale PCM products and numerical simulations, including hysteresis, to evaluate energy impacts in an envelope application. **Applied Thermal Engineering**, v.138, p.501–512, 2018.

BLANK, J.; DEB, K. pymoo: Multi-objective optimization in python. **IEEE Access**, v. 8, p. 89497-89509, 2020.

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, p. 41-65, 2021.

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, p.283–294, 2017.

BRITO, A. C. d.; AKUTSU, M.; SALLES, E. M.; CASTRO, G. M. Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, v.17, n.1, p.125–145, 2017.

BRITO, A. D. C. **Contribuição da inércia térmica na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo**. 2015. 241p. Tese (Doutorado em Engenharia) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CABEZA, L. F; CASTELL, A.; BARRENECHE, C. D.; DE GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, A. I. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, n.3, p.1675–1695, 2011.

CAI, R.; SUN, Z.; YU, H.; MENG, E.; WANG, J.; DAI, M. Review on optimization of phase change parameters in phase change material building envelopes. **Journal of Building Engineering**, p. 101979, 2020.

CALAFIORE, G.; TOMMOLILLO, C.; NOVARA, C.; FABRIZIO, E. APSEplus: a MATLAB toolbox for parametric energy simulation of reference buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE AND COMPUTER APPLICATIONS, 6., 2017. p.267–271.

CASCONE, Y.; CAPOZZOLI, A.; PERINO, M. Optimization analysis of PCM-enhanced opaque building envelope components for the energy retrofitting of office buildings in Mediterranean climates. **Applied energy**, v. 211, p. 929-953, 2018.

CASTILHO, A. **Simulação numérica do efeito de PCM no conforto térmico de edifícios**. 2014. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil.

CHATURVEDI, S.; RAJASEKAR, E.; NATARAJAN, S. Multi-objective building design optimization under operational uncertainties using the NSGA II algorithm. **Buildings**, v. 10, n. 5, p. 88, 2020.

CHEUNG, P. B. **Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo**. 2004. 268p. Tese (Doutorado em Engenharia Hídrica) — Universidade de São Paulo, São Carlos.

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

COSTA, J. A. C. **Formulação de materiais com mudança de fase por adição combinada de vermiculita, diatomita e parafina aplicados em argamassas cimentícias**. 2019. 113p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

CRAWLEY, D. B. Building energy tools directory. **Proceedings of Building Simulation**, v.1, p.63–64, 1997.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; PEDERSEN, C. O.; WINKELMANN, F. C. Energy plus: energy simulation program. **ASHRAE journal**, v.42, n.4, p.49–56, 2000.

CUNHA, S.; AGUIAR, J.; FERREIRA, V.; TADEU, A. Argamassas com incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM): Caracterização física, mecânica e durabilidade. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v.20, n.1, p.245–261, 2015.

CUNHA, S.; AGUIAR, J.; TADEU, A. Comportamento térmico de argamassas com incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM) no clima português. **Materia (Rio de Janeiro)**, v.22, n.4, 2017.

DAHLAN, N.; ARIS, A. Optimizing Energy Baseline for Medium Size Office Using Hybrid EnergyPlus-Evolutionary Programming (EP). **Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)**, v.10, n.1-4, p.59–65, 2018.

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

DALBEM, R.; CUNHA, E. G. D.; VICENTE, R.; FIGUEIREDO, A. J.; SILVA, A. C. S. B. D. Discussão do desempenho da envoltória de uma passive house adaptada à zona bioclimática 2 em acordo com o RTQ-R. **Ambiente Construído**, v.17, n.1, p.201–222, 2017.

DALBEM, R.; FREITAS, J. M. R. de; CUNHA, E. G. da. Conceito Passivhaus aplicado ao clima brasileiro. **Revista de Arquitetura IMED**, v.4, n.1, p.26–36, 2015.

DANIEL, W. W.; CROSS, C. L. **Biostatistics: a foundation for analysis in the health sciences**. Wiley, 2018.

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

DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE transactions on evolutionary computation**, v.6, n.2, p.182–197, 2002.

DELGARM, N.; SAJADI, B.; KOWSARY, F.; DELGARM, S. 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, 2016.

DERVIŞ, H. Bibliometric analysis using Bibliometrix an R Package. **Journal of Scientometric Research**, v. 8, n. 3, p. 156-160, 2019.

DOE, E. **9.0.1 EnergyPlus input/output references**. US Department of Energy, 2018.

DORNELLES, K.; RORIZ, M. Thermal inertia, comfort and energy consumption in build-ings: a case study in Sao Paulo state- Brazil. **International Journal for housing science and its applications**, v.28, n.2, p.153–162, 2004.

EMSLEY, J. **Nature's building blocks: an AZ guide to the elements**. Oxford University Press, 2011.

EPE. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**: Relatório Final, ano base 2018. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2019.

FAURE, G.; CHRISTIAANSE, T.; EVINS, R.; BAASCH, G. M. BESOS: a Collaborative Building and Energy Simulation Platform. In: Proceedings of the 6th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation. **Anais...**, p. 350-351. 2019.

FIGUEIREDO, A. J. P. de. **Energy efficiency and comfort strategies for Southern European climate: Optimization of passive housing and PCM solutions**. 2016. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Aveiro, Aveiro.

FIGUEIREDO, A.; KÄMPF, J.; VICENTE, R. Passive house optimization for Portugal: Overheating evaluation and energy performance. **Energy and Buildings**, v.118, p.181–196, 2016.

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

GASTINES, M. de; 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.

GAVIRA, M. de O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. 163 f. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, n.72, p.6–15, 2007.

GOMES, A. P. **Método de Avaliação do desempenho térmico de edifícios comerciais e residenciais em light steel framing**. 147 f. 2012. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

GRANJA, A. D. **TRANSMISSÃO DE CALOR EM REGIME PERIÓDICO: EFEITO DA INÉRCIA TÉRMICA EM FECHAMENTOS OPACOS**. 2002. 132p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2002.

HADJIEVA, M.; STOYKOV, R.; FILIPOVA, T. Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage. **Renewable Energy**, v.19, n.1-2, p.111–115, 2000.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**, vol. 2: gravitação, ondas e termodinâmica. Rio de Janeiro: LTC, v.8, 2009.

HARVEY, D. **Energy and the new reality 1: Energy efficiency and the demand for energy services**. Routledge, 2010.

HICHEM, N.; NOUREDDINE, S.; NADIA, S.; DJAMILA, D. Experimental and numerical study of a usual brick filled with PCM to improve the thermal inertia of buildings. **Energy Procedia**, v. 36, p. 766-775, 2013.

HUANG, Y. J. et al. Representative Layer-by-Layer Descriptions for Fenestration Systems with Specified Bulk Properties such as U-Factor and Solar Heat Gain Coefficient. **ASHRAE Transactions**, v.125, 2019.

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, p.A4014007, 2015.

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R**. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro, 2010.

- JEONG, S. G.; CHUNG, O.; YU, S.; KIM, S.; KIM, S. Improvement of the thermal properties of Bio-based PCM using exfoliated graphite nanoplatelets. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v.117, p.87–92, 2013.
- KITCHENHAM, B.; BRERETON, O. P.; BUDGEN, D.; TURNER, M.; BAILEY, J.; LINKMAN, S. Systematic literature reviews in software engineering – a systematic literature review. **Information and software technology**, v. 51, n. 1, p. 7-15, 2009.
- KISHORE, R. A.; BIANCHI, M. V.; BOOTEN, C.; VIDAL, J.; JACKSON, R. Optimizing PCM-integrated walls for potential energy savings in US Buildings. **Energy and Buildings**, v. 226, p. 110355, 2020.
- KONG, X; LU, S.; HUANG, J.; CAI, Z.; WEI, S. Experimental research on the use of phase change materials in perforated brick rooms for cooling storage. **Energy and Buildings**, v.62, p.597–604, 2013.
- KUZNIK, F.; LOPEZ, J. P. A.; BAILLIS, D.; JOHANNES, K. Phase change material wall optimization for heating using metamodeling. **Energy and Buildings**, v. 106, p. 216-224, 2015.
- LAMBERTS, R; GHISI, E.; PAPST, A. L. **Desempenho térmico de edificações, 7ª Edição**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética de Edificações (LABEEE), 2016.
- LA ROSA, A. D.; RECCA, A.; GAGLIANO, A.; SUMMERSCALES, J.; LATTERI, A.; COZZO, G.; CICALA, G. Environmental impacts and thermal insulation performance of innovative composite solutions for building applications. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 406-414, 2014.
- LAURENT PILON'S, R. G. Thermophysical properties of commercially available PCMs near room temperature. Disponível em: < <https://www.seas.ucla.edu/~pilon/Publications/DataDownloads/ThermophysicalPropertiesPCMnearRT.xlsx>>. Acesso em: 25 de out. de 2021.
- LAZARO, A.; DOLADO, P.; MARÍN, J. M.; ZALBA, B. PCM–air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: experimental results of two real-scale prototypes. **Energy Conversion and Management**, v.50, n.3, p.439–443, 2009.
- LEITZKE, R. K.; DA CUNHA, E. G.; DA SILVA, O. M.; DA SILVA, A. C. S. B.; BELTRAME, C. M. Avaliação de dispositivos de proteção solar fixos e automatizados para edifício residencial. **PARC Pesquisa Em Arquitetura E Construção**, v.8, n.1, p.59–72, 2017.
- LEITZKE, R. K.; BELTRAME, C. M.; DE FREITAS, J. R.; SEIXAS, J. N.; DOS SANTOS MACIEL, T., DA CUNHA, E. G.; RHEINGANTZ, P. A. Optimization of the

Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: The Pelotas. epw Case. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v.12, p.741–756, 2018.

LEITZKE, R. K.; CUNHA, E. G. da; MACIEL, T. dos S.; DEMBINSKI, F. M. D.; PRESTES, G. B. Algoritmo para análise evolutiva multiobjetivo em simulações termoenergéticas. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 16, n. 1, p. 24-42, 2021.

LI, M. A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity. **Applied energy**, v.106, p.25–30, 2013.

LI, W.; WANG, R.; ZHANG, T.; MING, M.; LI, K. Reinvestigation of evolutionary many-objective optimization: Focus on the Pareto knee front. **Information Sciences**, v. 522, p. 193-213, 2020.

LINDEMANN, A.; SCHMIDT, J.; TODTE, M.; ZEUNER, T. Thermal analytical investigations of the magnesium alloys AM 60 and AZ 91 including the melting range. **Thermochimica acta**, v.382, n.1-2, p.269–275, 2002.

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, p. 509-529, 2020.

LIU, Y.; WANG, M.; CUI, H.; YANG, L.; LIU, J. Micro-/macro-level optimization of phase change material panel in building envelope. **Energy**, v. 195, p. 116932, 2020.

MACIEL, T. dos S.; LEITZKE, R. K.; DUARTE, C. D. M.; SCHRAMM, F. K.; CUNHA, E. G. da. Otimização termoenergética de uma edificação escolar: discussão sobre o desempenho de quatro algoritmos evolutivos multiobjetivo. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 221-246, 2021.

MANSOUR, M. R. **Algoritmo para obtenção de planos de restabelecimento para sistemas de distribuição de grande porte**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Universidade de São Paulo.

MARKARIAN, E.; FAZELPOUR, F. Multi-objective optimization of energy performance of a building considering different configurations and types of PCM. **Solar Energy**, v. 191, p. 481-496, 2019.

MARQUES, T. H. T. **Influência das propriedades térmicas da envolvente opaca no desempenho de habitações de interesse social em São Carlos, SP**. 2013. 145p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MAVRIGIANNAKI, A.; AMPATZI, E. Latent heat storage in building elements: A systematic review on properties and contextual performance factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.60, p.852–866, 2016.

MEHLING, H.; CABEZA, L. F. Heat and cold storage with PCM. **Springer**, 2008. v.308.

MEMON, S. A. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v.31, p.870–906, 2014.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J. A. B. da. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, v.5, n.4, p.47–68, 2005.

NIMLYAT, P.; DASSAH, E.; ALLU, E. Computer simulations in buildings: implications for building energy performance. **Computer**, v.4, n.03, 2014.

NOGUEIRA, J. R. d. S.; CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C. Desempenho de painel de vedação vertical externa em Light Steel Framing composto por placas de madeira mineralizada. **Ambiente Construído**, v.18, n.3, p.289–307, 2018.

OHTA, Y.; SATO, H. Evolutionary multi-objective air-conditioning schedule optimization for office buildings. In: GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE COMPANION, 2018. p.296–297.

OLIVEIRA, D. D. S. **Identificação do tipo e quantidade de PCM adequado ao clima Português**. 2012b. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga.

OLIVEIRA GAVIRA, M. de. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. 2003. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

OLIVEIRA, L. **Avaliação dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos da NBR 15220-3, para habitações de interesse social, da Zona Bioclimática 2**. 2012a. 120p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

OLIVIERI, H.; BARBOSA, I. C. A., ROCHA, A. C. D., GRANJA, A. D., & FONTANINI, P. S. P. A utilização de novos sistemas construtivos para a redução no uso de insumos nos canteiros de obras: Light Steel Framing. **Ambiente Construído**, v.17, n.4, p.45–60, 2017.

CLIMATE ONEBUILDING. Repository of free climate data for building performance simulation. Disponível em: < <http://climate.onebuilding.org/default.html>>. Acesso em: 25 de out. de 2021.

PAPST, A. L. **USO DE INÉRCIA TÉRMICA NO CLIMA SUBTROPICAL: ESTUDO DE CASO EM FLORIANÓPOLIS – SC**. 1999. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PARK, B.; SRUBAR III, W. V.; KRARTI, M. **Energy performance analysis of variable thermal resistance envelopes in residential buildings**. Energy and Buildings, [S.l.], v.103, p.317–325, 2015.

PEGDEN, C. D.; SADOWSKI, R. P.; SHANNON, R. E. **Introduction to simulation using SIMAN**. McGraw-Hill, Inc., 1995.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar (2a edição)**. São José dos Campos: Inpe, 2017.

PERKINS, M. Z. The Utilization of Light Gauge Steel in Residential Construction on the State of Utah. **Brigham Young University**, 2009.

PHILIP, S.; TRAN, T.; TANJUATCO, L. Eppy: scripting language for E+. Disponível em: <<https://github.com/santoshphilip/eppy>>. Acesso em: 25 de fev. de 2020.

PONS, V.; STANESCU, G. Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil. **PARC Pesquisa Em Arquitetura E Construção**, v.8, n.2, p.127–140, 2017.

RAHIMPOUR, Z.; FACCANI, A.; AZUATALAM, D.; CHAPMAN, A.; VERBIČ, G. Using thermal inertia of buildings with phase change material for demand response. **Energy Procedia**, v. 121, p. 102-109, 2017.

RAMAIAH, G. B.; PARTHASARATHY, R. K. Application of kulkote temperature regulating phase change material on merino wool fiber and pashmina wool felt material. In: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, 2019. **Anais...**, 2019. v.577, n.1, p.012114.

RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. **Journal of statistical modeling and analytics**, v.2, n.1, p.21–33, 2011.

RODRIGUES, W. C. **Metodologia científica**. Faetec/IST. Paracambi, p. 2-20, 2007.

RUBITHERM, G. PHASE CHANGE MATERIAL RT-LINE (HIGH THERMAL CAPACITICY). Disponível em: <<https://www.rubitherm.eu/en/>>. Acesso em: 26 de fev. de 2020.

SANTOS, J. C. P. dos; KOTHE, K. K.; MOHAMED, G.; VAGHETTI, M. A. O.; RIZZATTI, E. Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para

a Zona Bioclimática 2 brasileira. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, p. 1030-1047, 2015.

SAWIN, J.; RUTOVITZ, J.; SVERRISSON, F. Renewables Global Status Report 2018. **France: Renewables Global Status Report**, 2018.

SILVA, A. S. **Desenvolvimento de um método para avaliação do desempenho térmico e energético de edificações aplicando análise de incertezas e sensibilidade**. 2016. 459p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, N. T. D. F. da. **Incorporação de materiais de mudança de fases em materiais de construção**. 2009. 217p. Dissertação (Mestrado em Materiais, Reabilitação e Sustentabilidade das Construções) — Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga.

SINAT. **Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço zincado conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Steel Framing”)**. Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos, Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT), Brasília, v.2, 2016.

SOARES, M. M. **Avaliação dos Parâmetros de Desempenho Térmico da NBR 15575/2013: habitações de interesse social na zona bioclimática 2**. 2014. 159p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

SOARES, N.; SANTOS, P.; GERVÁSIO, H.; COSTA, J. J.; DA SILVA, L. S. Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.78, p.194–209, 2017.

SONG, M; NIU, F.; MAO, N.; HU, Y.; DENG, S. Review on building energy performance improvement using phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 776-793, 2018.

SOUSA SOBRINHO, P. de. **Algoritmos genéticos canônico e elitista: uma abordagem comparativa**. 2014. 59p. Dissertação (Mestrado em Probabilidade e Estatística) — Departamento de Modelagem Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

UE, C. E. Recomendação 2016/1318. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016H1318&from=EN>>. Acesso em: 10 de fev. de 2020.

VELJKOVIC, M.; JOHANSSON, B. **Light steel framing for residential buildings. Thin-walled structures**, [S.l.], v.44, n.12, p.1272–1279, 2006.

VICENTE, R.; SILVA, T. Brick masonry walls with PCM macro-capsules: an experimental approach. **Applied Thermal Engineering**, v.67, n.1-2, p.24–34, 2014.

VIKHAR, P. A. Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GLOBAL TRENDS IN SIGNAL PROCESSING, INFORMATION COMPUTING AND COMMUNICATION (ICGTSPICC), 2016., 2016. **Anais...**, 2016. p.261–265.

VUKADINOVIĆ, A.; RADOSAVLJEVIĆ, J.; ĐORĐEVIĆ, A.; PROTIĆ, M.; PETROVIĆ, N. multi-objective optimization of energy performance for a detached residential building with a sunspace using the NSGA-II genetic algorithm. **Solar Energy**, v. 224, p. 1426-1444, 2021.

WI, S.; CHANG, S. J.; KIM, S. Improvement of thermal inertia effect in buildings using shape stabilized PCM wallboard based on the enthalpy-temperature function. **Sustainable Cities and Society**, v. 56, p. 102067, 2020.

WIJESURIYA, S.; BRANDT, M.; TABARES-VELASCO, P. C. Parametric analysis of a residential building with phase change material (PCM)-enhanced drywall, precooling, and variable electric rates in a hot and dry climate. **Applied Energy**, v.222, p.497–514, 2018.

YANG, C.; SUSMAN, G.; DOWSON, M. EnergyPlus model of novel PCM cooling system validated with installed system data. **Proceedings of SimBuild**, v.6, n.1, 2016.

YU, S.; CUI, Y.; XU, X.; FENG, G. Impact of civil envelope on energy consumption based on EnergyPlus. **Procedia Engineering**, v.121, p.1528–1534, 2015.

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.

ZHANG, Y.; KOROLIJA, I. Performing complex parametric simulations with jEPlus. In: SET2010-9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES, 2010. **Anais...**, 2010. p.24–27.

ZHU, N.; MA, Z.; WANG, S. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: a review. **Energy Conversion and Management**, v.50, n.12, p.3169–3181, 2009.

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

ZÖLD, A.; SZOKOLAY, S. V. Thermal insulation. **PLEA, Passive and Low Energy Architecture International**, 1997.

Anexos

ANEXO I – Exemplo de um datasheet disponibilizado pela empresa RubiTherm GmbH

Data sheet



RT28HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

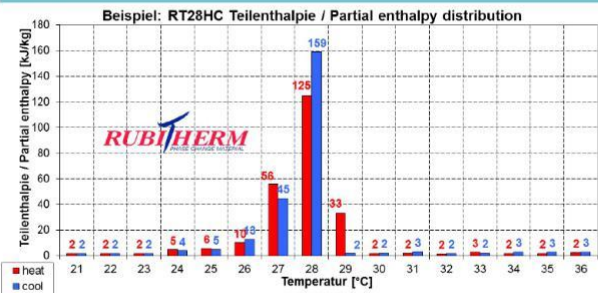
- Properties for RT-line:
- high thermal energy storage capacity
 - heat storage and release take place at relatively constant temperatures
 - no supercooling effect, chemically inert
 - long life product, with stable performance through the phase change cycles
 - melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area	Typical Values	
	27-29	[°C]
	main peak: 28	
Congeeing area	29-27	[°C]
	main peak: 27	
Heat storage capacity ± 7,5%	250	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 21°C to 36°C.	70	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at 15 °C	0,88	[kg/l]
Density liquid at 40 °C	0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point	165	[°C]
Max. operation temperature	50	[°C]



GHS08
H373: May be fatal if swallowed
and enters respiratory tract.



Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
Tel: +49 (30) 7109622-0
Fax: +49 (30) 7109622-22
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 06.08.2018

*Measured with 3-layer-calorimeter.