

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**PERFORMANCE TERMOENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO COM MATERIAIS
DE MUDANÇA DE FASE SOB PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

por

Lorenzo Olivo Filippini

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, abril de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

PERFORMANCE TERMOENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO COM MATERIAIS DE
MUDANÇA DE FASE SOB PROJEÇÕES DE MUDAÇAS CLIMÁTICAS

por

Lorenzo Olivo Filippini

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof^a. Dr^a. Letícia Jenisch Rodrigues

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Schramm

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a. Letícia Jenisch Rodrigues – DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Marcelo Schramm – Centro de Engenharias / UFPel

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin – DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Maurício Carvalho Ayres Torres – FAU / UFRGS

Porto Alegre, 19 de abril de 2023.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, *Kátia Filippini* e *Roberto Filippini*, pelo apoio, suporte e amor incondicionais durante toda a minha existência. Aos meus tios, *Sandra Filippini* e *Antônio Filippini*, e às minhas primas e amigas, *Bruna Filippini*, *Gabriela Filippini*, *Isabella Filippini*, *Giovana Filippini* e *Andréia*, que, de braços abertos, me receberam e me ajudaram inúmeras vezes durante meus primeiros momentos em Porto Alegre. Aos meus padrinhos, em Florianópolis, *Denise Mazzucco* e *Flávio Mazzucco* e meus primos *Luisa Mazzucco* e *Bruno Mazzucco*, que sempre me receberam e ajudaram. Agradeço aos tantos outros membros da minha família pelo apoio dado durante a graduação.

Ao meu amigo de longa data, *Pedro Poletto*, quem conheço desde que nasci, e com quem pude dividir boa parte da minha vivência na capital; aos seus pais, *Carla Poletto* e *Vanderlei Poletto*, também por todo o suporte dado em Porto Alegre e em outros momentos. Agradeço meus amigos da serra gaúcha, em especial, *André Dória* e *Nicholas Aita* e suas famílias, com quem cresci e compartilhei boas memórias nos últimos anos em Caxias do Sul. Não posso deixar de agradecer meus conterrâneos em Porto Alegre, alguns também do ensino médio: *Rubens Rech*, *Rafael Chies*, *Rafael Basso*, *Pedro Prativiera*, *Isadora Martini*, *Louise Ballico* e os demais, com quem compartilhei várias caronas de ida e volta da capital para a serra, especialmente no período pré-pandemia, além de experiências novas vividas somente em Porto Alegre.

Aos meus grandes amigos de curso: *Felipe Selmo*, *Luisa Dahlem*, *Matheus Haas* e *Elisa Gajardo*, com quem compartilhei ideias, piadas e memórias, e, praticamente, todas as disciplinas da universidade, além de entrarmos juntos na UFRGS, em 2017, e estarmos saindo da graduação, também juntos, agora em 2023; também agradeço ao *Felipe Martins* e ao *Eduardo Finck* pela parceria nos últimos semestres do curso. Agradeço aos amigos que entraram comigo na engenharia, mas, por qualquer motivo, não estamos mais na mesma etapa (ou nem mais no mesmo curso): *Felipe Ranzan*, *Leonardo Penha*, *Matheus Schebella*, *Gabriela Copetti*, *Aline Lorenzini*, *Guilherme Winter* e *Elias Martini*, também pela parceria e bons momentos durante todos esses anos.

Aos antigos amigos de Renova Jr., especialmente aqueles com quem dividi a diretoria e com quem mantive relações de amizade: *Bernardo Letsch*, *Guilherme Dal Ri*, *Danton Moura*, *Marcos Braz*, *Lucas de Borba*, e tantos outros, que toparam encarar o desafio, errar e crescer juntos em prol de um objetivo em comum. Agradeço todos os meus colegas de estágio, em especial, os já citados *Felipe Ranzan*, *Marcos Braz* e *Lucas de Borba*, *Mariana Müller*, *Guilherme Ferlin*, *Luis Alberti*, *Diego Pietzsch* e muitos outros, de quem pude me aproximar e aprender muito no ano passado, e, mesmo em um período curto, criar boas memórias.

Aos meus professores orientadores, *Letícia Jenisch Rodrigues* e *Marcelo Schramm*, por todo acompanhamento e parceria durante a construção deste trabalho, que, em vários momentos, excederam a orientação simplesmente acadêmica. Agradeço, também, ao professor *Maurício Torres* e a doutoranda *Gabriela Sartori*, que, sem seus ensinamentos durante a iniciação científica, ainda em 2019, o presente trabalho não seria possível. Agradeço também a todos os professores do curso que me desafiaram e me estimularam a crescer, me tornando uma pessoa e um profissional melhor. Agradeço aos servidores da UFRGS por manterem um ambiente adequado para a realização de uma das melhores universidades do país, apesar das dificuldades. Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul por ser o plano de fundo principal de todas as experiências vividas durante a graduação, e por fornecer um ensino gratuito e de excelência.

Agradeço aos mantenedores das ferramentas Sci-Hub, LibGen e MORE UFSC, mesmo que completamente anônimos, por fomentarem o acesso à produção científica de forma gratuita à toda a comunidade acadêmica.

A todos aqueles que estiveram presentes no decorrer dessa epopeia.

FILIPPINI, L. O. **Performance Termoenergética De Uma Edificação Com Materiais De Mudança De Fase Sob Projeções De Mudanças Climáticas.** 2023. 35 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

O presente trabalho investiga a performance térmica e energética de uma edificação com diferentes composições de envoltória e sua resposta à cenários climáticos futuros, considerando projeções de mudanças climáticas. Através de simulações computacionais utilizando o *software EnergyPlus*, a envoltória da edificação é alterada aplicando isolante térmico resistivo, material de mudança de fase ou nenhum material isolante e simulada nas zonas bioclimáticas 1 e 8, conforme Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT); a edificação, do tipo *light framing*, é construída consoante diretrizes normativas da *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE). O material de mudança de fase utilizado, SP24E, possui temperaturas de operação condizentes com os *setpoints* do sistema de climatização modelado. Empregando a ferramenta *Climate Change World Weather File Generator* (*CCWorldWeatherGen*), os comportamentos das mudanças climáticas para os anos representativos de 2050 e 2080 são incorporados aos arquivos climáticos através da técnica de *downscaling* estatístico de *morphing*, considerando o cenário de emissões A2 (médio-alto) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Os resultados demonstram que, em climas amenos, como Curitiba, o material de mudança de fase mostra-se mais eficiente do que o isolante térmico resistivo sob cenários de mudanças climáticas, reduzindo a *Energy Use Intensity* (EUI) anual projetada para 2050 em 8,2% e, para 2080, em 10%. Para o Rio de Janeiro, nas projeções climáticas, a envoltória com material de mudança de fase resulta em maiores EUI, registrando 12,1%, em 2050, e 20,7%, em 2080, a mais do que a envoltória com isolantes térmicos resistivos.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais de Mudança de Fase (PCM), Isolantes Térmicos, Envoltória, Eficiência Energética em Edificações, Mudanças Climáticas, Climas Futuros.

FILIPPINI, L. O. **Thermoenergetic Performance of a Building with Phase Change Materials Under Climate Change Projections.** 2023. 35 pages. Monografia (Work Completion of Graduation in Energy Engineering) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

This paper investigates the thermal and energy performance of a building with different envelope compositions and its response to future climate scenarios, considering climate change projections. Through computer simulations using *EnergyPlus*, the building envelope is altered by applying resistive thermal insulation, phase change material, or no insulating material at all, and simulated in bioclimatic zones 1 and 8, according to the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT); the building, of the light framing type, is built according to *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) guidelines. The phase change material used, SP24E, has operating temperatures consistent with the setpoints of the modeled HVAC system. Employing the *Climate Change World Weather File Generator* (*CCWorldWeatherGen*) tool, climate change behaviors for the representative years 2050 and 2080 are incorporated into the climate files through the statistical downscaling technique *morphing*, considering the A2 emissions scenario (medium-high) of the *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). The results show that in mild climates, such as in Curitiba, the phase change material proves to be more efficient than the resistive thermal insulator under climate change scenarios, reducing the annual Energy Use Intensity (EUI) projected for 2050 by 8.2% and, for 2080, by 10%. For Rio de Janeiro, in the climate projections, the envelope with phase change material results in higher EUI, registering 12.1% in 2050 and 20.7% more in 2080 than the envelope with resistive thermal insulators.

KEY WORDS: Phase Change Materials (PCM), Thermal Insulation, Building Envelope, Energy Efficiency in Buildings, Climate Change, Future Climates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Regiões de operação de entalpia e temperatura de derretimento de PCM do tipo sólido-líquido.	4
Figura 3.2 - Curva de histerese térmica completa desempenhada por um material de mudança de fase.	5
Figura 3.3 - Sistema construtivo com dois nós.	5
Figura 3.4 - Discretização espacial do método de diferenças finitas unidimensional.	6
Figura 4.1 - Modelo geométrico da tipologia.	11
Figura 4.2 - Detalhes da geometria da edificação e zonas térmicas.	11
Figura 5.1 - Intensidade de Uso de Energia mensal com sistemas de AVAC em Curitiba, PR (ZB1/3A).	14
Figura 5.2 - Balanço de calor mensal através da fachada norte em Curitiba, PR (ZB1/3A).	15
Figura 5.3 - Curvas horárias de temperatura radiante média na zona térmica 3 e fluxo de calor por condução na face interna da fachada norte durante a semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).	15
Figura 5.4 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na fachada norte durante semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).	16
Figura 5.5 - Balanço de calor mensal através da fachada sul em Curitiba, PR (ZB1/3A).	17
Figura 5.6 - Curvas horárias de temperatura radiante média na zona térmica 1 e fluxo de calor por condução na face interna da fachada sul durante semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).	17
Figura 5.7 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na fachada sul durante semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).	18
Figura 5.8 - Balanço de calor mensal através da cobertura em Curitiba, PR (ZB1/3A).	18
Figura 5.9 - Curvas horárias de temperatura operativa no <i>plenum</i> e fluxo de calor por condução na face interna da cobertura durante semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).	19
Figura 5.10 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na cobertura durante semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).	19
Figura 5.11 - Intensidade do Uso de Energia mensal com sistemas de AVAC no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).	20
Figura 5.12 - Balanço de calor mensal através da fachada norte no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).	20
Figura 5.13 - Curvas horárias de temperatura radiante média na zona térmica 3 e fluxo de calor por condução na face interna da fachada norte durante a semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).	21
Figura 5.14 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na fachada norte durante semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).	21
Figura 5.15 - Balanço de calor mensal através da fachada sul no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).	22
Figura 5.16 - Curvas horárias de temperatura radiante média na zona térmica 1 e fluxo de calor por condução na face interna da fachada sul durante a semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).	22
Figura 5.17 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na fachada sul durante semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).	23
Figura 5.18 - Balanço de calor mensal através da cobertura no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).	23
Figura 5.19 - Curvas horárias de temperatura operativa no <i>plenum</i> e fluxo de calor por condução na face interna da cobertura durante a semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).	24
Figura 5.20 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na cobertura durante semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).	24
Figura AE.1 - Detalhe das construções das superfícies, fora de escala.	31

Figura AF.1 - Comportamentos das temperaturas de bulbo seco externas nos cenários climáticos simulados	32
Figura A.1 - Possíveis alternativas de macroencapsulamento de materiais de mudança de fase.....	34
Figura B.1 - Diagrama esquemático de um sistema VAV multi-zona de duto único.	34
Figura C.1 - <i>Datasheet</i> do PCM SP24E.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Transmitância térmica das superfícies construtivas.	11
Tabela 4.2 - Resistência térmica empregada em cada um dos modelos e espessura do material.	12
Tabela 5.1 - Intensidade de Uso de Energia (EUI) anual.	13
Tabela AB.1 - Transmitância térmica das superfícies construtivas sem material isolante.	30
Tabela AC.1 - Anos dos arquivos climáticos utilizados para construção do ano meteorológico típico	31
Tabela AD.1 - Dados do material SP24E.	31
Tabela AF.1 - Médias e extremos anuais de temperaturas de bulbo seco nos cenários climáticos simulados.	32
Tabela AG.1 - Coeficientes de Correlação r de Pearson entre EUI mensal e balanço de calor na envoltória.	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 - Cidades representativas selecionadas.	9
Quadro 4.2 - Arquivos climáticos base de cada cidade selecionada.	10
Quadro AA.1 - Características de PCM sólido-líquido.	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditionins Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
CCWorldWeatherGen	<i>Climate Change World Weather Generator</i>
CondFD	<i>Conduction Finite Difference</i>
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
CTF	<i>Conduction Transfer Functions</i>
DOE	<i>United States Department of Energy</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
epw	<i>Energy Plus Weather</i>
HadCM3	<i>Hadley Center Coupled Model version 3</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
PACU	<i>Packaged Air-Conditioning Unit</i>
PCM	<i>Phase Change Material</i>
RTU	<i>Rooftop Unit</i>
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
TRY	<i>Typical Reference Year</i>
VAV	Volume de Ar Variável
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
ZB	Zona Bioclimática

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de superfície [m ²]
Q_{liq}	Balanco de calor mensal através da face interna [kWh/m ²]
c_p	Calor Específico [W/kgK]
C	Capacitância térmica [W/K]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² K]
r	Coefficiente de Correlação de Pearson [-]
c	Coefficiente de Discretização [-]
a_{mf}	Coefficiente de inclinação do processo de transição de fase (materiais não puros) [-]
k	Condutividade Térmica [W/mK]
α	Difusividade Térmica [m ² /s]
Δx	Distância nodal [m]
EUI	<i>Energy Use Intensity</i> [kWh/m ²]
e	Espessura [cm]
q''	Fluxo de calor [W/m ²]
q''_{int}	Fluxo de calor horário através da face interna [W/m ²]
m	Massa de material [kg]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
Fo	Número de Fourier [-]
Δt	Passo de tempo [s]
R	Resistência Térmica [m ² K/W]
$-fin$	Subíndice referente ao estado final no processo de mudança de fase
$-ini$	Subíndice referente ao estado inicial no processo de mudança de fase
$-i+1$	Subíndice referente ao nó adjacente ao nó modelado em direção ao interior
$-i-1$	Subíndice referente ao nó adjacente ao nó modelado em direção ao exterior
$-o$	Subíndice referente ao nó externo
$-i$	Subíndice referente ao nó interno
-1	Subíndice referente ao nó na face externa da superfície

-2	Subíndice referente ao nó na face interna da superfície
$-mf$	Subíndice referente ao processo de mudança de fase
$-E$	Subíndice referente nó de interface à direita do nó modelado
$-W$	Subíndice referente nó de interface à esquerda do nó modelado
$-i$	Subíndice referente nó modelado
$\bar{j+1}$	Superíndice referente ao novo passo de tempo
\bar{j}	Superíndice referente ao passo de tempo anterior
\dot{q}	Taxa de geração de calor volumétrica [W/m ³]
T	Temperatura [°C]
T_{op}	Temperatura Operativa horária [°C]
T_{mr}	Temperatura Radiante Média horária [°C]
U	Transmitância Térmica [W/m ² K]
Δh_{mf}	Varição de entalpia específica durante mudança de fase [kJ/kg]

LISTA DE SÍMBOLOS NO PROCESSO DE *MORPHING*

Δx_m	Diferença mensal absoluta da variável climatológica (<i>shift</i>)
α_m	Fator de escala de variação parcial mensal da variável climatológica (<i>stretch</i>)
$\langle x_0 \rangle_m$	Média mensal da variável climatológica de referência
$\langle x \rangle_m$	Média mensal da variável climatológica futura
N	Número de anos considerados
d_m	Número de dias de cada mês
$\langle \sigma_0^2 \rangle_m$	Variância mensal da variável climatológica de referência
$\langle \sigma^2 \rangle_m$	Variância mensal da variável climatológica futura
x	Variável horária do clima futuro
x_0	Variável horária do clima de referência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3.1	Critérios de seleção e métodos de aplicação de materiais de mudança de fase.....	3
3.2	Classificação de materiais de mudança de fase.....	4
3.3	Armazenamento de energia por calor latente e histerese térmica	4
3.4	Simulação utilizando <i>EnergyPlus</i>	5
3.5	<i>Morphing</i>	7
4	METODOLOGIA	8
4.1	Seleção de cidades representativas.....	9
4.2	O processo de <i>morphing</i> e arquivos climáticos.....	9
4.3	Modelo termoenergético	10
4.4	Seleção do material de mudança de fase e configuração da simulação	12
5	SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	12
5.1	Resultados para zona bioclimática 1/3A (Curitiba, PR).....	14
5.1.1	Fachada norte (zona térmica 3)	14
5.1.2	Fachada sul (zona térmica 1).....	16
5.1.3	Cobertura (<i>plenum</i>).....	18
5.2	Resultados para zona bioclimática 8/1A (Rio de Janeiro, RJ)	20
5.2.1	Fachada norte (zona térmica 3)	20
5.2.2	Zona térmica com fachada sul (Zona 1)	22
5.2.3	Cobertura (<i>plenum</i>).....	23
6	CONCLUSÃO	24
	APÊNDICES.....	30
	APÊNDICE A – Características de PCM do tipo sólido-líquido	30
	APÊNDICE B – Transmitância térmica das superfícies da envoltória	30
	APÊNDICE C – Anos utilizados para construção dos arquivos TMYx.....	31
	APÊNDICE D – Dados de <i>input</i> do PCM para simulação de histerese	31
	APÊNDICE E – Detalhes das construções das superfícies da envoltória	31
	APÊNDICE F – Comportamentos climáticos	31
	APÊNDICE G – Coeficientes de correlação de Pearson.....	33
	ANEXOS.....	34
	ANEXO A – Alternativas de macroencapsulamento de PCM para aplicação em edificações	34
	ANEXO B – Diagrama esquemático de um sistema VAV multi-zona.....	34
	ANEXO C – <i>Datasheet</i> do PCM SP24E.....	35

1 INTRODUÇÃO

As edificações, em conjunto com o setor de construção civil, foram responsáveis por cerca de 30% do uso final de energia e 27% das emissões de CO₂ mundialmente no ano de 2021 (IEA, 2022b). No contexto nacional, para o mesmo ano, as edificações compreendiam cerca de 51% do consumo final de eletricidade do país, conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022). O consumo com climatização e ventilação, globalmente em 2021, correspondia por cerca de 16% do uso final de energia elétrica nas edificações, o que equivale a 10% do uso total de energia elétrica no mundo nesse mesmo ano (IEA, 2022c).

Dado o agravamento das mudanças climáticas e eventos adversos de temperatura, a demanda por sistemas de climatização só tende a crescer, sendo que, de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022d), nas próximas três décadas, o uso de sistemas de ar condicionado será um dos principais motores da demanda global de eletricidade. Para que o setor de edificações esteja de acordo e contribua com os cenários *net zero* planejados para 2030 em diante, esforços significativos devem ser implementados em toda cadeia produtiva e operacional. O “paradoxo” existencial dos sistemas de ar condicionado, que ao mesmo tempo garantem climas e condições internas confortáveis, mas rejeitam calor para uma atmosfera cada vez mais quente, denota a imperatividade da aplicação de medidas da eficiência energética e harmonia tecnológica nas edificações e seus sistemas.

Em resposta a isso, a busca por alternativas passivas e ativas que garantam a resiliência térmica da edificação e assegurem o conforto térmico durante um longo prazo, ponderando as alterações climáticas futuras, devem ser levadas em consideração desde a concepção da edificação. Consoante, Yükses e Karadayi (2017) atestam que a envoltória contribui para cerca de 60% do custo com energia durante o ciclo de vida de uma edificação e, ainda conforme a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022a), o projeto adequado incorporando envoltória de alta performance torna-se a estratégia mais efetiva para mitigar a necessidade térmica das edificações e garantir o conforto dos ocupantes. Nesse contexto, a incorporação de armazenamento de energia térmica por calor latente nas envoltórias através de materiais de mudança de fase (PCM ou *Phase Change Materials*), visando a eficiência energética e desempenho térmico, é considerada uma tecnologia avançada e promissora (LIU et al., 2018).

Com isso exposto, a presente monografia objetiva-se por avaliar a performance térmica e energética de uma edificação com diferentes envoltórias propostas, empregando materiais de mudança de fase, sob a consideração de cenários futuros de mudanças climáticas e seus impactos nos climas nacionais. Para compreender as consequências climáticas e as respostas das envoltórias propostas, são estudados, em escala mensal, os consumos de energia com o sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) e o balanço de calor através das superfícies das fachadas norte e sul e cobertura; temperaturas radiantes médias, temperaturas operativas e fluxos de calor através das faces internas das superfícies em zonas térmicas características são avaliados em escala horária, durante uma semana típica, com o intuito de estudar as razões para os diferentes perfis de consumo e balanço de calor. Enfatizando os PCM, investiga-se o comportamento do estado físico do material aplicado à cada superfície a fim de traçar relações com as demais métricas e compreender a reação do material selecionado às mudanças climáticas.

A edificação estudada representa a tipologia de um prédio de escritórios médio e possui um modelo termoenergético caracterizado por uma única geometria, porém, possui sistemas construtivos e de AVAC em consonância com as Normas da *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE). Os modelos adequados para os diferentes climas do Brasil são simulados utilizando o *software EnergyPlus*, versão 9.2, (DOE, 2022a) nas cidades de Curitiba e Rio de Janeiro, respectivamente, nas zonas bioclimáticas 1 e 8, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Originalmente, as construções contam com isolantes térmicos resistivos para adequação dos parâmetros térmicos das paredes externas e cobertura estabelecidos pela ASHRAE. O trabalho objetiva comparar as performances da edificação de referência a longo prazo sem nenhum material isolante, com o isolante térmico resistivo projetado e a mesma edificação na qual um PCM substitui geometricamente o isolante em questão. O mesmo PCM é aplicado em todas as regiões climáticas, a sua temperatura de operação condiz com os *setpoints* do sistema de ar condicionado existente. As projeções para mudanças climáticas são incorporadas nas simulações através dos arquivos climáticos, empregando o processo estatístico de *morphing* e utilizando dados do cenário de emissões A2 (médio-alto) disponibilizados pelo

Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC); o processo é realizado através da ferramenta *CCWorldWeatherGen*, versão 1.9, desenvolvido por Jentsch et al. (2013), da Universidade de Southampton (2022). São construídos dois períodos de mudanças climáticas para os anos referência de 2050 e 2080, tomando como base para alteração o arquivo climático do tipo TMYx.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A envoltória é o principal sistema da edificação que reage às condições meteorológicas do local. As tendências de intensificação das mudanças climáticas e aumento das temperaturas a nível global, grandes desafios da humanidade neste século, terão um impacto direto na performance das edificações e no consumo de energia ao longo de sua existência. Para Yuan et al. (2022), a remodelagem da envoltória da edificação mostra-se como uma estratégia muito importante sob o ponto de vista de diversos aspectos, especialmente, no longo prazo: economia de energia, melhoria de microclimas internos, redução de poluentes na produção e viabilidade técnica econômica. Fang et al. (2014) cita que elementos construtivos com alta performance térmica, que compõe as superfícies da envoltória, garantem redução no consumo de energia para climatização e aprimoram o conforto térmico.

Conforme trabalho de D'Agostino et al. (2022), as performances de *Net Zero Energy Buildings* localizados em diferentes cidades europeias são analisadas para climas futuros. Estima-se um aumento entre 99 e 380% na carga térmica de resfriamento, comportamento oposto ao da carga de aquecimento, que possui uma redução estimada entre 38 e 57%, dependendo da tipologia e localidade, para o ano de 2060. Os resultados demonstram que edificações zero-energia com níveis de isolamento menores são menos sensíveis às mudanças climáticas. Consoante a isso, Baglivo et al. (2022) explicitam que edificações em climas quentes, no sul da Itália, dentro dos limites legais para a envoltória, sofrerão com superaquecimento no futuro – ano de 2080 – levando à consumos desproporcionais com climatização; os autores comentam que os limites regulatórios para as envoltórias têm apresentado tendências de aumento da isolamento térmica, caracterizada por baixa transmitância térmica. Rodrigues e Fernandes (2020) conduziram um estudo a fim de avaliar os riscos de superaquecimento de edifícios residenciais no Mediterrâneo em climas futuros, projetando valores ideais para a transmitância térmica no ano de 2050. Os resultados demonstram que a os valores ideais de transmitância térmica para climas atuais não acarretarão superaquecimento das edificações; em alguns casos, a transmitância da envoltória pode até ser reduzida, visto que a redução da carga de aquecimento compensa o aumento na carga de resfriamento. Os dois últimos trabalhos citados fizeram uso da ferramenta *Climate Change World Weather File Generator (CCWorldWeatherGen)*, para incorporar as projeções climáticas nas simulações.

Dentre as soluções passíveis de implementação na envoltória, é possível citar o aumento da massa térmica das superfícies – aprimorando a retenção de energia térmica – e o aumento da resistência térmica das camadas dessas superfícies – reduzindo a transferência de calor por condução – segundo Zilberberg, Trapper e Isaac (2021). Embora materiais usuais da construção civil possam funcionar, espontaneamente, como armazenadores de energia térmica por calor sensível, o uso de calor latente mostra-se consideravelmente mais interessante de um ponto de vista de densidade energética do processo (RATHORE et al., 2022); os isolantes térmicos resistivos são capazes de reduzir significativamente o fluxo de calor, em contrapartida, apresentam pouca influência na retenção de energia (WANG et al. 2022). Dentro desse contexto, o armazenamento de energia térmica por calor latente a partir da aplicação de materiais de mudança de fase torna-se uma alternativa interessante na construção de envoltórias, com o intuito de reduzir cargas térmicas tanto de aquecimento como de resfriamento.

Os materiais de mudança de fase apresentam um comportamento dinâmico, visto que podem alterar o seu estado físico à uma temperatura de operação específica e quase constante no processo, por conseguinte, o uso passivo ou ativo dos PCM, atrelado a outras estratégias, pode privilegiar os seus cenários de aplicação. Filippini, Sartori e Torres (2021) avaliaram o impacto da aplicação de PCM no conforto térmico de uma escola pública com projeto padronizado nas regiões bioclimáticas 1 e 8 (ABNT, 2005), com Curitiba e Rio de Janeiro como cidades representativas. O conforto térmico é regulado através da ventilação natural, avaliada de acordo com o conforto térmico adaptativo da Norma 55 da ASHRAE, de 2017. Os autores relatam que o PCM com temperatura de derretimento de 21°C obteve resultados significativos na melhora do conforto térmico em ambas cidades, quando aplicado nas paredes externas e com espessura de 5 cm; para a cidade do Rio de Janeiro, o PCM com temperatura de derretimento de 27°C

também demonstrou resultados positivos quando aplicado na cobertura com 5 cm de espessura, diminuindo as horas em desconforto térmico.

Materiais de mudança de fase desempenham performances diferentes em climas distintos, como demonstrado por Kalbasi e Hassani (2022). Os autores aplicaram materiais de mudança de fase com pontos de fusão distintos em edificações com envelopes consoantes à Norma 90.1 da ASHRAE, segundo classificações climáticas da associação. Com a aplicação de PCM, o período de conforto térmico reduziu de 54 a 82% do tempo dentre os 10 climas analisados, destacando os PCM com ponto de fusão de 22°C (adequado para 6 zonas) e 23°C (adequado para 8 zonas). Os autores citam, também, que a aplicação do material próxima ao interior da edificação traduz-se em períodos mais longos de conforto térmico do que cenários com diferentes posições de implementação. Carlucci et al. (2021) concluem que a aplicação de PCM reduz significativamente a carga térmica de resfriamento dos ambientes; no estudo realizado, uma placa de gesso com aplicação de PCM microencapsulado e ponto de fusão de 23°C – Alba Balance produzido pela Saint Gobain – é aplicado a edificações em diferentes climas europeus.

Com relação à isolantes térmicos resistivos aplicados no contexto nacional, através do estudo de Melo et al. (2015) concluiu-se que os limites máximos de transmitância térmica das paredes dados pela Norma 90.1 da ASHRAE, de 2013, não são adequados para regiões quentes como as brasileiras, nas quais o consumo de energia com climatização é dominado pelo resfriamento. Os autores notam que o uso de materiais isolantes pode aumentar a carga térmica anual, diminuindo as trocas de calor espontâneas do ambiente interno para o externo durante o período noturno. Colaborando com tais resultados, Kalbasi e Afrand (2022) atestam que o uso de PCM nas paredes produz melhores resultados, no verão, do que isolantes térmicos.

Tais comportamentos e resultados citados permitem a definição da hipótese guiadora do presente trabalho: no cenário de mudanças climáticas, caracterizado por temperaturas mais elevadas, o uso de PCM na envoltória gera melhores resultados de performance térmica e energética do que isolantes térmicos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os materiais de mudança de fase são materiais capazes de mudar o seu estado físico em uma temperatura conveniente, sendo aplicados em diversos setores da indústria (alimentos, energia, aeroespacial, automotiva, eletrônica, dentre outras) para armazenamento de energia térmica por calor latente, processo também conhecido como LHTES, ou *Latent Heat Thermal Energy Storage*.

3.1 Critérios de seleção e métodos de aplicação de materiais de mudança de fase

A utilização de materiais de mudança de fase depende, principalmente, da temperatura de operação desejada, uma vez que, durante o processo de transição de estado físico, o material apresenta baixa variação de temperatura, transformando a energia transferida em variação de entalpia. Desta maneira, a seleção do material empregado parte da determinação dessa temperatura, conforme Suresh, Hotta e Saha (2022). Outras características do PCM devem ser observadas para extrair o maior potencial de sua implementação, por exemplo, suas propriedades termodinâmicas, químicas, cinéticas e econômicas (RATHORE et al., 2016), conforme sintetizado por Liu et al. (2018):

- Termodinâmicas: temperatura de mudança de fase adequada, baixa segregação de fase, alto calor latente de fusão por unidade de volume, alto calor específico, alta condutividade térmica e baixa variação de volume entre estados físicos;
- Químicas: atóxico, baixa inflamabilidade, não explosivo, baixa corrosividade de materiais construtivos, estabilidade química de longo prazo, ciclos de derretimento e solidificação completos;
- Cinéticas: alta taxa de nucleação, ausência de subresfriamento, alta taxa de crescimento cristalino;
- Econômicas: baixo custo, disponibilidade comercial; e
- Outras: baixo impacto ambiental, não poluente, reciclável, compatibilidade com material utilizado no encapsulamento.

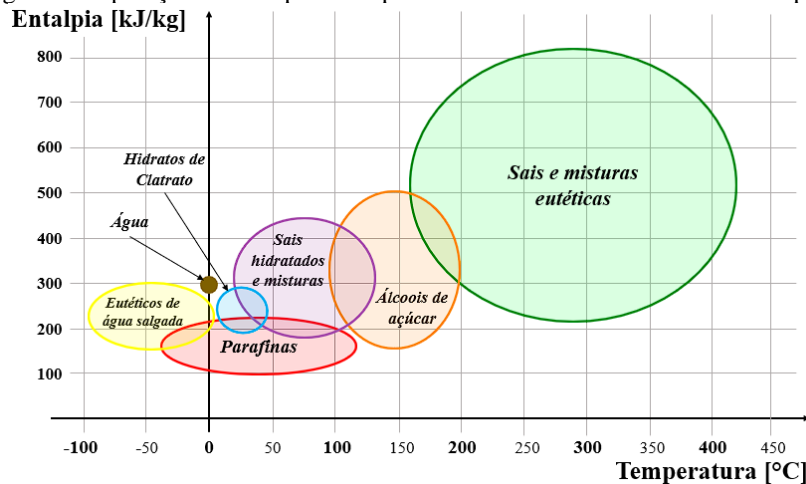
A efetiva aplicação de PCM no contexto da construção civil pode ser realizada através de diferentes métodos, como citado por Liu et al. (2018): incorporação direta, imersão, encapsulamento e estabilização de forma. Dentre essas, o encapsulamento apresenta-se como o método mais promissor para edificações, segundo os mesmos autores. A forma de encapsulamento pode, ainda, ser dividida conforme a escala da cápsula: nanoencapsulado (1 a 1000 nm), microencapsulado (1 a 1000 μm) e macroencapsulado (>1000

μm), conforme Paroutoglou et al. (2019). Técnicas envolvendo baixas escalas de cápsulas ($< 1000 \mu m$) incorporam os materiais diretamente nos elementos construtivos, alterando as propriedades térmicas do sistema final. O macroencapsulamento, segundo Liu et al. (2018), é a aplicação mais promissora no contexto de edificações (à critério ilustrativo, ver Anexo A para alternativas de macroencapsulamento).

3.2 Classificação de materiais de mudança de fase

A classificação básica de materiais de mudança de fase depende dos estados físicos nos quais o material irá operar, sendo estas sólido-sólido, sólido-gás, sólido-líquido e líquido-gás (PAROUTOGLU et al., 2019). No contexto da construção civil, a implementação de PCM do tipo sólido-líquido é visada, devido a faixa de temperaturas de operação de uma grande parcela de materiais com esse comportamento. Na Figura 3.1 é apresentado uma escala de temperatura e entalpias de operação de diferentes PCM.

Figura 3.1 - Regiões de operação de entalpia e temperatura de derretimento de PCM do tipo sólido-líquido.



Fonte: adaptado de Al-Yasiri e Szabó (2021).

Dentro desse do macrogrupo de PCM sólido-líquido existem, ainda, outras classificações, baseadas na origem e composição química do material. Conforme classificação, estes apresentam propriedades distintas, que se traduzem em vantagens ou desvantagens, dependendo da aplicação e seleção do material (vide Apêndice A). Veerakumar e Sreekumar (2016) descrevem brevemente as composições de PCM:

- Orgânicos: compostos baseados em carbono, geralmente classificados como parafínicos e não-parafínicos.
- Inorgânicos: geralmente sais hidratados ou metálicos.
- Eutéticos: misturas de dois ou mais PCM para obter temperaturas de operação desejada. São divididos, ainda, com base na temperatura de derretimento (alta ou baixa) e também pelos componentes da mistura, sendo orgânicos, inorgânicos ou orgânicos-inorgânicos.

3.3 Armazenamento de energia por calor latente e histerese térmica

Materiais podem armazenar calor de três diferentes maneiras: através de calor sensível, latente e reações químicas. O processo que os PCM desempenham, independentemente de sua classificação, pode ser representado por (adaptado de AKEIBER et al., 2016):

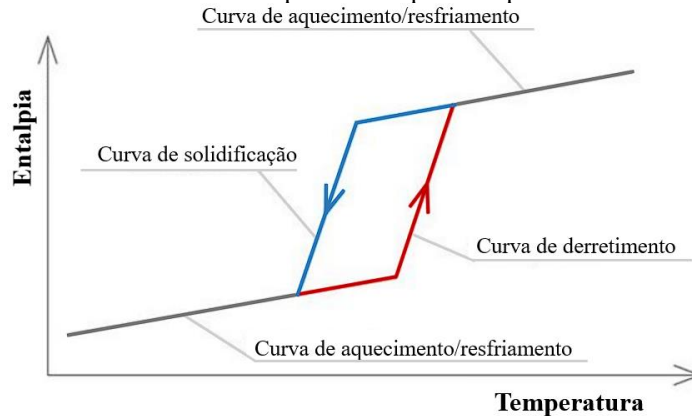
$$Q = \int_{T_{ini}}^{T_{mf}} mc_p(T)dT + ma_{mf}\Delta h_{mf} + \int_{T_{mf}}^{T_{fin}} mc_p(T)dT \quad (3.1)$$

que denota a energia armazenada (Q) na massa de material (m) dentro de um intervalo de temperaturas T ; $c_p(T)$ denota o calor específico do material como função da temperatura e Δh_{mf} a variação de entalpia específica do material no processo. Os subíndices “ini” e “fin” remetem aos estados inicial e final, respectivamente; o subíndice “mf” remete ao ponto de mudança de fase. Nesse valor de temperatura ocorre, efetivamente, a mudança de estado físico do material. Idealmente, essa mudança ocorre sem variações de

temperatura, contudo, em materiais reais, pode haver uma variação representada, na equação, pelo coeficiente a_{mf} . As integrais referem-se ao armazenamento por calor sensível, dependentes da massa do material e de seu calor específico. A mudança de fase é representada pela variação de entalpia do material (termo central da Equação 3.1) ou seja, a energia térmica recebida ou cedida durante a mudança de fase advém da conversão da entalpia do PCM.

O processo cíclico de mudança de fase em um PCM caracteriza o fenômeno de histerese térmica do mesmo (apresentado na Figura 3.2). Zastawna-Rumin, Kisilewicz e Berardi (2020) comentam a ocorrência em aplicações empíricas e simulações numéricas de PCM, destacando a importância do fenômeno para a performance térmica e durabilidade do mesmo, consoante Al-Janabi e Kavgic (2019). A Equação 3.1 é aplicável nas duas curvas e a área entre estas estabelece a energia armazenada durante a mudança de fase pelo material.

Figura 3.2 - Curva de histerese térmica completa desempenhada por um material de mudança de fase.

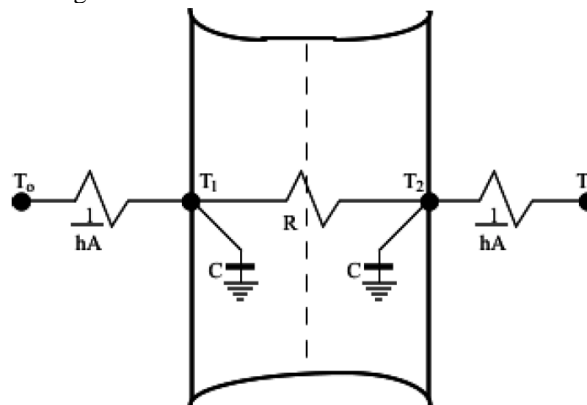


Fonte: adaptado de Zastawna-Rumin, Kisilewicz e Berardi (2020)

3.4 Simulação utilizando *EnergyPlus*

Segundo Al-Janabi e Kavgic (2019), o *software EnergyPlus* é uma das poucas ferramentas de simulação de edificações capazes de modelar materiais de mudança de fase. Conforme o *Engineering Reference* do *software* (DOE, 2019), a condução de calor em superfícies compostas faz uso de algoritmos CTF (*Conduction Transfer Functions*), desenvolvidos pelos precursores do *software*, capazes de solucionar as equações diferenciais relacionadas ao processo de condução. Através do método de espaço de estados, são aplicadas diferenças finitas para solução das equações, fazendo uso, também, de conceitos de circuitos térmicos de resistência e capacitância. Na Figura 3.3 apresenta-se uma interpretação do algoritmo para um sistema com dois nós.

Figura 3.3 - Sistema construtivo com dois nós.



Fonte: DOE (2019).

Notam-se as representações de resistências (R) e capacitâncias (C) térmicas atreladas a cada nó e que compõe o espaço de estados utilizado na solução, visível através das equações:

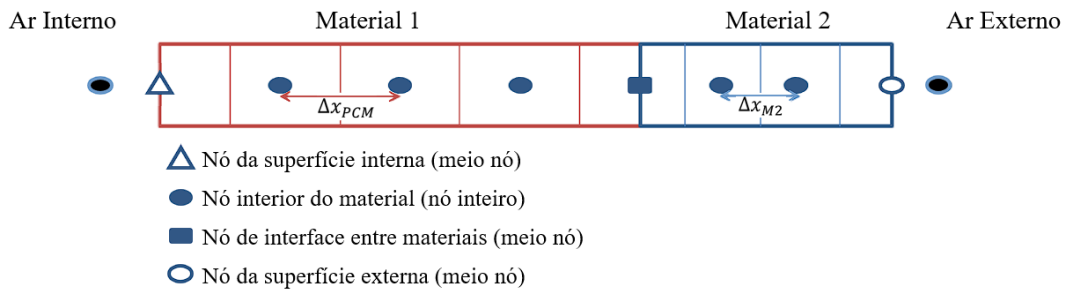
$$\begin{bmatrix} \frac{dT_1}{dt} \\ \frac{dT_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{hA}{C} & 0 \\ 0 & \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_o \\ T_i \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} q''_o \\ q''_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -h \\ h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & h \\ -h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_o \\ T_i \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Nas Equações 3.2 e 3.3: T representa a temperatura do nó, A a área da superfície, h o coeficiente de transferência de calor por convecção e q'' identifica o fluxo de calor; os subíndices “o” e “i”, nesse caso, fazem referência ao ambiente externo (*outdoor*) e interno (*indoor*). Tal algoritmo de cálculo é o padrão do *software*, e os materiais de construção usuais podem ser simulados através dele.

Os algoritmos consideram propriedades térmicas constantes das camadas e não produzem resultados sobre o interior da superfície, logo, visto mudança das propriedades na transição de fase, o uso de outro algoritmo mais fundamental, capaz de incorporar o comportamento dinâmico dos PCM, é necessário. Para tanto, o *software*, a partir da configuração do usuário, implementa o algoritmo de diferenças finitas unidimensional *Conduction Finite Difference* (CondFD; DOE, 2019). Através dele, as camadas das superfícies são discretizadas de forma dinâmica, com base nas suas propriedades térmicas. Na Figura 3.4 essa discretização em uma superfície complexa é apresentada, ilustrando, também, os tipos de nós considerados pelo método.

Figura 3.4 - Discretização espacial do método de diferenças finitas unidimensional.



Fonte: adaptado de DOE (2019)

A discretização espacial de cada camada de material é realizada partindo da divisão de sua espessura por um termo dependente de propriedades térmicas do material e pelo passo de tempo definido pelo usuário; o termo é obtido através de:

$$x = \sqrt{c\alpha\Delta t} \quad (3.4)$$

O resultado inteiro da razão fornece o número de nós que serão considerados pelo algoritmo para o cálculo da transferência de calor; o espaçamento entre os nós (Δx) é definido pela divisão da espessura do material pelo número de nós. Na Equação 3.4, α representa a difusividade térmica da camada de material, Δt o intervalo de tempo e c é a chamada constante de discretização espacial (*spatial discretization constant*), que representa, basicamente, o inverso no Número de Fourier numérico (DOE, 2019):

$$Fo = \frac{\alpha\Delta t}{\Delta x^2} \quad (3.5)$$

Logo, a discretização espacial do método baseia-se no critério de estabilidade de Von Neumann (ou de Fourier) para um método de solução explícito. Tal valor adimensional, conforme Bergman et al. (2014), fornece uma representação da efetividade com a qual o material consegue conduzir e armazenar calor; nesse caso, Δx identifica o espaçamento entre os nós e Δt o passo de tempo para cada iteração, tal como na Equação 3.4.

O método de diferenças finitas é aplicado à equação do calor unidimensional, adaptada de Bergman et al. (2014), representada por:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} \quad (3.6)$$

na qual o termo da esquerda da igualdade representa a energia armazenada, o primeiro termo à direita da igualdade o fluxo de calor e \dot{q} representa a taxa de geração de calor volumétrica no volume de controle avaliado. De acordo com os mesmos autores, a expressão denota que, em qualquer ponto do meio onde ocorre a condução, a taxa líquida de transferência de calor no volume de controle somada à taxa de geração de energia térmica deve ser igual a taxa de variação da energia armazenada no volume.

Como alternativa para solução da equação de diferenças finitas, o *software* apresenta a possibilidade de aplicação de dois esquemas de discretização:

$$\rho c_p \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left(k_W \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_W \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{\Delta x} \right) \quad (3.7)$$

$$\rho c_p \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \left(k_W \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right) \quad (3.8)$$

A Equação 3.7 identifica o esquema semi-implícito de segunda ordem no tempo de Crank-Nicholson e a Equação 3.8 o esquema totalmente implícito de primeira ordem no tempo, ambos baseados na solução de Adams-Moulton, conforme DOE (2019). Em ambas equações, são explicitadas as discretizações temporais e espaciais para cada valor de temperatura. Os subíndices “W” e “E” referem-se, respectivamente aos nós a esquerda (*West*) e a direita (*East*) do nó modelado, identificado pelo subíndice “i”; “i + 1” identifica o nó adjacente a “i” na direção do exterior da construção, e, analogamente, “i – 1” identifica o nó adjacente na direção para o interior da construção. Os índices “j” e “j + 1” remetem à discretização temporal, onde “j” identifica o instante anterior e “j + 1” o novo instante de tempo, com base no passo temporal configurado.

Sendo a solução implícita, o método iterativo de Gauss-Seidel é empregado junto à um coeficiente de sub-relaxação para aumento da estabilidade numérica, assim, atualizando as temperaturas nodais da superfície; o processo iterativo citado é o *solver* mais profundo do método ConFD e é aplicado à todas superfícies. O valor da entalpia em cada um dos nós é calculado em cada iteração. O *EnergyPlus* ainda executa iterações em um *loop* externo considerando o balanço de energia interna em cada uma das camadas da superfície, com o intuito de garantir as trocas térmicas advindas da radiação de onda longa.

Para consideração do fenômeno da histerese, o *software* demanda informações termodinâmicas do material em ambos os estados físicos do processo, assim, é capaz de construir as curvas que comporão o fenômeno. Ao passo que é realizado o cálculo da entalpia dos nós em cada uma das iterações, o valor do calor específico do material também é atualizado, dependendo das temperaturas e estados físicos do nó no início e ao fim do passo de tempo.

3.5 Morphing

O processo básico de *morphing*, desenvolvido por Belcher, Hacker e Powell (2005), altera as variáveis climáticas originais com base nas projeções climáticas de um Modelo Global de Circulação (*Global Circulation Model* ou GCM), entretanto, respeita o comportamento meteorológico do período base para a modificação (*baseline*). O formato do clima *baseline* empregado depende do formato dos dados projetados no cenário de mudanças climáticas considerado. No método desenvolvido, aplicam-se cenários que listam mudanças em variáveis climáticas mensais médias. Assim, o comportamento climático *baseline* é calculado separadamente para cada mês através de

$$\langle x_0 \rangle_m = \frac{1}{24 d_m N} \sum_{N \text{ anos}} \sum_{m \text{ mês}} x_0 \quad (3.9)$$

onde a variável x_0 denota o registro “atual” do clima de cada mês m ; a referência climatológica dessa variável em cada mês é expressa por $\langle x_0 \rangle_m$, definida como a média de x_0 de todos os anos; N representa o número de anos no período médio e d_m o número de dias em cada mês m ; 24 expressa o cálculo da média horária da variável. Essa variável $\langle x_0 \rangle_m$ é utilizada como a referência do clima atual para comparação direta com as projeções climáticas. Dependendo do resultado dessa comparação, aplica-se apenas uma das operações:

$$x = x_0 + \Delta x_m \quad (3.10)$$

$$x = \alpha_m x_0 \quad (3.11)$$

$$x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m (x_0 - \langle x_0 \rangle_m) = \langle x_0 \rangle_m + \Delta x_m + (1 + \alpha_m)(x_0 - \langle x_0 \rangle_m) \quad (3.12)$$

que denotam, respectivamente, as operações de *shift*, *linear stretch* e a combinação de ambas, conforme a definição de Belcher, Hacker e Powell (2005). Segundo descrição dos autores: a operação de *shift* (3.10) é aplicada quando, no cenário de mudanças climáticas, existe uma variação absoluta na média mensal da variável x_0 ; *stretch* (3.11) é empregado quando o cenário projetado apresenta alterações parciais na média ou na variância mensal da variável, ou, quando a variável apresenta um comportamento específico e constante durante um período, por exemplo, como a irradiação solar, que é nula durante a noite. A operação combinatória de *shift* e *stretch* (3.12) é aplicada quando ambas média e variância da variável apresentam modificações.

Nas Equações 3.10 e 3.12, Δx_m expressa a variação absoluta da média mensal da variável para o mês m . Como consequência do processo de *shift*, a variância mensal da variável não é alterada e o cálculo da média mensal de $\langle x \rangle_m$ torna-se

$$\langle x \rangle_m = \langle x_0 \rangle_m + \Delta x_m \quad (3.13)$$

Já nas Equações 3.11 e 3.12, o fator de escala α_m identifica uma variação não inteira de $\langle x \rangle_m$. A operação de *stretch* altera a média mensal e a variância mensal da variável:

$$\langle x \rangle_m = \alpha_m \langle x_0 \rangle_m \quad (3.14)$$

$$\langle \sigma^2 \rangle_m = \alpha_m^2 \langle \sigma_0^2 \rangle_m \quad (3.15)$$

Quando a operação combinada de *shift* e *stretch* é aplicada, a média mensal da variável tem o comportamento dado pela Equação 3.13, que caracteriza o processo de *shift*, enquanto a variância $\langle \sigma^2 \rangle_m$ apresenta o comportamento do processo de *stretch* dado pela Equação 3.15.

4 METODOLOGIA

Para a realização do presente trabalho, um modelo termoenergético genérico é utilizado. Visto magnitude do todo território nacional, são definidas cidades representativas com comportamentos climáticos diferentes, a fim de avaliar a performance da edificação em cenários distintos de aplicação. Tais comportamentos são traduzidos através de arquivos climáticos do tipo *Typical Meteorological Year* (TMY), que são modificados utilizando a ferramenta *CCWorldWeatherGen*. Através desta, dois novos arquivos são criados representando projeções futuras incorporando mudanças climáticas: 2050 e 2080, tendo o TMY como referência.

O modelo termoenergético é construído e disponibilizado pelo Departamento de Energia do Estados Unidos (2022b); geometricamente é idêntico para todas as zonas climáticas, entretanto, os parâmetros construtivos variam de acordo com a Norma 90.1 da ASHRAE (2019), consoante classificações climáticas. Demais sistemas – ventilação, climatização, cargas internas – são configurados e dimensionados em consonância com esta e outras normas da associação. A aplicação do PCM substitui o isolante térmico implementado, respeitando suas dimensões geométricas, assim, a espessura do PCM é igual à do isolante, de acordo os parâmetros térmicos originais da envoltória. Semelhante ao estudo de Melo et al. (2015), à

critério de comparação, serão executadas simulações onde nem isolante nem PCM são aplicados às superfícies. Todas as simulações são performadas através do *EnergyPlus* e os *outputs* são analisados e manipulados através de *scripts* em *Python*, utilizando, em especial, a biblioteca *Pandas*.

4.1 Seleção de cidades representativas

De acordo com a Norma ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2005), o Brasil é dividido em oito zonas bioclimáticas (ZB). A Norma 90.1 de ASHRAE (2019) divide o Brasil em quatro regiões climáticas: 0A (*extremely hot humid*), 1A (*very hot humid*), 2A (*hot humid*) e 3A (*warm humid*), contudo, a divisão dos órgãos não é recíproca, isto é, as classificações dos climas nacionais não são equivalentes; por exemplo, a cidade do Rio de Janeiro, conforme ABNT, localiza-se na zona bioclimática 8 (mais extrema), enquanto a associação americana classifica-a na região climática 1A; a grande maioria das cidades na região climática 0A encontram-se, também, na zona bioclimática 8. Em função disso, opta-se por priorizar a classificação consoante à ABNT, uma vez que apresenta maior variabilidade de climas e sua caracterização para definição de diretrizes construtivas.

Com o intuito de avaliar o impacto da envoltória em diferentes contextos climáticos, são selecionadas cidades representativas das zonas bioclimáticas extremas 1 e 8, com climas antagônicos, baseando-se na população de cada uma (IBGE, 2021). O Quadro 4.1 condensa essas informações.

Quadro 4.1 - Cidades representativas selecionadas.

Zona Bioclimática ABNT (ZB)	Região Climática ASHRAE	Cidade representativa
1	3A	Curitiba
8	1A	Rio de Janeiro

Fonte: o Autor.

Ressalta-se, como uma limitação do trabalho, a impossibilidade de extrapolação dos resultados das cidades para as demais localidades das suas respectivas zonas bioclimáticas, uma vez que, na zona 8, por exemplo, a grande maioria das cidades localizam-se nas regiões norte e nordeste do país, logo, apresentam uma carta solar diferente da cidade do Rio de Janeiro.

4.2 O processo de *morphing* e arquivos climáticos

O processo de *morphing* dos arquivos climáticos é executado através da ferramenta *CCWorldWeatherGen*, versão 1.9. A ferramenta gratuita projeta os cenários climáticos futuros tomando como base o período de 1961 a 1990 (REINO UNIDO, 2022) através da utilização de dados do modelo de circulação global HadCM3 (*Hadley Center Coupled Model version 3*), o qual modela o comportamento atmosférico e oceânico em escala global; o mesmo possui uma resolução espacial de aproximadamente 300x300 km². Dada essa baixa resolução, o *CCWorldWeatherGen* realiza um processo estatístico de *downscaling* dinâmico, e obtém os valores das variáveis climáticas de cada localização através da média dos resultados de quatro pontos da malha espacial do modelo HadCM3 mais próximos das coordenadas reais do local desejado.

O período considerado no modelo é consoante à Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2021), que estabelece um intervalo de 30 anos como definição de um comportamento climático; a organização também mantém a recomendação de que o período entre 1961 e 1990 seja tomado como referência comum em estudos, projeções e monitoramento do clima e suas anomalias. Os dados do modelo HadCM3 são disponibilizados pelo IPCC (2022) e a ferramenta *CCWorldWeatherGen* considera o cenário de emissões A2 do IPCC para modificação dos arquivos climáticos. Esse cenário projeta o desenvolvimento econômico global com focos regionais de crescimento, em um mundo heterogêneo e com população crescente, no qual menos medidas em prol do desenvolvimento sustentável são efetivamente aplicadas, porém, não é o pior dos cenários em termos de emissões (médio-alto). O *CCWorldWeatherGen* transforma um arquivo *.epw* (*EnergyPlus Weather*) com base na extrapolação desejada para os anos representativos de 2020, 2050 e 2080, conforme as projeções obtidas pelo modelo HadCM3, cada qual caracterizando um período climático definido de 30 anos: 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099, respectivamente.

Com relação aos dados climáticos para as simulações das edificações nas cidades selecionadas, Scheller et al. (2015) realizou um estudo comparando três tipos de arquivos climáticos existentes para cidades brasileiras: TRY (*Test Reference Year*), SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) e

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). No trabalho citado, foram avaliadas diversas variáveis meteorológicas dos arquivos. Através do mesmo, foi possível identificar que os arquivos do INMET apresentavam falhas na aquisição dos dados em alguns períodos, atreladas a possíveis problemas nos sensores automáticos utilizados. Com relação aos dados SWERA, poucas cidades brasileiras possuem arquivos climáticos do tipo. Logo, a utilização de arquivos TRY torna-se necessária; arquivos desse tipo consideram um ano real dentro de um período de 10 anos, tratando-o como um ano de referência, sem extremos de temperatura. Entretanto, conforme Crawley e Lawrie (2015), os arquivos TRY não apresentam informações completas acerca de dados de radiação solar, informações estas que foram supridas através de um novo tipo de arquivo, o *Typical Meteorological Year* ou TMY. Este, além de contar com mais informações que o TRY, trabalha com dados meteorológicos de um maior intervalo, construindo um ano típico fictício, com meses de diferentes anos dentro de um período de 15 anos ou mais analisados. Os autores desencorajam o uso de arquivos do tipo TRY e recomendam o uso de TMY.

Dadas as considerações e recomendações de Crawley e Lawrie (2015) e da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2021), deve-se optar por arquivos do tipo TMY de períodos mais antigos ou de uma maior amostragem de anos, para haver a fidedignidade do processo de *morphing* com a projeção de comportamentos climáticos realistas. Nesse sentido, opta-se por usar os arquivos TMYx, que constroem os anos meteorológicos típicos com base em todo o período de coleta existente, disponibilizados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (2020). Os arquivos climáticos originais são apresentados no Quadro 4.2, juntamente com o período de amostragem dos dados.

Quadro 4.2 - Arquivos climáticos base de cada cidade selecionada.

Cidade	Arquivo climático	Período
Curitiba	BRA_PR_Curitiba-Pena.Intl.AP.838400_TMYx	1961-2017
Rio de Janeiro	BRA_RJ_Rio.de.Janeiro-Santos.Dumont.AP.837550_TMYx	1973-2017

Fonte: o Autor.

Contudo, é importante ressaltar que os arquivos climáticos originais representam um ano meteorológico típico dentro do período descrito no Quadro 4.2, considerando todos os anos da amostra. Desde o início das medidas até hoje, as alterações climáticas fazem parte do comportamento climático, haja vista que o ano meteorológico típico que engloba um intervalo de anos com esse tipo de comportamento, *i.e.*, os mais recentes (vide Apêndice C), e, portanto, tende a incorporar o perfil climatológico com os efeitos das mudanças climáticas. Assim, como atestam Jentsch et al. (2013), desenvolvedores da ferramenta, e Belcher, Hacker e Powell (2005), desenvolvedores do método, é possível esperar uma leve superestimação dos efeitos das mudanças climáticas ao aplicar a metodologia de *morphing* tendo como base arquivos climáticos mais recentes, uma vez que a técnica mantém o comportamento dos dados originais.

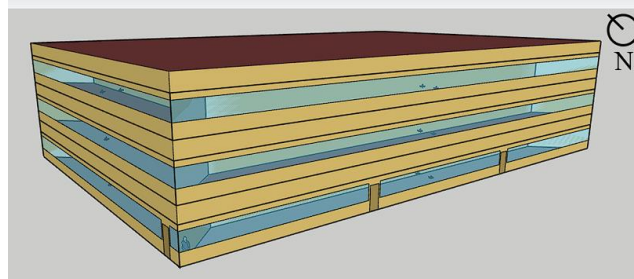
4.3 Modelo termoenergético

A Norma 90.1 da ASHRAE intitulada “*Energy Standards for Buildings Except Low Rise-Residential Buildings*” (ASHRAE, 2019), determina as diretrizes para a construção e simulação de modelos termoenergéticos de referência, ou *baseline models*, aplicáveis para todas as regiões climáticas. A norma define os parâmetros térmicos das superfícies, eficiência mínima de sistemas de climatização, densidades de iluminação e os sistemas de AVAC adequados para as tipologias construtivas, de acordo com área de piso e suas localidades. O modelo termoenergético desse estudo é desenvolvido e disponibilizado, em sua totalidade, pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2022b), através do programa *Building Energy Codes Program* (BECP), o qual, em conjunto com outras tipologias, são amplamente utilizados em diversos estudos, sendo estruturados respeitando a Norma 90.1 citada. O conjunto de protótipos representa cerca de 75% da área de piso construído de novas edificações em todas as climas norte-americanos.

A presente monografia opta por utilizar o modelo de prédio de escritórios médio (Figura 4.1), tipologia que, geralmente, possui projetos e sistemas integrados que apresentam um maior enfoque na aplicação de medidas de conforto térmico e eficiência energética, além de, pelo comportamento da operação da edificação, estar sujeita a maiores cargas térmicas durante períodos críticos. Os modelos empregados nas zonas bioclimáticas são idênticos com relação ao tipo de sistemas de climatização, cargas internas e operação da edificação, com variações construtivas e detalhes do sistema de AVAC, adequadas a Norma 90.1 da ASHRAE (2019). O sistema construtivo da edificação é *steel frame*, o qual, consoante mesma

norma, exige a utilização de isolantes térmicos nas paredes. O valor da transmitância térmica máxima (fator U ou somente U) para as paredes e cobertura dos modelos, em cada zona climática, são listados na Tabela 4.1. Nenhum dos parâmetros citados, com exceção das condições climáticas, são alterados entre simulações da mesma zona bioclimática.

Figura 4.1 - Modelo geométrico da tipologia.



Fonte: adaptado de DOE (2022b).

Tabela 4.1 - Transmitância térmica das superfícies construtivas.

Zona Bioclimática	$U_{cobertura}$ [W/m ² K]	$U_{paredes}$ [W/m ² K]
1 (3A)	0,220	0,435
8 (1A)	0,273	0,705

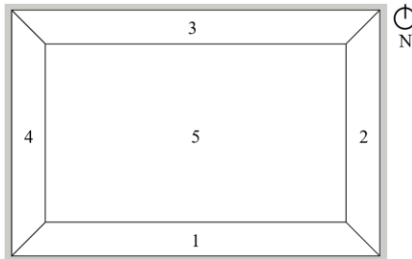
Fonte: adaptado de ASHRAE (2019).

O prédio de escritórios possui três pavimentos com 5 zonas térmicas cada, classificadas como periféricas (1 a 4) ou núcleo (5), com mesmas definições de cargas internas por unidade de área. Através da Figura 4.2 é possível visualizar a geometria do modelo em maiores detalhes; o percentual de área de abertura, em todas as orientações, é de 33%. O sistema de AVAC da edificação é do tipo volume de ar variável (VAV) multizona de duto único, onde um ventilador com velocidade variável insufla o ar misturado (externo e retorno) e cada zona térmica possui um outro ventilador capaz de modular a vazão de ar por *dampers* conforme os *setpoints* de temperatura da zona; o sistema de resfriamento e aquecimento de ar é central, com unidades de reaquecimento do ar nas zonas térmicas.

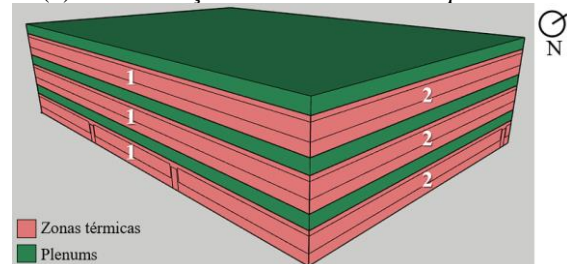
Detalhadamente, cada um dos andares é atendido por uma unidade do tipo *rooftop self-contained air-conditioner* (ou PACU, *Packaged Air-Conditioning Unit*) onde a máquina possui, contido em uma única carcaça, todo o sistema de insuflamento e condicionamento do ar (serpentina de aquecimento e resfriamento) para atendimento dos andares. O sistema de resfriamento é através de expansão de vapor direta, enquanto o de aquecimento ocorre através de gás natural, sistemas com eficiências de, respectivamente, 340% (COP) e 81%; cada zona térmica possui um sistema de aquecimento individual através de uma resistência elétrica nos terminais do insuflamento, com eficiência unitária.

Figura 4.2 - Detalhes da geometria da edificação e zonas térmicas.

(a) Numeração e orientação das zonas térmicas.



(b) Identificação de zonas térmicas e plenums.



Fonte: adaptado de DOE (2022b).

Entre os pavimentos existem os *plenums* de retorno dos sistemas de climatização que atendem cada um dos respectivos andares e onde, na prática, abrigam-se os dutos e caixas dos ventiladores de cada zona térmica; o ar de retorno de todas as zonas do pavimento é insuflado para o espaço. Na região climática 3A

(ZB1, Curitiba) o sistema de insuflamento de ar de cada andar possui um ciclo economizador (ver Anexo B), cujo acionamento depende da diferença de entalpia entre o ar externo e o ar de retorno: se a entalpia do ar externo for maior do que a do ar de retorno, a vazão de ar externo é fixada em um valor mínimo, do contrário, os *dampers* modulam as vazões de ar com o intuito de atingir o *setpoint* de temperatura; dessa maneira, exige-se menos energia para condicionar o ar insuflado.

4.4 Seleção do material de mudança de fase e configuração da simulação

O modelo termoenergético utilizado possui os valores de *setpoint* de aquecimento e resfriamento de 21 e 24°C, respectivamente, que representam temperaturas comumente usadas para ativação dos sistemas de AVAC. A seleção do material de mudança de fase, visto que sua implementação tem como objetivo a redução do consumo de energia com os sistemas de climatização, visa, em suma, balizar a temperatura da mudança de estado físico conforme os limites de operação do sistema de ar condicionado. Por esta lógica e tomando como referência os materiais selecionados e resultados em alguns dos trabalhos previamente descritos opta-se pela utilização do PCM inorgânico SP24E, produzido pela RubiTherm (2022b). A fabricante cita que, para a aplicação em edificações, materiais inorgânicos são, geralmente, preferência (RUBITHERM, 2022a). O PCM em questão apresenta características favoráveis para sua seleção: performance estável durante os ciclos de mudança de fase, alto calor latente por unidade de volume, subresfriamento limitado, baixa inflamabilidade; é atóxico e passível de ser macroencapsulado.

O PCM selecionado é modelado, no *EnergyPlus*, utilizando a classe *MaterialProperty:PhaseChangeHysteresys*, capaz de modelar o comportamento cíclico da fase latente dos materiais; a classe solicita propriedades de ambos estados físicos (ver Apêndice D). Para tanto, é necessário utilizar o algoritmo de diferenças finitas CondFD. Em concordância com Al-Janabi e Kavgic (2019), em função de sua robustez e estabilidade, o esquema totalmente implícito é empregado, tal como os algoritmos *TARP* para trocas convectivas internas e o *DOE-2* para trocas convectivas externas. Como parâmetros de discretização, adotam-se os resultados de Tabares-Velasco, Christensen e Bianchi (2012), que validaram os valores de 0,3 para constante de discretização e 60 passos de tempo por hora, o máximo permitido pelo *EnergyPlus*. Tais algoritmos e configurações não são necessários para simulação das envoltórias sem PCM, mas são mantidos em prol da padronização da metodologia numérica entre as simulações. As tolerâncias para convergências numéricas foram mantidas como os valores padrão do *software*.

A espessura do PCM empregado em cada superfície equivale à espessura do isolante aplicado em cada um dos respectivos sistemas construtivos, uma vez que o intuito é substituir geometricamente um pelo outro. Conforme os modelos desenvolvidos por DOE (2022b), as resistências térmicas (R) dos isolantes empregados em cada modelo são visíveis através da Tabela 4.2; ressalta-se que, nos modelos termoenergéticos, os isolantes são representados somente através dos seus valores de resistência térmica equivalente, sem a definição de um material físico, ou seja, sem massa térmica.

Ainda de acordo com DOE (2022c), os principais isolantes térmicos utilizados na construção civil são celulose, fibra de vidro e fibra mineral, os quais apresentam uma condutividade térmica (k) semelhante e que pode ser aproximada por $0,04 \text{ W/mK}$ (POPESCU, 2017). A espessura teórica do material isolante (e) é dada pela multiplicação da resistência térmica (R) e a condutividade térmica desse material. Essa espessura é, também, a espessura do PCM que substituirá o isolante. A Tabela 4.2 ilustra valores inteiros – dada necessidade de encapsulamento discreto – das espessuras dos PCM aplicados à cada superfície conforme a sua zona climática; para ilustrar as construções da envoltória, ver Apêndice E.

Tabela 4.2 - Resistência térmica empregada em cada um dos modelos e espessura do material.

Zona Bioclimática	Cobertura		Parede Externa	
	R [$\text{m}^2\text{K/W}$]	e [cm]	R [$\text{m}^2\text{K/W}$]	e [cm]
1 (3A)	4,319	17	1,903	8
8 (1A)	3,472	14	1,037	4

Fonte: o Autor.

5 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram realizadas, no total, 18 simulações: 9 simulações para cada zona bioclimática, dividindo-se em simulações variando a composição da envoltória (isolante térmico resistivo, material de mudança de

fase e nenhum material) para cada um dos arquivos climáticos (TMYx original, projeção para 2050 e projeção para 2080). O processo de *morphing* foi executado através da ferramenta *CCWorldWeatherGen*, gerando arquivos climáticos para os anos representativos de 2050 e 2080 a partir do TMYx. A duração média das simulações utilizando o *EnergyPlus* com isolante térmico ou nenhum material foi de, aproximadamente, 30 a 35 minutos, enquanto, quando o material de mudança de fase era aplicado, o tempo de simulação médio aumentou para cerca de 40 a 45 minutos; as simulações foram realizadas utilizando um processador i5-8250U e 8 GB de memória RAM DDR4.

São avaliadas métricas de toda edificação e algumas zonas térmicas representativas. As zonas térmicas e espaços selecionados para análise são: zona 1 (fachada sul) e zona 3 (fachada norte), no andar intermediário, ambas ocupadas e climatizadas, e o *plenum* na cobertura. Para avaliar o impacto da envoltória e a orientação das fachadas, o balanço de calor mensal é apresentado para cada um dos comportamentos climáticos simulados: o mesmo expressa o somatório do fluxo de calor por condução horário na face interna da superfície. A métrica resulta em um ganho ou perda de calor líquido durante o horário de operação da edificação e funcionamento do sistema de climatização. Os dados horários de temperatura radiante média, temperatura operativa e fluxo de calor através da envoltória são trabalhados durante semanas típicas definidas pelos arquivos climáticos TMYx (semanas com temperaturas médias mais próximas à média de cada estação). Opta-se por utilizar a temperatura radiante média para avaliar as zonas térmicas 1 e 3, ao contrário da temperatura operativa, pois os ambientes são condicionados, logo, a temperatura média do ar aproxima-se do *setpoint* e, portanto, não ilustrando de forma desejada o impacto direto da envoltória; paralelamente, a temperatura operativa do *plenum* é investigada, em função deste ambiente possuir somente superfícies opacas e não ser condicionado, mas receber o ar de retorno das zonas térmicas.

Dando ênfase para os materiais de mudança de fase, ilustra-se o comportamento horário característico e predominante do PCM na superfície avaliada. Para a obtenção dessas informações, utiliza-se o valor representativo de cada um dos nós gerado pelo próprio *EnergyPlus*, o qual compreende um número real entre -2 (líquido) e 2 (sólido). A partir do Teorema do Valor Médio, extrai-se um valor numérico representativo a partir da integração da Regra de Simpson; o valor predominante é a moda dos resultados nodais.

Com relação à edificação, são extraídos os comportamentos do consumo total de energia mensal do sistema de AVAC – elétrica e térmica, nas resistências térmicas ou expansão direta e aquecedor a gás, respectivamente – já definido no modelo, dividido pela área de piso condicionado, métrica representada por *Energy Use Intensity* (EUI) ou Intensidade do Uso de Energia, com o intuito de incorporar o perfil de cargas parciais que equipamentos de climatização podem apresentar e estudar o impacto da envoltória na tipologia em questão. A Tabela 5.1 sintetiza os resultados de Intensidade do Uso de Energia anual com os sistemas de climatização para cada uma das envoltórias nos diferentes cenários climáticos simulados. Os acrônimos “NEM”, “ISO” e “PCM” representam as envoltórias nenhum material, isolante térmico resistivo e material de mudança de fase, respectivamente.

Tabela 5.1 - Intensidade de Uso de Energia (EUI) anual.

Curitiba, PR – Zona Bioclimática 1/Região Climática 3A			
Clima	NEM [kWh/m²]	ISO [kWh/m²]	PCM [kWh/m²]
TMYx	37,17	21,17	20,35
Projeção 2050	40,49	29,15	26,76
Projeção 2080	48,99	35,93	32,34
Rio de Janeiro, RJ – Zona Bioclimática 8/Região Climática 1A			
Clima	NEM [kWh/m²]	ISO [kWh/m²]	PCM [kWh/m²]
TMYx	52,38	41,27	38,15
Projeção 2050	69,23	50,86	57,03
Projeção 2080	80,57	58,38	70,48

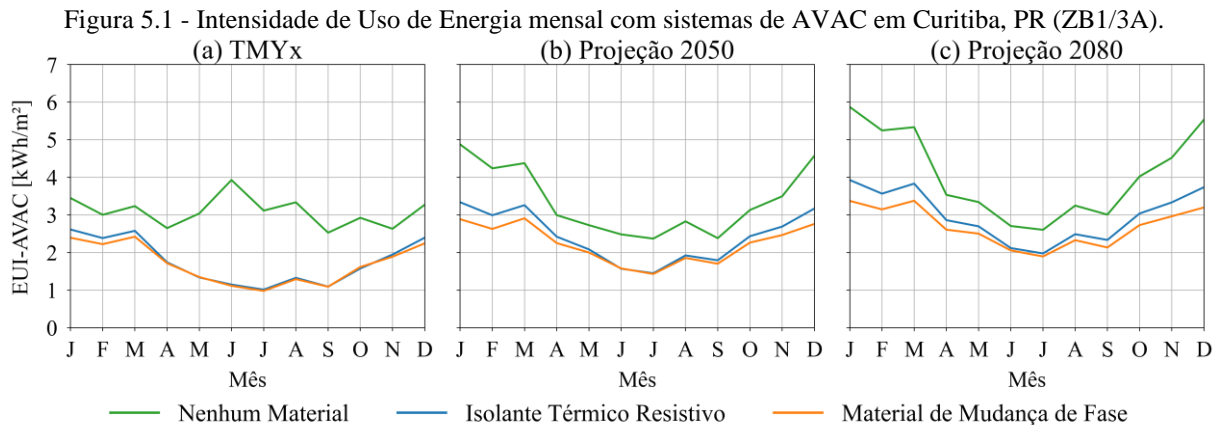
Fonte: o Autor.

Os resultados demonstram menores valores de EUI para a envoltória com PCM comparando-a com as demais na zona bioclimática 1 em todos os climas simulados; para a zona bioclimática 8, a envoltória com material de mudança de fase apresenta o menor valor de EUI para o ano meteorológico típico, porém, exibe resultados superiores à envoltória com isolante térmico resistivo nas simulações empregando

projeções climáticas; a envoltória sem material isolante, ou seja, com a maior transmitância térmica apresenta os maiores valores de EUI em todas as simulações.

5.1 Resultados para zona bioclimática 1/3A (Curitiba, PR)

Através da Figura 5.1, é possível observar o comportamento mensal da Intensidade do Uso de Energia com os sistemas de AVAC para a cidade de Curitiba; considerando o ano meteorológico típico, faz-se necessário o uso de aquecimento, especialmente, no caso da envoltória sem nenhum material.



Fonte: o Autor.

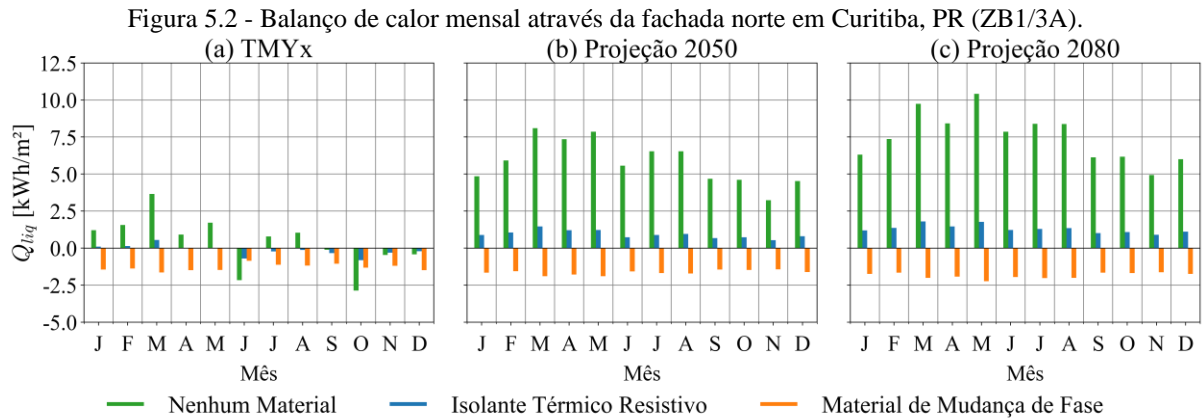
Realçando-o na Figura 5.1 (a), o consumo nos meses de inverno excede o consumo nos meses de verão. Isso pode ser justificado pelo uso do sistema de aquecimento através de resistências térmicas individuais localizadas no insuflamento das zonas térmicas. Tais equipamentos possuem eficiência unitária, o que os torna menos eficientes que o sistema de expansão direta, utilizado para resfriamento dos ambientes. Não obstante, o sistema de aquecimento central a gás também é requisitado em alguns dos momentos durante o inverno, aumentando o consumo de energia. Na comparação com as demais envoltórias, a aplicação de PCM acarreta em EUI anual cerca de 82,5% menor durante o ano típico, e, em média, 51,4% nos climas futuros; a envoltória com isolante térmico, por sua vez, apresenta EUI anual durante a simulação com TMYx de 75,4% menor do que a envoltória sem material, e, a média dos climas futuros é 37,6% menor. Ao comparar estas envoltórias compostas entre si, a aplicação de material de mudança de fase produz menores valores anuais: cerca de 3,9% menor no ano típico, 8,2% em 2050 e 10% em 2080.

Em função do aumento das temperaturas consoante projeções climáticas, nota-se uma mudança de comportamento do consumo de energia durante o período de inverno para o caso da edificação sem material isolante na envoltória; em ambas projeções simuladas, os meses de inverno passam a ter o menor valor de EUI no ano, ou seja, a demanda térmica para aquecimento é “convertida” em demanda térmica de resfriamento. Com relação às simulações nas quais a envoltória possui ou isolante térmico ou material de mudança de fase, o perfil de consumo de energia mensal é semelhante e muito próximo durante todo o ano para o clima de TMYx. O “descolamento” das curvas de consumo é notável nos meses fora do período de outono e inverno nas projeções de climas futuros, com diferença de quase 1 kWh/m² em 2080.

5.1.1 Fachada norte (zona térmica 3)

Através da Figura 5.2 ilustra-se o balanço de calor na face interna da superfície (Q_{liq}), denotando ganhos de calor mensais pela zona térmica quando o balanço é positivo e perdas de calor pela zona quando o balanço é negativo; o balanço representa o somatório dos fluxos de calor horários na face interna da fachada durante a ocupação da edificação. Observa-se que, para todas as simulações, o balanço de calor na superfície com o material de mudança de fase é sempre negativo, denotando a retirada de calor da zona térmica durante a operação da mesma, o que diminui a carga de resfriamento; isso ocorre devido à coincidência da temperatura do ar da zona com a temperatura de mudança de fase do material. Durante os meses de inverno, especialmente na Figura 5.2 (a), o consumo de energia, para essa envoltória, diminui, o que não significa que haja demanda de aquecimento, mas, sim, que a zona térmica, através dos ganhos solares e cargas internas, em conjunto com o isolamento térmico, consegue manter níveis confortáveis de

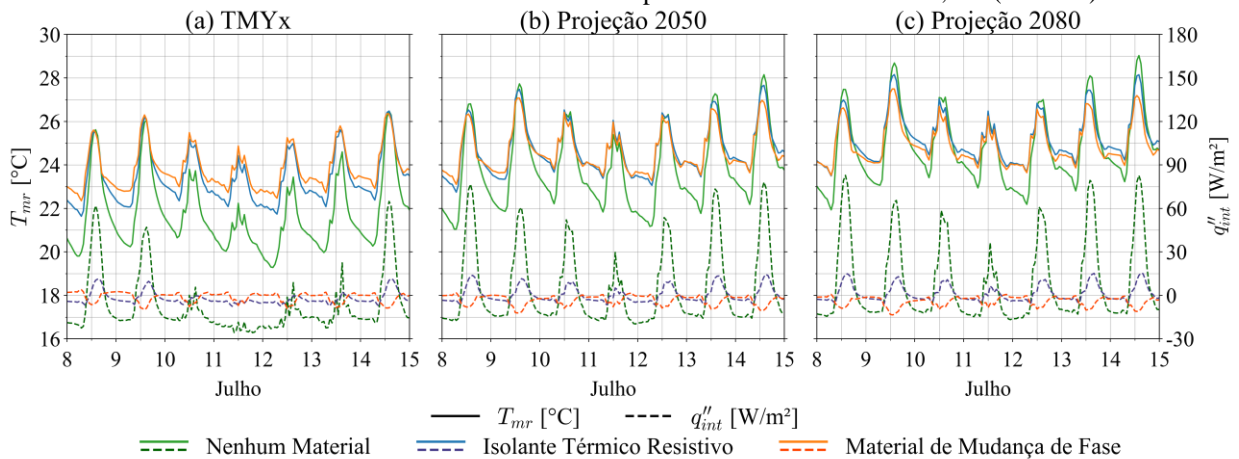
temperatura de forma passiva. Nesse sentido, a temperatura da face interna pode permanecer próxima à temperatura de solidificação do material, enquanto o seu núcleo e, principalmente, a face externa da fachada apresentam menores temperaturas, o que diminui a taxa de transferência de calor por essa superfície.



Fonte: o Autor.

A envoltória sem nenhum material não apresenta comportamento característico durante o ano meteorológico típico, possuindo um dos menores valores para o balanço de calor no mês de junho (-2,15 kWh/m²), mês que apresenta o maior EUI, de 3,93 kWh/m²; o mês de outubro, fora da estação de frio intenso, durante o período da primavera, apresenta o menor valor para o balanço de calor (-2,86 kWh/m²), e, conseqüentemente, um dos maiores EUI registrados para essa envoltória (2,95 kWh/m²). A ausência de material isolante provoca intensos ganhos de calor nas simulações das projeções climáticas, excedendo, com frequência 5 kWh/m² e 7,5 kWh/m² mensais, atingindo máximos de 8,10 kWh/m² em março de 2050 e 10,42 kWh/m² em maio de 2080, em função da intensificação da irradiação solar direta durante esse período. A aplicação do isolante térmico resistivo garante a manutenção de níveis baixos de ganhos e perdas de calor como observável em todas as simulações.

Figura 5.3 - Curvas horárias de temperatura radiante média na zona térmica 3 e fluxo de calor por condução na face interna da fachada norte durante a semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).



Fonte: o Autor.

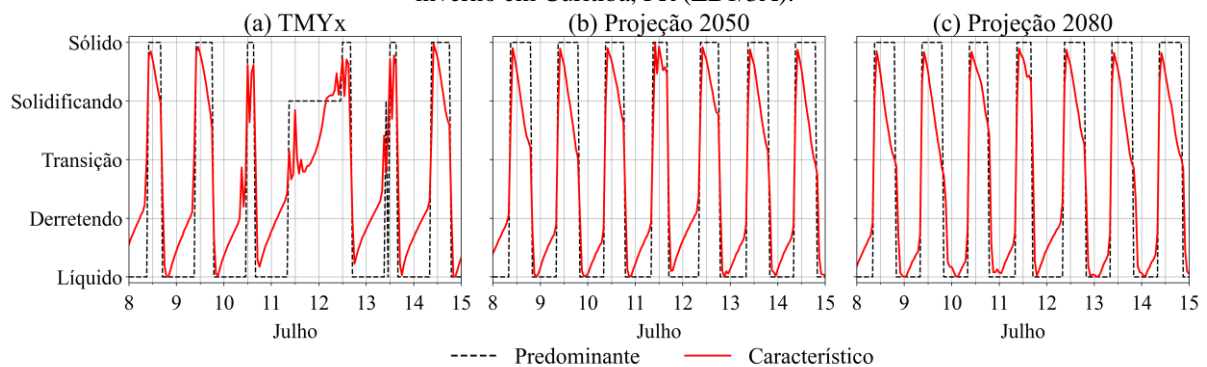
As curvas horárias de temperatura radiante média (T_{mr}) e o fluxo de calor por condução na face interna da superfície da envoltória (q''_{int}), para a zona térmica 3, são expressas na Figura 5.3; o sentido positivo do fluxo de calor indica um fluxo do exterior para o interior da zona térmica. Para Curitiba, opta-se por estudar o perfil das variáveis na semana típica de inverno, definida entre os dias 08 e 15 de julho, segundo o arquivo climático TMYx.

As simulações com material de mudança de fase na envoltória, para o ano meteorológico típico, resultam em temperaturas médias radiantes superiores às outras envoltórias, especialmente entre os

períodos de ocupação dos dias da semana, com média semanal igual a 24,06°C. Durante a semana típica (Figura 5.3 (a)), no período noturno, diferentemente das envoltórias com isolante térmico e nenhum material, o fluxo de calor por condução na envoltória com PCM é positivo ou muito próximo à zero, contrastando com as outras aplicações, nas quais o fluxo de calor é negativo. Nesse sentido, a zona térmica 3 perde calor à uma taxa menor ou até recebe calor nesse intervalo de horas através da parede externa; esse comportamento passivo é complementado pela retirada de calor por parte do PCM durante o dia, diminuindo a amplitude de temperaturas. Assim, no momento de retorno da operação da edificação, no dia seguinte, a zona térmica apresenta uma temperatura radiante média superior, e, conseqüentemente, diminui sua carga térmica de aquecimento, principalmente, no início da ocupação. O material armazena calor da zona térmica durante o dia e é capaz de cedê-lo à mesma durante a noite; a média da temperatura radiante média é de 24,85°C na projeção de 2050 e 25,14°C para 2080, durante as horas de ocupação.

Para as projeções climáticas de 2050 e 2080 (Figura 5.3 (b) e (c)), as temperaturas da zona térmica nas simulações com isolante térmico e com PCM tornam-se praticamente idênticas, com poucas variações ao longo da semana, colaborando com os resultados semelhantes para EUI visíveis na Figura 5.1 (b) nos meses de junho e julho; nas respectivas condições climáticas, a média semanal da temperatura radiante média é de 24,98 e 25,46°C para a envoltória com isolante. É interessante salientar a maior incidência de radiação solar direta durante o inverno, o que é traduzido pelo elevado fluxo de calor no caso sem nenhum material na envoltória; de forma antagônica, a redução das temperaturas externas durante o período da noite produz gradientes de temperatura de quase 6°C para essa envoltória, que se torna muito mais suscetível e sensível às mudanças do tempo e do clima local, apresentando médias da T_{mr} de 22,09°C no ano típico e 24,32 e 25,20°C os respectivos climas futuros, o que corrobora com a mudança no padrão de EUI apresentado pela edificação com essa envoltória.

Figura 5.4 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na fachada norte durante semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).



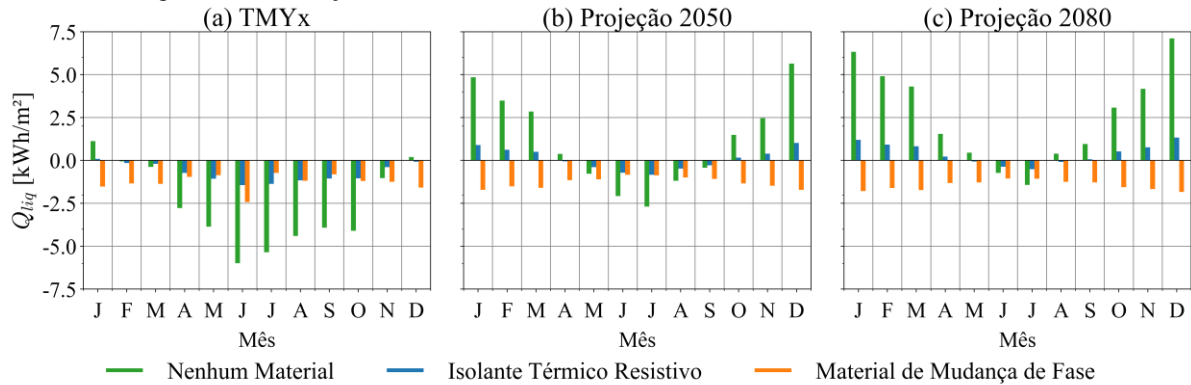
Fonte: o Autor.

O comportamento do balanço de calor através da fachada é complementado pela análise do estado físico característico do material de mudança de fase, por meio da Figura 5.4. Em Curitiba, opta-se por avaliar o material na semana típica de inverno, definida pelo arquivo TMYx como sendo entre 8 e 15 de julho. Ao observar todas as curvas, é notável o comportamento cíclico do estado físico, explicitando a completude do processo de histerese térmica por parte do PCM nessa superfície diariamente: durante o início do período diurno, o material solidifica-se, liberando calor para a vizinhança; com o passar do tempo, o material retira calor espontaneamente do seu entorno, derretendo; o ciclo de histerese térmica do PCM ocorre dentro da faixa de *setpoint* do sistema de climatização, portanto, os processos exotérmicos e endotérmicos regulam a temperatura da face interna à níveis condizentes com o sistema.

5.1.2 Fachada sul (zona térmica 1)

Ao observar a Figura 5.5, tal como na zona térmica 3, para o ano meteorológico típico (Figura 5.5 (a)) e para a projeção para 2050 (b), a zona térmica perde calor intensamente, com o mínimo em junho do TMY, aproximadamente -6 kWh/m²; da mesma forma que na zona térmica 3, a perda de calor através da parede – nos casos com PCM – diminui nos meses de inverno, denotando a redução da demanda por resfriamento espontânea da zona térmica.

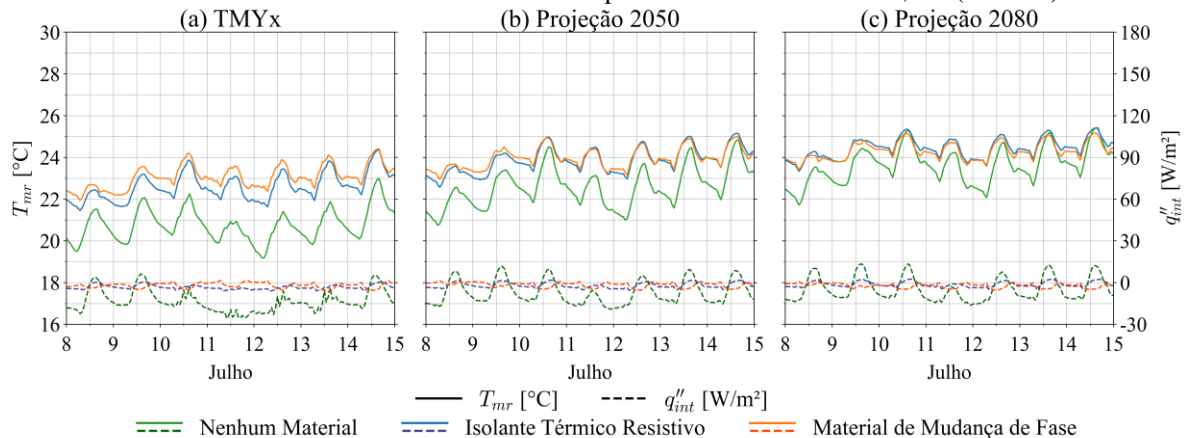
Figura 5.5 - Balanço de calor mensal através da fachada sul em Curitiba, PR (ZB1/3A).



Fonte: o Autor.

Devido a perda de calor através da envoltória na fachada sul quando nenhum material é aplicado, a carga de aquecimento sobrepõe a carga de resfriamento, justificando o maior período de EUI para essa aplicação; as perdas anuais de calor, durante o ano meteorológico típico, chegam a quase -49 kWh/m^2 . As envoltórias com material de mudança de fase e isolante térmico, durante o inverno, apresentam EUI e balanço de calor semelhantes, especialmente na fachada orientada para o sul. Fora desse período, com destaque para as projeções climáticas simuladas, a envoltória com PCM tem melhor capacidade de retirar o calor da zona térmica, reduzindo a carga de resfriamento – anualmente, a fachada com PCM apresenta perdas de calor médias de $-16,45 \text{ kWh/m}^2$, enquanto o isolante térmico de $-7,28 \text{ kWh/m}^2$, cerca de 56% menor. O impacto da ausência de radiação solar é facilmente observado através das perdas de calor mensais através da fachada sem material isolante.

Figura 5.6 - Curvas horárias de temperatura radiante média na zona térmica 1 e fluxo de calor por condução na face interna da fachada sul durante semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).



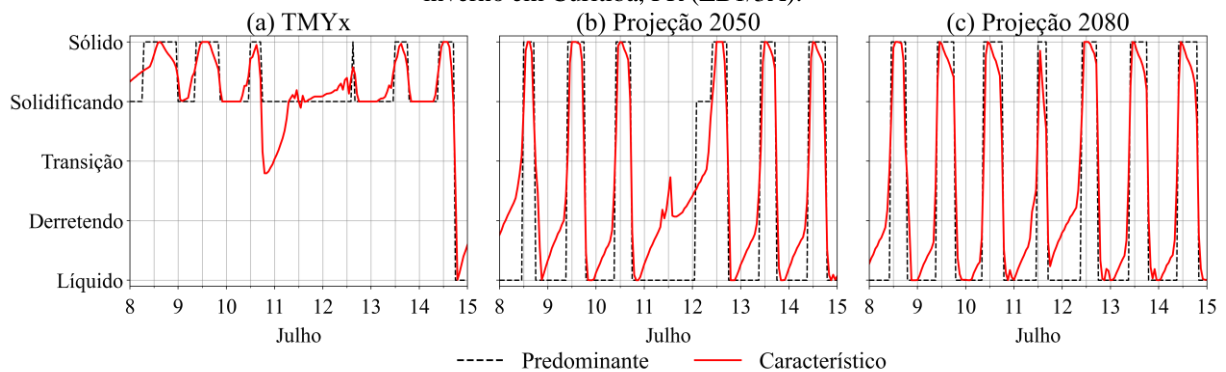
Fonte: o Autor.

Na Figura 5.6, tal como ocorre para fachada norte, durante o ano meteorológico típico (a) e para a projeção para 2050 (b), o fluxo de calor por condução para a envoltória com PCM permanece negativo, assim, a zona perde calor para a parede com o material. Para a simulação empregando o TMY, a temperatura radiante média da zona térmica 1 – com PCM na envoltória da edificação – é superior, durante todas as horas ao ser comparada com os outros casos, atingindo $23,23^\circ\text{C}$ de média semanal durante ocupação. Semelhante à zona térmica 3, o fluxo de calor na face interna da envoltória é positivo ou nulo, em boa parte das horas noturnas da semana, especialmente na Figura 5.6 (a). Tal aquecimento passivo, em função do armazenamento de energia térmica por parte do PCM, garante menores gradientes de temperatura radiante média. Para essa zona térmica, o PCM é capaz de manter a média da temperatura radiante média durante a semana entre 23 e $24,5^\circ\text{C}$ considerando todos os climas simulados; a envoltória sem material isolante não

apresenta T_{mr} média acima de 24°C em nenhuma das simulações, durante as horas ocupadas, com exceção de 2080, que registra a maior dentre as envoltórias, igual a $24,57^{\circ}\text{C}$.

Com relação ao estado físico do material, exposto na Figura 5.7, para o clima descrito pelo arquivo TMYx (Figura 5.7 (a)), nota-se a predominância do estado sólido ou parcialmente sólido durante boa parte da semana típica de inverno, mantendo um estado intermediário pelo período. Isso pode ser justificado pelos baixos fluxos de calor durante esse intervalo, visto a baixa temperatura externa e a proximidade da temperatura interna do ponto de operação do PCM. Nesse sentido, o núcleo do material funciona como uma barreira para a transferência de calor entre o meio externo e o meio interno durante a mudança de fase; ao considerar as mudanças climáticas nas simulações, o PCM apresenta ciclos de mudança de fase diários mais evidentes, especialmente expostos Figura 5.7 (c), indicando que a performance do material melhora em climas futuros para essa fachada, o que também corrobora para a intensificação da retirada de calor da zona térmica nessas simulações.

Figura 5.7 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na fachada sul durante semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).

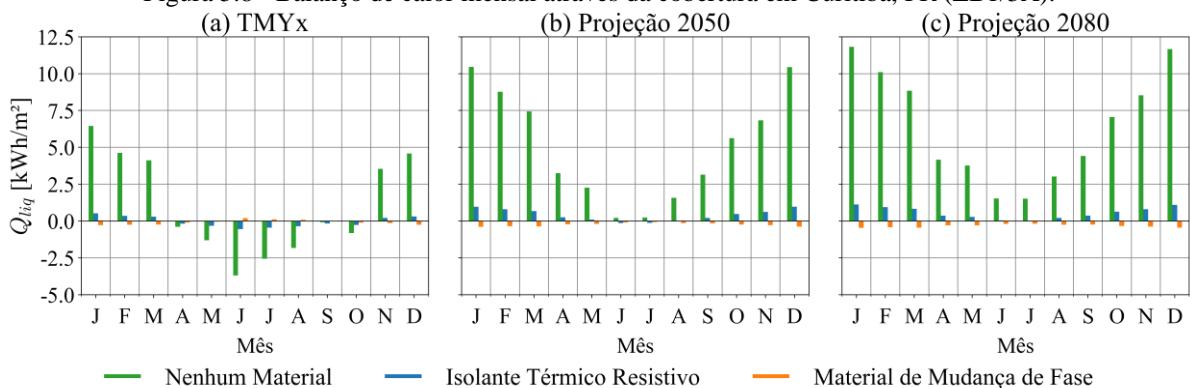


Fonte: o Autor.

5.1.3 Cobertura (*plenum*)

Em função da espessura de material isolante na cobertura (17 cm), tanto resistivo como material de mudança de fase, o fluxo de calor é extremamente baixo, resultando em balanços de calor mensais próximo a zero nessas coberturas, como é possível averiguar através da Figura 5.8.

Figura 5.8 - Balanço de calor mensal através da cobertura em Curitiba, PR (ZB1/3A).



Fonte: o Autor.

Em contrapartida, a ausência de qualquer material torna a transferência de calor através da superfície muito mais sensível aos gradientes de temperatura; comparando a envoltória em questão com as que possuem a aplicação de material isolante, é visível que o *plenum* troca calor com o meio externo de forma intensa, em particular, no ápice do verão e do inverno: para o ano típico, na medida que as envoltórias com PCM e isolante apresentam, respectivamente, ganhos de calor anuais $2,12 \text{ kWh/m}^2$ e $4,57 \text{ kWh/m}^2$ e

perdas de calor anuais de $-3,07 \text{ kWh/m}^2$ e $-5,11 \text{ kWh/m}^2$, a cobertura sem nenhum material aplicado registra ganhos anuais de $47,53 \text{ kWh/m}^2$ e perdas de $-34,82 \text{ kWh/m}^2$.

Entre maio e agosto do TMY, a edificação sem material na cobertura registra as maiores perdas de calor, com mínimo de $-3,68 \text{ kWh/m}^2$ em junho, e os maiores valores de EUI com o sistema de AVAC. A baixa temperatura do ar de retorno no *plenum*, que, ao misturar-se com o ar externo, demanda mais energia térmica das serpentinas de aquecimento para atingir o *setpoint*; em certos meses de outono (abril e maio) e primavera (setembro e outubro), para o clima representado pelo arquivo TMYx, e, também, junho e julho da projeção climática para 2050, apresentam balanços de calor próximos à zero, justificando-se pelo equilíbrio térmico entre as faces da superfície, em função das temperaturas externas, radiação solar e temperatura do ar de retorno no *plenum*. Salientam-se os grandes ganhos de calor no período de verão para ambas projeções climáticas, que ultrapassam 5 kWh/m^2 .

Figura 5.9 - Curvas horárias de temperatura operativa no *plenum* e fluxo de calor por condução na face interna da cobertura durante semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).

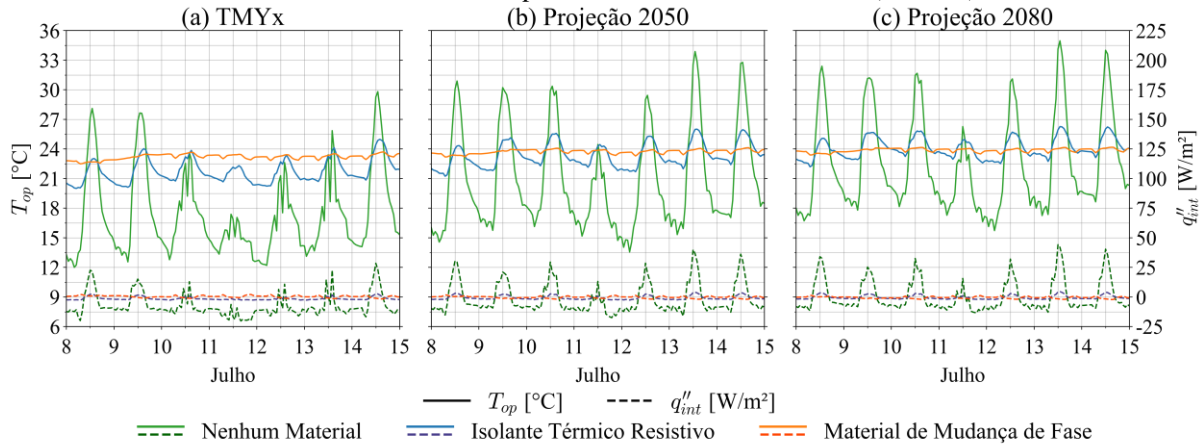
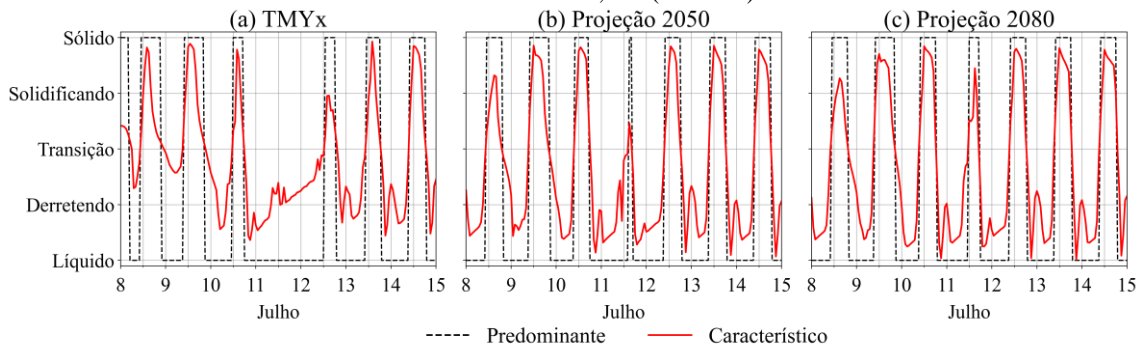


Figura 5.10 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na cobertura durante semana típica de inverno em Curitiba, PR (ZB1/3A).



A partir da Figura 5.9, visualiza-se que a envoltória com PCM é capaz de manter a temperatura operativa do espaço quase constante durante toda a semana avaliada, para todos os climas simulados, mantendo a média durante as horas ocupadas abaixo de 24°C . Mesmo durante a semana típica de inverno, a envoltória sem material isolante provoca temperaturas operativas elevadas e grandes amplitudes térmicas, com variações de quase 17°C diários; os fluxos de calor através da cobertura durante toda a semana, nesta aplicação, reforçam esse comportamento dos gradientes.

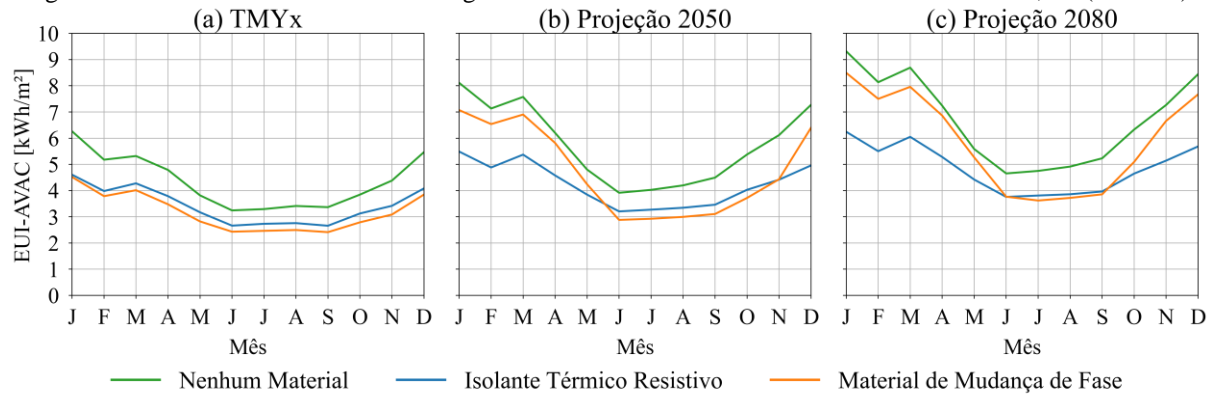
O estado físico característico do PCM na cobertura – Figura 5.10 – explicita ciclos de mudança de fase com maior definição se comparados ao comportamento do material na fachada sul, mas menos nítidos que na fachada norte. A espessura do material, de 17 cm , impede que todo o seu volume mude de fase de maneira uniforme, cujos ciclos de histerese são incompletos e uma espécie de estratificação do estado físico

é visível; o comportamento do estado físico característico varia dentro da região de transição de fase e com tendência à solidificação, especialmente para a simulação com o arquivo TMYx. Nessa situação climática, o volume de material majoritariamente não atinge o estado líquido.

5.2 Resultados para zona bioclimática 8/1A (Rio de Janeiro, RJ)

Naturalmente, a tipologia estudada, no clima da zona bioclimática 8, apresenta maiores valores de EUI mensais quando comparada com outras regiões climáticas (vide Figura 5.11).

Figura 5.11 - Intensidade do Uso de Energia mensal com sistemas de AVAC no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).

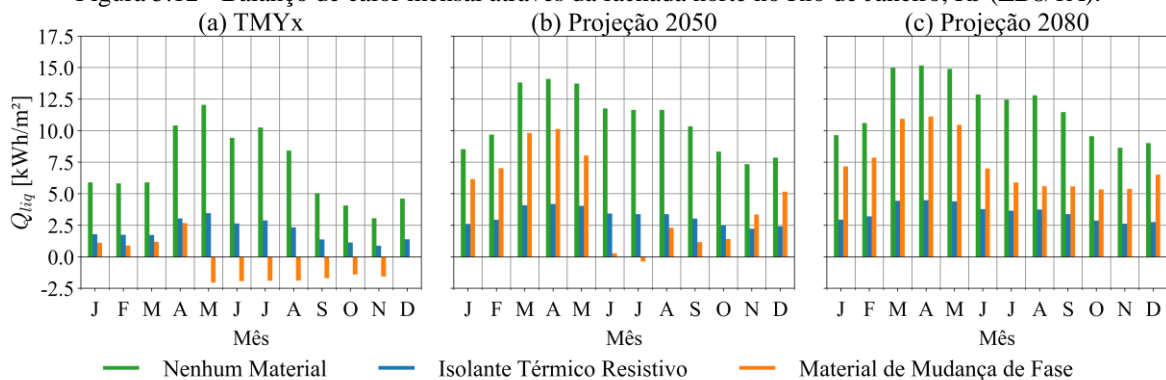


Todavia, nas projeções climáticas, a EUI da edificação com material de mudança de fase aproxima-se da EUI da edificação simulada sem nenhum material isolante, sendo, anualmente, cerca de 12,1% (2050) e 20,7% (2080) maior que a envoltória com isolante térmico resistivo, destacando os meses de janeiro a maio e novembro e dezembro; durante o período de inverno e primavera, projetados para 2050 (Figura 5.11 (b)), o PCM resulta nos menores valores de energia consumida, o que só acontece durante o inverno para a projeção de 2080, visível pela Figura 5.11 (c); a envoltória com isolante térmico resistivo apresenta reduções de EUI anuais de 21,2%, 26,5% e 27,5% para os climas simulados, respectivamente, comparando-a com a edificação sem material isolante.

5.2.1 Fachada norte (zona térmica 3)

Observando a Figura 5.12, a ausência de material isolante provoca, novamente, elevados ganhos de calor mensais durante todo o ano, resultando, anualmente em 95,01 kWh/m², 131,11 kWh/m² e 143,19 kWh/m² para respectivos climas simulados.

Figura 5.12 - Balanço de calor mensal através da fachada norte no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).

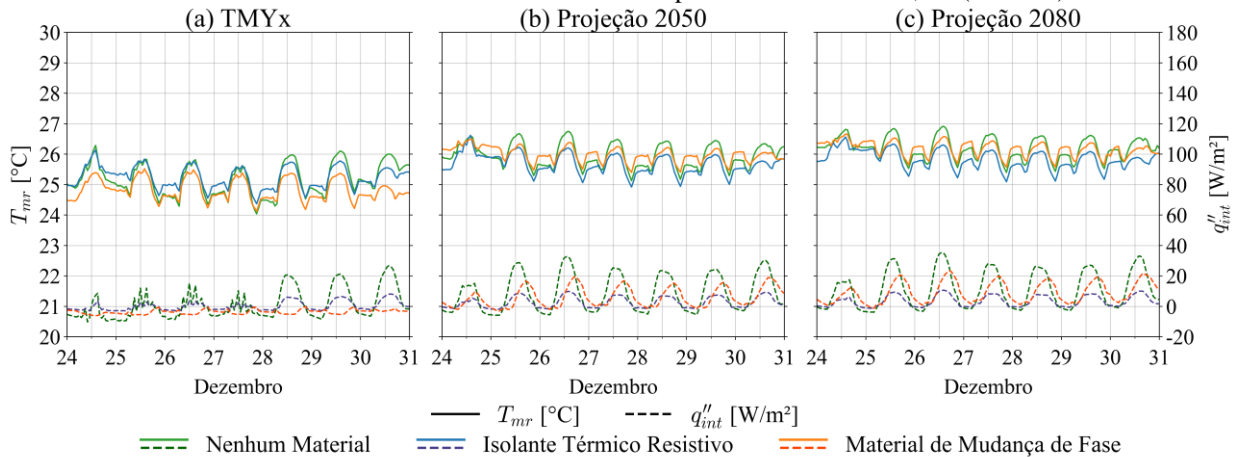


O material de mudança de fase produz perdas de calor mensais entre maio e novembro do TMY, exposto na Figura 5.12 (a), período no qual ocorre a maior diferença de EUI mensal dessa aplicação para com as demais. O material isolante consegue manter um perfil uniforme e similar – com diferenças de

magnitude – entre todos comportamentos climáticos. Para as projeções climáticas, os ganhos de calor através da fachada norte com PCM ultrapassam os da mesma fachada com isolante térmico resistivo: para a projeção de 2050 são 57,86%, ao passo que para o clima projetado para 2080 chegam 113,75% a mais.

A semana típica definida para o Rio de Janeiro, conforme o arquivo TMYx, é de 24 a 31 de dezembro, apresentando a média próxima à média anual; uma vez que o clima da cidade não apresenta grandes diferenças de temperatura ao longo das estações, o arquivo não especifica uma semana típica sazonal. Visivelmente através da Figura 5.13 (b) e (c), as temperaturas radiantes médias e fluxos de calor através da fachada com PCM são superiores aos resultados para o isolante térmico resistivo – as médias das temperaturas médias radiantes são cerca de 0,3°C superiores – validando o elevado consumo desse caso durante o mês de dezembro para as projeções climáticas, comportamento oposto ao apresentado para a mesma envoltória no ano meteorológico típico; para o clima simulado, a média da temperatura radiante média para o caso com isolante é cerca de 0,4°C maior do que para o caso com PCM.

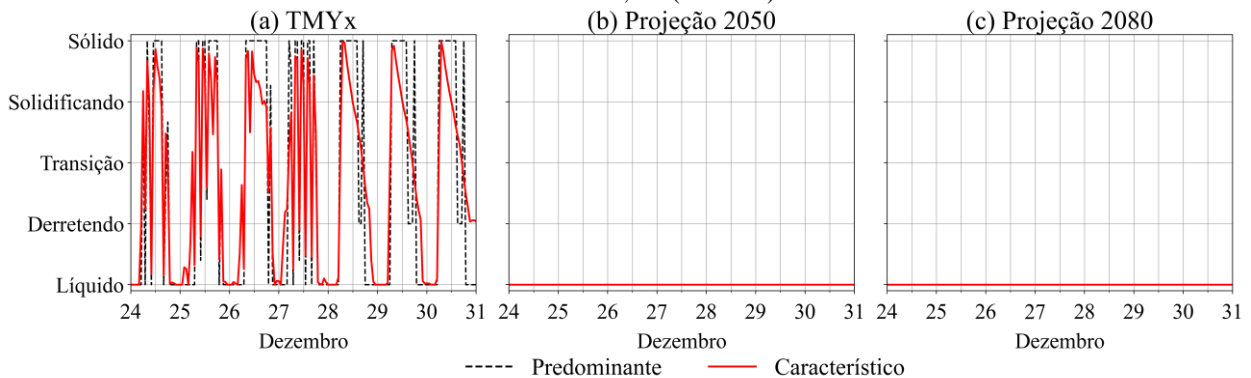
Figura 5.13 - Curvas horárias de temperatura radiante média na zona térmica 3 e fluxo de calor por condução na face interna da fachada norte durante a semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).



Fonte: o Autor.

O estado físico característico do material de mudança de fase, avaliado para a semana típica, nas projeções climáticas de 2050 (Figura 5.14 (a)) e 2080 (Figura 5.14 (b)) explicitam um estado físico constantemente líquido, justificando o elevado uso de energia do mês em questão e nos demais meses de verão e os comportamentos de fluxo de calor e temperatura expressos na Figura 5.13.

Figura 5.14 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na fachada norte durante semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).



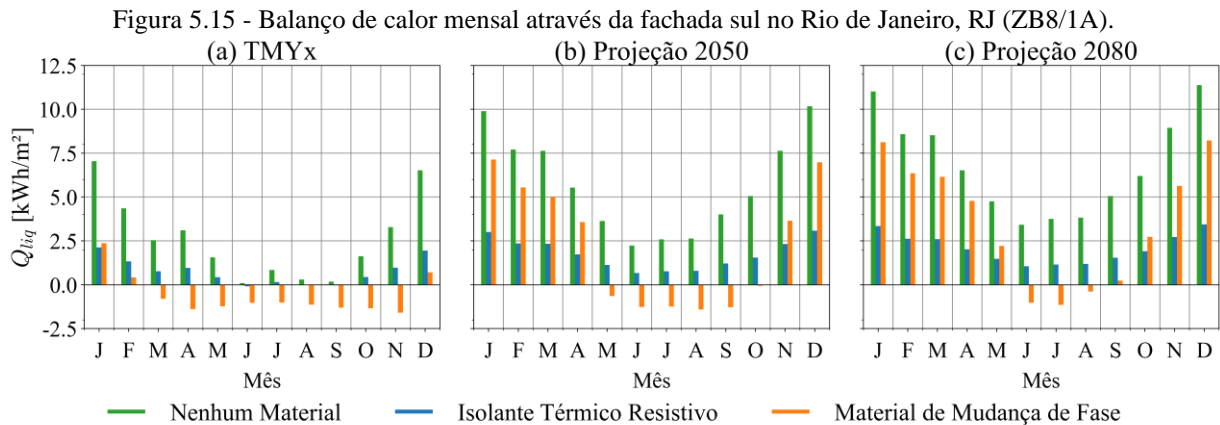
Fonte: o Autor.

Dadas as altas temperaturas, mesmo durante o ano meteorológico típico, a alta frequência de mudanças de estados físicos durante o dia pode ser observada especialmente entre os dias 27 e 28. Possivelmente, uma proximidade entre as temperaturas internas e externas ocorre, o que diminui, também,

o fluxo de calor por condução no interior da superfície; essa tendência das temperaturas mantém um volume significativo do PCM em um estado físico transicional, sujeito a variações de estado mais facilmente.

5.2.2 Zona térmica com fachada sul (Zona 1)

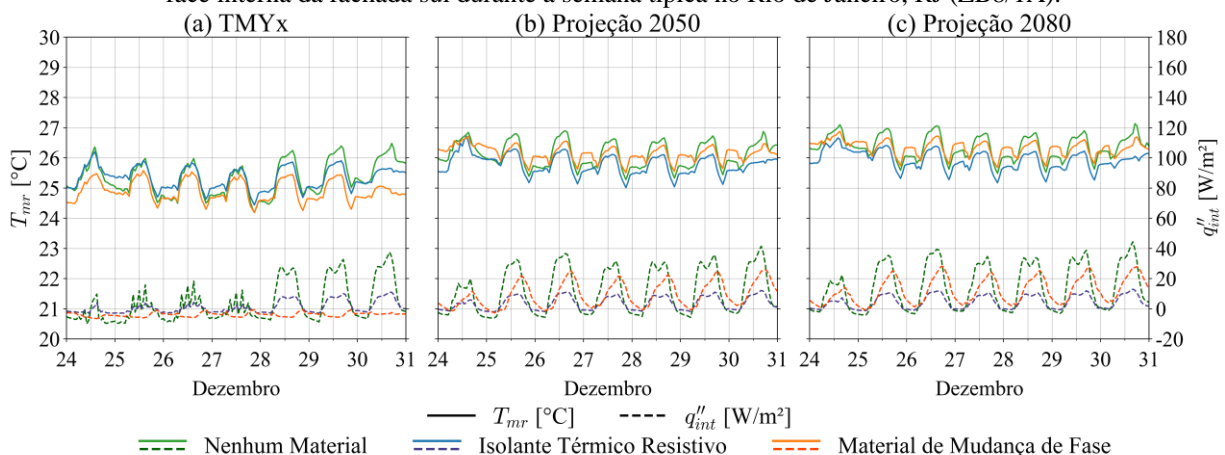
O comportamento do balanço de calor mensal para a fachada sul assemelha-se ao consumo de energia mensal ilustrado na Figura 5.15, especialmente ao se observar a envoltória com material de mudança de fase: conforme o balanço mensal de calor denota perda de energia térmica, o valor do EUI mensal para a respectiva edificação torna-se o menor dentre as três envoltórias simuladas, com destaque para as projeções de climas futuros. Os coeficientes de correlação de Pearson, para as projeções climáticas de 2050 e 2080, são 0,940 e 0,973, respectivamente, denotando correlação muito forte entre as variáveis.



Fonte: o Autor.

Semelhante à zona térmica 3, a zona térmica 1, observando a Figura 5.16, apresenta resultados temperatura radiante média na fachada com material de mudança de fase mais elevados que os apresentados pela parede com isolante térmico resistivo em projeções climática. A média semanal da T_{mr} nessa aplicação é de 26,09 e 26,26°C para os climas de 2050 e 2080; no caso da envoltória com isolante, a média nesses períodos reduz-se a 25,78 e 25,90°C.

Figura 5.16 - Curvas horárias de temperatura radiante média na zona térmica 1 e fluxo de calor por condução na face interna da fachada sul durante a semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).

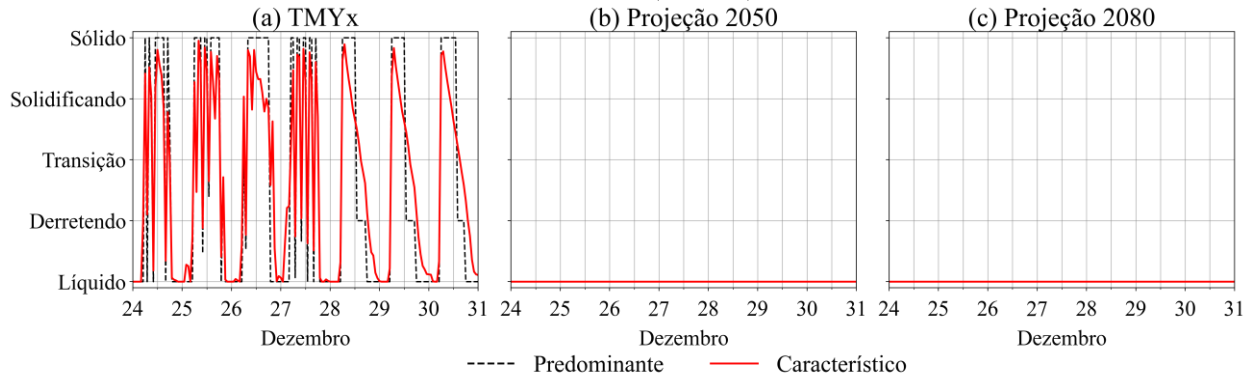


Fonte: o Autor.

Segundo as Figuras Figura 5.11 e Figura 5.15 (b) e (c), em dezembro dos climas projetados, o consumo de energia e o balanço de calor para a envoltória com material de mudança de fase apresentam resultados superiores comparados aos valores para a envoltória com isolante térmico resistivo; embora a ausência de irradiação solar direta nessa superfície, as altas temperaturas externas e a baixa espessura do

material de 4 cm, comparada às outras aplicações, o PCM apresenta-se no estado líquido durante toda a semana de dezembro (Figura 5.17 (b) e (c)), aumentando a transmitância térmica da superfície.

Figura 5.17 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na fachada sul durante semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).

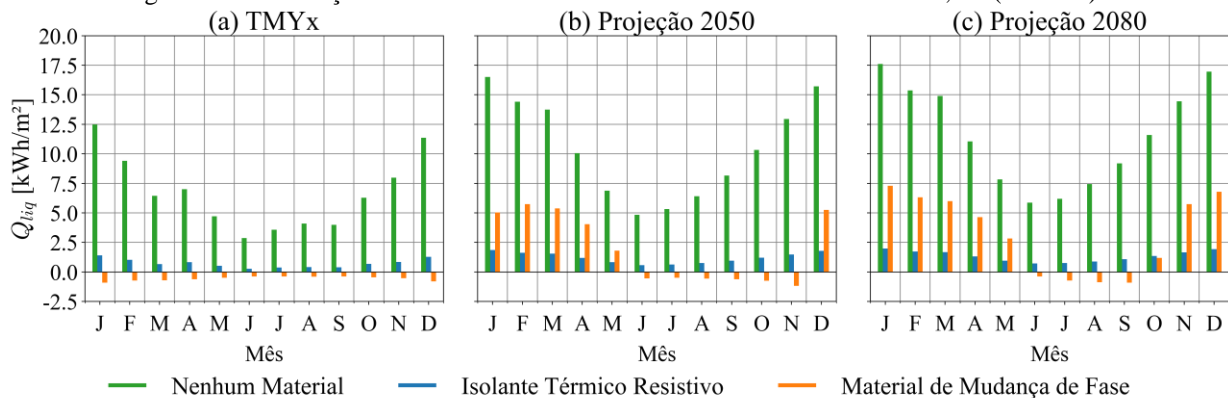


Fonte: o Autor.

5.2.3 Cobertura (*plenum*)

Semelhante às demais superfícies, o balanço de calor mensal através da superfície corrobora com o comportamento do consumo de energia mensal com climatização – vide Figura 5.18. A cobertura sem material isolante permite significativos ganhos de calor ao *plenum* de retorno em todos os meses do ano, com valores consideravelmente superiores aos apresentados pelas outras construções de envoltória; para essa composição de cobertura, obtém-se como coeficientes de correlação de Pearson entre o balanço de calor mensal e o EUI mensal 0,920 (TMYx), 0,964 (2050) e 0,963 (2080), demonstrando forte correlação entre as métricas.

Figura 5.18 - Balanço de calor mensal através da cobertura no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).



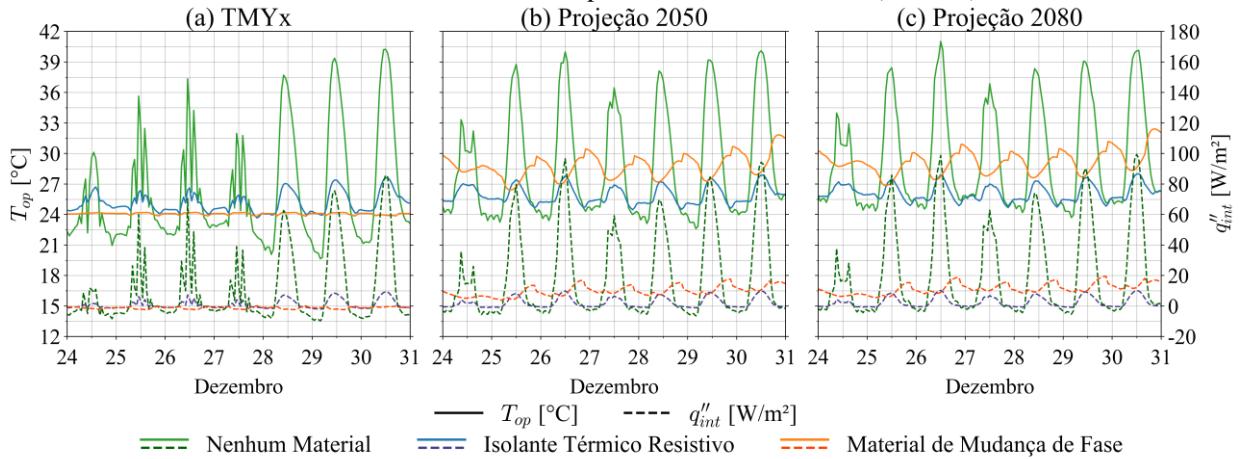
Fonte: o Autor.

O PCM acarreta em ganhos expressivos de calor nas simulações com climas futuros comparados aos apresentados na cobertura com isolante térmico resistivo, contudo, é capaz de gerar balanços de calor mensais negativos nos meses de inverno e primavera, coincidindo com os períodos de EUI mínimo da envoltória; o isolante térmico resistivo é capaz de reduzir significativamente o fluxo de calor em todos os climas, resultando em ganhos de calor menos expressivos que as outras aplicações.

Corroborando com as análises das fachadas norte e sul, de forma mais expressiva, observa-se a temperatura operativa do *plenum* superior no caso da cobertura com PCM quando comparada à estrutura com isolante térmico resistivo em projeções climáticas; a média semanal da temperatura operativa excede em 2°C, em 2050, e 2,4°C na projeção climática de 2080. Além disso, a amplitude dessa temperatura também é significativa, contrapondo as demais fachadas. A cobertura com isolante térmico consegue, independente do clima simulado, manter baixos níveis de fluxo de calor, o que garante temperaturas adequadas do espaço, chegando a uma média máxima semanal no clima futuro de 2080, com 26,3°C.

Novamente, os vários picos de fluxo de calor e temperatura, explicitados na Figura 5.19 (a) para a cobertura sem material, podem ser justificados pelo equilíbrio de temperaturas entre a face interna e o núcleo da superfície; para o ano meteorológico típico, essa cobertura produz uma temperatura operativa média de 28,7°C, cerca de 3°C acima das demais.

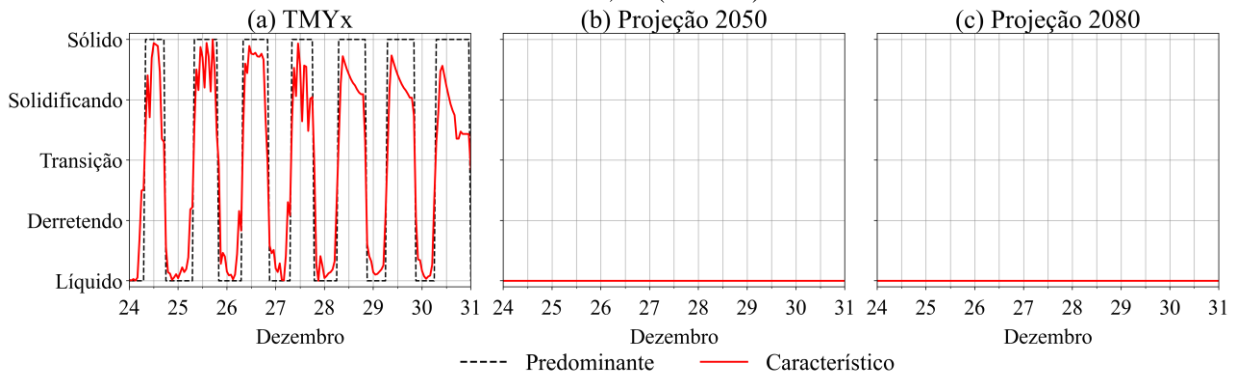
Figura 5.19 - Curvas horárias de temperatura operativa no *plenum* e fluxo de calor por condução na face interna da cobertura durante a semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).



Fonte: o Autor.

Embora existam 14 cm de PCM na cobertura, o material permanece no estado líquido durante as semanas típicas simuladas com arquivos climáticos futuros, tal como expressam as curvas da Figura 5.20 (b) e (c). Isso mantém o *plenum*, mais especificamente o ar de retorno, em temperaturas elevadas e menos vantajosas para o seu condicionamento, o que exige mais do sistema de AVAC para retirar a energia térmica do ar de mistura que é insuflado para as zonas térmicas.

Figura 5.20 - Comportamento horário do estado físico do PCM aplicado na cobertura durante semana típica no Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A).



Fonte: o Autor.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs avaliar o comportamento térmico e energético em climas futuros de uma edificação de tipologia comercial em função da implementação de diferentes materiais na envoltória e seus impactos na adaptabilidade climática e resiliência térmica dessa edificação. Utilizando o *software EnergyPlus* e códigos em *Python* para análise e tratamento dos dados dos *outputs*, foram estudados três tipos de envoltória: com isolante térmico resistivo, conforme ASHRAE; com material de mudança de fase SP24E, substituindo geometricamente esse isolante; e sem nenhum material isolante, possuindo a maior transmitância térmica dentre as envoltórias consideradas. Fez-se uso de um modelo termoenergético protótipo construído e disponibilizado pelo Departamento de Energia do Estados Unidos, cujos sistemas são consoantes às normas da ASHRAE; foram selecionadas duas cidades representativas de zonas

bioclimáticas definidas pela ABNT (1 e 8), coincidentes com as da associação americana (3A e 1A), para execução das simulações em diferentes comportamentos climáticos.

As projeções de mudanças climáticas futuras, para os anos representativos de 2050 e 2080, foram incorporadas aos arquivos climáticos, necessários para simulações termoenergéticas, por meio da metodologia de *downscaling* estatística *morphing* utilizando a ferramenta *CCWorldWeatherGen* e dados do Modelo Atmosférico de Circulação Global HadCM3, disponibilizados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), para o cenário de emissões A2, médio-alto. As métricas da edificação consistiram na Intensidade do Uso de Energia (EUI) mensal para climatização dos ambientes e o comportamento dos balanços de calor mensal através das envoltórias; na escala das zonas térmicas, foram estudados perfis horários em semanas típicas da temperatura radiante média, temperatura operativa e fluxo de calor na face interna das superfícies das fachadas, e, também, o estado físico característico horário do PCM nas respectivas superfícies onde o material foi aplicado.

A partir dos resultados obtidos e respectivas análises, constata-se se que o trabalho atinge os objetivos propostos e, assim, conclui-se que:

- A implementação do material de mudança de fase com temperaturas de operação dentro do intervalo de *setpoint* do sistema de climatização resulta em melhor desempenho térmico e energético da edificação em regiões com climas amenos se comparada à utilização de isolantes térmicos resistivos, apresentando menores valores de EUI; contudo, em locais cujas projeções climáticas indicam um aumento expressivo de temperaturas, a aplicação de PCM pode ser inviável porque a transferência de calor através da superfície se intensifica ao passo que o material permanece no estado líquido durante a operação da edificação. Nesse cenário, materiais isolantes mostram-se mais benéficos do ponto de vista de eficiência energética do que PCM;
- A combinação simultânea de aplicações passiva (na envoltória da zona térmica) e ativa (na envoltória dos *plenums*) potencializa o impacto da implementação do material de mudança de fase em toda a envoltória externa, mantendo níveis adequados de temperatura radiante média e temperatura operativa consoantes aos *setpoints* do sistema de AVAC;
- As mudanças climáticas mostram-se como um aspecto importante para avaliação e projeto de envoltórias e a sua consideração em simulações termoenergéticas é uma ferramenta relevante para o estudo da performance da edificação durante sua vida útil. Os coeficientes de correlação de Pearson calculados explicitam que, com o aumento das temperaturas, os ganhos de calor através da envoltória, particularmente em uma edificação com isolamento térmico deficiente, ditarão o consumo de energia com climatização, o que denota a imperatividade da implementação de estratégias à envoltória para garantir adaptabilidade e resiliência climática das edificações;
- Sendo uma aplicação naturalmente passiva e sensível ao clima, a definição da faixa de temperatura de operação do PCM deve ser dimensionada primordialmente observando as condições meteorológicas locais, concomitante à definição de parâmetros termodinâmicos;
- O aumento da condutividade térmica do material de mudança de fase, embora traga benefícios do ponto de vista do ciclo de histerese térmica, pode impactar negativamente na performance da envoltória onde o material é aplicado, posto que o PCM pode permanecer em um único estado físico, perdendo-se, assim, a capacidade de armazenamento de calor latente e aumentando a transmitância térmica da superfície onde é aplicado, intensificando os ganhos de calor.

Para trabalhos futuros sugere-se inclusão da avaliação econômica das envoltórias, consideração de diferentes zonas climáticas e a aplicação de materiais convencionais da construção civil nacional como referência, que já possuem massa térmica relevante. Os PCM funcionam a partir de ciclos de histerese e, conforme a quantidade de ciclos, o material pode apresentar variações em suas propriedades térmicas. Nesse sentido, a substituição periódica do material de mudança de fase desempenha um papel relevante, tal como, por exemplo, a adaptação da transmitância do envelope ao aumento das temperaturas ou a combinação dos materiais em uma superfície composta. Demais sugestões envolvem a consideração de diferentes tipologias e sistemas de AVAC, de forma a estudar os efeitos passivos e ativos da implementação de PCM e o impacto da performance em cargas parciais dos equipamentos de climatização. Outrossim, as características da envoltória podem ser parametrizadas em trabalhos subsequentes, tendo como objetivo a otimização da eficiência energética, conforto térmico e custo de construção e operação da edificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKEIBER, Hussein; NEJAT, Payam; MAJID, Muhd Zaimi Abd.; WAHID, Mazlan A.; JOMEHZADEH, Fatemeh; FAMILI, Iman Zeynali; CALAUTIT, John Kaiser; HUGHES, Ben Richard; ZAKI, Sheikh Ahmad. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 60, p. 1470-1497, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.036>.

AL-JANABI, Ali; KAVGIC, Miroslava. **Application and sensitivity analysis of the phase change material hysteresis method in EnergyPlus: A case study**. Applied Thermal Engineering, [S.L.], v. 162, p.1-19, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114222>.

AL-YASIRI, Qudama; SZABÓ, Márta. Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: a comprehensive analysis. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 36, p. 102122, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102122>.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019 – Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 15220-3: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BAGLIVO, Cristina; CONGEDO, Paolo Maria; MURRONE, Graziano; LEZZI, Dalila. Long-term predictive energy analysis of a high-performance building in a mediterranean climate under climate change. **Energy**, [S.L.], v. 238, p. 121641, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.121641>.

BELCHER, Se; HACKER, Jn; POWELL, Ds. Constructing design weather data for future climates. **Building Services Engineering Research And Technology**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 49-61, fev. 2005. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>.

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S.; INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 1699 p.

CARLUCCI, Francesco; CANNAVALE, Alessandro; TRIGGIANO, Angela Alessia; SQUICCIARINI, Amalia; FIORITO, Francesco. Phase Change Material Integration in Building Envelopes in Different Building Types and Climates: modeling the benefits of active and passive strategies. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 10, p. 4680, 20 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app11104680>.

CRAWLEY, Drury; LAWRIE, Linda. Rethinking the TMY: is the “typical” meteorological year best for building performance simulation?. **Building Simulation Conference Proceedings**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 1-8, 7 dez. 2015. IBPSA. <http://dx.doi.org/10.26868/25222708.2015.2707>.

D'AGOSTINO, D.; PARKER, D.; EPIFANI, I.; CRAWLEY, D.; LAWRIE, L.. How will future climate impact the design and performance of nearly zero energy buildings (NZEBs)? **Energy**, [S.L.], v. 240, p. 122479, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.122479>.

DOE. **EnergyPlus Engineering Reference**. U.S. Department of Energy, 2019.

DOE. **EnergyPlus**. Versão 9.2. U.S. Department of Energy, <https://energyplus.net/>. Acesso em: 02 jul. 2022a.

DOE. **Prototype Building Models**. U.S. Department of Energy. Disponível em: <https://www.energycodes.gov/prototype-building-models>. Acesso em: 10 nov. 2022b.

DOE. **Types of Insulation**. U.S. Department of Energy. Disponível em: [https://www.energy.gov/energysaver/types-insulation#:~:text=The%20most%20common%20types%20of%20materials%20used%20for%20loose%20Dfill,\(rock%20or%20slag\)%20wool](https://www.energy.gov/energysaver/types-insulation#:~:text=The%20most%20common%20types%20of%20materials%20used%20for%20loose%20Dfill,(rock%20or%20slag)%20wool). Acesso em: 10 dez. 2022c.

Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. **Atlas da Eficiência Energética Brasil 2021**. [S.I.]: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2021>. Acesso em: 16 fev. 2023.

FANG, Zhaosong; LI, Nan; LI, Baizhan; LUO, Guozhi; HUANG, Yanqi. The effect of building envelope insulation on cooling energy consumption in summer. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 77, p. 197-205, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.030>.

FILIPPINI, Lorenzo Olivo; SARTORI, Gabriela; TORRES, Maurício Carvalho Ayres. The impact of PCM applications on thermal comfort in standardized preschool designs in 2 Brazilian climatic zones. **Building Simulation Conference Proceedings**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 2749-2756, 1 set. 2021. KU Leuven. <http://dx.doi.org/10.26868/25222708.2021.30855>.

GRANDERSON, Jessica; LIN, Guanjing; HARDING, Ari; IM, Piljae; CHEN, Yan. Building fault detection data to aid diagnostic algorithm creation and performance testing. **Scientific Data**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1-15, 24 fev. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41597-020-0398-6>.

IEA. Agência Internacional de Energia. **Building Envelope**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/building-envelopes>. Acesso em: 26 nov. 2022a.

IEA. Agência Internacional de Energia. **Buildings**. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/buildings>. Acesso em: 15 ago. 2022b.

IEA. Agência Internacional de Energia. **Cooling**. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/cooling>. Acesso em: 15 ago. 2022c.

IEA. Agência Internacional de Energia. **The Future of Cooling**: opportunities for energy-efficient air conditioning. 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>. Acesso em: 15 ago. 2022d.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População estimada do país chega a 213,3 milhões de habitantes em 2021**. 2021. Disponível em: [https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/31458-populacao-estimada-do-pais-chega-a-213-3-milhoes-de-habitantes-em-2021#:~:text=O%20munic%C3%ADpio%20de%20S%C3%A3o%20Paulo,\(2%2C7%20mil%C3%B5es\)](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/31458-populacao-estimada-do-pais-chega-a-213-3-milhoes-de-habitantes-em-2021#:~:text=O%20munic%C3%ADpio%20de%20S%C3%A3o%20Paulo,(2%2C7%20mil%C3%B5es)). Acesso em: 28 nov. 2022.

IPCC. Intergovernmental Panel On Climate Change. **HadCM3 Climate Scenario Data**. Data Distribution Centre. Disponível em: https://www.ipcc-data.org/sim/gcm_clim/SRES_TAR/hadcm3_download.html. Acesso em: 28 nov. 2022.

JENTSCH, Mark F.; JAMES, Patrick A.B.; BOURIKAS, Leonidas; BAHAJ, Abubakr S.. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 55, p. 514-524, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049>.

KALBASI, Rasool; AFRAND, Masoud. Which one is more effective to add to building envelope: phase change material, thermal insulation, or their combination to meet zero-carbon-ready buildings?. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 367, p. 133032, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133032>.

KALBASI, Rasool; HASSANI, Parsa. Buildings with less HVAC power demand by incorporating PCM into envelopes taking into account ASHRAE climate classification. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 51, p. 104303, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104303>.

LIU, Zhengxuan; YU, Zhun (Jerry); YANG, Tingting; QIN, Di; LI, Shuisheng; ZHANG, Guoqiang; HAGHIGHAT, Fariborz; JOYBARI, Mahmood Mastani. A review on macro-encapsulated phase change material for building envelope applications. **Building And Environment**, [S.L.], v. 144, p. 281-294, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.030>.

MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto; VERSAGE, Rogério de Souza; ZHANG, Yi. Is Thermal Insulation Always Beneficial in Hot Climates? **Building Simulation Conference Proceedings**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 1353-1360, 7 dez. 2015. IBPSA. <http://dx.doi.org/10.26868/25222708.2015.2188>.

PAROUTOGLU, Evdoxia et al. A PCM based cooling system for office buildings: a state-of-the-art review. **E3s Web Of Conferences**, [S.L.], v. 111, p.1-8, 2019. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/201911101026>.

PBE Edifica. **Arquivos climáticos INMET 2018**. 2020. Disponível em: <http://pbeedifica.com.br/arquivos-climaticos/inmet2018>. Acesso em: 10 jan. 2023.

POPESCU, C. -M.. Wood as bio-based building material. **Performance Of Bio-Based Building Materials**, [S.L.], p. 21-96, 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-100982-6.00002-1>.

RATHORE, Pushpendra Kumar Singh; GUPTA, Naveen Kumar; YADAV, Devanand; SHUKLA, Shailendra Kumar; KAUL, Sanjay. Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: an updated review. **Sustainable Cities And Society**, [S.L.], v. 79, p. 103690, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2022.103690>.

REINO UNIDO. Hadley Center. Met Office. **HadCM3: Met Office climate prediction model**. Disponível em: <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadcm3>. Acesso em: 01 dez. 2022.

RODRIGUES, Eugénio; FERNANDES, Marco S.. Overheating risk in Mediterranean residential buildings: comparison of current and future climate scenarios. **Applied Energy**, [S.L.], v. 259, p. 114110, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114110>.

RUBITHERM. **BUILDINGS**. 2022. Disponível em: <https://www.rubitherm.eu/en/applications/building>. Acesso em: 18 set. 2022a.

RUBITHERM. **Data Sheet SP24E**. 2022. Disponível em: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_SP24E_EN_12072022.PDF. Acesso 18 set. 2022b.

SHELLER, C., Melo, A.P., SORGATO, M., LAMBERTS, R. “Análise de arquivos Climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações”. **Laboratório de Eficiência Energética Em Edificações**, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2015.

SURESH, C.; HOTTA, Tapano Kumar; SAHA, Sandip K.. Phase change material incorporation techniques in building envelopes for enhancing the building thermal Comfort-A review. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 268, p. 112225, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112225>.

TABARES-VELASCO, Paulo Cesar; CHRISTENSEN, Craig; BIANCHI, Marcus. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building And Environment**, [S.L.], v. 54, p. 186-196, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.019>.

UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON. **CCWorldWeatherGen**. 2022. Disponível em: <https://energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/>. Acesso em: 20 nov. 2022.

VEERAKUMAR, C.; SREEKUMAR, A.. Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications – A review. **International Journal Of Refrigeration**, [s.l.], v. 67, p.271-289, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005>.

WANG, Xiaonan; LI, Wengui; LUO, Zhiyu; WANG, Kejin; SHAH, Surendra P.. A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: design, characteristic, performance and application. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 260, p. 111923, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111923>.

WMO. World Meteorological Organization. **Updated 30-year reference period reflects changing climate**. 2021. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/media/news/updated-30-year-reference-period-reflects-changing-climate>. Acesso em: 01 dez. 2022.

YUAN, Feng; YAO, Runming; SADRIZADEH, Sasan; LI, Baiyi; CAO, Guangyu; ZHANG, Shaoxing; ZHOU, Shan; LIU, Hong; BOGDAN, Anna; CROITORU, Cristiana. Thermal comfort in hospital buildings – A literature review. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 45, p. 103463, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103463>.

YÜKSEK, Izzet; KARADAYI, Tülay Tikansak. Energy-Efficient Building Design in the Context of Building Life Cycle. **Energy Efficient Buildings**, [S.L.], v. 1, n. 5, p. 93-124, 18 jan. 2017. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/66670>.

ZASTAWNA-RUMIN, Anna; KISILEWICZ, Tomasz; BERARDI, Umberto. Novel Simulation Algorithm for Modeling the Hysteresis of Phase Change Materials. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 1200, 5 mar. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13051200>.

ZILBERBERG, E.; TRAPPER, P.; MEIR, I.A.; ISAAC, S.. The impact of thermal mass and insulation of building structure on energy efficiency. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 241, p. 110954, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110954>.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Características de PCM do tipo sólido-líquido

De acordo com a composição do PCM do tipo sólido-líquido, diferentes características são observadas para a macroclassificação do material; no Quadro AP.1 essas características são divididas entre vantagens e desvantagens.

Quadro AA.1 – Características de PCM sólido-líquido.

Tipo de PCM	Vantagens	Desvantagens
Orgânicos	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade em diferentes temperaturas; • Alto calor latente de fusão; • Ausência de subresfriamento; • Ausência de segregação de fase; • Estável depois de vários ciclos; • Estabilidade química e física; • Compatibilidade com os materiais das cápsulas; • Baixa corrosividade; • Baixo impacto ambiental; • Não reativos; • Recicláveis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa condutividade térmica; • Instável sob altas temperaturas; • Transição de fase disforme; • Alguns não são compatíveis com cápsulas plásticas; • Baixa entalpia • Diferentes níveis de toxicidade; • Flamáveis; • Custo alto quando puros.
Inorgânicos	<ul style="list-style-type: none"> • Alta capacidade de armazenamento térmico; • Boa condutividade térmica; • Facilmente disponível; • Baixo custo; • Baixa pressão de vapor; • Inflamáveis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentam superfusão; • Variação de volume entre fases; • Podem apresentar segregação de fase; • Alguns são incompatíveis com containers metálicos.
Eutéticos	<ul style="list-style-type: none"> • Maior densidade de armazenamento que compostos orgânicos; • Valores de derretimento bem definidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custosos; • Poucos dados termodinâmicos.

Fonte: adaptado de Yasiri e Szabó (2021).

APÊNDICE B – Transmitância térmica das superfícies da envoltória

A alteração da composição da envoltória altera o valor da transmitância térmica das superfícies, ultrapassando o valor máximo definido pela ASHRAE. Na Tabela AB.1 são expostos os valores para a cobertura e para as paredes externas, onde “NEM” identifica a envoltória sem material isolante e “PCM” e envoltória com material de mudança de fase; no caso do PCM, um valor único é apresentado entre os dois estados físicos já que a condutividade térmica não se altera (ver Apêndice D – Dados de input do material de mudança de fase para simulação de histerese), logo, sua resistência térmica é virtualmente a mesma.

Tabela AB.1 – Transmitância térmica das superfícies construtivas sem material isolante.

Zona climática	$U_{cobertura} [W/m^2K]$		$U_{paredes} [W/m^2K]$	
	NEM	PCM	NEM	PCM
1A	5,083	2,098	2,606	2,156
3A	5,083	1,863	2,606	1,839

Fonte: o Autor.

APÊNDICE C – Anos utilizados para construção dos arquivos TMYx

Os anos meteorológicos típicos são construídos selecionando meses representativos do período climático de referência. A Tabela AC.1 expõe os anos dos quais os meses são extraídos; em vermelho destacam-se os anos fora do período climático recomendado pela Organização Meteorológica Mundial.

Tabela AC.1 – Anos dos arquivos climáticos utilizados para construção do ano meteorológico típico.

Cidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Curitiba	1977	1987	1977	1964	1993	2008	1980	1965	1986	2017	1977	1990
Rio de Janeiro	1989	1991	2017	1988	1981	1980	1980	1981	2001	1987	2001	1979

Fonte: o Autor.

APÊNDICE D – Dados de *input* do PCM para simulação de histerese

Na Tabela AD.1 são apresentados os dados necessários para simulação da histerese térmica do material de mudança de fase no *EnergyPlus*. Os dados são extraídos do *datasheet* do PCM.

Tabela AD.1 – Dados do material SP24E.

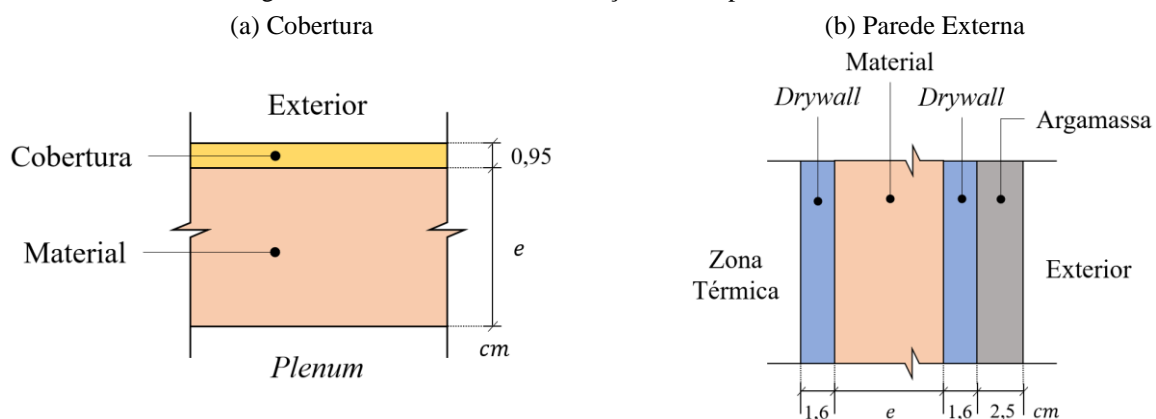
Propriedade	Valor	Unidade
Faixa de temperatura de derretimento	24-25 (pico em 24)	°C
Faixa de temperatura de solidificação	23-21 (pico em 22)	°C
Calor latente (L)	150	kJ/kg
Calor específico (c_p)	2	kJ/kgK
Massa específica no estado sólido (ρ_{sol})	1600	kg/m ³
Massa específica no estado líquido (ρ_{liq})	1500	kg/m ³
Condutividade térmica (k)	0,5	W/mK

Fonte: adaptado de RubiTherm (2022).

APÊNDICE E – Detalhes das construções das superfícies da envoltória

Na Figura AE.1 ilustram-se as construções genéricas das superfícies da cobertura e fachadas externas, realçando a camada de material – isolante ou PCM – que é alterada entre simulações.

Figura AE.1 – Detalhe das construções das superfícies, fora de escala.



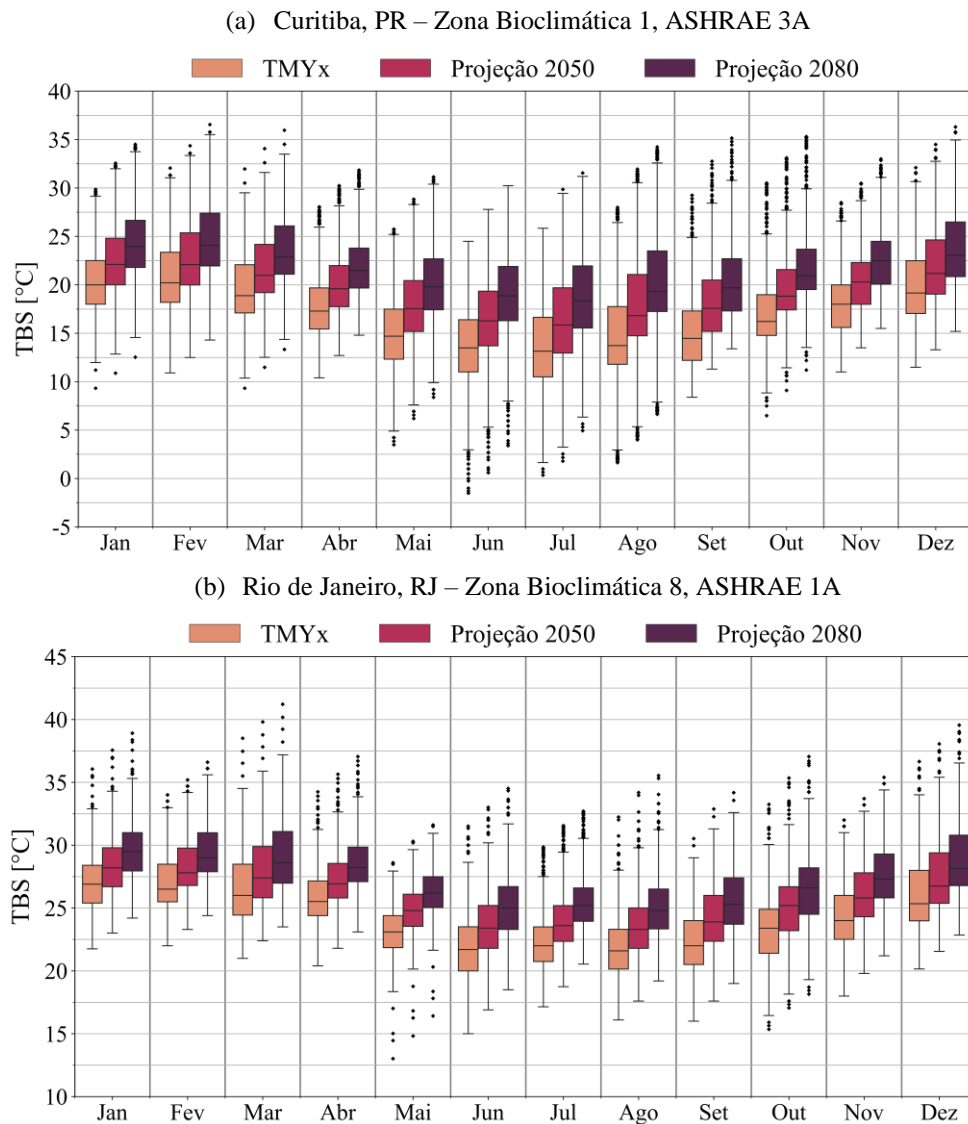
Fonte: o Autor.

APÊNDICE F – Comportamentos climáticos

Através da Figura AF.1, são apresentados os comportamentos das temperaturas de bulbo seco externa (TBS) horárias em cada mês, conforme os arquivos climáticos empregados, utilizando *boxplots* para condensar a informação da temperatura em frequência horária. Isso serve como forma de ilustração das mudanças climáticas em relação ao clima do ano meteorológico típico. É possível identificar, também,

a operação de *shift*, da técnica de *morphing*, sendo aplicada à variável climática em questão, ao observar os deslocamentos uniformes entre os climas.

Figura AF.1 – Comportamentos das temperaturas de bulbo seco externas nos cenários climáticos simulados.



Fonte: o Autor.

A Tabela AF.1 condensa informações anuais dos três períodos climáticos simulados: média anual da temperatura de bulbo seco externa e mínimos e máximos anuais, nas duas zonas bioclimáticas simuladas. Curitiba registra aumentos de 2,52°C, na projeção para 2050, e 4,65°C em 2080 na média anual, enquanto a cidade do Rio de Janeiro, apresenta aumentos menos expressivos: de 1,59°C em 2050 e 2,98°C no clima projetado de 2080, comparando com a média anual do ano típico.

Tabela AF.1 – Médias e extremos anuais de temperaturas de bulbo seco nos cenários climáticos simulados.

Climas	Curitiba, PR – ZB1 1, ASHRAE 3A			Rio de Janeiro, RJ – ZB 8, ASHRAE 1A		
	T_{ano} [°C]	$T_{mín}$ [°C]	$T_{máx}$ [°C]	T_{ano} [°C]	$T_{mín}$ [°C]	$T_{máx}$ [°C]
TMYx	17,17	-1,51	32,10	24,26	13,02	38,51
Projeção 2050	19,69	0,59	34,50	25,86	14,82	39,81
Projeção 2080	21,83	3,39	36,56	27,25	16,42	41,21

Fonte: o Autor.

APÊNDICE G – Coeficientes de correlação de Pearson

Na Tabela AG.1 são expostos os valores do coeficiente de correlação r de Pearson entre a intensidade de uso de energia mensal e os balanços de calor através das superfícies da envoltória avaliadas.

Tabela AG.1 – Coeficientes de Correlação r de Pearson entre EUI mensal e balanço de calor na envoltória.

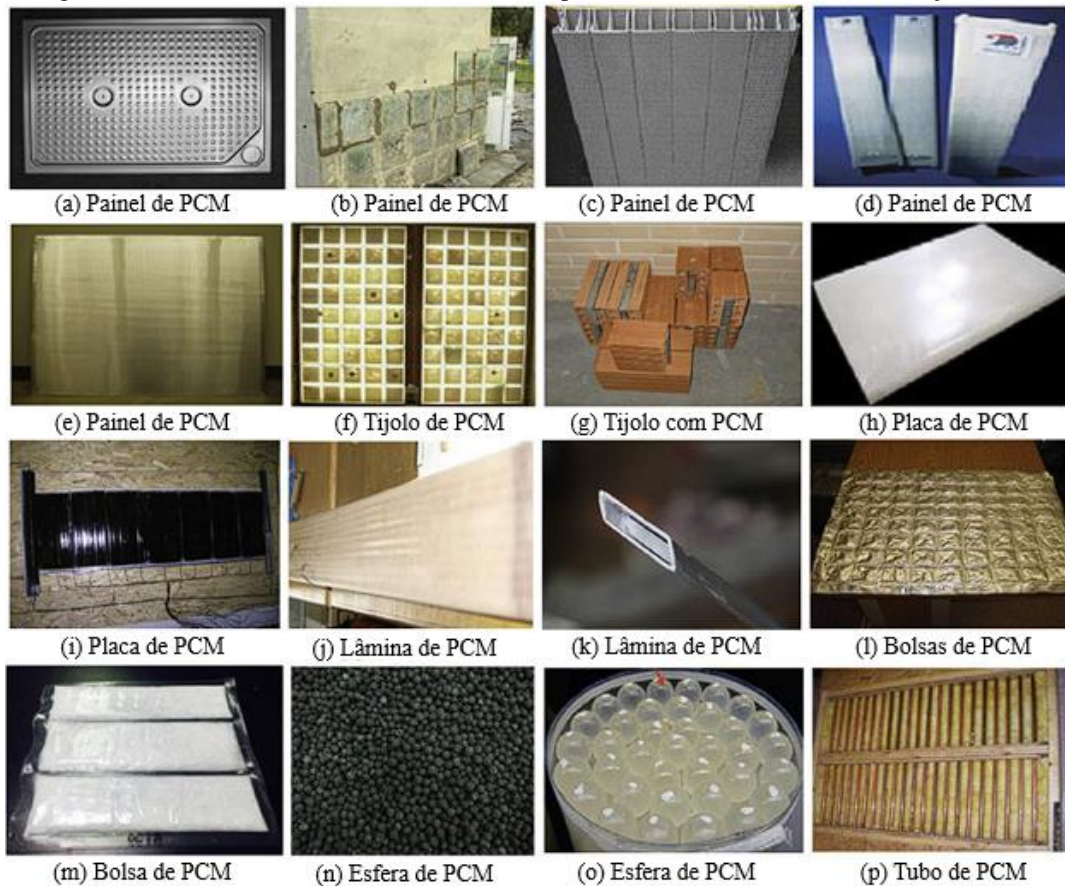
EUI mensal x balanço de calor através da fachada norte						
Clima	Curitiba, PR (ZB1/3A)			Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A)		
	NEM	ISO	PCM	NEM	ISO	PCM
TMYx	-0,112	0,597	-0,763	-0,410	-0,282	0,794
Projeção 2050	-0,134	0,271	-0,121	-0,282	-0,125	0,815
Projeção 2080	-0,282	0,085	0,353	-0,287	-0,135	0,443
EUI mensal x balanço de calor através da fachada sul						
Clima	Curitiba, PR (ZB1/3A)			Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A)		
	NEM	ISO	PCM	NEM	ISO	PCM
TMYx	-0,144	0,963	-0,227	0,922	0,885	0,710
Projeção 2050	0,945	0,960	-0,957	0,949	0,918	0,940
Projeção 2080	0,967	0,956	-0,954	0,944	0,906	0,973
EUI mensal x balanço de calor através da cobertura						
Clima	Curitiba, PR (ZB1/3A)			Rio de Janeiro, RJ (ZB8/1A)		
	NEM	ISO	PCM	NEM	ISO	PCM
TMYx	-0,150	0,930	-0,941	0,920	0,856	-0,969
Projeção 2050	0,945	0,950	-0,984	0,964	0,928	0,923
Projeção 2080	0,971	0,950	-0,988	0,963	0,921	0,983

Fonte: o Autor.

ANEXOS

ANEXO A – Alternativas de macroencapsulamento de PCM para aplicação em edificações

Figura A.1 – Possíveis alternativas de macroencapsulamento de materiais de mudança de fase.

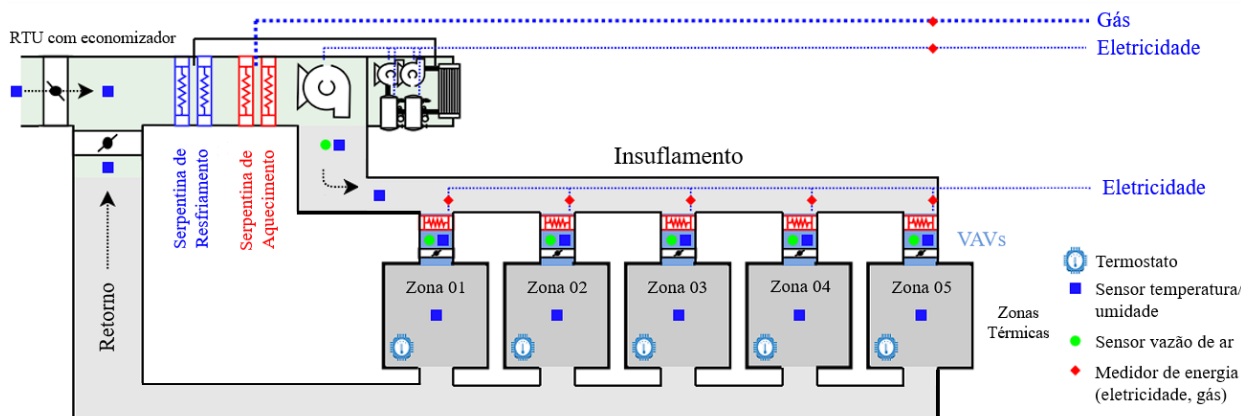


Fonte: adaptado de Liu et al. (2018)

ANEXO B – Diagrama esquemático de um sistema VAV multi-zona

Na Figura B.1 apresenta-se um diagrama de um sistema VAV multi-zona de duto único, com unidade *rooftop* e ciclo economizador, destacando o ar de retorno das zonas térmicas até o equipamento.

Figura B.1 – Diagrama esquemático de um sistema VAV multi-zona de duto único.




Fonte: adaptado de Granderson et al. (2020).

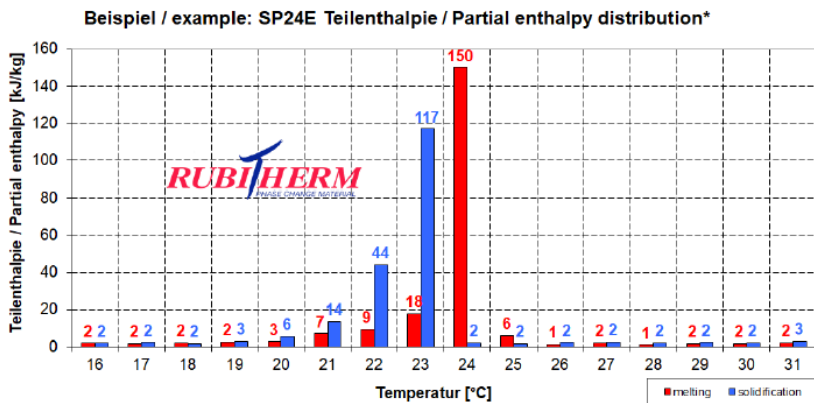
ANEXO C – Datasheet do PCM SP24E

Figura C.1 – Datasheet do PCM SP24E.

The most important data:	Typical Values
Melting area	24-25 [°C] main peak: 24
Congeeing area	23-21 [°C] main peak: 22
Heat storage capacity ± 7,5% Combination of sensible and latent heat in a temperatur range of 15 °C to 30°C.	180 [kJ/kg]
Specific heat capacity	50 [Wh/kg]*
Density solid at 15°C	2 [kJ/kg·K]*
Density liquid at 35°C	1,6 [kg/l]
Volume expansion	1,5 [kg/l]
Heat conductivity	~6 [%]
Max. operation temperature	~0,5 [W/(m·K)]
Corrosion	45 [°C] corrosive effect on metals



The product must be initialized (melt, homogenize and cool to 0 °C) once before use to achieve the specified properties. SP-products may absorb release water if stored improperly. This can result in a change of the physical properties given. Storing in closed containers mandatory.



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

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 12.07.2022

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Fonte: adaptado de Rubitherm (2022b).