

**MATHEUS MENEZES OLIVEIRA**

**INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE NO  
CONFORTO TÉRMICO EM MODELO DE ESCRITÓRIO NOS CLIMAS  
BRASILEIROS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Joyce Correna Carlo

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

O48i  
2023

Oliveira, Matheus Menezes, 1993-

Investigação da influência dos materiais de mudança de fase no conforto térmico em modelo de escritório nos climas brasileiros / Matheus Menezes Oliveira. – Viçosa, MG, 2023.  
1 tese eletrônica (196 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Joyce Correna Carlo.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.188>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Arquitetura e conservação de energia. 2. Materiais - Propriedades térmicas. 3. Conforto humano. 4. Clima - Brasil. I. Carlo, Joyce Correna, 1973-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDD 22. ed. 720.472

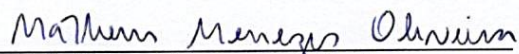
**MATHEUS MENEZES OLIVEIRA**

**INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE NO  
CONFORTO TÉRMICO EM MODELO DE ESCRITÓRIO NOS CLIMAS  
BRASILEIROS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

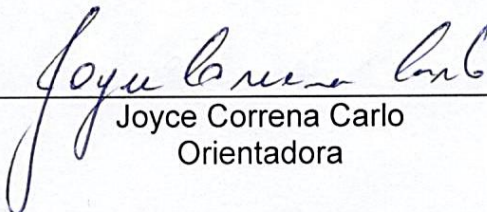
APROVADA: 28 de fevereiro de 2023.

Assentimento:



---

Matheus Menezes Oliveira  
Autor



---

Joyce Correna Carlo  
Orientadora

## RESUMO

OLIVEIRA, Matheus Menezes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2023. **Investigação da influência dos materiais de mudança de fase no conforto térmico em modelo de escritório nos climas brasileiros**. Orientadora: Joyce Correna Carlo.

Os Materiais de Mudança de Fase (PCMs) podem aumentar a inércia térmica de ambientes com restrições ao uso de materiais tradicionalmente associados à alta capacidade térmica. A incorporação de PCMs pode promover atraso e amortecimento térmico, aumentar o conforto térmico de usuários e a eficiência energética de edificações. Muitas pesquisas comprovaram o desempenho de PCMs para climas temperados e com altas latitudes, porém, para o contexto climático brasileiro, as pesquisas são comparativamente escassas. Essa tese objetiva contextualizar a aplicação de PCMs no espaço edificado e analisar sua influência no conforto térmico de usuários em um modelo de escritório nos climas brasileiros. Para isso, foi executada uma revisão integrativa de literatura para definição do estado da arte e simulações termoenergéticas com o programa EnergyPlus. A revisão levantou os parâmetros mais relevantes e correntes em pesquisas com PCMs: clima, condicionamento do ambiente, orientação solar, o tipo/características de PCM, a camada em que o material está instalado e sua espessura. Após o levantamento, foram realizadas simulações com PCMs orgânicos com temperaturas de mudança de fase entre 18°C e 44°C em modelo de escritório de baixa capacidade térmica e condicionado naturalmente. As simulações foram divididas em dois grupos: o primeiro com 5 cidades, com foco nos parâmetros de instalação e condições de contorno e o segundo, com 95 cidades simuladas e foco nos parâmetros climáticos. As primeiras simulações revelaram que o tipo do PCM, o clima (temperatura e radiação) e a camada de instalação foram os parâmetros de maior influência, resultando em variações acima de 20% na porcentagem de conforto térmico adaptativo. A orientação solar teve impacto moderado, com mudanças de até 10% no conforto e a espessura do PCM e tipo de ventilação apresentaram menor influência, com média de 2% no conforto. No segundo grupo de simulações, os parâmetros de instalação de maior impacto identificadas no primeiro grupo foram fixadas e os parâmetros climáticos foram adotados como variáveis independentes e analisados em relação ao conforto térmico adaptativo em ambientes com PCM. Foram avaliadas temperaturas de bulbo

seco e de ponto de orvalho, radiação infravermelha, direta e difusa, umidade relativa, direção e velocidade do vento. Os resultados indicaram que a incorporação de PCMs tem potencial para aumentar o conforto em parte do Brasil, nos melhores casos com aumento entre 20% e 36% em relação aos casos sem PCMs. Constantemente, os melhores resultados foram obtidos nas Zonas Bioclimáticas (ZBs) 1 a 4, com melhores efeitos em cidades com temperaturas médias anuais iguais ou abaixo de 21°C. Cidades com temperaturas médias anuais maiores que 21°C e menores que 23°C nas ZB3, ZB4, ZB5 e ZB8 também apresentaram bom desempenho, o que demanda avaliação individualizada para cidades com médias anuais acima de 21°C. Para as melhores ocorrências, a temperatura de bulbo seco, a umidade relativa e a direção do vento foram os parâmetros climáticos mais representativos, e, portanto, mais importantes para o aumento do conforto térmico de usuários em ambientes com PCM.

**Palavras-chave:** Materiais de Mudança de Fase. PCMs. Simulação termoenergética. EnergyPlus. Climas brasileiros. Conforto térmico adaptativo. Parâmetros climáticos.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Matheus Menezes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2023. **Investigation of the influence of phase change materials on thermal comfort in an office model in Brazilian climates.** Adviser: Joyce Correna Carlo.

Phase Change Materials (PCMs) increase the building's thermal inertia comparably to materials traditionally associated with high thermal capacity. Incorporating Phase Change Materials (PCMs) in indoor environments can increase users' thermal comfort and the building's energy efficiency. Many investigations have proven the performance of PCMs in temperate climates and at high latitudes. However, in the Brazilian climatic context, research is relatively limited. This thesis aims to contextualize the application of PCMs in the built space and analyze their influence on the thermal comfort of office users in Brazilian climates. An integrative literature review was conducted to define the state-of-the-art and thermoenergetic simulations using EnergyPlus. The review presented the most relevant and current examination parameters in research with PCMs: climate, environmental conditioning, solar orientation, the type/characteristics of the PCM, the layer in which the material is installed, and its thickness. After the survey, simulations were conducted using organic PCMs with phase-change temperatures between 18°C and 44°C, installed in a naturally conditioned, low thermal capacity office model. The simulations were divided into two groups, the first contemplated 5 cities and focused on installation parameters and boundary conditions and the second assessed 95 cities and focused on climate parameters. The first simulations revealed that the phase-change temperature, the climate (temperature and radiation), and the installation layer were the most influential parameters, resulting in 20% variations in adaptive thermal comfort. Solar orientation had a moderate impact, with up to 10% comfort variation, followed by layer thickness and type of ventilation, with 2% thermal comfort alteration. In the second group of simulations, the highest impact parameters in the first group were fixed. The climatic parameters were adopted as independent variables and analyzed according to adaptive thermal comfort variation between the PCM-incorporated and base cases. Dry bulb and dew point temperatures, direct and diffuse infrared radiation, relative humidity, wind direction, and wind speed were evaluated. The results indicated that the incorporation of PCMs has the potential to increase comfort in part of Brazil, with improvements between 20% and 36%

compared to cases without PCMs. Consistently, the best results occurred in Bioclimatic Zones (BZs) 1 to 4, with the best effects in cities with average annual temperatures at or below 21°C. Cities with annual average temperatures between 21°C and 23°C in ZB3, ZB4, ZB5, and ZB8 also performed satisfactorily, demanding further evaluation. For the best circumstances, dry bulb temperature, relative humidity, and wind direction were the most representative climatic parameters and, therefore, most significant for increasing users' thermal comfort in environments with PCM.

**Keywords:** Phase Change Materials. PCMs. Thermoenergetic simulation. EnergyPlus. Brazilian climates. Adaptive thermal comfort. Climatic parameters.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Análise bibliométrica dos autores .....	70
Figura 2 Análise bibliométrica das palavras-chave .....	72
Figura 3 Cidades contempladas em pesquisas com PCMs – Região dos trópicos destacada em rosa .....	74
Figura 4 (a) Edificação simulada com ambiente analisado destacado em vermelho, fachada frontal; (b) Edificação simulada, fachada posterior .....	93
Figura 5 Seção esquemática das paredes, com camada de PCM, nesse exemplo com 3cm.....	97
Figura 6 Comparação entre o PHC do CB e dos tipos de PCM na ZB1 .....	101
Figura 7 Comparação entre o PHC do CB e dos tipos de PCM para Brasília (ZB4).....	102
Figura 8 Relação entre Temperatura interna e externa do ambiente com PCM para Brasília .....	103
Figura 9 Comparação entre o PHC do CB e dos tipos de PCM para ZB8 .....	104
Figura 10 Comparação entre camada de instalação e condição de ventilação e espessura. Espessura 3cm (a) e espessura 6cm (b).....	107
Figura 11 PHC da ventilação seletiva com ventilação noturna .....	109
Figura 12 PHC da opção 3 (esquerda) e 4 (direita) .....	110
Figura 13 Relação entre PCM e temperatura externa média anual .....	111
Figura 14 Relação entre PCM e radiação solar média anual.....	111
Figura 15 (a) Edificação simulada com ambiente analisado destacado em vermelho, fachada frontal; (b) Edificação simulada, fachada posterior .....	123
Figura 16 Cidades selecionadas para simulação plotadas sobre o mapa do Brasil (a) Classificação Climática de Köppen-Geiger (b) Classificação Climática da NBR 15220. ....	125
Figura 17 Diferenças entre os PHCs do caso-base (CB) com cada caso com PCM para as 95 cidades em relação às temperaturas médias anuais das cidades .....	133
Figura 18 Diferenças entre os casos com PCM e seus respectivos CB, para as 95 cidades .....	133
Figura 19 Contribuição dos parâmetros climáticos na cidade de Maria da Fé (a) CB e (b) PCM 21 .....	136
Figura 20 Contribuição da TBS no conforto do CB e dos PCMs testados .....	137
Figura 21 Contribuição da UR no conforto do CB e PCMs testados.....	138

Figura 22 Contribuição da Vdir no conforto do CB e PCMs testados .....	138
Figura 23 Análise do PCM 21 considerando todos os parâmetros climáticos.....	139
Figura 24 Biplot – Clusters das cidades com os CB sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	140
Figura 25 Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 18 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	140
Figura 26 Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 21 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	140
Figura 27 Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 22 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	140
Figura 28 Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 25 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	141
Figura 29 Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 28 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	141
Figura 30 Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 35.....	141
Figura 31 (Equivalente a Figura 3) Cidades contempladas em pesquisas com PCMs – Região dos trópicos destacada em rosa.....	155
Figura 32 (Equivalente a Figura 18) Cidades selecionadas para simulação plotadas sobre o mapa do Brasil.....	156
Figura 33 TBS anual para todas as cidades selecionadas .....	157
Figura 34 TBS anual para as cidades selecionadas.....	157
Figura 35 (Equivalente a Figura 26) Biplot – Clusters das cidades com os CB sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	190
Figura 36 (Equivalente a Figura 27) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 18 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	191
Figura 37 (Equivalente a Figura 28) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 21 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	192
Figura 38 (Equivalente a Figura 29) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 22 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	193
Figura 39 (Equivalente a Figura 30) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 25 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	194
Figura 40 (Equivalente a Figura 31) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 28 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	195
Figura 41 (Equivalente a Figura 32) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 35 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância.....	196

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resultados por strings de busca.....	43
Tabela 2 PCM em paredes externas e internas.....	46
Tabela 3 PCM em coberturas.....	53
Tabela 4 PCMs em envoltórias.....	56
Tabela 5 PCM em fechamentos translúcidos.....	63
Tabela 6 PCMs em outros sistemas.....	68
Tabela 7 Parâmetros adotados na simulação.....	93
Tabela 8 Condições de Ventilação.....	94
Tabela 9 Propriedades dos PCMs.....	95
Tabela 10 Características das cidades analisadas.....	96
Tabela 11 Resultados obtidos a partir da simulação.....	98
Tabela 12 Parâmetros adotados na simulação do CB.....	123
Tabela 13 Propriedades dos PCMs.....	124
Tabela 14 Características climáticas das cidades analisadas.....	126
Tabela 15 Resultado comparativo entre casos com PCM, CB e média dos 6 PCMs ...	130
Tabela 16 Porcentagem da influência dos parâmetros climáticos na PHC em Maria da Fé.....	136
Tabela 17 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Campos do Jordão.....	158
Tabela 18 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Curitiba.....	158
Tabela 19 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Maringá.....	158
Tabela 20 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Bento Gonçalves.....	159
Tabela 21 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Poços de Caldas.....	159
Tabela 22 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Varginha.....	159
Tabela 23 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Maria da Fé.....	160

Tabela 24 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Teresópolis .....	160
Tabela 25 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Piracicaba .....	160
Tabela 26 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Inacio Martins .....	161
Tabela 27 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Chuí .....	161
Tabela 28 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Santa Maria .....	161
Tabela 29 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Alegrete .....	162
Tabela 30 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Curitiba .....	162
Tabela 31 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Belo Horizonte .....	162
Tabela 32 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Diamantina .....	163
Tabela 33 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Timoteo .....	163
Tabela 34 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Juiz de Fora .....	163
Tabela 35 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: São Paulo .....	164
Tabela 36 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Sorocaba .....	164
Tabela 37 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Dourados .....	164
Tabela 38 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Londrina .....	165
Tabela 39 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Foz do Iguaçu .....	165
Tabela 40 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Porto Alegre .....	165
Tabela 41 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Florianópolis .....	166

Tabela 42 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Valença .....	166
Tabela 43 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Uberlândia .....	166
Tabela 44 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Bauru.....	167
Tabela 45 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Pires do Rio.....	167
Tabela 46 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Brasília .....	167
Tabela 47 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Vitória da Conquista .....	168
Tabela 48 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Guaramiranga.....	168
Tabela 49 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Alegre .....	168
Tabela 50 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Teófilo Otoni .....	169
Tabela 51 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Iguapé .....	169
Tabela 52 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Sorriso .....	169
Tabela 53 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Miranda .....	170
Tabela 54 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Niterói.....	170
Tabela 55 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Paraná.....	170
Tabela 56 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Santa Rita de Cassia .....	171
Tabela 57 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Irecê .....	171
Tabela 58 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Serra Talhada.....	171
Tabela 59 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Montes Claros .....	172

Tabela 60 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Presidente Prudente .....	172
Tabela 61 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Goiânia .....	172
Tabela 62 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Rondonópolis.....	173
Tabela 63 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Paranatinga .....	173
Tabela 64 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Campo Grande .....	173
Tabela 65 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Coxim .....	174
Tabela 66 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Palmas .....	174
Tabela 67 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Dianópolis.....	174
Tabela 68 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Barreiras .....	175
Tabela 69 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Barbalha .....	175
Tabela 70 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Imperatriz .....	175
Tabela 71 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Caxias .....	176
Tabela 72 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Patos .....	176
Tabela 73 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Petrolina .....	176
Tabela 74 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Teresina .....	177
Tabela 75 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Caicó .....	177
Tabela 76 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Mossoró.....	177
Tabela 77 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Monte Azul.....	178

Tabela 78 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Monte Alegre do Goiás .....	178
Tabela 79 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Cuiabá .....	178
Tabela 80 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Rio Branco .....	179
Tabela 81 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Macapá .....	179
Tabela 82 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Oiapoque .....	179
Tabela 83 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Manaus .....	180
Tabela 84 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Barcelos .....	180
Tabela 85 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Parintins .....	180
Tabela 86 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Belém .....	181
Tabela 87 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Marabá .....	181
Tabela 88 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Parauapebas .....	181
Tabela 89 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Castanhal .....	182
Tabela 90 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Santana do Araguaia .....	182
Tabela 91 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Porto Velho .....	182
Tabela 92 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Boa Vista .....	183
Tabela 93 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Maceió .....	183
Tabela 94 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Arapiraca .....	183
Tabela 95 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Salvador .....	184

Tabela 96 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Feira de Santana .....	184
Tabela 97 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Ilhéus.....	184
Tabela 98 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Fortaleza .....	185
Tabela 99 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: São Luís .....	185
Tabela 100 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: João Pessoa.....	185
Tabela 101 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Campina Grande .....	186
Tabela 102 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Recife .....	186
Tabela 103 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Caruaru .....	186
Tabela 104 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Parnaíba.....	187
Tabela 105 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Natal .....	187
Tabela 106 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Aracaju .....	187
Tabela 107 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Carira.....	188
Tabela 108 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Vitória .....	188
Tabela 109 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Rio de Janeiro .....	188
Tabela 110 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Juína.....	189
Tabela 111 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Corumbá.....	189

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BE	Belém
BG	Bento Gonçalves
BR	Brasília
CB	Caso Base
CJ	Campos do Jordão
E3	Espessura do PCM de 3cm
E6	Espessura do PCM de 6cm
EX	PCM instalado na parte externa das paredes
IN	PCM instalado na parte interna das paredes
L	Leste
ME	PCM instalado no meio das paredes
N	Norte
O	Oeste
PCM	Material de Mudança de Fase
PCM 18	PCM RT18HC fabricado pela Rubitherm Technologies GmbH ®
PCM 21	PCM RT21HC fabricado pela Rubitherm Technologies GmbH ®
PCM 22	PCM RT22HC fabricado pela Rubitherm Technologies GmbH ®
PCM 25	PCM RT25HC fabricado pela Rubitherm Technologies GmbH ®
PCM 28	PCM RT28HC fabricado pela Rubitherm Technologies GmbH ®
PCM 35	PCM RT35HC fabricado pela Rubitherm Technologies GmbH ®
PCM 44	PCM RT44HC fabricado pela Rubitherm Technologies GmbH ®
PHC	Percentual/porcentagem de horas em conforto
Rdif	Radiação difusa
Rdir	Radiação direta
Rinf	Radiação infravermelha
RJ	Rio de Janeiro
S	Sul
TBS	Temperatura de bulbo seco
TMA	Temperatura média anual
TMF	Temperatura de mudança de fase
TPO	Temperatura de ponto de orvalho

UFV Universidade Federal de Viçosa  
UR Umidade relativa  
Vdir Direção do vento  
VS Ventilação natural seletiva  
VSN Ventilação natural seletiva combinada com ventilação noturna constante  
Vvel Velocidade do vento  
ZB Zona Bioclimática (Definida pela NBR 15220, ABNT 2005)

## SUMÁRIO

<b>CAPITULO 1: INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>19</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	19
1.2 OBJETIVO .....	20
1.2.1 Objetivo Geral .....	20
1.2.2 Objetivos Específicos .....	20
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA .....	21
1.4 ESTRUTURA DA TESE .....	22
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	25
<b>CAPÍTULO 2: USO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE EM SISTEMAS CONSTRUTIVOS: REVISÃO INTEGRATIVA DE LITERATURA</b>	<b>28</b>
RESUMO .....	28
ABSTRACT .....	28
2.1 INTRODUÇÃO .....	29
2.2 MATERIAIS E MÉTODO .....	31
2.3 REFERENCIAL TEÓRICO .....	37
2.3.1 Classificação dos PCMs .....	38
2.3.2 Utilização de PCMs em elementos construtivos .....	39
2.3.3 PCMs na construção civil .....	41
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	43
2.4.1 Resultados da busca e seleção de artigos a partir da revisão integrativa .....	43
2.4.2 PCMs em componentes construtivos .....	44
2.4.3 Análise bibliométrica .....	70
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	75
2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	79
<b>CAPÍTULO 3: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA E PARÂMETROS DE INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE EM EDIFICAÇÕES DE ESCRITÓRIO EM CLIMAS BRASILEIROS</b>	<b>89</b>
RESUMO .....	89
ABSTRACT .....	89
3.1 INTRODUÇÃO .....	90
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	92
3.2.1 Simulação Termoenergética .....	92
3.2.2 Geometria e materiais .....	93
3.2.3 Condições de ventilação .....	94
3.2.4 PCMs .....	95
3.2.5 Cidades e climas avaliados .....	96

3.2.6	Instalação do PCM .....	97
3.2.7	Dados de saída e análise dos resultados .....	98
3.3	RESULTADOS.....	98
3.3.1	Tipos de PCMs em relação as Zonas Bioclimáticas .....	100
3.3.2	Parâmetros construtivos e de instalação do PCM .....	105
3.3.3	Influência dos parâmetros climáticos.....	110
3.4	CONCLUSÃO .....	113
3.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
<b>CAPÍTULO: 4 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS NO CONFORTO TÉRMICO DOS USUÁRIOS EM ESCRITÓRIOS COM PCMs NOS CLIMAS BRASILEIROS</b>		<b>118</b>
	RESUMO.....	118
	ABSTRACT.....	118
4.1	INTRODUÇÃO.....	119
4.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	121
4.2.1	Simulação Termoenergética.....	121
4.2.2	Definição do modelo, propriedades construtivas e condições de contorno ..	122
4.2.3	Tipos de PCMs.....	124
4.2.4	Cidades avaliadas .....	125
4.2.5	Dados de saída de simulação .....	128
4.2.6	Análise dos parâmetros climáticos .....	128
4.3	RESULTADOS.....	130
4.3.1	Comparação do caso base às simulações com PCMs incorporados .....	130
4.3.2	Análise da influência dos parâmetros climáticos .....	135
4.3.3	Agrupamento das cidades com melhor desempenho.....	138
4.4	CONCLUSÃO .....	144
4.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO GERAL</b>		<b>149</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	153
<b>APÊNDICES</b>		<b>155</b>
	APÊNDICE A.....	155
	APÊNDICE B.....	156
	APÊNDICE C.....	157
	APÊNDICE D.....	158
	APÊNDICE E.....	190

## CAPITULO 1: INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 INTRODUÇÃO

As edificações consomem mais de 30% da energia gerada no planeta e o uso de eletricidade em edifícios cresce em média 2,5% ao ano desde 2010. Nesse contexto, há uma demanda energética crescente para climatização de edificações comerciais com o intuito de proporcionar conforto térmico aos usuários (ÜRGE-VORSATZ et al., 2015; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017). Em baixas latitudes, com em climas tropicais, o consumo com condicionamento artificial para refrigeração é relativamente mais expressivo devido às altas temperaturas e umidade relativa do ar (LOPES; CÓSTOLA; LABAKI, 2017).

Em uma situação na qual há necessidade de aumentar a inércia térmica de ambientes que possuam fechamentos leves, é possível utilizar os Materiais de Mudança de Fase (em inglês *Phase Change Materials* - PCMs). Esses materiais possuem alta capacidade de armazenamento de energia na forma de calor latente e potencial para promover atraso térmico e amortecimento da amplitude da temperatura do ar interno em relação à amplitude do ar externo. Se comparados aos componentes feitos com materiais de alta capacidade térmica em uso na construção civil, como materiais rochosos, argila e concreto, os PCMs possuem como vantagens baixos volume e massa para capacidades térmicas equivalentes. Dessa forma, quando empregados adequadamente, os PCMs podem promover melhoria do desempenho térmico, aumento das horas em que os usuários dos edifícios sentem conforto, e diminuição do consumo de energia elétrica com a redução da necessidade de climatizar ambientes artificialmente (WAHID et al., 2017; SONG et al., 2018).

A incorporação de PCMs como sistemas passivos em edificações já tem seu desempenho térmico comprovado com melhorias no conforto térmico dos usuários e redução do consumo energético (KABDRAKHMANOVA; MEMON; SAURBAYEVA, 2021; LI et al., 2022; RATHORE et al, 2020; PARK et al., 2021; WANG et al., 2022). Os estudos mais abrangentes sobre a incorporação de PCMs em edificações para os climas brasileiros foram desenvolvidos por Brito et al (2017) e Pons e Stanescu (2017). Os estudos mencionados somados, apresentam análises para apenas 10 cidades brasileiras. Além disso, não houve variações nas condições de contorno, como análise

para diferentes orientações solares e condições de ventilação natural. Em relação aos parâmetros de instalação, não houve variação entre a camada de instalação, com parte da análise realizada com espessuras da camada de PCM entre 20cm e 35cm, o que excede as dimensões tradicionalmente utilizadas em paredes nas edificações brasileiras. Em nenhuma das pesquisas foi apresentada uma análise aprofundada e quantitativa em relações entre os parâmetros climáticos, em que apenas a temperatura do ar e radiação foram consideradas.

Assim, resta saber como os PCMs se comportam termicamente em mais cidades brasileiras, e quais os parâmetros de contorno, de instalação e climáticos aproveitam ao máximo os benefícios desses materiais.

A hipótese: **O uso de PCMs influencia positivamente o conforto térmico dos usuários em um modelo de escritório nos climas brasileiros**, leva à seguinte pergunta de pesquisa: **Quais são as características de instalação dos PCMs e os parâmetros climáticos que contribuem para melhoria do conforto térmico dos usuários em um modelo de escritório naturalmente condicionado nos climas brasileiros?**

## **1.2 OBJETIVO**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Analisar a influência da incorporação de PCMs no conforto térmico de usuários em um modelo de escritório naturalmente condicionado nos climas brasileiros.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Identificar e discutir as propriedades, características, potencialidades, restrições e aplicações de PCMs incorporados em sistemas construtivos passivos em edificações;
2. Mapear a distribuição geográfica e identificar a rede de autores, coautores e palavras-chave relacionadas ao estado da arte em pesquisas com PCM;
3. Investigar a influência de parâmetros de instalação e condições de contorno no desempenho de PCMs para os climas brasileiros.

4. Investigar a influência de parâmetros climáticos no desempenho de PCMs para os climas brasileiros.

### **1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA**

A inércia térmica é uma estratégia recomendada pela NBR 15220 (ABNT, 2005) para 7 das 8 Zonas Bioclimáticas brasileiras. Porém, tem sido pouco explorada em edificações contemporâneas, pois geralmente é associada a fechamentos espessos e pesados. Assim, a utilização de PCMs configura-se como possível solução para incorporação da inércia térmica que necessita de investigação para o contexto climático brasileiro.

Os PCMs já têm seu desempenho térmico consistentemente comprovado e são utilizados em países de clima temperado e latitudes médias, como demonstrado nos estudos de Pasupathy, Velraj e Seeniraj (2008); Kuznik e Virgone (2009); Baetens, Jelle e Gustavsen (2010); Rodriguez-Ubinas et al. (2012); Memon (2014); Vrachopoulos et al. (2015); Wahid et al. (2017); Gracia et al. (2018); Frazzica et al. (2019); Zhou e Eames (2019) e Li et al (2022). Porém, esses materiais não estão disponíveis no mercado nacional e não podem ser importados e utilizados sem o devido estudo e adaptações (BRITO et al., 2017; PONS; STANESCU, 2017).

Outra limitação do uso de PCM no Brasil está na sua associação com a ventilação natural, estratégia frequentemente explorada nas edificações brasileiras. Quando empregada de forma seletiva, o seu uso pode garantir ciclos completos de carga e descarga do PCM (LAAOUATNI et al., 2019; MATHIS et al., 2018; GUARINO et al., 2017; LIU et al., 2020; WANG et al., 2020). Os ciclos garantem que o material se comporte efetivamente para absorver ou liberar calor latente próximo a uma temperatura desejada e, conseqüentemente, melhorar as condições de conforto térmico dos usuários ao reduzir os extremos de temperatura.

A ventilação natural seletiva é descrita por Souza, Amparo e Gomes, (2011) e Tonelli e Grimaudo (2014) como uma estratégia que pode contribuir para o aumento ou para a redução da inércia térmica de ambientes. Além disso, grande parte das edificações brasileiras utilizam a ventilação natural como única forma de condicionamento. Em escritórios, o uso de condicionamento artificial é mais comum, embora não seja homogêneo em todo país. Muitas vezes a ventilação natural é utilizada em parte do

ano, principalmente em escritórios de pequeno porte. Logo, é necessário avaliar em quais locais o uso de PCMs e o consequente aumento da inércia térmica é recomendado, em quais deve ser utilizado em combinação com a ventilação e em quais não existe indicação de uso do material.

Assim como a ventilação, outros parâmetros climáticos, como temperatura, radiação, e umidade relativa influenciam o conforto térmico dos usuários e o funcionamento do PCM. Esses parâmetros são considerados de relevância em pesquisas como a de Saffari et al. (2017). Entretanto, não existem trabalhos que quantificaram ou se dedicaram a investigá-los para os contextos climáticos brasileiros de maneira a auxiliar na compreensão do seu funcionamento e na formulação de diretrizes para utilização de PCMs no Brasil.

Dessa forma, esta pesquisa investiga uma opção para melhorar o desempenho e conforto térmico de usuários em edificações brasileiras naturalmente condicionadas. Também faz parte a investigação dos parâmetros climáticos necessários para adaptação de um material que é pouco usual no país, a partir do potencial de aumento do conforto térmico identificado em pesquisas internacionais e das evidências encontradas para parte dos climas do Brasil.

Também não foram encontrados trabalhos publicados sobre a investigação de parâmetros de instalação, como camada de instalação do PCM combinado a diferentes condições de contorno, como orientações solares e condições de ventilação para PCMs no Brasil. A própria abrangência desse estudo é inédita, pois considerou 95 cidades com diferentes condições climáticas, latitudes e altitudes, a fim de avaliar a pertinência do uso do material.

#### **1.4 ESTRUTURA DA TESE**

Essa tese está dividida em cinco capítulos e seis apêndices: (1) Introdução Geral; (2) Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura; (3) Análise da influência e parâmetros de incorporação de PCMs em edificações de escritório em climas brasileiros; (4) Influência dos parâmetros climáticos no conforto térmico dos usuários em escritórios com PCMs nos climas brasileiros; (5) Conclusão Geral; e (6) Apêndices A, B, C, D e E.

**1° Capítulo:**

O primeiro capítulo consiste em uma introdução geral ao tema, com uma contextualização, objetivo geral e específicos, justificativa, relevância e ineditismo da pesquisa e um breve resumo de todos os capítulos.

Os capítulos 2, 3 e 4 estão escritos na forma de artigos. Cada um dos artigos é independente e possui a estrutura completa composta por introdução/referencial teórico, objetivo, procedimentos metodológicos, resultados e conclusões.

**2° Capítulo:**

O capítulo 2, corresponde ao artigo com título “Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura” (OLIVEIRA; LUCARELLI; CARLO, 2022), publicado na Revista Ambiente Construído, cujo acesso para versão original está presente em: DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000300610>. Para manter a formatação do restante do texto, o conteúdo idêntico ao publicado foi ajustado ao modelo da UFV a fim de dar sequência à numeração de páginas, figuras e tabelas dos demais capítulos.

Esse artigo responde aos objetivos específicos 1 e 2 e discute as potencialidades do uso de PCMs em sistemas construtivos se valendo de uma revisão integrativa de literatura em repositórios nacionais e internacionais para identificação das classificações de PCMs, critérios de seleção, incorporação e aplicação e tendências e lacunas em pesquisas acadêmicas.

Foram revisadas 134 publicações, em que 103 representam o estado da arte. As pesquisas encontradas demonstram que a utilização de PCMs em sistemas construtivos apresentou potencial para aumento das horas de conforto térmico dos usuários e redução do consumo de energia em edificações.

Como conclusão parcial, os parâmetros climáticos são fator de importância para a escolha adequada de PCMs, o que denota a relevância de pesquisas em regiões tropicais, quente e úmidas, principalmente em baixas latitudes, como grande parte do território brasileiro. Também foi observado o destaque crescente em pesquisas que utilizam simulações e otimizações multiobjetivo para avaliação simultânea dos parâmetros envolvidos com PCMs em sistemas construtivos.

### **3° Capítulo:**

O capítulo 3, corresponde ao artigo com título “Análise da influência e parâmetros de incorporação de materiais de mudança de fase em edificações de escritório em climas brasileiros” e responde ao objetivo específico 3. Nele, foi investigada a influência da incorporação de PCMs no conforto térmico de usuários em uma edificação naturalmente ventilada de escritórios em cinco cidades: duas na ZB1, Bento Gonçalves, Campos do Jordão; uma na ZB4, Brasília; e duas na ZB8, Belém e Rio de Janeiro.

A análise foi realizada por simulação termoenergética com o EnergyPlus e considerou diferentes condições de contorno e de instalação do PCM, como espessura e camada de instalação, condições de ventilação natural, orientação solar e seis temperaturas de mudança de fase. A incorporação do material proporcionou aumento entre 26% a 33% do conforto térmico em relação à edificação sem PCM, com melhores casos nas cidades das ZBs 1 e 4.

Como conclusão, as temperaturas de mudança de fase entre 21°C e 28°C, instalação do PCM na camada interna da parede e em climas com temperaturas médias externas próximas a 19°C e radiação próxima a 4000 W/m<sup>2</sup>, foram os parâmetros de maior influência no aumento do conforto.

### **4° Capítulo:**

O capítulo 4, corresponde ao artigo com título “Influência dos parâmetros climáticos no conforto térmico dos usuários em escritórios com PCMs nos climas brasileiros” e responde ao objetivo específico 4. Nesse artigo, os parâmetros de instalação e condições de contorno do artigo/capítulo anterior foram incorporados e fixados para um caso, a fim de investigar a influência de parâmetros climáticos no funcionamento de PCMs. Foram analisadas temperaturas de bulbo seco e de ponto de orvalho, umidade relativa, radiação infravermelha, direta e difusa e direção e velocidade do vento.

Para isso, foi utilizada simulação termoenergética no EnergyPlus para 95 cidades brasileiras em todas as ZBs. Para quantificar a influência dos parâmetros climáticos, foi utilizado a técnica de *machine learning* por *Gradient Boosting* e *Feature*

*Importance*, e, para agrupar as cidades, foi utilizada Análise de Componentes Principais.

A partir dos resultados, foi possível afirmar que o maior potencial para adoção de PCMs em escritórios naturalmente ventilados no Brasil está concentrado em cidades com temperaturas médias anuais abaixo de 21°C. Se analisadas as cidades que apresentaram casos com melhor desempenho, os parâmetros climáticos que mais influenciaram foram a temperatura de bulbo seco, a umidade relativa e a direção de incidência do vento.

## 5° Capítulo:

O 5° capítulo é uma conclusão geral da tese, que relaciona as conclusões dos 3 artigos (Capítulos 2, 3 e 4). Ele ainda traz a resposta à hipótese e pergunta de pesquisa e recomendações para trabalhos futuros.

## 1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARICI, M.; BILGIN, F.; NIŽETIĆ, S.; KARABAY, H. PCM integrated to external building walls: An optimization study on maximum activation of latent heat. **Applied Thermal Engineering**, v. 165, n. October 2019, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114560>.

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

BAETENS, R.; JELLE, B; GUSTAVSEN, A. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 1361–1368, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>.

BRITO, A.; AKUTSU, M.; SALLES, E.; CASTRO, G. Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 125–145, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100128>.

FRAZZICA, A.; BRANCATO, V.; PALOMBA, V.; LA ROSA, D.; GRUNGO, F.; CALABRESE, L.; PROVERBIO, E. Thermal performance of hybrid cement mortar-PCMs for warm climates application. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 193, n. July 2018, p. 270–280, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.01.022>.

GRACIA, A.; NAVARRO, L.; COMA, J.; SERRANO, S.; ROMANÍ, J.; PÉREZ, G.; CABEZA, L. Experimental set-up for testing active and passive systems for energy savings in buildings – Lessons learnt. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. September 2017, p. 1014–1026, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.109>.

GUARINO, F.; ATHIENITIS, A.; CELLURA, M.; BASTIEN, D. PCM thermal storage design in buildings: Experimental studies and applications to solarium in cold climates. **Applied Energy**, v. 185, p. 95–106, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.046>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy technology perspectives 2017: Flagship report. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017> Acesso em maio de 2022.

- KABDRAKHMANOVA, M.; MEMON, S.; SAURBAYEVA, A. Implementation of the panel data regression analysis in PCM integrated buildings located in a humid subtropical climate. *Energy*, v. 237, p. 121651, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121651>
- KUZNIK, F.; VIRGONE, J. Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling. *Energy and Buildings*, v. 41, n. 5, p. 561–570, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.022>.
- LAOOUATNI, A.; MARTAJ, N.; BENNACER, R.; LACHI, M.; EL OMARI, M.; EL GANAOU, M. Thermal building control using active ventilated block integrating phase change material. *Energy and Buildings*, v. 187, p. 50–63, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.024>.
- LI, C.; WEN, X.; CAI, W.; WU, J.; SHAO, J.; YANG, Y.; YU, H.; LIU, D.; WANG, M. Energy performance of buildings with composite phase-change material wallboards in different climatic zones of China. *Energy & Buildings*, v. 273, p. 112398, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112398>
- LIU, J.; LIU, Y.; YANG, L.; LIU, T.; ZHANG, C.; DONG, H. Climatic and seasonal suitability of phase change materials coupled with night ventilation for office buildings in Western China. *Renewable Energy*, v. 147, p. 356–373, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.069>.
- LOPES, F.; CÔSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Simulação de estratégias bioclimáticas passivas para edifício de escritórios em clima tropical semiúmido. In: ENCAC/ELACAC, Balneário Camboriú. *Proceedings [...]* Balneário Camboriú: Santa Catarina, 2017. p. 1–10.
- MATHIS, D.; BLANCHET, P.; LAGIÈRE, P.; LANDRY, V. Performance of wood-based panels integrated with a bio-based phase change material: A full-scale experiment in a cold climate with timber-frame huts. *Energies*, v. 11, n. 11, p. 1–15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113093>.
- MEMON, S. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 31, p. 870–906, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.042>.
- PARK, P.; BERARDI, U.; CHANG, S.; WI, S.; KANG, Y.; KIM, S. Energy retrofit of PCM-applied apartment buildings considering building orientation and height. *Energy*, v. 222, p. 119877, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119877>
- PASUPATHY, A.; VELRAJ, R.; SEENIRAJ, R. V. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, n. 1, p. 39–64, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.010>.
- PONS, V.; STANESCU, G. Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 8, n. 2, p. 127, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v8i2.8650228>.
- RATHORE, P.; GUPTA, N.; YADAV, D.; SHUKLA, S.; KAUL, S. Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: an updated review. *Sustainable Cities and Society*, v. 79, p. 103690, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103690>
- RODRIGUEZ-UBINAS, E.; RUIZ-VALERO, L.; VEGA, S.; NEILA, J. Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses. *Energy and Buildings*, v. 50, p. 49–62, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.018>.
- SAFFARI, M.; DE GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, C.; CABEZA, L. F. Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings. *Applied Energy*, v. 202, p. 420–434, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.107>
- SONG, M.; NIU, F.; MAO, N.; HU, Y.; DENG, S. Review on building energy performance improvement using phase change materials. *Energy and Buildings*, v. 158, p. 776–793, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.066>.
- SOUZA, H.; AMPARO, L.; GOMES, A. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em light steel framing *Ambiente Construído*, v. 11, n. 4, p. 113–128, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000400009>
- TONELLI, C.; GRIMAUDO, M. Timber buildings and thermal inertia: Open scientific problems for summer behavior in Mediterranean climate. *Energy & Buildings*, v. 83, p. 89–95, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.063>.

- ÜRGE-VORSATZ, D.; CABEZA, L. F.; SERRANO, S.; BARRENECHE, C.; PETRICHENKO, K. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 85–98, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039>.
- VRACHOPOULOS, M.; KRAVVARITIS, E.; STAVLAS, D. G.; STAMATOPOULOS, V.; GONIDIS, A.; KOUKOU, M. K. Investigating the performance of a test phase change material chamber for passive solar applications: experimental and theoretical approach. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 34, n. 9, p. 614–627, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786451.2013.853065>.
- WAHID, M.; HOSSEINI, S.; HUSSEN, H. M.; AKEIBER, H.; SAUD, S.; MOHAMMAD, A. An overview of phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region. **Applied Thermal Engineering**, v. 112, p. 1240–1259, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.032>.
- WANG, H.; LU, Wei; WU, Z.; ZHANG, G. Parametric analysis of applying PCM wallboards for energy saving in high-rise lightweight buildings in Shanghai. **Renewable Energy**, v. 145, p. 52–64, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.124>.
- WANG, X.; LI, W.; LUO, Z.; WANG, K.; SHAH, S. A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application. **Energy & Buildings**, v. 260, p. 111923, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111923>
- ZHOU, D.; EAMES, P. Phase Change Material Wallboard (PCMW) melting temperature optimisation for passive indoor temperature control. **Renewable Energy**, v. 139, p. 507–514, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.109>.

## CAPÍTULO 2: USO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE EM SISTEMAS CONSTRUTIVOS: REVISÃO INTEGRATIVA DE LITERATURA

### RESUMO

Os materiais de mudança de fase – *Phase Change Materials* (PCMs) possuem alta capacidade de armazenamento de energia na forma de calor latente e, conseqüentemente, potencial para proporcionar conforto térmico aos usuários e economia de energia em edificações. Entretanto, muitos parâmetros devem ser analisados para sua escolha e utilização adequada. O objetivo deste artigo é discutir as potencialidades do uso de PCMs em sistemas construtivos a partir de uma revisão integrativa de literatura em repositórios nacionais e internacionais, identificando as classificações, critérios de seleção, incorporação, aplicação, tendências e lacunas das pesquisas. Foram encontradas 134 publicações, dentre as quais 103 representam o estado da arte nos últimos cinco anos. De maneira geral, as pesquisas encontradas demonstram que a utilização de PCMs em sistemas construtivos apresenta potencial para aumento das horas de conforto e redução do consumo de energia. As condições climáticas configuraram o parâmetro mais importante para a escolha adequada de PCMs, evidenciando a importância de pesquisas em regiões tropicais com clima quente e úmido, principalmente em baixas latitudes, como grande parte do Brasil. Também foi observado o enfoque crescente em pesquisas que utilizam simulações e otimizações multiobjetivo para avaliação simultânea dos diversos parâmetros envolvidos na associação de PCMs a sistemas construtivos.

**Palavras-chave:** Material de mudança de fase; Revisão integrativa; Inércia térmica; Estratégias passivas; Conforto térmico; Eficiência energética.

### ABSTRACT

Phase Change Materials (PCMs) have a high latent heat storage capacity and, consequently, the potential to provide thermal comfort to users and energy savings in buildings. However, many parameters should be analyzed for the selection and application of these materials. This article discusses the potentialities of applying PCMs in construction systems based on an Integrative Literature Review in national and international repositories, identifying the classifications, selection, incorporation and application criteria, tendencies, and research gaps. The review comprises 134 articles, 103 of which are state-of-the-art of the last five years. In general, research on PCMs for constructive systems increased comfort hours and diminished energy consumption. Climatic conditions proved to be the most crucial parameter for the determination of PCMs, evidencing a gap in research for tropical regions with hot and humid climates and low latitudes, such as a large portion of Brazil. It was also observed a significant growth in research that uses multiobjective simulations and optimization to simultaneously evaluate the parameters involved in the association of PCMs and buildings systems.

**Keywords:** Phase Change Material; Integrative Review; Thermal Inertia; Passive Strategy; Thermal Comfort; Energy Efficiency.

## 2.1 INTRODUÇÃO

Edificações consomem mais de 40% da energia primária gerada no planeta e o uso de eletricidade em edifícios cresce em média 2,5% ao ano desde 2010. Em países em desenvolvimento, e sobretudo em locais de clima quente e parcialmente úmido, há uma demanda significativa para climatização de edificações comerciais com o intuito de proporcionar conforto térmico aos usuários (ÜRGE-VORSATZ et al., 2015; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017). Nesse contexto, estratégias passivas de climatização possibilitam o aquecimento ou o resfriamento de ambientes sem acréscimos no consumo de energia elétrica.

Dentre as estratégias passivas de climatização, a inércia térmica é recomendada para edificações situadas em locais com grande amplitude diária da temperatura do ar externo e incidência de radiação solar intensa. Normalmente, edificações com alta capacidade térmica possuem envoltórias compostas por elementos construtivos espessos e pesados, recintos parcialmente enterrados, pequenas aberturas e elementos de sombreamento. Em oposição, edificações contemporâneas geralmente possuem baixa capacidade térmica por priorizarem o uso de fechamentos leves, devido às limitações econômicas e técnicas (BRITO, 2015). Sendo assim, o desempenho térmico de envoltórias exerce influência direta na manutenção das condições ambientais internas e no gasto de energia elétrica (NATEPHRA et al., 2017).

Em situações em que se deseja aumentar a inércia térmica de ambientes com fechamentos leves, a literatura sugere como uma das opções o uso de materiais inteligentes. Esses materiais, também conhecidos como ativos, adaptativos ou multifuncionais (em inglês *smart materials*), com alto desempenho e propriedades diversas, são capazes de gerar respostas para estímulos externos como temperatura, pressão, umidade e outros (FERREIRA; NÓVOA; MARQUES, 2016).

Nessa classificação, os materiais de mudança de fase (em inglês *phase change materials* – PCMs) funcionam como elementos passivos integrados ou adicionados a componentes construtivos das edificações. Em sua forma original, possuem alta capacidade de armazenamento de energia em calor latente e potencial para promover atraso térmico e amortecimento da amplitude da temperatura do ar interno em relação à amplitude do ar externo. Comparados a componentes construtivos tradicionalmente

associados a alta capacidade térmica, como materiais rochosos e argila, os PCMs possuem baixos volume e massa para capacidades térmicas equivalentes. Dessa forma, quando adequadamente empregados, podem promover melhoria do desempenho térmico, aumento das horas em que os usuários sentem conforto e redução da necessidade de climatização artificial (WAHID et al., 2017; SONG et al., 2018).

De acordo com Brito et al. (2017), a incorporação de PCMs a componentes construtivos é mais expressiva no Hemisfério Norte, e principalmente em altas latitudes, a despeito do maior gasto de energia em relação aos climas quentes e úmidos.

Destaca-se, nesse contexto, os artigos que apresentam revisões de literatura com foco no uso de PCM em edificações com uma compilação média de mais de 100 artigos. Esses estudos proporcionam ao leitor/pesquisador uma visão global do tema que é especialmente interessante em etapas iniciais de pesquisa. Dentro do tema PCM e edificações, podem ser encontrados artigos de revisão mais abrangentes, que apresentam o material, suas propriedades e aplicações (ZALBA et al., 2003; SHARMA et al., 2009; BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010; KALNÆS; JELLE, 2015; RATHORE; SHUKLA, 2019; MARANI; NEHDI, 2019) ou mais específicos: com foco na eficiência energética (CUNHA; AGUIAR, 2020); PCMs para resfriamento ou em climas quentes (WAHID et al., 2017; PEREZ; ØSTERGAARD, 2018; FARAJ et al., 2020; OLIVEIRA; GONZALES; CARVALHO, 2021); PCM em argamassas (FRIGIONE; LETTIERI; SARCINELLA, 2019); PCMs em paredes (MEMON, 2014; CUI et al., 2015); sistemas envidraçados (LI et al., 2020); e pesquisas em PCM a partir de simulação (SAFFARI et al., 2017).

Embora apresentadas as vantagens desse tipo de publicação, o comum em todos estudos, com exceção de Oliveira, Gonzáles e Carvalho (2021), é a inexistência de procedimentos metodológicos bem descritos e replicáveis. Todos os artigos mencionados não apresentam seções destinadas aos procedimentos metodológicos, limitando-se a indicar o estudo como revisão no título, resumo, objetivos ou conclusão. Em alguns poucos casos a palavra revisão é acompanhada por um substantivo, como “*literature*”, “*state-of-the-art*”, “*comprehensive*”, “*extensive*” ou “*critical*”, que são genéricos e insuficientes para compreensão da abordagem metodológica proposta.

Portanto, o **objetivo** deste artigo é identificar e discutir as características, potencialidades, restrições, aplicações e propriedades dos PCMs empregados em sistemas construtivos, a partir de uma metodologia estruturada e replicável para condução de uma revisão integrativa de literatura. Também faz parte do objetivo deste trabalho apresentar o estado da arte das aplicações de PCMs em sistemas passivos de acordo com o tipo de envelope construtivo utilizando tabelas resumo, além do mapeamento e análise crítica da rede de coautores, palavras-chave e distribuição geográfica das pesquisas.

## 2.2 MATERIAIS E MÉTODO

O método adotado neste trabalho consiste em uma revisão integrativa de literatura com definição do estado da arte e revisão bibliométrica. A abordagem integrativa é normalmente utilizada em revisões de literatura nas áreas das ciências da saúde (MAHMUD et al., 2021) e ciências agrárias (BASSOTTO et al., 2022) e é uma das maneiras de gerar novos conhecimentos sobre determinado tema a partir de uma revisão crítica e sintética das publicações e pesquisas representativas de uma forma integrada. Além disso, ela fomenta novas estruturas e perspectivas sobre assuntos específicos (TORRACO, 2016).

Uma revisão integrativa inclui pesquisas com diferentes metodologias e escopos, o que permite que estudos teóricos e empíricos gerem uma amostra maior, ampliando as análises e fornecendo conclusões diversificadas (MENDES; SILVEIRA; GALVÃO, 2008). Revisões integrativas são recomendadas para a investigação de temas dinâmicos ou emergentes, caracterizados por um aumento rápido no número de produções em que muitas vezes são encontradas contradições ou discrepância entre as publicações (TORRACO, 2016).

Embora apresentadas as vantagens dessa abordagem metodológica, não foram encontradas revisões integrativas de literatura em periódicos nacionais ou internacionais sobre assuntos relacionados a PCMs. Pelo fato das pesquisas em PCMs serem um tema em crescente investigação e que apresentam resultados divergentes, justifica-se a aplicação dessa metodologia.

O fundamento de uma revisão integrativa é sua sistematização em tópicos ou etapas de análise. Autores como Souza, Silva e Carvalho (2010) dividem a revisão em seis

tópicos, enquanto Mendes, Silveira e Galvão (2008) e Whittemore e Knafl (2005) dividem em cinco. O conteúdo das etapas apresentadas pelos autores citados é essencialmente o mesmo. Portanto, a diferença no número de etapas ocorre pela junção ou divisão de alguns dos seguintes tópicos:

- (a) identificação do tema, seleção da questão de pesquisa e da base de dados;
- (b) estabelecimento de critérios de busca, inclusão e exclusão;
- (c) definição das informações que foram extraídas dos estudos;
- (d) forma de apresentação e agrupamento dos resultados;
- (e) interpretação dos resultados.

Na primeira etapa (a), de identificação do tema, seleção da questão de pesquisa e da base de dados, foi definido como objeto levantar e analisar as principais publicações sobre PCMs em sistemas construtivos.

Portanto, elabora-se a seguinte pergunta de pesquisa: quais as características, potencialidades, restrições, aplicações, abordagens metodológicas e propriedades do uso de PCMs em sistemas passivos em edificações?

Essa seleção e pergunta de pesquisa partem do raciocínio teórico adquirido ao longo de leituras prévias que seguiram abordagens semelhantes, como Baetens et al. (2010), Rodriguez-Ubinas et al. (2012), Memon (2014), Kalnæs e Jelle (2015), Jelle e Kalnæs (2017) e Faraj et al. (2020).

Como base de dados, foi escolhida a biblioteca virtual Periódicos Capes, disponibilizada gratuitamente para as instituições públicas de ensino superior pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e pelo Ministério da Educação.

Justifica-se a escolha do Periódicos Capes por conter um amplo catálogo de publicações em periódicos nacionais e internacionais, dissertações e teses, compilando pesquisas que aparecem em diretórios como Google Scholar, Scopus, SciELO e outros indexadores. O uso de uma única plataforma apresentou vantagens como o número reduzido de resultados duplicados e análise concomitante de pesquisas em inglês e português. Como limitação, o Periódicos Capes permite menos critérios de seleção de pesquisa, reduzindo o número de termos e operadores booleanos em cada pesquisa, gerando *strings* de busca mais simplificadas.

Na segunda etapa (b) são estabelecidos os critérios de busca, inclusão e exclusão. Foram considerados artigos de periódicos e anais de congresso nacionais e internacionais revisados por pares, além de pesquisas em andamento ou finalizadas. Foram descartadas teses e dissertações devido à duplicidade de informações, já que todas encontradas possuíam publicações em periódicos. Também foram descartadas publicações em anais quando existiam correspondência entre o trabalho apresentado em congresso e posteriormente publicado em periódicos. De forma semelhante, publicações em livros não foram selecionadas ou tabuladas como estado da arte. Contudo, a construção teórica da pesquisa e o entendimento do objeto de pesquisa se embasaram em publicações teóricas também presentes nos livros dos principais pesquisadores na área de PCMs.

Foram consideradas publicações em inglês e em português com recorte temporal de 2016 a 2021. Após uma análise inicial, percebeu-se que artigos selecionados publicados em 2016 pertenciam a uma sequência de artigos que contemplavam pesquisas maiores, datando de antes de 2016. Essas publicações anteriores a 2016 traziam informações fundamentais para o entendimento das pesquisas e, por esse motivo, foram incluídas manualmente em regime de exceção.

Com a finalidade de estabelecer as principais bases de dados, palavras-chave recorrentes e as lacunas nas pesquisas em PCM uma análise anterior a este estudo foi conduzida, utilizando os artigos de revisão já mencionados anteriormente. Logo, foram selecionadas as seguintes palavras-chave para compor as *strings* de pesquisa: materiais de mudança de fase; PCM; inércia térmica; edificações; arquitetura; sistemas passivos. As palavras-chave foram inseridas em inglês e português, de maneira individual e combinada com auxílio dos operadores booleanos: AND, OR e NOT para pesquisas em inglês, e, OU e NÃO para pesquisas em português. Termos compostos foram inseridos entre aspas duplas e acentos, cedilhas e palavras não indexadas foram excluídas. Para os termos “materiais” e “edificações” foi utilizado um asterisco para buscas de palavras semelhantes com qualquer número de caracteres.

O termo “sistemas passivos” foi inicialmente incluído nas *strings* de pesquisa. Porém, após as primeiras tentativas de busca, percebeu-se que o termo não resultava efetivamente em uma filtragem dos resultados. Muitos autores não classificam os sistemas como passivos ou ativos, o que gerou aumento de complexidade e número de buscas sem resultados efetivos.

Logo, a seleção de artigos que avaliaram sistemas passivos foi feita de forma individualizada e manualmente, após a leitura das publicações obtidas a partir das *strings* descritas a seguir. Devido à limitação de caracteres, foram utilizadas *strings* múltiplas, relacionando diferentes termos secundários (i.e., arquitetura e edificações), mantendo os termos principais (i.e., relacionados aos PCMs).

Foram construídas as seguintes *strings* de pesquisa em inglês: (TITLE-ABS-KEY (*phase* OR "*change*" OR "*material*") AND (*thermal inertia*) AND (*build*\*)); (TITLE-ABS-KEY (*pcm*\*) AND (*thermal inertia*) AND (*build*\*)); (TITLE-ABS-KEY (*phase* OR "*change*" OR "*material*") OR (*thermal inertia*) AND (*architecture*)); (TITLE-ABS-KEY (*pcm*\*) AND (*thermal inertia*) AND (*architecture*\*)).

Para buscas em português: (TITLE-ABS-KEY (*material*\* OU "*mudanca*" OU "*fase*") E (*inercia termica*) E (*edifica*\*)); (TITLE-ABS-KEY (*pcm*\*) E (*inercia termica*) E (*edifica*\*)); (TITLE-ABS-KEY (*material*\* OU "*mudanca*" OU "*fase*") E (*inercia termica*) E (*arquitetura*)); (TITLE-ABS-KEY (*pcm*\*) E (*inercia termica*) E (*arquitetura*)).

Na opção “Personalizar meus resultados” disponível no Periódicos Capes, foram determinadas as seguintes restrições: ordenar por “Data – Mais recente”; disponibilidade “Periódicos revisados por pares”; tipo de recurso “Artigos”; Assunto “todas as opções”; data de criação “01/01/2016 a 31/12/2021”; coleção “todas as opções”; idioma “Inglês” e “Português”; título do periódico, “todas as opções”. Além disso, o campo filtro das buscas foi deixado em “qualquer campo”, o que permitiu pesquisas em títulos, autores/criadores e assuntos.

Após a leitura dos títulos, palavras-chave e resumos, foram excluídas eventuais publicações duplicadas e pesquisas que não possuíssem relação com os temas de interesse ou estivessem em outro idioma, mesmo que o resumo estivesse em inglês. Como exemplo, foram encontrados e excluídos estudos de PCMs em tecidos, roupas de proteção individual, produtos hospitalares, recipientes de transporte de alimentos e fármacos, PCMs em sistemas e componentes eletrônicos, PCMs aplicados em equipamentos ou maquinários industriais e desenvolvimento de novos PCMs ou novas formas de armazenamento e encapsulamento ainda sem aplicação avaliada para construção civil.

Após essa etapa de exclusão, os artigos foram lidos na íntegra e organizados e sintetizados utilizando o *software* Excel. Nessa etapa foram feitas inclusões manuais

de artigos que se repetissem mais de três vezes entre os estudos encontrados, além de estudos continuados fora dos cinco anos do escopo.

Na terceira etapa (c) foram definidas quais informações seriam extraídas das publicações. O fator norteador dessa seleção foi a identificação de propriedades do PCM e características de instalação conflitantes apresentadas como melhores soluções nos respectivos artigos. Por esse motivo buscou-se entender os fatores, condicionantes e procedimentos metodológicos que levaram aos resultados encontrados.

Logo, foram selecionadas como informações extraídas: os autores; tipo de PCMs estudados; forma de incorporação; temperatura de mudança de fase; capacidade de armazenamento de calor latente; abordagem metodológica; local de instalação do PCM no sistema construtivo; localização geográfica do estudo; e principais resultados e conclusões.

Na quarta etapa (d) foi definida a forma de apresentação e agrupamento dos resultados. Os estudos foram classificados e divididos a partir do tipo de sistema construtivo investigado nas respectivas publicações. Essa divisão se deu em dois grupos, o primeiro classificado com sistemas construtivos opacos e o segundo com sistemas construtivos translúcidos e outros sistemas/dispositivos.

Em relação ao primeiro grupo, a revisão contemplou estudos com PCMs em paredes externas, internas, divisórias, coberturas e envoltórias no geral. Embora apresentados resultados de paredes e coberturas separadamente, a criação da categoria “Envoltória” se deu pela combinação do uso de PCMs em mais de um sistema construtivo concomitantemente, geralmente paredes e lajes. Soma-se à justificativa anterior o entendimento de que as características térmicas e o desempenho com incorporação de PCMs nos ambientes classificados como “Envoltória” é diferente dos classificados como “Paredes” ou “Coberturas”.

No segundo grupo foram considerados PCMs em fechamentos translúcidos (esquadrias e coberturas envidraçadas), persianas, venezianas, brises, fachadas duplas, chaminés solares e paredes *trombe*.

A partir da classificação mencionada e das informações extraídas na terceira etapa (c), foram criadas cinco tabelas referentes à incorporação de PCMs.

É importante destacar que parte dos artigos não apresentou todas as informações levantadas. Nesses casos, os campos foram deixados em branco ou completados parcialmente com as informações disponibilizadas.

Na quinta etapa (e) de interpretação dos resultados, os artigos foram discutidos, comparados e os principais resultados foram apresentados. Também foram discutidas as concordâncias e discordâncias entre as pesquisas, em que foram analisadas informações baseadas nas diferentes abordagens, climas e métodos adotados por cada estudo.

Nessa etapa foi utilizado o *software* VOSviewer, versão 1.6.1.7, para elaborar uma análise bibliométrica parcial e posteriormente agrupar as redes de autores, coautores e de palavras-chave. O objetivo dessa análise bibliométrica foi identificar a relação entre os autores e palavras-chave na busca por artigos em uma revisão integrativa.

O programa utiliza uma base de dados .ris exportada do *software* de gestão de referências bibliográficas Mendeley. O VOSviewer elabora organogramas que apresentam a frequência com a qual os autores aparecem e suas conexões como coautores de diferentes publicações. De forma semelhante, as palavras-chave são destacadas e conectadas a partir da frequência de ocorrência. O agrupamento ainda considera palavras-chave relacionadas por estudo. Logo, quanto mais publicações de determinado autor ou quanto maior a frequência em que palavras-chave se repetem, maior será o tamanho de sua fonte, e conseqüentemente, maior o destaque.

Para gerar a rede de palavras-chave foram selecionadas palavras com cinco ou mais ocorrências nos campos título, palavras-chave, e resumo utilizando a opção de contagem "*full counting*" que contabiliza o número de aparições de cada palavra. Para a rede de autores e coautores, foram selecionadas as coautorias utilizando o mesmo método de contagem das palavras-chave; o número de documentos por autor deveria ser de, no mínimo, dois.

A disposição dos nomes ocorreu pela normalização por associação de força, com configurações padrão para *layout* e *clusterings*. As cores dos dados foram configuradas no próprio programa a partir de composições já incluídas em sua biblioteca.

Ainda como parte da análise bibliométrica, foi elaborado um mapa com a distribuição geográfica e climática das pesquisas usando a classificação de Köppen-Geiger. As informações dos climas/cidades em que os PCMs foram estudados (medições ou simulações) foram levantadas na terceira etapa (c) e posteriormente localizadas em um mapa-múndi a partir das suas coordenadas geográficas.

Destaca-se que parte dos artigos investigou mais de uma condição climática e que na elaboração do mapa não foi considerada a frequência de ocorrência das cidades. Dessa forma, algumas cidades que foram mencionadas mais de uma vez nas tabelas resumo aparecem como uma marcação no mapa. Também foram observados estudos em laboratório que consideraram, por exemplo, uma temperatura de bulbo seco constante em ambiente teste controlado, em que não foi apresentado nenhuma característica ou definição climática. Nesses casos, nenhuma condição climática foi atribuída para a publicação.

O mapa-múndi com as localizações geográficas foi então sobreposto pelo mapa com a classificação climática de Köppen-Geiger. Para essa sobreposição foi utilizada a versão de Peel, Finlayson e McMahon (2007). Dessa forma, foi possível analisar a distribuição geográfica dos estudos e entender em quais climas existem lacunas nas pesquisas com PCMs.

## **2.3 REFERENCIAL TEÓRICO**

Os PCMs armazenam ou liberam energia na forma de calor latente durante a mudança de fase e podem ser utilizados para auxiliar no controle das condições térmicas ambientais dentro de uma faixa específica de temperatura (KALNÆS; JELLE, 2015). Quando a temperatura atinge o ponto de fusão, as ligações químicas no material começam a se romper e há absorção de energia em um processo endotérmico. Nesse processo, geralmente há a mudança do estado físico do PCM de sólido para o líquido. À medida que a temperatura do ar próxima ao PCM cai, o material libera a energia armazenada e retorna ao estado sólido original. Em edificações, a energia utilizada para alterar sua fase poderá levar a uma temperatura do ar interna mais estável e com maior potencial de proporcionar conforto térmico aos usuários. Esse efeito também pode reduzir as cargas de pico e o consumo energético com arrefecimento e aquecimento (KALNÆS; JELLE, 2015; RATHORE; SHUKLA, 2019).

O armazenamento de energia na forma de calor latente em PCMs é de 5 a 14 vezes maior por unidade de volume se comparado aos materiais tradicionalmente utilizados para essa finalidade na forma de calor sensível. Além disso, a mudança de fase, e por consequência parte significativa do armazenamento de energia, ocorre a uma temperatura praticamente constante. Devido a essas propriedades e à ciclicidade do material, os PCMs são utilizados para o armazenamento de energia térmica em diversas aplicações. Dentre elas, em edificações para redução do consumo de energia e aumento do conforto térmico dos usuários (HUANG et al., 2017; WAHID et al., 2017; BRITO et al., 2017; SONG et al., 2018).

### **2.3.1 Classificação dos PCMs**

A maneira mais difundida de classificar PCMs é pela sua divisão em três grupos: orgânicos, inorgânicos e eutéticos (PASUPATHY; VELRAJ; SEENIRAJ, 2008; KALNÆS; JELLE, 2015; WAHID et al., 2017; RATHORE; SHUKLA, 2019; FRIGIONE; LETTIERI; SARCINELLA, 2019; FARAJ et al., 2020).

PCMs orgânicos consistem principalmente de cadeias de carbono e hidrogênio e podem ser divididos em parafinados e não parafinados. Os PCMs não parafinados podem ser classificados como ácidos graxos, polietilenoglicol, álcoois, polímeros e seus derivados (FARAJ et al., 2020). Apresentam ponto de fusão constante, não apresentam segregação ou sobrefusão durante os ciclos de mudança de fase e produzem pouca pressão de vapor, com redução no volume de 10% durante a solidificação. Além disso, são quimicamente inertes, não corrosivos, incolores, duráveis, baratos, abundantes, ecológicos e atóxicos (WAHID et al., 2017).

Podem apresentar baixo desempenho nas mudanças de fase devido à baixa condutividade térmica, mas essa desvantagem pode ser contornada com a utilização de elementos metálicos em sua composição (AZIZ et al., 2018). Outra desvantagem ocorre ao atingirem temperaturas elevadas. Nessas condições, as ligações químicas podem ser quebradas e levar à evaporação das cadeias moleculares (WAHID et al., 2017).

Os PCMs inorgânicos são subdivididos em dois grupos, os sais hidratados e os metálicos. Esses materiais apresentam níveis de armazenamento de calor latente semelhante aos PCMs orgânicos por unidade de massa, entretanto seu calor latente por unidade volumétrica tende a ser maior devido à maior densidade. Além disso,

apresentam maior condutividade e não são inflamáveis. Os sais hidratados possuem temperaturas de fusão que variam de 5°C a 130°C, o que os torna ideais para aplicações na construção civil (KALNÆS; JELLE, 2015). Esse intervalo de temperatura de fusão não é encontrado em PCMs metálicos, fator que os exclui desse levantamento bibliográfico.

Os sais hidratados geralmente contêm alta densidade de armazenamento de calor latente, em grande parte devido à sua alta densidade. Esses materiais são compostos majoritariamente por um sal e água e compreendem diversas combinações de elementos. A mudança de fase envolve a hidratação ou desidratação dos sais em um processo que se assemelha à fusão e solidificação (SHARMA et al., 2007). Como desvantagens, apresentam mudanças de fase não congruentes, instáveis e problemas relacionados a sobrefusão. Além disso, possuem alta pressão de vapor no processo de mudança de fase e são potencialmente corrosivos em contato com elementos metálicos (MEHLING; CABEZA, 2008).

Os PCMs eutéticos são compostos pela união de dois ou mais PCMs com ciclos de mudança de fase concordantes. Durante a sua fabricação, os dois materiais são combinados de maneira que o PCM final apresente comportamento de um material único (JELLE; KALNÆS, 2017). Essa categoria pode ser composta por misturas entre PCMs orgânicos, inorgânicos, e orgânicos e inorgânicos, o que possibilita arranjos personalizados para aplicações específicas (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010).

Embora haja aumento de pesquisas sobre PCMs eutéticos, seu uso em sistemas de armazenamento de calor latente não é difundido se comparado aos PCMs orgânicos e inorgânicos. Portanto, combinações de materiais ainda precisam ser testadas e suas propriedades termofísicas são um campo para novas investigações (KALNÆS; JELLE, 2015).

### **2.3.2 Utilização de PCMs em elementos construtivos**

A forma de incorporação do PCM em elementos construtivos é um dos parâmetros mais importantes para garantir o seu desempenho térmico e energético em edificações. Como o PCM passa por mudanças de fase relativamente rápidas, na maior parte dos casos de sólido para líquido e de líquido para sólido, existem limitações em relação à sua incorporação direta. Essa complexidade também inclui parâmetros de projeto, como seleção da temperatura de mudança de fase do PCM,

quantidade do material e localização do sistema de armazenamento de energia térmica dentro da edificação (RATHORE; SHUKLA, 2019). Além disso, as temperaturas de mudança de fase dos PCMs tendem a sofrer modificações quando utilizados junto aos materiais de construção (WAHID et al., 2017).

Logo, a utilização dos PCMs na construção civil depende da sua classificação (orgânico, inorgânico e eutético), do seu princípio de funcionamento (ativo ou passivo) e da sua forma de incorporação em elementos construtivos (como componente, integrado ou como unidade de armazenamento).

O princípio de funcionamento passivo aproveita o ganho térmico da radiação solar direta e difusa, bem como os ganhos térmicos devido à carga térmica interna. Os PCMs utilizados em sistemas com princípio ativo utilizam energia térmica fornecida por equipamentos mecânicos (ZHOU; EAMES, 2019).

Quando o PCM faz parte de uma das camadas de um elemento construtivo, é classificado como componente. Por outro lado, quando o PCM é misturado ou impregnado a um material de construção, ele é classificado como integrado.

Para PCMs integrados, diversas técnicas podem ser aplicadas. A incorporação direta constitui a técnica mais simples, em que os PCMs em pó ou líquido são misturados diretamente aos materiais de construção que incluem, por exemplo, gesso e concreto. Esse método não requer nenhum equipamento adicional, porém pode acarretar em incompatibilidade entre os materiais construtivos e os PCMs e gerar possíveis vazamentos (WAHID et al., 2017).

Na imersão, os materiais construtivos em estado sólido são imersos em PCMs líquidos para a absorção por capilaridade. Alguns estudos apontam que essa técnica também ocasiona vazamentos do PCM, o que prejudica seu uso de forma continuada (MEMON, 2014).

O PCM na forma estabilizada consiste em sua mistura com outros componentes de suporte. Nesse composto, as partículas de PCM na ordem de dezenas de micrômetros estão dispersas uniformemente em uma matriz polimérica. A concentração de PCM deve ser a mais alta possível, idealmente em torno de 80%. Como principais características, esses compostos apresentam a possibilidade de combinação entre PCMs e materiais de suporte de forma personalizada, de acordo com a necessidade

do ambiente. Além disso, os PCMs estabilizados podem realizar vários ciclos de mudança de fase sem deformações ou vazamentos, possuem alta condutividade térmica e capacidade de armazenamento de calor (ZHANG et al., 2006).

PCMs como componentes geralmente aparecem em formas encapsuladas. No encapsulamento (microencapsulamento e macroencapsulamento), o PCM é revestido com outro material antes de ser utilizado. Essa técnica é a mais utilizada em pesquisas (CUNHA; AGUIAR, 2020) e possui como vantagens alta resistência, durabilidade, estabilidade térmica, além de evitar vazamentos e perdas de PCM durante a mudança de fases (WAHID et al., 2017).

Em geral, o material da cápsula deve conter as seguintes características: alta condutividade térmica, resistência e flexibilidade; atoxidade e não corrosividade; resistência ao fogo; estabilidade química e física; e estabilidade à exposição de raios UV e umidade (RATHORE; SHUKLA, 2019).

O encapsulamento do PCM aumenta sua superfície de contato, melhora a transferência de calor e condutividade térmica. Logo, impede que o PCM entre em contato direto com o material de construção e o ambiente circundante, o que aumenta sua estabilidade (SU; DARKWA; KOKOGIANNAKIS, 2015; RATHORE; SHUKLA, 2019).

O encapsulamento do PCM pode ser classificado como microencapsulamento ou macroencapsulamento com base na dimensão do material do invólucro. O PCM microencapsulado, embora haja variação entre os autores, possui entre 0,1  $\mu\text{m}$  e 1 mm. Já o macroencapsulamento possui dimensões maiores que 1 mm (WAHID et al., 2017; RATHORE; SHUKLA, 2019).

### **2.3.3 PCMs na construção civil**

Na construção civil os PCMs funcionam, quase sempre, como elementos passivos que aumentam a capacidade térmica de componentes e a inércia térmica de ambientes. Como exemplos de PCMs aplicados de forma ativa temos, por exemplo: sistemas fotovoltaicos, bombas de calor, sistemas de recuperação de calor e sistemas de aquecimento de piso (FRIGIONE; LETTIERI; SARCINELLA, 2019).

A utilização de PCMs é recomendada para edificações localizadas em climas com grande variação de temperatura do ar externo (na ordem de 10°C) e com fechamentos

leves e de baixa capacidade térmica, como edifícios estruturados em aço, *light steel framing* e madeira que, de maneira geral, possuem fechamentos com baixa capacidade térmica. Essa alta amplitude térmica da temperatura externa ao longo do dia impacta os ciclos de carga e descarga dos PCMs incorporados em sistemas passivos. Se o material não conseguir solidificar completamente a eficácia do sistema poderá ser consideravelmente reduzida. Para situações em que a descarga não ocorre naturalmente, é necessário fornecer mecanismos para desencadear a troca de fase, como, por exemplo, a ventilação noturna (KALNÆS; JELLE, 2015; SOLGI et al., 2019).

Para atingir os benefícios esperados, é necessário avaliar os parâmetros relativos à associação PCM + Edificação. Os principais parâmetros investigados na literatura são as condições climáticas do local, projeto e orientação da edificação, localização, forma de incorporação, quantidade de PCM por componente construtivo, tipo de material, temperatura de mudança de fase, capacidade de armazenamento de calor latente, carga térmica interna, questões relacionadas ao uso dos espaços e questões econômicas e ambientais (PASUPATHY; VELRAJ; SEENIRAJ, 2008; WAHID et al., 2017; FRIGIONE; LETTIERI; SARCINELLA, 2019; BAI et al., 2020).

Também é necessário avaliar as propriedades isoladas do PCM. Portanto, a escolha de um PCM para um sistema de armazenamento de energia térmica deve levar em conta as propriedades termofísicas, cinéticas, químicas, econômicas e ambientais (MEMON, 2014).

Se levadas em consideração apenas as condições de contorno de maneira isolada, Kalnæs e Jelle (2015) apontaram a dificuldade de selecionar um PCM que funcione de maneira ideal para cada estação do ano. Os autores destacam que, além da dificuldade de selecionar o PCM correto para climas específicos, o efeito dos PCMs terá variações a partir das diferentes condições climáticas ao longo do ano. Logo, a seleção de um PCM com base em uma temperatura específica de mudança de fase pode não ser apropriada para estações diferentes.

Soma-se às dificuldades em selecionar as propriedades de um PCM as limitações das informações disponibilizadas pelos fabricantes. Memon (2014) afirma que pesquisadores e fabricantes utilizam abordagens diferentes para obter as propriedades dos PCMs. Há uma falta de uniformidade na apresentação de dados que

caracterizam o material, o que dificulta o entendimento de suas características e conseqüentemente sua escolha. Além disso, devido à falta de normatização, as propriedades térmicas dos PCMs podem estar incorretas, imprecisas e superestimadas (KALNÆS; JELLE, 2015).

Em relação à viabilidade econômica, pelo fato de os PCMs potencialmente oferecerem uma diminuição no consumo geral de energia, é importante ter conhecimento de qual é o retorno do investimento inicial. Entretanto, poucas pesquisas foram realizadas sobre esse tema devido à falta de conhecimento prático sobre como os PCMs se comportam nas edificações em diferentes climas. Como ainda há incertezas em relação ao efeito geral dos PCMs, mostrar os benefícios econômicos em longo prazo poderia ajudar a aumentar o interesse de usuários, investidores e projetistas (KALNÆS; JELLE, 2015).

## 2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 2.4.1 Resultados da busca e seleção de artigos a partir da revisão integrativa

O número de resultados das diferentes buscas é apresentado na Tabela 1 com suas respectivas *strings* de busca.

Tabela 1 Resultados por *strings* de busca

<i>Strings</i> de Pesquisa	phase OR "change*" OR "material" AND thermal inertia AND build*	pcm* AND therma   inertia AND build*	phase OR "change*" OR "material" OR thermal inertia) AND architecture	pcm*AND thermal inertia AND architecture *	material* OU "mudanca" OU "fase" E inercia termica E edifica*	pcm* E (inercia termica E edifica *)	material* OU "mudanca" OU "fase" E inercia termica E arquitetura	pcm* E (inercia termica E arquitetura)
Nº resultados	3.173	405	1.274	130	3	0	3	0

Fonte: Os autores (2022).

A busca inicial resultou em 4.988 artigos que, após uma pré-seleção (i.e., leitura do título, palavras-chave e resumo), foram reduzidos para 307. A partir da leitura integral dos artigos pré-selecionados, 103 foram selecionados e compõem as Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6, apresentadas a seguir.

As demais publicações citadas ao longo do texto e referenciadas ao final desse artigo compõem referências para a introdução, justificativa e desenvolvimento do método.

#### **2.4.2 PCMs em componentes construtivos**

Os PCMs podem ser utilizados de forma passiva em vários elementos construtivos como em coberturas, paredes, em toda a envoltória da edificação, divisórias internas, forros, fechamentos translúcidos, e sistemas como fachadas duplas e chaminés solares.

Existem várias pesquisas que investigaram o desenvolvimento de novos tipos de PCM ou de uma nova forma de incorporação ou estabilização desses materiais em elementos construtivos. Como exemplo, podem ser citadas: estabilização de PCMs (MEHRALI et al., 2016; CHENG; FENG, 2020); estudos com novos PCMs parafinados (LUO et al., 2015; XU et al., 2015; COSTA et al., 2019; CHENG et al., 2020); PCMs compostos por ácidos graxos (HE et al., 2015); PCMs compostos por polietileno (WEINGRILL et al., 2020); misturas eutéticas (KAHWAJI et al., 2016; KAHWAJI; WHITE, 2018); e capsulas com a união entre dois PCMs (ZHAO; ZHANG; KONG, 2020). Esses trabalhos não serão explorados nessa revisão, cujo foco é o desempenho térmico/energético e conforto térmico de usuários em edificações com PCMs e sua aplicação em sistemas construtivos.

##### **2.4.2.1 PCMs em paredes externas e internas**

Uma vantagem da utilização de PCM em paredes está na elevada área de contato com o ambiente interno e externo, o que possibilita maiores trocas de energia e, conseqüentemente, maior eficiência na utilização do material. Portanto, essa é a solução mais comum para a implementação de PCMs em edificações (CUNHA; AGUIAR, 2020) com destaque para utilização dos PCMs em painéis pré-fabricados de vedação como componentes.

Ao discutir o estado da arte em fechamentos pré-fabricados para vedação, Memon (2014) destaca que, ao serem aprimorados com PCM, os painéis foram capazes de reduzir o consumo de energia, a temperatura máxima e a flutuação interna da temperatura do ar. O autor destaca a eficiência do sistema na redução do consumo de energia em momentos de pico e das emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao aquecimento e resfriamento.

Embora apresentadas as vantagens da utilização de PCMs em painéis para vedação, Memon (2014) afirma que a sua eficiência dependerá de parâmetros como: o tipo de PCM selecionado e sua temperatura de mudança de fase; a capacidade de armazenamento de calor por unidade de área; orientação da parede; condições climáticas e de contorno; ganhos solares diretos; taxa de ventilação; e cor da superfície.

A Tabela 2 apresenta pesquisas que investigaram a utilização de PCMs em paredes internas e externas, em painéis leves, e em sistemas pesados como alvenaria e concreto.

Tabela 2 PCM em paredes externas e internas

Autores (Ano)	Tipo do PCM (Composição e fabricante)	Forma de Incorporação	Temperatura Mudança de Fase (°C)	Cap. de armazenamento de calor latente	Abordagem metodológica	Tipo/dimensão do ambiente	Condição do ambiente	Local de instalação do PCM. Composição do sistema construtivo	Localização geográfica do estudo	Principais conclusões
AKETOUAN E et al., 2018	Orgânico (parafinas, ácido graxo e ácido cáprico)	Preenchimento de blocos de vedação	24,0 a 37,0	144 a 243 kJ/kg	Análise numérica; simulação termoenergética (comsol multiphysics)	3 tipologias de habitação de 100 a 400 m <sup>2</sup>	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em tijolo furado de argila	5 cidades no Marrocos	A temperatura de fusão média do PCM em 37°C foi a solução mais otimizada. Com 27°C, economia de energia de 25% no clima desértico e 40% no clima oceânico.
AL-SAAD; ZHAI, 2015	***	***	19,0 a 28,0	50 a 300 kJ/kg	Simulação termoenergética (TRNSYS); ensaio em laboratório	Habitação de 167 m <sup>2</sup>	Natural e artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em <i>Drywall</i> /madeira e isolante	4 cidades nos EUA	Carga de resfriamento anual reduzida em até 15,8% com PCM em camadas internas, sem efeitos no aquecimento.
ARICI et al., 2020	***	***	-10,0 a 40,0	250 kJ/kg	Análise numérica	Apenas a parede foi testada	***	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto, isolante e gesso	2 cidades na Turquia	Melhores resultados para temperatura de fusão entre 6°C a 34°C e espessura e posição do PCM variável: de 1mm a 20 mm. PCM mais externo para efeito de aquecimento e mais interno para resfriamento.
BANIASSADI; SAILOR; BRYAN, 2019	Orgânico (BioPCM™)	***	29,0	250 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Habitação de 112 m <sup>2</sup>	Natural e artificial	PCM nas paredes externas. Tipo de material variou conforme o clima	16 cidades nos EUA	Aumento da resiliência do edifício em relação ao calor extremo com destaque para habitações de interesse social.
CHANG et al., 2017	Orgânico (n-Octadecan)	Macroencapsulado	28,0	256 kJ/kg	Simulação termoenergética (WUFI PRO 5.3)	Habitação rural	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em cimento, gesso, madeira e isolante	6 cidades na Coreia	Melhoria das condições de conforto térmico e redução do risco do crescimento de fungos nas paredes.
GOUNNI; EL ALAMI, 2017	Orgânico (polietileno, 40% e parafina 60%)	Incorporação direta	21,7 a 31,0	140 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Célula teste de 0,4 x 0,4 x 0,4 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em madeira	***	Localização ideal para o PCM afetada pela temperatura de mudança de fase e pela fonte de calor com redução da temperatura superficial em 2°C.

GRACIA et al., 2018	***	Microencapsulado	20,0 a 22,0	***	Ensaio em modelo físico	Células teste de 2,4 × 2,4 × 2,4 m e 2,4 m × 5,5 × 2,4 m	Natural e artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto pré-fabricado	Lérida (Espanha)	Curva de temperatura interna com oscilações menores devido ao PCM. No protótipo de concreto com PCM foi registrado atraso térmico de 2h.
GUARINO et al., 2017	***	Incorporação direta/folhas de PCM	18,0 a 24,0	70 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; simulação termoeenergética (EnergyPlus)	Célula teste de 2,8 × 1,3 × 2,4 m	Natural e artificial	PCM nas paredes externas. Parede em painel polimérico com PCM e alumínio	Montreal (Canadá)	Atraso térmico de 6 a 8 h no período frio: redução das oscilações de temperaturas diárias em até 10°C e economia média de 17%. Necessidade da associação do sistema a ventilação natural para reduzir o superaquecimento.
JIN et al., 2016	Orgânico (RT27 Rubitherm Technologies)	***	27,0	178 kJ/kg	Análise numérica; Ensaio em laboratório	Apenas a parede foi testada	Artificial	PCM nas paredes. Paredes em gesso e isolante	Lawrence; Kansas (EUA)	Local ideal para a instalação do PCM mais próximo da superfície externa considerando o aumento da espessura da camada de PCM, do calor de fusão e da temperatura de mudança de fase.
JIN et al., 2017					Análise numérica		***		Nanjing (China)	Melhor localização nas camadas interna. Melhores resultados para as condições de verão.
LAAOUATNI et al., 2019	Orgânico (styrene-type polymer)	Incorporação direta	27,0	179 kJ/kg	Ensaio em laboratório; simulação termoeenergética (comsol multiphysics)	Apenas a parede foi testada	Natural e artificial	PCM nas paredes. Paredes com bloco de concreto preenchido com PCM	***	Aumento da capacidade térmica da parede com deslocamento e redução da carga térmica, com destaque para o uso da ventilação natural.
LAGOU et al., 2019	***	***	1,0 a 35,0	***	Análise numérica (comsol multiphysics)	***	Natural	PCM nas paredes externas. Paredes em argamassa cimentícia, placa de gesso e isolante	6 cidades na Europa	Os melhores desempenhos foram encontrados para o PCM instalado na superfície mais interna da parede externa. Parâmetros como clima podem influenciar a definição da solução construtiva ideal em relação à posição e tipo PCM a serem empregados.
LEE et al., 2015	Inorgânico (Sal Hidratado)	Incorporação direta/folhas de PCM	31,4	150 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Células teste de 1,8 × 1,8 × 1,2 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em madeira e isolante	Lawrence (EUA)	A localização do PCM no meio da parede foi ideal para sul com reduções no pico do fluxo de calor de 51,3%, enquanto a localização próxima a superfície interna foi a ideal para oeste com reduções de 29,7%.
LEE et al., 2018	Orgânico (Rubitherm)	Incorporado por mistura direta no isolante	26,0 a 28,0	147 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Célula teste de 1,8 × 1,8 × 1,5 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em madeira e isolante	Lawrence (EUA)	PCM proporcionou atraso térmico de 1,5 h e redução diária do pico de fluxo de calor de 25,4% com variações entre orientações cardinais.

LEE; MEDINA; SUN, 2015	Orgânico (parafina)	Incorporação direta/folhas de PCM	20,6	73 kJ/kg	Medições	Edificação institucional de 4400 m <sup>2</sup>	Artificial	PCM nas paredes. Paredes em painéis pré-fabricados	Lawrence (EUA)	Para o melhor caso foi obtido uma menor variação das temperaturas superficiais e redução média do fluxo de calor de 27,4%, com máximo de 67% e atraso térmico de 3 h.
LEI; YANG; YANG, 2016	***	***	22,0 a 32,0	223 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Ambiente de 3,0 x 3,0 x 2,8 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto	Singapura	Temperatura de mudança de fase influenciada pela localização e pela curva de entalpia/temperatura. Os PCMs aplicados nas superfícies externas mostraram melhor desempenho.
LI et al., 2015	***	***	18,0 a 26,0	178 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; simulação termoenergética (EnergyPlus)	Célula teste de 0,8 x 1,0 x 1,3 m	***	PCM nas paredes externas. Paredes em gesso, isolante e alumínio	5 cidades na China	O PCM evitou a transferência de calor e tem efeitos de atenuação do fluxo de calor e atraso térmico. Esse efeito é maior em cidades que possuem uma maior variação da temperatura ao longo do dia.
MARKARIAN; FAZELPOUR, 2019	Orgânico	***	21,0 a 29,0	200 e 250 kJ/kg	Simulação multiobjetivo (DesignBuilder/EnergyPlus/NSGA-II)	Habitação multipavimento de 828m <sup>2</sup>	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em alvenaria, blocos de concreto, isolante e gesso	5 cidades no Irã	A utilização de PCM resulta em economia de eletricidade de 4,5–5,5% para todos os climas. O <i>payback</i> foi de mais de 70 anos para todas as cidades.
MATERA et al., 2018	Inorgânico (sal hidratado)	***	32,0	254 kJ/kg	Simulação termoenergética (TRNSYS)	Edifício dois pavimentos, dimensão de 10,0 x 10,0 x 6,0 m	Artificial	PCM nas paredes internas. Paredes em tijolo, gesso e isolante	Roma (Itália)	No inverno, foi observado o pior desempenho, com aumento na demanda energética para aquecimento. No verão, houve uma redução significativa da demanda de arrefecimento.
MATHIS et al., 2018	Orgânico (PT23 Puretemp®)	Macroencapsulado	23,4	201 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Célula teste de 2,2 x 1,5 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em madeira, gesso e isolante	Quebec (Canadá)	O PCM não foi eficiente no frio extremo: redução mensal do consumo por aquecimento de 8,1% a 41% em condições amenas. No verão, a eficiência foi limitada pela baixa descarga térmica noturna.
MAZZEO; OLIVETI; ARCURI, 2017	S15 (EPS)/LATEST20T (TEAP)/ HS22P (savENRG)/ SP26E (Rubitherm)/C3 2 (CLIMATOR)	***	15,0 a 32,0	160 a 190 kJ/kg	Simulação termoenergética (TRNSYS)	Apenas a parede foi testada	Artificial	***	Turim; Cosenza (Itália)	O PCM com temperatura de fusão intermediária entre os <i>setpoints</i> de inverno e verão apresentaram a melhor relação entre as demandas energéticas das duas estações.

MI et al., 2016	***	Incorporado direta	27	280 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Edifício de escritório multipavimento de 41,8 x 15,4 x 3,3 m	Natural e artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em argamassa e concreto	5 cidades na China	A economia de energia mais significativa em escritórios localizados em regiões frias ou com verão quente e inverno frio. Uso de PCMs não é indicado para regiões quentes.
NGHANA; TARIKU, 2016	Orgânico (parafina)	Incorporado direta	23	200 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; simulação termoenergética (EnergyPlus)	Edificação residencial de 49,0 x 37,0 x 2,40 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em madeira e gesso	Vancouver (Canadá)	Eficaz na estabilização da temperatura com reduções de 1,4°C na temperatura do ar, 2,7°C na temperatura superficial das paredes e redução na temperatura operativa, mas sem efeitos no conforto.
PONS; STANESCU, 2017	Orgânico (ácido cáprico e álcool dodecílico)	***	26,5	127 kJ/kg	Análise numérica	Sala comercial de 8,0 x 5,0 x 3,0 m	Natural e artificial	PCM na parede externa. Paredes em argamassa e alvenaria	8 cidades brasileiras	Os PCMs têm potencial para reduzir o consumo de energia com destaque para as regiões com climas mais frios do país.
SUN et al., 2016	Orgânico (n-octadecane)	Estabilizado	27,4	243 kJ/kg	Análise numérica	Edifício de escritórios/teste apenas na parede	Natural	PCM nas paredes externas	5 cidades chinesas	A temperatura de fusão ideal variou entre 24,1°C e 25,5°C. Para a cidade com clima quente, não foi possível proporcionar benefícios com a utilização do PCM.
THIELE et al., 2015	Orgânico (polietileno, PureTemp 20, Entropy Solutions Inc.)	Microencapsulado	10,0 a 25,0	180 kJ/kg	Análise numérica;	Habitação de 240 m <sup>2</sup>	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto	São Francisco; Los Angeles (EUA)	PCM reduziu a carga de resfriamento no verão mais do que a carga de aquecimento no inverno. Economia maior para as paredes orientadas a sul.
THIELE; SANT; PILON, 2015	Orgânico (Polyethylene)	Microencapsulado	21,5	180 kJ/kg	Análise numérica; ensaio em laboratório	***	Artificial	PCM nas paredes. Paredes em concreto	São Francisco; Los Angeles (EUA)	Uso de PCM resultou em redução e atraso no fluxo máximo de calor quando submetido à temperatura externa diurna e radiação solar.
VRACHOPOULOS et al., 2015	Orgânico (GR 27, Rubitherm)	Incorporação direta	27,5/18,0 a 26,0	72 kJ/kg	Análise numérica; Ensaio em modelo físico;	Célula teste de 2,0 x 2,0 x 2,0 m	Natural	PCM nas paredes externas. Paredes em placas cimentícias e gesso, estruturadas em madeira	Eubeia (Grécia)	Durante o período de fusão do PCM não foi possível observar fluxo de calor para a célula teste, o que resultou numa temperatura interna praticamente constante.
YAO et al., 2018	Orgânico (parafina, Sinopec Nanyang Branch)	Estabilizado	27,6	67 kJ/kg	Simulação termoenergética (TRNSYS); Ensaio em modelo físico;	Célula teste de 1,7 x 1,7 x 2,2 m	Natural e artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em metal e isolante	Tianjin (China)	PCM pode beneficiar o conforto interno e a eficiência energética. Análise do <i>payback</i> indicou um retorno de investimento de 5,84 anos.

ZHOU; EAMES, 2019	***	***	23,4	***	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Edifício de escritório de 12,0 x 8,0 x 3,0 m	Natural e artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em alvenaria, e gesso	Birmingham (Inglaterra)	A temperatura ótima de fusão foi de 23,4°C. No verão, economia de energia é de até 40%. Percentual de horas em conforto térmico melhorado em até 7,2%.
ZHU et al., 2016a	Orgânico (Parafina)	Estabilizado	18,0 a 33,0	***	Análise numérica	Ambiente de 5,0 x 4,0 x 3,0 m	Natural e artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto e isolante	5 cidades na China	Temperatura otimizada do PCM depende das temperaturas externas e internas, com melhor desempenho para as condições de inverno
ZHU et al., 2016b	Orgânico (Parafina n-Heptadecane)	Estabilizado	19,0 e 28,0	206 e 225 kJ/kg	Simulação termoenergética (TRNSYS)	Edifício de escritório de 9,0 x 5,0 x 3,0 m	Natural e artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto e isolante	Wuhan (China)	Consumo de energia foi 6,4% menor no verão e 17,8% menor no inverno no ambiente com PCM.
WANG et al., 2018	Orgânico (Parafina MPCM 37-D, Microtek)	Microencapsulado	37	166 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Teste apenas na parede	Natural e artificial	***	Taiwan	A parede pôde dissipar calor efetivamente quando o ambiente interno está sujeito a uma condição de convecção forçada ou natural.
WANG et al., 2020	Orgânico	***	18,0 a 30,0	200 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Ambiente comercial/industrial de 8,0 x 6,0 x 2,7 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto, gesso e isolante	Xangai (China)	PCM proporcionou melhoria do conforto térmico e redução das oscilações na temperatura do ambiente, com melhores resultados para a condição de inverno, com <i>payback</i> de 5 anos.

Fonte: Os autores (2022).

A partir dos estudos apresentados, é possível afirmar que a utilização de PCM em paredes tem potencial para aumento das horas em conforto e redução do consumo de energia. Porém, é necessária uma análise de diferentes parâmetros como a camada onde o PCM será alocado, a orientação solar da parede, o clima e a estação do ano, a temperatura de fusão do PCM, a temperatura de *setpoint* desejada no ambiente interno e aspectos construtivos.

Consonantemente, é necessário fornecer mecanismos para os ciclos completos de carga e descarga do PCM. Autores como Laaouatni et al. (2019), Mathis et al. (2018), Guarino et al. (2017), Liu et al. (2020) e Wang et al., (2020) apontaram a importância da ventilação natural seletiva para garantir os benefícios esperados com a utilização do PCMs.

Em relação ao clima, não foi possível estabelecer um consenso entre as pesquisas. Estudos como os de Mathis et al. (2018), no Québec, Lei, Yang, Yang (2016), em Singapura, Matera et al. (2018), em Roma, e Jin et al. (2017), em Nanjing obtiveram resultados positivos em condições de verão ou em climas quentes. Para 5 cidades chinesas, Sun et al. (2016), Mi et al. (2016) e Zhu et al. (2016a) obtiveram resultados positivos para o inverno, bem como Zhu et al. (2016b). Wuhan, Mazzeo, Oliveti e Arcuri (2017) recomendam um PCM com temperatura de fusão intermediária entre os *setpoints* de inverno e verão para Turim e Cosenza, enquanto Nghana e Tariku (2016) obtiveram, de maneira geral, resultados positivos para as duas estações em Vancouver.

Em relação à orientação solar da parede, Lee et al. (2018) obtiveram resultados melhores em relação à redução do fluxo de calor para orientação norte (Hemisfério Norte) e Lee, Medina e Sun (2015) para orientação oeste (Hemisfério Norte).

Sobre a camada onde o PCM deve ser instalado, há desacordo entre as pesquisas, o que reforça a necessidade do estudo dos parâmetros mencionados anteriormente. É possível concluir que a escolha da camada depende do efeito desejado, aquecimento ou resfriamento, conforme apontado por Gounni El Alami (2017) e Arici et al. (2020).

Os resultados divergentes nas pesquisas apresentadas eram esperados, uma vez que os autores utilizaram diferentes PCMs, geometrias, abordagens metodológicas, aspectos construtivos e condições de contorno. No entanto, recomenda-se que, ao avaliar a utilização de PCMs em paredes, sejam selecionados estudos com

parâmetros semelhantes ao do ambiente a ser analisado. Essa busca não elimina a necessidade de analisar todos os parâmetros envolvidos, mas pode ser uma forma de filtrar e restringir o número de variáveis necessárias para estabelecer uma relação entre os PCMs e os benefícios desejados com a sua utilização.

#### **2.4.2.2 Coberturas**

Elementos horizontais como coberturas possuem grande área superficial e geralmente estão em contato próximo com os usuários. Ademais, dentre as envoltórias, coberturas apresentam maiores ganhos de radiação solar e maiores fluxos de calor em baixas latitudes. Por esse motivo, são elementos importantes para a manutenção das condições de conforto térmico na região tropical, com potencial para incorporação de PCMs.

A Tabela 3 apresentada pesquisas que investigaram a utilização de PCMs em sistemas de coberturas.

Tabela 3 PCM em coberturas

<b>Autores (Ano)</b>	<b>Tipo do PCM (composição e fabricante)</b>	<b>Forma de incorporação</b>	<b>Temperatura de mudança de fase (°C)</b>	<b>Cap. de armazenamento de calor latente</b>	<b>Abordagem metodológica</b>	<b>Tipo/dimensão do ambiente</b>	<b>Condicionamento do ambiente</b>	<b>Tipo de sistema construtivo com PCM</b>	<b>Localização geográfica do estudo</b>	<b>Principais conclusões</b>
AKEIBER; WAHID; HUSSEN, 2016	Orgânico (óleo e parafina)	***	19,0 a 44,0	***	Ensaio em modelo físico	Célula teste de 1,0 x 1,0 x 1,1 m	***	PCM na cobertura. Cobertura em concreto e alumínio	Bagdá (Iraque)	Menor fluxo de calor através da cobertura para todos os casos, destaque para o PCM com temperatura de mudança de fase entre 40°C e 44°C.
BHAMARE; RATHOD; BANERJEE, 2020	***	***	25,8	188 kJ/kg	Análise numérica; simulação termoenergética (FLUENT)	Ambiente de 1,2 x 1,2 x 2,4 m	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em alvenaria e concreto	Chennai (Índia)	A cobertura integrada com PCM mantém a temperatura no intervalo de 25,5 a 27,5°C e reduz as cargas de pico de calor em comparação com um telhado sem PCM.
DONG et al., 2015	***	***	30,0 a 38,0	Entre 138 e 238 kJ/kg	Análise numérica; simulação termoenergética no (FLUENT6.3)	Habituação	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em concreto, argamassa e alumínio	Daqing (China)	O efeito positivo do PCM na redução do fluxo de calor e no aumento do atraso térmico, superior a 3h. O parâmetro mais impactante foi a espessura da camada de PCM e o coeficiente de absorção da cobertura.
GUICHARD et al., 2015	Orgânico (parafina)	Microencapsulado	21,7 a 23,4	71 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; simulação (ISOLAB)	Célula teste de 3,0 x 3,0 x 3,0 m	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em madeira, placa de gesso e telha galvanizada	Ilha da Reunião	PCM capaz de reter a fluxo de calor da cobertura, reduzir a temperatura no interior da célula teste em 2°C.
JAYALATH et al., 2016	Orgânico	***	23,0	210 kJ/kg	Simulação termoenergética (TRNSYS e EnergyPlus)	Edificação residencial de 186 m <sup>2</sup>	Natural	PCM na cobertura. Cobertura em aço e isolante	Melbourne (Austrália)	PCM na cobertura pode reduzir as cargas de resfriamento e aquecimento, fornece conforto térmico para ocupantes com menores flutuações de temperatura interna.
LU et al., 2016	Eutético (tetradecanol e myristate)	Encapsulado em canos	35,0	186 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Célula teste de 2,0 x 2,0 x 2,4 m	***	PCM na cobertura. Cobertura argamassa, camada de revestimento reflexivo e isolante	Tianjin (China)	A cobertura proposta foi capaz de reduzir os picos de temperatura e fluxo de calor, além de apresentar um efeito positivo na capacidade térmica e isolamento.

MOHSENI; TANG; WANG, 2019	Orgânico (PureTemp 23, PureTemp)	Impregnação; macroencapsu- lado	23,0	***	Ensaio em laboratório	Célula teste 1,0 x 1,0 x 1, 0m	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em concreto	***	Resistência à compressão diminuiu com PCM. A absorção de água e o encolhimento por secagem foram reduzidos. A associação dos dois materiais pode reduzir o consumo de energia e temperatura interna.
REDDY; MUDGAL, 2017	***	***	28,8 a 33,8	Entre 132 e 197 kJ/kg	Análise numérica; simulação ter- moenergética no (FLUENT)	Avaliado apenas a cobertura	***	PCM na cobertura. Cobertura em tijolo, concreto e gesso	Chennai (Índia)	Redução no ganho de calor de 17% a 26% para um telhado com uma única camada de PCM e 25% a 36% para multicamadas.
TOKUÇ; BASARAN; YESÜGEY, 2015	***	Incorporado di- reta/folhas de PCM	27,0	179 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; simulação CFD (ANSYS FLUENT)	Avaliado uma placa de 0,5 x 0,5 m	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em concreto e isolante	Istambul (Turquia)	Espessura de 2 cm se mostrou a mais eficiente no controle da temperatura. Não foi possível garantir a carga/descarga no material em todas as estações do ano.
YU et al., 2020	Orgânico (parafina e poliestireno)	Forma estabili- zada	34,0 a 38,0	200 kJ/kg	Simulação CFD	Avaliado apenas a cobertura	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em concreto	5 cidades na China	Temperaturas ótimas de mudança de fase com variações de acordo com os climas. Para os melhores casos, foram observadas reduções da temperatura interna entre 3,7°C a 4,0°C.
ZHOU et al., 2018	Orgânico (Parafina, Microtek)	Microencapsu- lado	37,0 a 43,0	167 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Avaliado uma placa de 0,1 x 0,1 m	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em estrutura de colmeia em alumínio	Taiwan	Telhado com PCM de temperatura de fusão de 37°C aumentou o deslocamento de carga de pico. Porém, houve ganho de calor interno ligeiramente aumentado.

Fonte: Os autores (2022).

As pesquisas sobre utilização de PCMs em coberturas avaliam atraso e redução no fluxo de calor descendente devido aos ganhos térmicos pela radiação solar. Nesses casos, conforme apresentado pelos autores revisados nesse estudo, os PCMs reduzem o fluxo de calor, o consumo de energia e aumentam as horas em conforto dos usuários. Porém, não foram observadas influências ou diferenças devido ao clima ou latitude.

Observa-se que, se comparado aos PCMs utilizados em paredes e fechamentos verticais, a temperatura de fusão dos PCMs utilizados em lajes e coberturas é quase sempre mais alta, em torno de 30°C a 40°C.

#### **2.4.2.3 Envoltórias**

Embora já tenha sido apresentada uma revisão da utilização de PCMs em paredes e coberturas, os estudos apresentados focaram na utilização de PCMs em apenas um tipo de elemento construtivo. Nesse item serão revisadas pesquisas com PCMs em mais de um tipo de elemento construtivo, na maioria dos casos em paredes, pisos e coberturas de maneira combinada (Tabela 4).

Tabela 4 PCMs em envoltórias

Autores (Ano)	Tipo do PCM (composição e fabricante)	Forma de incorporação	Temperatura de mudança a Fase (°C)	Cap. de armazenamento de calor latente	Abordagem metodológica	Tipo/dimensão do ambiente	Condição do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização geográfica do estudo	Principais conclusões
AHANGARI; MAEREFAT, 2019	***	Forma estabilizada	23,0 a 21,0	60 a 63 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Ambiente de 3,0 x 3,0 x 3,0 m	Artificial	PCM nas paredes, piso e cobertura. Envoltória em gesso, concreto e isolante	4 cidades no Irã	Temperatura de fusão ótima para a camada mais interna é de 1°C abaixo da temperatura desejada para o ambiente interno no inverno. A segunda camada deverá ter a temperatura de fusão de 2°C a 3°C acima da temperatura desejada para o ambiente interno no verão.
AUZEBY et al., 2016	Orgânico (parafina + poliestireno)	Forma estabilizada	23,1 a 24,0	86 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Edificação residencial de 81,6 m <sup>2</sup>	Natural	PCM nas paredes internas, telhado e pisos. Paredes externas em tijolos, gesso e isolante, paredes internas em gesso e lajes em concreto	Nottinghamshire (Inglaterra)	O uso de PCM atuou na diminuição do superaquecimento. Edificações mais isoladas necessitam de mais PCMs do que aquelas menos isoladas. Os edifícios "leves" tem maior benefício com PCMs do que os edifícios "pesados".
(BAI et al., 2020)	***	***	17,0 a 25,0	***	Análise numérica; ensaios em modelo físico	Célula teste de 2,4 x 2,4 x 2,4 m	Natural e artificial	PCM nas paredes e teto. Paredes em gesso	Auckland (Nova Zelândia)	A eficácia dos PCMs em edificações é influenciada pelo clima e parâmetros de construção. Se a temperatura média do ar externo for maior do que o limite do nível de conforto do humano, o superaquecimento ocorrerá mesmo com PCMs.
BELTRÁN ; MARTÍNEZ-GÓMEZ, 2019	Orgânico e Inorgânico (GR25, RT25 a 30, n-Octadecane, BioPCM Q21, 23, 25, 27 e 29	***	21,0 a 29,9	45 a 261 kJ/kg	Métodos de decisão multicritério e simulação termoenergética (EnergyPlus)	Edificação residencial de 36 m <sup>2</sup>	Artificial	PCM nas paredes e cobertura. Cobertura em telha metálica e gesso e paredes em tijolos e concreto	3 cidades no Equador	O uso de PCM apresenta um bom comportamento térmico durante o dia e a noite em locais frios, principalmente à noite, quando o PCM mantém a temperatura interna em uma temperatura confortável. Em algumas situações o PCM aumentou a sensação de desconforto térmico em locais mais quentes e úmidos.
BERARDI; SOUDIAN, 2019	Orgânico (BioPCM TM e Energain)	Microencapsulado	21,7 a 25,0	70 e 165 a 200 kJ/kg	Ensaio em modelo físico e simulação termoenergética (EnergyPlus)	Célula teste na escala de 1:10 de um apartamento	Natural e Artificial	PCM nas paredes e teto. Célula teste em estrutura de alumínio com fechamento em polietileno e isolante	Toronto (Canadá)	PCMs contribuíram para estabilização das temperaturas internas em condições extremas com variações bruscas de temperatura. Necessidade da ventilação noturna para acelerar o processo de carga/descarga do material.

BOUGUE RRA; RETIEL, 2015	Orgânico (parafina)	Microencapsulado	24,0 a 32,0	160 kJ/kg	Análise numérica	Edificação residencial de 104 m <sup>2</sup>	Natural e artificial	PCMs nas paredes e coberturas. Paredes em alvenaria e cobertura em concreto	Djelfa (Argélia)	Redução no consumo para resfriamento entre 20% e 30%. Benéficos relacionados a interações entre PCM e às condições climáticas e sistema construtivo. Necessário PCMs com diferentes temperaturas de fusão para diferentes superfícies.
BRITO et al., 2017	PCM teórico	***	Recomendado de 30,0 a 34,0	Recomendado maior que 315 kJ/m <sup>2</sup>	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Ambiente de 2,6 x 2,6 x 2,6 a 3 m	1 renovação por hora	PCMs nas paredes e teto. Sistema construtivo leve (paredes em placa cimentícia, isolante e gesso e cobertura em forro de gesso e telha cerâmica); e pesado (paredes e forro em concreto e cobertura em telha cerâmica)	8 cidades no Brasil	PCMs teóricos com ponto de fusão entre 30°C e 34°C apresentaram resultados melhores para as ZBs mais frias. Nas zonas mais quentes necessário ponderação, pois o uso de PMCs pode piorar as condições de conforto térmico.
HASAN; BASHER; SHDHAN, 2018	Orgânico (parafina)	Incorporado direta/Folhas de PCM	44,0	174 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Célula teste de 1,5 x 1,5 x 1,0 m	***	PCMs nas paredes e teto. Paredes em alvenaria e argamassa cimentícia, cobertura em placa metálica com isolante	Kut (Iraque)	Uso de PCM reduziu a temperatura interna, melhorou conforto térmico, reduziu a carga de resfriamento e consumo de energia elétrica.
JANGELD INOV et al., 2020	PCM teórico	***	18,0 a 28,0	219 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Edificação Residencial de dois pavimentos de 12,2 x 9,2 x 6,5 m	Artificial	PCMs nas paredes e teto. Variação dos materiais de acordo com o clima, na sua maioria estruturas de <i>Ligth Steel frame</i> , gesso, isolante e concreto	8 cidades com clima frio	A economia anual de energia variou entre 196 kWh a 391 kWh. Em cidades que a economia de energia de resfriamento foi mais alta, os PCMs ideais possuíam temperaturas de fusão entre 24°C e 26°C, nas que a energia de aquecimento foi mais alta, 21°C.
KENZHEK HANOV; MEMON; ADILKHA NOVA, 2020	PCM teórico	***	19,0 a 27,0	220 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Edificação Residencial de quatro pavimentos com dimensão de 46,0 x 15,0 x 3,2 m cada	Artificial	PCMs nas paredes e teto. Paredes em placa de gesso e isolante, lajes em concreto e cobertura em concreto, isolante e chapas metálicas	8 cidades com clima frio	PCMs com baixas temperaturas de fusão foram eficientes durante a estações de transição, os PCMs com maiores temperaturas de fusão foram eficientes no período de verão. PCMs com temperatura de fusão de 23°C e 24°C podem ser usados para todo o clima subártico com <i>payback</i> de 16 a 32 anos.

KHARBO UCH et al., 2018	***	***	21,0 a 27,0	200 kJ/kg	Análise numérica; ensaios em modelo físico	Célula teste de 1 m <sup>3</sup>	Artificial	PCM nas paredes e telhado. Paredes em tijolos, argamassa cimentícia, isolante e placa de gesso. Cobertura em concreto, isolante e placa de gesso	Tangier (Marrocos)	Uso de PCM apresentou uma melhoria no desempenho térmico. Nas paredes com PCM na camada interna foi obtido um maior atraso térmico, com influência negativa no amortecimento térmico.
KIM et al., 2017	Orgânico (parafina hexadecane e octadecane)	Estabilizada em chapas de alumínio	19,0 a 26,0	62 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	3 células teste	Natural e artificial	PCM no piso, parede e cobertura. Paredes e cobertura em chapas de compensado, laminado e isolante, piso em concreto, compensado e isolante	Chiba (Japão)	Redução no pico máximo de temperatura interna de 2,3°C e 3,1°C durante o dia, e a temperatura máxima noturna aumentou 1,9°C e 2,5°C. Redução no consumo de energia para aquecimento das células testes entre 9,2% e 18,4%.
KONSTANTINIDOU; LANG; PAPADOPOULOS, 2018	Inorgânico (Micronal-Basf®)	Microencapsulado	23,0 a 24,0 (Base); 18,0 a 26,0 (otimização)	70-128 kJ/kg (Base); 40-195 kJ/kg (otimizado)	Simulações multiobjetivo (EnergyPlus + NSGA-II)	2 ambientes de escritório com 144m <sup>2</sup>	Artificial	Paredes externas, internas e cobertura. Os fechamentos analisados foram classificados como leve, médio e pesado	Atenas (Grécia)	O uso de PCMs contribuiu na redução do número de horas em desconforto e no consumo energético para resfriamento em escritórios. Necessidade da ventilação natural para o processo de carga/descarga do PCM.
LEI et al., 2017	Orgânico (parafina)	Microencapsulado	28,0	39 kJ/kg	Análise numérica; simulação termoenergética (EnergyPlus)	Ambiente de 9,7 x 3,4 m	Artificial	PCM nas paredes e cobertura	Singapura	Economia de energia mensal de 5% a 12%, com interação entre a baixa absorvância e o PCM, cuja integração viabiliza um bom desempenho térmico ao longo do ano.
LIRA-OLIVER; VILCHIS-MARTÍNEZ, 2017	Orgânico (Rubitherm)	Macroencapsulado	17,0-19,0; 20,0-23,0; 22,0-26,0	260; 190; 230 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; simulação termoenergética (EnergyPlus)	Célula teste de 1 m <sup>3</sup>	Artificial	PCMs nas paredes e cobertura. Fechamentos em placa de gesso e concreto aerado	Cidade do México (México)	PCM com temperatura de fusão próxima a 18°C, combinado com um material de baixa condutividade térmica, resultou em mais horas em conforto.
BAI et al., 2020	Orgânico (gordura animal e óleo de palma)	***	19,0 a 33,0	219 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; simulação termoenergética (EnergyPlus)	Edificação de 4 pavimentos de 3,6 x 31,9 x 15,8 m	Natural (Ventilação noturna) e artificial	PCM nas paredes externas, internas e no teto. Fechamentos em concreto e tijolo	10 cidades na China	O PCM + estratégia de ventilação noturna reduziu as horas de desconforto nas estações de transição em 16% se comparado apenas com a ventilação noturna. Necessário avaliar cada caso, pois as condições climáticas tem impacto na eficiência.

MARIN et al., 2016	(Micronal®)	Microencapsulado	25,0	200 kJ/m <sup>2</sup>	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Ambiente de 2,4 x 2,4 x 2,4m	Natural e artificial	PCMs nas paredes e cobertura. Fechamentos em aço galvanizado com isolante	25 cidades com diferentes condições climáticas	Redução no consumo de energia em envoltórias de edifícios leves (para aquecimento em climas áridos, temperados quentes). Não houve uma adaptação do PCM para cada clima analisado: piores resultados para cidades de clima tropical e frio com neve.
MEMARIAN et al., 2018	Orgânico (parafina)	Microencapsulado	21,0 a 29,0	200 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; simulação termoenergética (Ecotect 2011 e EnergyPlus)	Célula teste de 2,1 x 2,1 x 0,9 m. Ambiente simulado 3,6 x 4,9 x 2,4m	Natural e Artificial	PCMs no piso, parede e cobertura. Fechamentos em placa cimentícia, concreto e isolante	Teerã (Irã)	O PCM com temperatura de fusão de 29°C reduziu o consumo anual de energia em 15% e com 5 trocas/h de renovação de ar a economia aumentou para 20%.
MENG; YU; ZHOU, 2017	(Rubitherm)	Macroencapsulado	17,0-19,0 e 28,0-30,0	225 kJ/kg e 190 kJ/kg	Análise numérica; ensaios em modelo físico	Células teste de 1 m <sup>3</sup>	Natural	PCMs no piso, parede e cobertura. Chapas de poliestireno expandido	Shanghai (China)	Melhoria no comportamento térmico para verão e inverno. Se comparada a uma célula teste sem PCM, redução da flutuação térmica durante os dias ensolarados de verão entre 28,8% e 67,8%, no inverno entre 17,7% e 25,4%.
MUTHUVEL et al., 2015	6 PCMs orgânicos e 3 inorgânicos	Macroencapsulado	22,0 a 30,0	***	Ensaio em modelo físico; simulação CFD (Creo Elements/Pro)	Células teste de 1 m <sup>3</sup>	Natural	PCMs nas paredes e cobertura. Paredes em alvenaria e cobertura em telhas	Virudhunagar (Índia)	Para as condições avaliadas, o PCM foi capaz de reduzir em até 6°C a temperatura do ambiente.
OZDENEFE; DEWSBURY, 2016	Orgânico (parafina)	Microencapsulado	26,0	90 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Edificação residencial de 186 m <sup>2</sup>	Natural e Artificial	PCM nas paredes externas, internas e cobertura. Estrutura em concreto e paredes em tijolos furados	Chipre	Redução na temperatura em até 1,7°C e na demanda energética em até 14%. Necessidade de ventilação noturna para melhoria no desempenho do PCM.
RAMAKRISHNAN; SANJAYAN; WANG, 2019	Orgânico (parafina/perlita expandida hidrofóbica)	Forma estabilizada	27,0	81 J/g	Ensaio em modelo físico	Célula teste de 1,1 x 0,7 x 0,7 m	Natural	PCMs no piso e parede. Estrutura e fechamentos em madeira, isolante e chapa metálica	Melbourne (Austrália)	Houve redução de até 2,4°C na temperatura interna e 3,7°C na temperatura superficial das células teste devido a utilização do PCM.
RATHORE; SHUKLA, 2020	Inorgânico (SavE® OM37, Pluss Advanced Technologies Pvt)	Macroencapsulado	36,0 a 40,0	218 J/g	Ensaio em modelo físico	Célula teste de 1,1 x 1,1 x 1,1 m	Natural	PCM nas paredes e cobertura. Fechamentos em concreto e argamassa cimentícia	Mathura (Índia)	A utilização de PCM reduziu de 40,67% a 59,79% a amplitude térmica, com redução de 7,19% a 9,18% na temperatura de pico de todas as paredes, cobertura e ambiente interno da célula teste. Foi alcançado de 60 a 120 minutos de atraso e redução de 38,76% na demanda de resfriamento.

SAFFARI et al., 2016	Orgânico (parafina, Rubitherm)	Estabilizada em chapas de alumínio	23,0 a 27,0	250 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Ambiente de 8,0 x 6,0 x 2,7 m	Artificial	PCM nas paredes e cobertura. Fechamentos em placa de gesso, isolante e madeira	Madrid (Espanha)	Para PCM com temperatura fusão de 27°C, maior economia de energia no verão e com 23°C maior economia no inverno. Economias de energia de resfriamento em todos os casos, com exceção do período de inverno, com consumo aumentado com PCM no caso base. <i>Payback</i> de 2 a 3 anos (residencial) e de 6 anos (comercial).
SAFFARI et al., 2017	Orgânico (Parafina)	Microencapsulado	Resfriamento: 24,0 a 28,0; Aquecimento 18,0 a 22,0	110 J/g	Otimização baseada em Simulação (EnergyPlus e GenOpt)	Edificação residencial multipavimentos 3100 m <sup>2</sup> (46,3 x 16,9 x 3,0 m/pavimento)	Artificial	PCM nas paredes externas e cobertura. Paredes em estuque, placa de gesso, isolante e cobertura em telha metálica e isolante	57 cidades com diferentes condições climáticas	Em um clima com necessidade de resfriamento: melhor temperatura de fusão do PCM entre 24°C e 28°C. Climas com necessidade de aquecimento: 18°C e 22°C. Para uso de PCM em edificações, considerar classificação climática, elevação em relação ao nível do mar, irradiância solar, umidade relativa e ventilação.
(SELKA; KORTI; ABOUDI, 2015)	Orgânico (parafina)	***	22,0 a 23,0	240 kJ/kg	Análise numérica e Simulação CFD (FLUENT)	Edificação residencial	Natural	PCM nas paredes e cobertura. Laje em concreto e paredes em tijolos e concreto	Tlemcen (Argélia)	O uso PCMs na parede podem reduzir a temperatura ambiente em cerca de 6°C a 7°C.
SHARMA; RAI, 2020	Orgânico (Rubitherm)	***	24,0 a 50,0	60 ou 240 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Edificação residencial	Artificial	PCM nas paredes e cobertura. Paredes em alvenaria, argamassa cimentícia e isolante. Cobertura em concreto, argamassa cimentícia e isolante	Délhi (Índia)	As simulações com isolante térmico apresentaram um potencial maior na redução da carga térmica, se comparada às com PCM.
SINKA et al., 2019	Orgânico (DuPont Energain e BioPCM)	Estabilizada em chapas de alumínio	21,6 e 25,0	121 e 200 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; simulação termoenergética (EnergyPlus)	5 células teste	Natural e artificial	PCM no piso, paredes e cobertura. Paredes externas com diferentes materiais, entre eles placas de madeira, alvenaria e isolante	Riga (Letônia)	Necessidade de sistemas de resfriamento adicionais junto do PCM no período noturno. Melhores resultados quando utilizado um sistema de resfriamento ativo na cobertura, redução da temperatura de 3°C a 4°C durante o dia.
SOVETOVA; MEMON; KIM, 2019	Orgânico	***	20,0 a 32,0	219 kJ/kg	Simulação termoenergética (EnergyPlus)	Edificação comercial de 4 pavimentos de 15,5 x 42,0 m/pavimento)	Artificial	PCM nas paredes externas e cobertura. Variação dos fechamentos de acordo com o clima	8 cidades com clima quente e seco	Para todas as oito cidades, a economia mensal de energia foi maior durante os meses de verão. Economia aumentou com o aumento da área superficial e diminuiu com o aumento da espessura da camada de PCM.

Fonte: Os autores (2022).

A utilização de PCMs em envoltórias se destaca pelo aumento das horas em conforto térmico dos usuários e economia de energia, conforme apresentado por Saffari et al. (2017), Sovetova; Memon e Kim (2019), Ramakrishnan, Sanjayan e Wang (2019), Konstantinidou, Lang e Papadopoulos (2018), Kharbouch et al. (2018) e Kenzhekhanov, Memon e Adilkhanova (2020). Entretanto, autores como Brito et al. (2017) e Bai et al. (2020) apresentaram situações em que o uso de PCMs pode piorar o desempenho térmico dependendo do clima. Já Sharma e Rai (2020) concluíram que o uso de isolante térmico apresentou mais vantagem se comparado ao uso de PCMs. Autores como Bouguerra e Retiel (2015), Bai et al. (2020) e Brito et al. (2017) afirmaram a necessidade de avaliar o clima externo, pois sua influência é significativa para o comportamento do PCM. Além da análise climática, Saffari et al. (2017) apontaram que condições de contorno como elevação em relação ao nível do mar, radiação solar, umidade relativa e perfil do vento influenciaram no resultado do uso de PCM, mesmo entre cidades classificadas com o mesmo clima.

Conforme já discutido, a necessidade de carga e descarga do PCM foi apontada como fator fundamental para a eficiência na sua utilização em envoltórias, principalmente com a adoção da ventilação seletiva no período noturno (KONSTANTINIDOU; LANG; PAPADOPOULOS, 2018; BERARDI; SOUDIAN, 2019; OZDENEFE; DEWSBURY, 2016; BAI et al., 2020).

Por se tratarem de superfícies diferentes, com cargas e trocas térmicas diferentes, autores como Ahangari e Maerefat (2019b), Marin et al. (2016), Bouguerra e Retiel (2015) e Berardi e Soudian (2019) investigaram a utilização de mais de um tipo de PCM, ou PCMs com temperaturas de fusão diferentes em elementos construtivos diferentes. Os estudos mencionados mostraram resultados promissores e foram considerados, com base nessa revisão, como a abordagem mais assertiva para utilização de PCMs em envoltórias.

#### **2.4.2.4 Fechamentos translúcidos**

Os elementos translúcidos, por possuírem baixas resistência e capacidade térmicas, representam parte do edifício responsável por maior perda ou ganho energético.

Muitas soluções foram desenvolvidas para amenizar a baixa resistência térmica dos elementos translúcidos: estudos sobre vidros multicamadas, vidros duplos, preenchimento do espaço entre os painéis de vidro com gás ou aerogel e vidros com

baixa emissividade (LI et al., 2020a). Entretanto, nenhuma delas resolve efetivamente a baixa capacidade térmica dos componentes. Como solução para aumentar a capacidade térmica desses elementos, algumas pesquisas propuseram sua associação ao uso de PCMs (Tabela 5).

Tabela 5 PCM em fechamentos translúcidos

Autores (ano)	Tipo do PCM (composição e fabricante)	Forma de incorporação	Temperatura de mudança de fase (°C)	Cap. de armazenamento de calor latente	Abordagem metodológica	Tipo/dimensão do ambiente	Condição do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização geográfica do estudo	Principais conclusões
DURAKOVIC; TORLAK; SCIENCES, 2017	Orgânico (parafina Rubitherm GmbH)	***	24,5 a 26,5	189 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; análise numérica	Célula teste com 1,0 x 0,5 x 0,5 m	Artificial	PCM no interior de janela de vidro duplo	Sarajevo (Bósnia)	PCM reduziu as variações de temperatura e acumulou energia convectiva e radiante na forma de calor latente, com manutenção da temperatura da superfície interna mais baixa.
BERTHOU et al., 2015	Eutético (orgânico ácido graxo)	***	22,2 a 24,6	162 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Painel de 1 m <sup>2</sup>	Artificial	PCM no sistema envidraçado de uma parede trombe composto por vidro, aerogel de sílica e PCM	Sophia-Antipolis (França)	Sistema mais eficaz no inverno, com diferenças entre as temperaturas externas e internas de cerca de 10°C. Melhor desempenho em climas frios e ensolarados. Durante o verão, foi observado superaquecimento. Foram encontrados índices de 500 lux no ambiente interno.
GIOVANNINI et al., 2018	Orgânico (parafina)	***	35,0	170 J/g	Simulação termoenergética e luminosa (Radiance/Honeybee)	Ambiente de 3,6 x 5,0 x 2,7m abertura envidraçada 100% da fachada	***	PCM no interior de janela de vidro duplo	Östersund (Suécia), Turin (Itália); Abu Dhabi (EAU)	A janela com PCM permitiu uma maior incidência de luz no ambiente interno. Porém, o aumento da quantidade de luz não resultou em maior conforto visual.
GOIA; PERINO; SERRA, 2014	Orgânico (n-alkanos e ceras, RT35HC)	***	33,0 a 37,0	245 J/g	Ensaio em modelo físico	Célula teste com 1,6 x 3,6 x 2,5 m	Natural	PCM no interior de painel envidraçado com 3 e 4 camadas de vidro. Um dos casos com argônio	Torino (Itália)	O PCM colocado na cavidade mais interna da unidade envidraçada apresenta um desempenho melhor se comparado a externa.
GOIA et al., 2015	Orgânico (parafina)	***	21,0 a 35,0	***	Ensaio em modelo físico	Teste em área envidraçada de 0,25 x 0,25 m	***	6 variações da combinação entre PCM no interior de janela de vidro duplo	***	Vantagens: uso da iluminação natural, redução do risco de ofuscamento e redução e mudança do pico de ganho solar. Desvantagens: aumento de peso, mudança de volume e limitação do aspecto translúcido.
GOIA; BOCCALERI, 2016	Orgânico (parafina: aliphatic hydrocarbons e straight-chain alkanes)	***	35,0	170 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Teste em área envidraçada de 1,4 x 1,1 m	Artificial	PCM no interior de janela de vidro duplo	Torino (Itália)	Há estabilidade no armazenamento de calor latente após o processo de envelhecimento forçado. Entretanto, foi observada uma diminuição da faixa de temperatura de fusão e degradação química com envelhecimento.

GOIA; PERINO; SERRA, 2014	Orgânico. (parafina, Rubitherm)	***	35,0	170 J/g	Ensaio em modelo físico	Teste em área envidraçada de 1,40 x 0,70 m	Artificial	PCM no interior de ja- nela de vidro duplo	Torino (Itália)	No verão, permite redução no ganho de energia superior a 50% pela obstrução da radiação solar. No inverno, houve uma redução na perda de calor durante o dia, mas o ganho de radiação solar foi reduzido.
GRYNNING; GOIA; TIME, 2015	Inorgânico (sal hidratado)	Macro.	28,5	***	Ensaio em modelo físico	Teste em área envidraçada de 1,2 x 1,2 m	Artificial	PCM no interior de ja- nela com 4 camadas de vidro	***	Necessário períodos longos de incidência de radiação combinados com altas temperaturas externas para proporcionar melhorias no desempenho. PCM torna a visão pela janela limitada.
HU; HEISELBER G, 2018	Orgânico (parafina)	***	22,0	216 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; análise numérica	Teste em área envidraçada de 1,5 x 0,7 m	Artificial	PCM no sistema envidraçado com vidro duplo e camada de ar para efeito chaminé	Copenhague (Dinamarca)	O melhor resultado foi capaz de resfriar o ar que passa pela janela em média 6,5°C com um tempo de resfriamento de 3,9 h.
KOLÁCEK; CHARVÁTOV Á; SEHNÁLEK, 2017	Inorgânico (sal hidratado)	***	***	***	Ensaio em modelo físico; análise numérica	Teste em área envidraçada de 1,0 x 1,0 m	Artificial	PCM no interior de ja- nela com 4 camadas de vidro	***	Redução de 66% na energia térmica incidente no interior do edifício. PCM utilizado no experimento tem uma taxa de transmissão de luz no estado líquido máxima de 45% e no estado sólido máxima de 28%.
LI et al., 2020a	Orgânico (parafina)	***	27,0 e 29,0	206 kJ/kg	Análise numérica	***	***	PCM no interior de ja- nela de vidro duplo	Daqing (China)	Importância da radiação solar na temperatura superficial e na transmissão do fluxo de calor. A incidência de luz é maior quando o PCM está no estado líquido.
LI et al., 2018	Orgânico (Parafina Shanghai Joule Wax Industry)	***	18,0; 26,0; 32,0	185; 174; 172 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Células teste de 0,76 x 0,71 x 0,61 m e área envidraçada de 0,50 x 0,45 m	Natural e artificial	PCM no interior de painel envidraçado com 4 camadas de vidro	Daqing (China)	A economia de energia pode chegar a 47,5%. Payback de 3,3 anos se considerada a melhor seleção do ponto de fusão do PCM.
LI et al., 2020b	Orgânico (parafina)	***	8,0	185 kJ/g	Análise numérica (FLUENT6.3)	***	***	PCM no interior de ja- nela com 3 camadas de vidro e aerogel de sílica	Daqing (China)	Importância do aerogel (isolamento) + PCM (armazenamento de energia térmica) na manutenção do conforto térmico em regiões frias.

LIU et al., 2016	Orgânico (parafina)	***	27,0 a 29,0	205 kJ/kg	Análise numérica	Cobertura de estádio	***	PCM no interior de painel envidraçado com 2 camadas de vidro	Daqing (China)	Parâmetros como espessura, inclinação, coeficientes de absorção e índice de refração do PCM nos estados sólido e líquido afetam diretamente o desempenho térmico e luminoso das coberturas.
LIU; YANGYANG WU; LIU, 2017					Medição protótipo; análise numé- rica	Células teste de 0,76 × 0,71 × 0,61 m e área envidraçada de 0,50 x 0,45 m		PCM no interior de painel envidraçado com 4 camadas de vidro		
ZHONG et al., 2015	Orgânico (parafina)	***	27,0 e 29,0	205 kJ/kg	Modelo físico; análise numérica	***	Artificial	PCM no interior de ja- nela de vidro duplo	Nanjing (China)	Deslocamento do pico de carga do sistema de ar condicionado e potencial promissor de economia de energia.

Fonte: Os autores (2022).

A utilização de PCMs em vidros apresenta vantagens em relação ao aumento do conforto térmico, da eficiência energética e diminuição da temperatura superficial (DURAKOVIC; TORLAK; SCIENCES, 2017; BERTHOU et al., 2015; GRYNNING; GOIA; TIME, 2015; BERTHOU et al., 2015; LI et al., 2020b).

Autores como Grynning, Goia e Time (2015), Berthou et al. (2015) e Li et al. (2016) destacaram a importância da incidência de radiação solar na superfície dos vidros para a eficiência desses sistemas.

Uma característica discutida pelos autores é que, mesmo o PCM no estado líquido, não é obtida a mesma transparência de um vidro comum. Já no estado sólido, na maioria das vezes o PCM não é transparente e permite apenas a passagem de luz difusa. Alguns autores apresentaram aplicações vantajosas para essa característica, como a utilização do sistema como proteção solar (GOIA; PERINO; SERRA, 2014). Porém, mesmo a utilização apenas de iluminação difusa deve ser avaliada, já que pode acarretar desconforto luminoso interno e ofuscamento (GIOVANNINI et al., 2018).

Outra associação de PCM e vidros que foi explorada nessa revisão foram os estudos de Liu et al. (2016) e Liu, Yangyang Wu e Liu (2017), que investigaram sistemas zenitais. A utilização de coberturas envidraçadas com PCM pode ser uma solução para minimizar as limitações relacionadas à transparência do material. Em climas quentes, as coberturas translúcidas podem ser utilizadas para iluminar ambientes internos com o mínimo de ganho de calor utilizando apenas radiação difusa. Logo, a utilização de PCMs nesses fechamentos é uma possível solução que necessita maior investigação.

Apesar das vantagens apresentadas, a incorporação de PCMs em superfícies translúcidas não representa uma situação economicamente viável para janelas convencionais em edificações residenciais. Seu potencial deve ser explorado em edificações comerciais, caracterizados por grandes fachadas e coberturas envidraçadas com elevados ganhos térmicos e baixa inércia térmica de ambientes. Além disso, destaca-se que os sistemas translúcidos com PCM podem ser eficazes apenas se o PCM permanecer na fase de transição na maior parte do tempo. Fora da fase de transição, a capacidade térmica desses materiais não é muito melhor do que aquelas encontradas em câmaras de ar (GOIA et al., 2015).

#### **2.4.2.5 PCMs em outros sistemas**

A associação de PCMs em persianas, venezianas e brises pode reduzir as trocas térmicas com o meio externo pelas aberturas, com pouca ou nenhuma intervenção na edificação.

Em relação aos dispositivos que utilizam do efeito chaminé, como chaminés solares e fachadas duplas, a sua associação com PCMs tem potencial para melhorar o condicionamento dos ambientes internos e economizar energia no sistema de climatização (MONGHASEMI; VADIEE, 2018). Porém, assim como ocorre com a associação PCM a persianas, venezianas e brises, o número de pesquisas que levaram em consideração esses dispositivos é bastante reduzido se comparado àquelas em outros sistemas construtivos como paredes, coberturas, envoltórias e vidros (Tabela 6).

Monghasemi e Vadiie (2018) realizaram um levantamento bibliográfico dos trabalhos que investigaram a associação de chaminés solares com PCM. Os autores destacaram algumas potencialidades dessa associação: a utilização de PCMs pode diminuir a sensibilidade da chaminé solar a flutuações repentinas de calor; é possível garantir maior número de horas de ventilação natural, especialmente durante a noite ou dias nublados; e são necessárias pequenas modificações na configuração das chaminés solares para a incorporação de PCMs (Tabela 6).

Tabela 6 PCMs em outros sistemas

Autores (ano)	Tipo do PCM (composição e fabricante)	Forma de incorporação	Temperatura de mudança de fase (°C)	Cap. de armazenamento de calor latente	Abordagem metodológica	Tipo/dimensão do ambiente	Condição do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização geográfica do estudo	Principais conclusões
LI; DARKWA; KOKOGIA NNAKIS, 2017	(PX35, Rubitherm)	Microencapsulado	29,0 a 36,0	***	Ensaio em modelo físico; simulação CFD (ANSYS FLUENT)	Célula teste de 1,0 x 0,9 x 0,4 m	Natural	PCM em brises compostos por chapas de alumínio dentro de uma fachada dupla	Ningbo (China)	Sistema capaz de reduzir a temperatura média do ar e a temperatura de saída na fachada dupla. Foi possível melhorar a transferência de calor entre o ar da cavidade e as lâminas com PCM, com absorção do calor excessivo na fachada dupla.
DE GRACIA et al., 2013a	Inorgânico (sal hidratado SP-22, Rubitherm)	Macroencapsulado	22,0	150 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Célula teste de 2,4 x 2,4 x 5,1 m com área da superfície absorvedora de 6,4 m <sup>2</sup>	Natural e artificial	PCM na superfície absorvedora de uma fachada dupla. Célula teste em alvenaria e argamassa cimentícia	Lleida (Espanha)	Sistema melhorou o comportamento térmico de todo o edifício com reduções no consumo elétrico dos sistemas de climatização.
DE GRACIA et al., 2013b										Necessidade do uso da ventilação noturna para carga/descarga do PCM. Sensibilidade do sistema em relação ao clima e demanda de resfriamento dos usuários.
GRACIA et al., 2015a	Inorgânico (sal hidratado SP-22, Rubitherm)	Macroencapsulado	18,0 a 23,0	93 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; análise numérica	Célula teste de 2,4 x 2,4 x 5,1 m com área da superfície absorvedora de 6,4 m <sup>2</sup>	Natural e artificial	PCM em fachada dupla	Lleida (Espanha)	Redução da temperatura em até 90%. Potencial do PCM para melhorar a regulação térmica de espaços internos.
GRACIA et al., 2015b		***	22,0	150 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; análise numérica					PCM na superfície absorvedora de uma fachada dupla. Célula teste em alvenaria e argamassa cimentícia
LI; LIU; LU, 2017	Orgânico (parafina)	***	38,0 a 43,0	175 kJ/kg	Análise numérica e medição em protótipo	Chaminé solar teste de 1,0 x 1,6 x 0,4 m com PCM	***	PCM instalado na superfície absorvedora de uma chaminé solar feita em aço, vidro e isolante	***	Impacto positivo no desempenho térmico com aumento da temperatura da superfície absorvedora e do fluxo de ar devido ao PCM. Necessária análise individual, pois, em algumas situações, pode aumentar o desconforto.
LIU; LI, 2015		Macroencapsulado			Ensaio em modelo físico					Redução do fluxo de ar durante o período de carregamento do material e aumento do fluxo durante o período de descarga.

MORADI; KIANIFAR ; WONGWIS, 2017	Orgânico (parafina)	Incorpo- rada em containers plásticos	51,8 a 55,8	250 kJ/kg	Simulação CFD (FLUENT); Ensaio em modelo físico	Chaminé so- lar teste de 0,6 x 1,1 x 0,2 com PCM	Natural	PCM instalado na superfície absorvedora de uma chaminé solar feita em aço, vidro e isolante	Bojnourd (Iran)	O momento de descarga do PCM apresenta aumento na eficiência total do sistema de 30%.
SAXENA et al., 2020	Orgânico (parafina)	Tubos de cobre com PCM	41,0 a 44,0	250 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Protótipo de uma chaminé solar com su- perfície ab- sorvedora de 1,5 x 0,50 m	Natural e artificial	PCM preenchendo o interior de tubos de cobre que compõe a superfície chaminé solar feita em aço, vidro e isolante	Moradaba d (Índia)	Foram obtidos resultados melhores em relação a transferência de calor, eficiência térmica, temperatura de exaustão devido ao uso do PCM.
SILVA et al., 2015a	Orgânico (parafina, RT28HC®)	Macroen- capsulado	27,0 a 29,0	245 kJ/kg	Ensaio em modelo físico	Célula teste de 7,0 x 2,3 x 2,6 m	Natural	PCM em sistema jane- la/veneziana. Célula teste em aço galvanizado com painéis <i>drywall</i> com isolante	Aveiro (Portugal)	Redução nos picos de temperatura máxima e mínima de 6% e 11% respectivamente. Aumento em 45 minutos do atraso para atingir o mínimo e 60 minutos para atingir o pico máximo de temperatura.
SILVA et al., 2015b										Redução da temperatura em até 90%. Potencial do PCM para melhorar a regulação térmica de espaços internos.

Fonte: Os autores (2022).

## 2.4.3 Análise bibliométrica

### 2.4.3.1 Rede de autores e coautores

A partir do organograma relacionando os principais autores gerado no VOSviewer (Figura 1), foi possível identificar os grupos de pesquisas com o maior volume de publicações. Também foi possível identificar os possíveis coordenadores desses grupos de pesquisa, devido à repetição de seus nomes nas publicações.

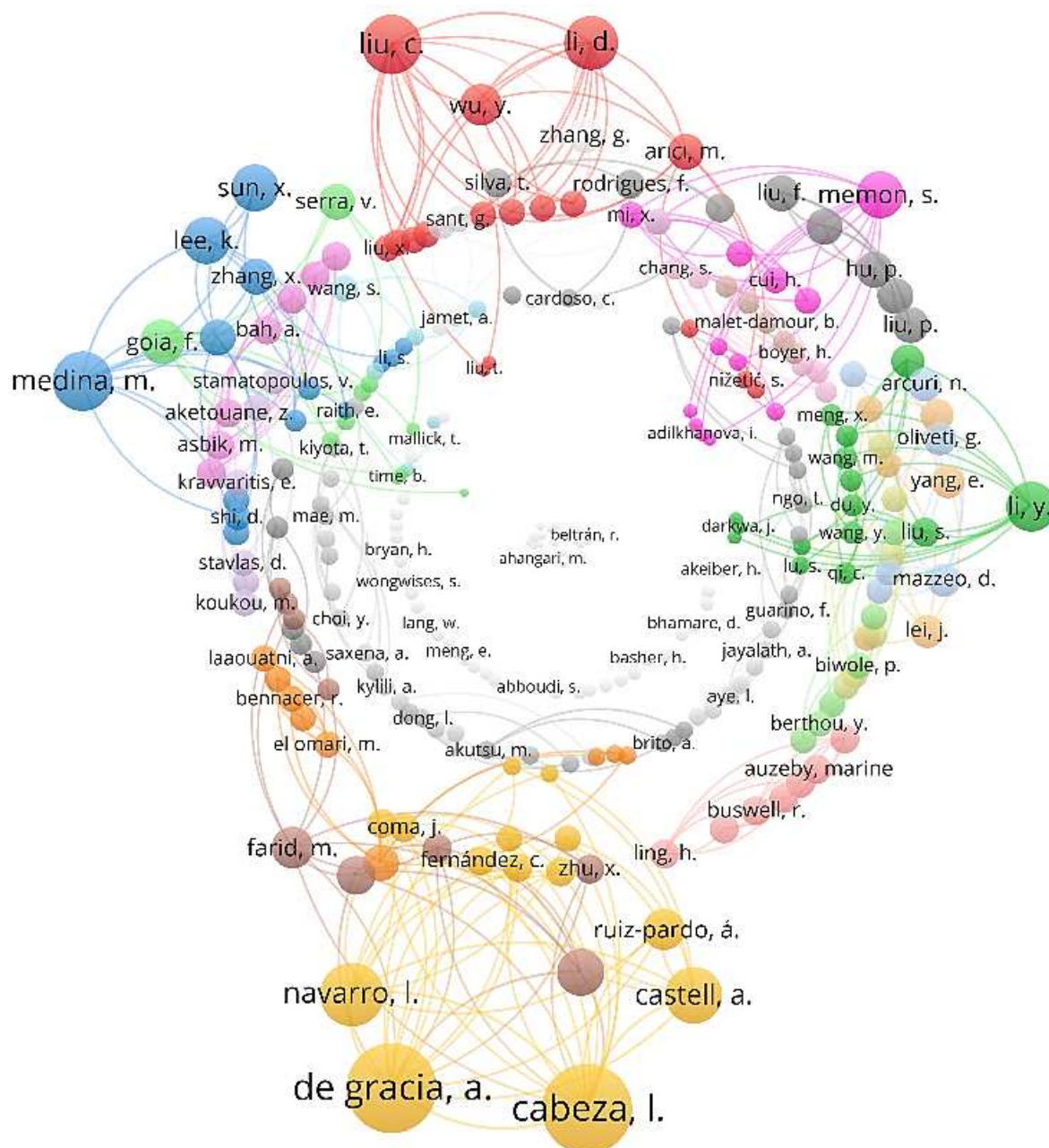


Figura 1 Análise bibliométrica dos autores  
Fonte: Os autores (2022).

Logo, destacam-se: as pesquisadoras Luisa F. Cabeza e Lidia Navarro da Universitat de Lleida e Alvaro de Gracia da Universitat Rovira, Espanha; Mario A. Medina da University of Kansas, EUA; Changyu Liu e Dong Li da Northeast Petroleum University e Yongcai Li da Chongqing University, China; e Shazim Ali Memon da Nazarbayev University, Cazaquistão.

A identificação dos coordenadores de grupos de pesquisa pode ser uma forma de auxiliar as buscas de artigos em PCMs por autoria em paralelo com a busca de termos e palavras-chave. Dessa forma, é possível aprimorar a busca por assuntos específicos, como, por exemplo, PCMs em fachadas duplas a partir dos trabalhos de Alvaro de Gracia, com 4 publicações no tema.

O organograma ainda mostra 18 agrupamentos mais importantes (representados por cores saturadas) e agrupamentos menos representativos (representados por cores dessaturadas). Isso ocorre devido às opções de *clustering* do programa de análise bibliométrica que associa pesquisadores pela quantidade de pesquisas relacionadas, desconectando das redes os autores com menor número de publicações. Além disso, quando maior a opacidade dos grupos de autores, menor a associação com outros pesquisadores importantes no tema.

#### **2.4.3.2 Palavras-chave**

A partir do organograma apresentado na Figura 2 foi possível observar que as palavras-chave que mais se repetiram foram: a combinação entre PCM, PCMs, *phase change material* e conforto e performance térmica (*thermal comfort* e *thermal performance*). É possível observar seis maiores interconexões no meio do organograma, indicando a maior coocorrência de palavras associadas. Como exemplo, o termo PCM se relaciona fortemente com todas as palavras-chave no agrupamento laranja. Outros termos nos limites do *cluster* fazem paralelos com outros agrupamentos, i.e., *thermal performance* se relaciona igualmente com o agrupamento laranja e verde; no entanto, é incluída no agrupamento verde por ter ligação direta com modelos simulacionais e seus parâmetros. Devido ao diverso número de ligações, não é possível analisar conexões mais sutis como a relações entre *building envelope* e os caracterizantes de envoltória (*roof, location, configuration, construction e insulation*).



o usuário compreenda a linguagem de programação *Python* para a criação do arquivo de definições, sinônimos, antônimos e substituições.

A partir da interpretação dos termos que mais se repetiram, é possível afirmar que existe uma tendência entre as áreas, métodos e parâmetros de maior interesse nas pesquisas de PCM e as palavras destacadas na Figura 2. Apesar do agrupamento em seis *clusterings*, as palavras podem ser divididas em três grupos maiores. Isso ocorre porque o *software* cria agrupamentos por conexão entre pesquisas e não por assuntos. O primeiro grupo se refere aos dados de saída e à forma como a incorporação dos PCMs foi analisada, com os termos traduzidos: performance térmica; conforto; conforto térmico, economia de energia, simulação; e EnergyPlus. O segundo grupo compõe as palavras-chave ligadas a características, local, sistema e forma em que o PCM foi instalado, com os termos traduzidos: envelope da edificação; edificação residencial; telhado; espessura; isolante; e orientação. O terceiro grupo está ligado às condições climáticas, com palavras com os termos traduzidos: condições climáticas; clima interno; temperatura interna; inverno; verão; radiação solar; energia solar; e estação.

É importante destacar que intencionalmente não foram inseridos termos que levassem às buscas para recortes específicos. Os termos que se diferenciaram das palavras presentes nas *strings* surgiram a partir das buscas gerais.

Logo, para buscas sobre abordagens, características e climas específicos em pesquisas com PCMs recomenda-se uma combinação entre os termos citados, que nesse recorte podem ser considerados gerais, e a utilização de palavras-chave específicas.

#### **2.4.3.3 Distribuição geográfica das pesquisas em PCMs**

Com o objetivo de analisar a distribuição geográfica das pesquisas, foram mapeadas todas as cidades/climas contemplados na avaliação de sistemas construtivos com PCM. Foram identificadas 295 cidades/climas para os quais os estudos foram realizados levando em consideração medições e simulações. A Figura 3, na qual cada marcação representa uma cidade, foi elaborada a partir dos estudos apresentados nas Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6 e sobreposta a classificação climatológica de Köppen-Geiger.

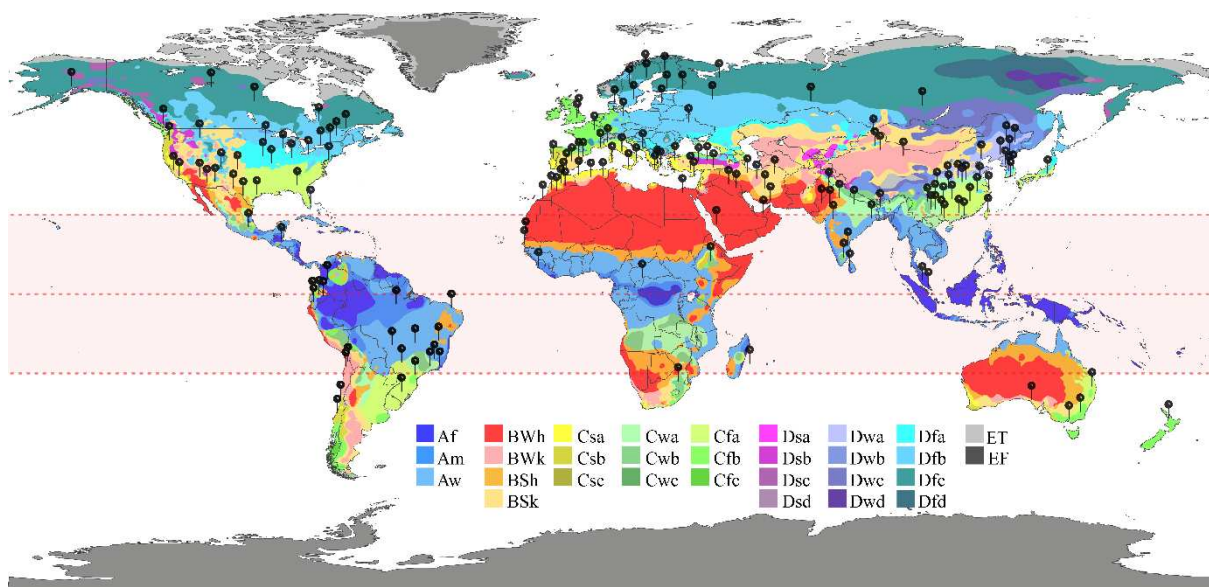


Figura 3 Cidades contempladas em pesquisas com PCMs – Região dos trópicos destacada em rosa

Figura em melhor resolução no Apêndice A

Fonte: Adaptado de Peel, Finlayson e McMahon (2007).

O levantamento mostra uma distribuição ampla das pesquisas com PCM, com a maioria dos estudos concentrados no Hemisfério Norte, acima do Trópico de Câncer. É possível observar estudos em todos os continentes, com exceção da Antártica, em diversas condições climáticas e em diferentes latitudes (Figura 3).

Pesquisas em climas temperados, característicos do grupo C de Köppen, são as mais recorrentes e representam 38% de todos os estudos encontrados. No grupo C, 64% dos estudos acontecem para o subtipo verão quente, seguido de 27% das ocorrências para verões frescos e apenas 9% para verões frios. Pouco menos da metade dos estudos em climas temperados se refere a invernos secos. Os trabalhos se concentram principalmente no sudeste asiático, com destaque para a China, sudeste dos Estados Unidos, Europa Ocidental, Oceania e América do Sul, com três estudos no sul do Brasil.

O grupo B de Köppen para climas com baixo índice de precipitação anual é o segundo mais expressivo, com 30% das ocorrências, principalmente para o tipo semiárido no oeste dos Estados Unidos e em maior quantidade no Oriente Médio.

O grupo continental e subártico aparece como o terceiro mais estudado com ênfase para tipo inverno seco e verão frio. As ocorrências se concentram principalmente nos países europeus setentrionais e ocidentais.

Desconsiderando o grupo polar/alpino que não apresenta nenhum estudo, o grupo tropical é o menos representativo dentre todos. Esse grupo é responsável por apenas 15% das ocorrências, especialmente para o tipo de savana, presente principalmente na região entre trópicos. Nota-se também que dentro do grupo tropical poucas pesquisas foram realizadas para os tipos equatorial e de monções.

A combinação do levantamento das cidades e da revisão integrativa de literatura demonstram a versatilidade dos PCMs e seu potencial de uso em diversas aplicações e em diversos climas. Essas regiões apresentam número significativo de horas em desconforto, principalmente por calor, e gastos de energia para resfriamento, agravados pelo aumento crescente no consumo de energia pelos países em desenvolvimento nessas regiões.

Pesquisas como as realizadas por Brito et al. (2017), Pons e Stanescu (2017), Guichard et al. (2015), Saffari et al. (2017), Lei, Yang e Yang (2016), Reddy e Mudgal (2017) e Muthuvel et al. (2015) apresentaram os benefícios da utilização de PCMs nessas regiões. Evidentemente, é necessário estudar o desempenho térmico e energético da edificação em relação ao clima, os parâmetros construtivos e as características do PCMs para alcançar os benefícios esperados. Além disso, existe a possibilidade de que no grupo equatorial e de monções, com temperaturas externas elevadas durante todo o ano e muitas vezes acima do intervalo de conforto, a utilização de PCM e conseqüentemente o aumento da capacidade térmica da edificação acarrete o aumento do desconforto dos usuários por calor e aumento no consumo de energia (BRITO *et al.*, 2017; BAI et al., 2020).

Logo, vê-se a importância de mais estudos com PCMs em regiões tropicais com clima quente e úmido, com foco no aumento do desempenho térmico, na mitigação do desconforto por calor e na redução do consumo de energia por condicionamento artificial.

## **2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este artigo apresenta uma revisão integrativa de literatura do estado da arte e análise bibliométrica para publicações relacionadas à utilização de PCMs com aplicação em sistemas construtivos passivos em edificações. O uso da revisão integrativa de literatura como procedimento metodológico se mostrou uma ferramenta efetiva para o

levantamento, seleção e análise de artigos. Embora esse método seja comum nas áreas das ciências agrárias e da saúde, a partir do que foi exposto, acredita-se no seu potencial também para uso nas áreas relacionadas a tecnologias do ambiente construído.

Inicialmente foram apresentados os PCMs, seu funcionamento, formas de aplicação, características térmicas, químicas, físicas e econômicas necessárias para seu uso na construção civil. Na sequência, foram discutidas as vantagens e desvantagens dos tipos de PCM e sua forma de incorporação em elementos construtivos.

De maneira geral, a utilização de PCMs em todos os sistemas construtivos apresentou potencial relacionado ao aumento das horas de conforto e redução do consumo de energia, com algumas exceções. Outras vantagens, como *payback* reduzido, redução do fluxo de calor, redução do risco de condensação e controle da umidade foram investigadas e se mostraram positivas.

Parte dos autores recomenda uso do PCM associado à ventilação seletiva, principalmente a noturna. Dessa forma, os PCMs têm condições de absorver energia durante o dia e liberá-la durante a noite. Sem esse ciclo, o material funcionará como um armazenador de calor sensível, sem grande parte dos benefícios esperados.

Sobre as propriedades dos PCMs, 66% das pesquisas utilizou PCMs orgânicos, compostos por parafinas e ácidos graxos. A forma de utilização foi diversificada, com uma tendência maior de uso na forma de componente encapsulado (micro e macro), presente em 28% dos trabalhos.

Em relação à temperatura de mudança de fase, 74% dos estudos investigou temperaturas entre 22°C e 28°C enquanto 50% das pesquisas adotaram capacidades de armazenamento de calor latente entre 150 kJ/kg a 210 kJ/kg. Temperaturas de mudança de fase mais altas, acima de 30°C, foram observadas para PCMs utilizados em coberturas, sistemas envidraçados e chaminés solares, que são mais comumente expostos à radiação solar direta. Estudos em climas quentes, sejam eles secos ou úmidos, também apresentaram PCMs com temperaturas de mudança de fase mais altas, na ordem de 30°C. De forma geral, as investigações consideram faixas de temperatura específicas, muitas vezes intrínsecas aos estudos, o que torna generalista a extrapolação da análise dos dados.

A maioria das pesquisas utilizou algum tipo de medição como abordagem metodológica, com destaque para medições em células testes com dimensões entre 1 m<sup>3</sup> e 2 m<sup>3</sup>, adotadas em 52% dos estudos. Destaca-se também que 28% dos trabalhos utilizaram de simulação termoenergética com o *software* EnergyPlus.

Em relação ao ambiente de análise, a maioria possui baixa capacidade térmica. Das pesquisas que avaliaram fechamentos opacos, 46% foram compostos por sistemas construtivos de camadas homogêneas como gesso, isolante, compensado, madeira, e painéis pré-fabricados em concreto e 69% foram avaliados com climatização artificial ou híbrida.

A partir dos parâmetros investigados, fica evidente a influência da relação entre as condições climáticas e a edificação no desempenho térmico dos PCMs. As condições climáticas vão além das diferenças entre regiões e climas, com impacto na variação das temperaturas entre dia e noite e durante as estações do ano.

Além do desempenho térmico da edificação frente ao clima, destacam-se a orientação solar da superfície, a camada em que o PCM está instalado, a espessura da camada de PCM, o tipo de material construtivo associado ao PCM, a geometria dos ambientes e da edificação, tipos de materiais e condições de contorno da edificação, a temperatura de mudança de fase, a capacidade de armazenamento de energia na forma de calor latente, questões relacionadas à ocupação dos espaços internos, seu padrão de uso e carga térmica.

O excesso de parâmetros associados ao uso dos PCMs e a possibilidade de ajustar cada um deles para correta aplicação é, possivelmente, o que garante a versatilidade do material e sua aplicação para vários locais com condições climáticas e de uso significativamente diferentes. Entretanto, isso também contribui para resultados discrepantes entre pesquisas. A variação dos parâmetros gera pesquisas com objetivos ou metodologias significativamente diferentes, o que dificulta a comparação entre os resultados e levou este trabalho a estabelecer o componente construtivo ao qual o PCM foi associado como subitem para agrupamento e classificação dos artigos.

É também vista como uma limitação a relativa pouca utilização de PCMs reais devido à falta de padronização por parte dos fabricantes. A falta de uniformidade na apresentação dos produtos contribui para continuação de pesquisas com PCMs

teóricos ou para seleção incorreta, imprecisa ou superestimada de materiais não representativos.

Para além das características dos PCMs, poucas são as pesquisas que ofereceram informações sobre a viabilidade econômica da sua aplicação. De forma geral, os autores demonstram diminuição do consumo geral de energia, mas não oferecem informações sobre retorno do investimento. Isso ocorre principalmente devido à incerteza sobre o uso de PCMs em longo prazo.

Para a seleção dos PCMs, a maioria dos trabalhos cobre apenas um ou dois parâmetros utilizando otimizações mono-objetivo. Como metodologias promissoras, apontamos a pesquisa de Berardi e Soudian (2019), que investiga a utilização de diversos tipos de PCM, faixas de temperatura e elementos construtivos concomitantemente, levando a uma abordagem assertiva e reproduzível, mesmo com a utilização de PCMs teóricos.

É uma tendência para pesquisas futuras a utilização de simulações paramétricas para uma avaliação simultânea de diversas características e propriedades a fim de correlacionar as variáveis intervenientes no desempenho, incluindo análises de sensibilidade e otimizações multiobjetivo. Essa abordagem metodológica pode permitir uma série de investigações com uso de PCMs que não são possíveis em pesquisas que consideram apenas medições, por exemplo. Ainda pode ser citada a necessidade de avaliações pós-ocupação, que poderão surgir após o uso amplo do material em edificações, principalmente as comerciais.

Por fim, destaca-se a distribuição heterogênea das pesquisas ao redor do mundo. Existe o potencial do material proporcionar conforto e economia de energia para grande parte dos climas, entretanto o número de pesquisas em regiões temperadas, com latitudes médias, é maior do que em climas tropicais com baixas latitudes. A análise do emprego de PCMs nessas regiões é também uma lacuna para maiores investigações, visto o número reduzido de trabalhos que levaram em consideração PCMs com temperaturas de fusão acima de 30°C associados ao uso da ventilação natural.

Portanto, a utilização de PCMs em edificações compostas por sistemas construtivos heterogêneos é uma demanda relevante e um campo de pesquisa a ser investigado em climas tropicais quentes e úmidos e de baixa latitude, como grande parte do Brasil.

## 2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHANGARI, M.; MAEREFAT, M. An innovative PCM system for thermal comfort improvement and energy demand reduction in building under different climate conditions *Sustainable Cities and Society*. **Sustainable Cities and Society**, v. 44, p.120-129, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.008>
- AKEIBER, H. J.; WAHID, M. A.; HUSSEN, H. M. A newly composed paraffin encapsulated prototype roof structure for efficient thermal management in hot climate. **Energy**, v. 104, p. 99–106, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.131>
- AKETOUANE, Z.; MALHA, M.; BRUNEAU, D.; BAH, A.; MICHEL, B.; ASBIK, M. Energy savings potential by integrating Phase Change Material into hollow bricks: The case of Moroccan buildings. **Building Simulation**, v. 11, n. 6, p. 1109–1122, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0457-5>
- ALLISON, D. A. Metrics for decisions, in: *Patron-Driven Library*, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-84334-736-1.50007-6>
- AL-SAAD, S. N.; ZHAI, Z. A new validated TRNSYS module for simulating latent heat storage walls. **Energy and Buildings**, v. 109, p. 274–290, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.013>
- ARICI, M.; BILGIN, F.; NIŽETIĆ, S.; KARABAY, H. PCM integrated to external building walls: An optimization study on maximum activation of latent heat. **Applied Thermal Engineering**, v. 165, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114560>
- AUZEBY, M.; WEI, S.; UNDERWOOD, C.; TINDALL, J.; CHEN, C.; LING, H.; BUSWELL, R. Effectiveness of using phase change materials on reducing summer overheating issues in UK residential buildings with identification of influential factors. **Energies**, v. 9, n. 8, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/en9080605>
- AZIZ, S.; AMIN, N. A. M.; ABDUL MAJID, M. S.; BELUSKO, M.; BRUNO, F. CFD simulation of a TES tank comprising a PCM encapsulated in sphere with heat transfer enhancement. **Applied Thermal Engineering**, v. 143, p. 1085–1092, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.013>
- BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 1361–1368, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>
- BAI, L.; XIE, J.; FARID, M. M.; WANG, W.; LIU, J. Analytical model to study the heat storage of phase change material envelopes in lightweight passive buildings. **Building and Environment**, v. 169, p. 106531, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106531>
- BANIASSADI, A.; SAILOR, D. J.; BRYAN, H. J. Effectiveness of phase change materials for improving the resiliency of residential buildings to extreme thermal conditions. **Solar Energy**, v. 188, p. 190–199, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.011>
- BASSOTTO, L. C.; LOPES, M. A.; BRITO, M. J. DE; BENEDICTO, G. C. DE. Eficiência produtiva e riscos para propriedades leiteiras: uma revisão integrativa. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, n. 4, p. 1–20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.245277>
- BELTRÁN, R. D.; MARTÍNEZ-GÓMEZ, J. Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment. **Journal of Building Engineering**, v. 24, p. 100726, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.018>
- BERARDI, U.; SOUDIAN, S. Experimental investigation of latent heat thermal energy storage using PCMs with different melting temperatures for building retrofit. **Energy and Buildings**, v. 185, p. 180–195, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.016>
- BERTHOUS, Y.; BIWOLE, P. H.; ACHARD, P.; SALLÉE, H.; TANTOT-NEIRAC, M.; JAY, F. Full scale experimentation on a new translucent passive solar wall combining silica aerogels and phase change materials. **Solar Energy**, v. 115, p. 733–742, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.038>
- BHAMARE, D. K.; RATHOD, M. K.; BANERJEE, J. Numerical model for evaluating thermal performance of residential building roof integrated with inclined phase change material (PCM) layer. **Journal of Building Engineering**, v. 28, p. 101018, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101018>

BOUGUERRA, E. H.; RETIEL, N. Effect of the Switch Temperature on the Summer Performance of Phase Change Materials in Buildings. **Journal of Energy Engineering**, v. 141, n. 4, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1061/%28ASCE%29EY.1943-7897.0000243>

BRITO, A. **Contribuição da inércia térmica na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo. 2015.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/T.3.2016.tde-13062016-102613>

BRITO, A.; AKUTSU, M.; SALLES, E.; CASTRO, G. Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 125–145, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100128>

CHANG, S. J.; KANG, Y.; WI, S.; JEONG, S.G.; KIM, S. Hygrothermal performance improvement of the Korean wood frame walls using macro-packed phase change materials (MPPCM). **Applied Thermal Engineering**, v. 114, p. 457–465, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.188>

CHENG, L.; FENG, J. Form-stable phase change materials based on delignified wood flour for thermal management of buildings. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 129, p. 105690, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105690>

CHENG, T.; WANG, N.; WANG, H.; SUN, R.; WONG, C. P. A newly designed paraffin@VO<sub>2</sub> phase change material with the combination of high latent heat and large thermal conductivity. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 559, p. 226–235, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.10.033>

COSTA, J. A. C.; MARTINELLI, A. E.; NASCIMENTO, R. M.; MENDES, A. M. Microstructural design and thermal characterization of composite diatomite-vermiculite paraffin-based form-stable PCM for cementitious mortars. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117167, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117167>

CUI, Y.; XIE, J.; LIU, J.; PAN, S. Review of Phase Change Materials Integrated in Building Walls for Energy Saving. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 763–770, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.027>

CUNHA, S. R. L.; AGUIAR, J. L. B. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. **Journal of Energy Storage**, v. 27, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101083>

DE GRACIA, A.; NAVARRO, L.; CASTELL, A.; CABEZA, L. F. Energy performance of a ventilated double skin facade with PCM under different climates. **Energy & Buildings**, v. 91, p. 37–42, 2015b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.011>

DE GRACIA, A.; NAVARRO, L.; CASTELL, A.; RUIZ-PARDO, A.; ALVÁREZ, S.; CABEZA, L. F. Experimental study of a ventilated facade with PCM during winter period. **Energy and Buildings**, v. 58, p. 324–332, 2013a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.026>

DE GRACIA, A.; NAVARRO, L.; CASTELL, A.; RUIZ-PARDO, A.; ALVÁREZ, S.; CABEZA, L. F. Thermal analysis of a ventilated facade with PCM for cooling applications. **Energy and Buildings**, v. 65, p. 508–515, 2013b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.032>

DE GRACIA, A.; NAVARRO, L.; COMA, J.; SERRANO, S.; ROMANÍ, J.; PÉREZ, G.; CABEZA, L. F. Experimental set-up for testing active and passive systems for energy savings in buildings – Lessons learnt. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1014–1026, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.109>

DE GRACIA, A.; CASTELL, A.; FERNÁNDEZ, C.; CABEZA, L. F. A simple model to predict the thermal performance of a ventilated facade with phase change materials. **Energy & Buildings**, v. 93, p. 137–142, 2015a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.069>

DONG, L.; YUMENG, Z.; CHANGYU, L.; GUOZHONG, W. Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building. **Energy Conversion and Management**, v. 100, p. 147–156, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.014>

DURAKOVIC, B.; TORLAK, M.; SCIENCES, N. Experimental and numerical study of a PCM window model as a thermal energy storage unit. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 12, p. 272–280, 2017. DOI: <https://doi.org/doi:10.1093/ijlct/ctw024>

- FARAJ, K.; KHALED, M.; FARAJ, J.; HACHEM, F.; CASTELAIN, C. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109579, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109579>
- FERREIRA, A.; NÓVOA, P. R. O.; MARQUES, A. T. Multifunctional material systems: a state-of-the-art Review. **Composite Structures**, v. 151, p. 3-35, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.028>
- FRIGIONE, M.; LETTIERI, M.; SARCINELLA, A. Phase change materials for energy efficiency in buildings and their use in mortars. **Materials**, v. 12, p. 1260, 2019. DOI: <https://doi.org/doi:10.3390/ma12081260>
- GIOVANNINI, L.; GOIA, F.; LO VERSO, V.; SERRA, V. A Comparative Analysis of the Visual Comfort Performance between a PCM Glazing and a Conventional Selective Double Glazed Unit. **Sustainability**, v. 10, 2018. DOI: <https://doi.org/doi:10.3390/su10103579>
- GOIA, F.; ZINZI, M.; CARNIELO, E.; SERRA, V. Spectral and angular solar properties of a PCM-filled double glazing unit. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 302–312, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.019> 0378-7788
- GOIA, F.; BOCCALERI, E. Physical-chemical properties evolution and thermal properties reliability of a paraffin wax under solar radiation exposure in a real-scale PCM window system. **Energy and Buildings**, v. 119, p. 41–50, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2016.03.007>
- GOIA, F.; PERINO, M.; SERRA, V. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype. **Solar Energy**, v. 100, p. 217–233, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.002>
- GOUNNI, A.; EL ALAMI, M. The optimal allocation of the PCM within a composite wall for surface temperature and heat flux reduction: An experimental Approach. **Applied Thermal Engineering**, v. 127, p. 1488–1494, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.168>
- GRYNNING, S.; GOIA, F.; TIME, B. Dynamic thermal performance of a PCM window system: characterization using large scale measurements. **Energy Procedia**, v. 78, p. 85–90, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.119>
- GUARINO, F.; ATHIENITIS, A.; CELLURA, M.; BASTIEN, D. PCM thermal storage design in buildings: Experimental studies and applications to solarium in cold climates. **Applied Energy**, v. 185, p. 95–106, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.046>
- GUICHARD, S.; MIRANVILLE, F.; BIGOT, D.; MALET-DAMOUR, B.; BOYER, H. Experimental investigation on a complex roof incorporating phase-change material. **Energy & Buildings**, v. 108, p. 36–43, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2015.08.055>
- HASAN, M. I.; BASHER, H. O.; SHDHAN, A. O. Experimental investigation of phase change materials for insulation of residential buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 36, p. 42–58, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.009>
- HE, H.; ZHAO, P.; YUE, Q.; GAO, B.; YUE, D.; LI, Q. A novel polynary fatty acid/sludge ceramsite composite phase change materials and its applications in building energy conservation. **Renewable Energy**, v. 76, p. 45–52, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.001> 0960-1481
- HU, Y.; HEISELBERG, P. K. Energy & Buildings A new ventilated window with PCM heat exchanger — Performance analysis and design optimization. **Energy & Buildings**, v. 169, p. 185–194, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.060>
- HUANG, X.; ALVA, G.; JIA, Y.; FANG, G. Morphological characterization and applications of phase change materials in thermal energy storage: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 128–145, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.048>
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy technology perspectives 2020: Flagship report**. Disponível em < <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020> > Acesso em 02 de novembro de 2021.
- JANGELDINOV, B.; MEMON, S. A.; KIM, J.; KABDRAKHMANOVA, M. Evaluating the Energy Efficiency of PCM-Integrated Lightweight Steel-Framed Building in Eight Different Cities of Warm Summer Humid Continental Climate. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/4381495>

- JAYALATH, A.; AYE, L.; MENDIS, P.; NGO, T. Effects of phase change material roof layers on thermal performance of a residential building in Melbourne and Sydney. **Energy & Buildings**, v. 121, p. 152–158, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.007> 0378-7788
- JELLE, B. P.; KALNÆS, S. E. Chapter 3 - Phase Change Materials for Application in Energy-Efficient Buildings. In: PACHECO-TORGAL, F.; GRANQVIST, C. G.; JELLE, B. P.; VANOLI, G. P.; BIANCO, N.; KURNITSKI, J. **Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting: Materials, Technologies, Optimization and Case Studies**. Elsevier Inc, 2017. p. 57-118. ISBN 978-0-08-101128-7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-101128-7.00003-4>
- JIN, X.; MEDINA, M. A.; ZHANG, X. Numerical analysis for the optimal location of a thin PCM layer in frame walls. **Applied Thermal Engineering**, v. 103, p. 1057–1063, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.056> 1359-4311
- JIN, X.; SHI, D.; MEDINA, M. A.; SHI, X.; ZHOU, X.; ZHANG, X. Optimal location of PCM layer in building walls under Nanjing (China) weather conditions. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 129, n. 3, p. 1767–1778, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-017-6307-3>
- KAHWAJI, S.; JOHNSON, M. B.; KHEIRABADI, A. C.; GROULX, D.; WHITE, M. A. Stable, low-cost phase change material for building applications: The eutectic mixture of decanoic acid and tetradecanoic acid. **Applied Energy**, v. 168, p. 457–464, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.115> 0306-2619
- KAHWAJI, S.; WHITE, M. A. Prediction of the properties of eutectic fatty acid phase change materials. **Thermochimica Acta**, v. 660, p. 94–100, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.12.02>
- KALNÆS, S. E.; JELLE, B. P. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. **Energy and Buildings**, v. 94, p. 150–176, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2015.02.023>
- KENZHEKHANOV, S.; MEMON, S. A.; ADILKHANOVA, I. Quantitative evaluation of thermal performance and energy saving potential of the building integrated with PCM in a subarctic climate. **Energy**, v. 192, p. 116607, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116607>
- KHARBOUCH, Y.; OUHSAINE, L.; MIMET, A.; EL GANAOU, M. Thermal performance investigation of a PCM-enhanced wall/roof in northern Morocco. **Building Simulation**, v. 11, n. 6, p. 1083–1093, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0449-5>
- KIM, H. B.; MAE, M.; CHOI, Y.; KIYOTA, T. Experimental analysis of thermal performance in buildings with shape-stabilized phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 524–533, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.076> 0378-7788
- KOLÁČEK, M.; CHARVÁTOVÁ, H.; SEHNÁLEK, S. Experimental and Numerical Research of the Thermal Properties of a PCM Window Panel. **Sustainability**, v. 9, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/su9071222>
- KONSTANTINIDOU, C. A.; LANG, W.; PAPADOPOULOS, A. M. Multiobjective optimization of a building envelope with the use of phase change materials (PCMs) in Mediterranean climates. **International Journal of Energy Research**, v. 42, n. 9, p. 3030–3047, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3969>
- LAAOUATNI, A.; MARTAJ, N.; BENNACER, R.; LACHI, M.; EL OMARI, M.; EL GANAOU, M. Thermal building control using active ventilated block integrating phase change material. **Energy and Buildings**, v. 187, p. 50–63, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.024> 0378-7788
- LAGOU, A.; KYLILI, A.; ŠADAUSKIENĖ, J.; FOKAIDES, P. A. Numerical investigation of phase change materials (PCM) optimal melting properties and position in building elements under diverse conditions. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 452–464, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.199> 0950-0618
- LEE, K. O.; MEDINA, M. A.; RATH, E.; SUN, X. Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management. **Applied Energy**, v. 137, p. 699–706, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.003> 0306-2619
- LEE, K. O.; MEDINA, M. A.; SUN, X.; JIN, X. Thermal performance of phase change materials (PCM)-enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls. **Solar Energy**, v. 163, p. 113–121, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.086>
- LEE, K. O.; MEDINA, M. A.; SUN, X. On the use of plug-and-play walls (PPW) for evaluating thermal enhancement technologies for building enclosures: Evaluation of a thin phase change material (PCM)

- layer. **Energy and Buildings**, v. 86, p. 86–92, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.020>
- LEI, J.; KUMARASAMY, K.; ZINGRE, K. T.; YANG, J.; WAN, M. P.; YANG, E. H. Cool colored coating and phase change materials as complementary cooling strategies for building cooling load reduction in tropics. **Applied Energy**, v. 190, p. 57–63, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.114>
- LEI, J.; YANG, J.; YANG, E. H. Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore. **Applied Energy**, v. 162, p. 207–217, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.031>
- LI, D.; MA, T.; LIU, C.; ZHENG, Y.; WANG, Z.; LIU, X. Thermal performance of a PCM-filled double glazing unit with different optical properties of phase change material. **Energy & Buildings**, v. 119, p. 143–152, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.036>
- LI, D.; WU, Y.; ZHANG, G.; ARICI, M.; LIU, C.; Wang, F. Influence of glazed roof containing phase change material on indoor thermal environment and energy consumption. **Applied Energy**, v. 222, p. 343–350, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.015>
- LI, D.; WU, Y.; WANG, B.; LIU, C.; ARICI, M. Optical and thermal performance of glazing units containing PCM in buildings: A review. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117327, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117327>
- LI, D.; ZHANG, C.; LI, Q.; LIU, C.; ARICI, M.; WU, Y. Thermal performance evaluation of glass window combining silica aerogels and phase change materials for cold climate of China. **Applied Thermal Engineering**, v. 165, p. 114547, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114547>
- LI, Y.; WANG, Y.; MENG, X.; WANG, M.; LONG, E. Research on Indoor Thermal Environment Improvement of Lightweight Building Integrated with Phase Change Material under Different Climate Conditions. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 1628–1634, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.193>
- LI, Y.; DARKWA, J.; KOKOGIANNAKIS, G. Heat transfer analysis of an integrated double skin façade and phase change material blind system. **Building and Environment**, v. 125, p. 111–121, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.034>
- LI, Y.; LIU, S.; LU, J. Effects of various parameters of a PCM on thermal performance of a solar chimney. **Applied Thermal Engineering**, v. 127, p. 1119–1131, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.087>
- LIRA-OLIVER, A.; VILCHIS-MARTÍNEZ, S. Thermal Inertia Performance Evaluation of Light-Weighted Construction Space Envelopes Using Phase Change Materials in Mexico City's Climate. **Technologies**, v. 5, n. 4, p. 69, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies5040069>
- LIU, C.; ZHOU, Y.; LI, D.; MENG, F.; ZHENG, Y.; LIU, X. Numerical analysis on thermal performance of a PCM-filled double glazing roof. **Energy & Buildings**, v. 125, p. 267–275, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.002>
- LIU, C.; WU, Y.; LI, D.; MA, T.; LIU, X. Investigations on thermal and optical performances of a glazing roof with PCM layer. **International Journal of Energy Research**, v. 41, p. 2138–2148, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/er.3775>
- LIU, J.; LIU, Y.; YANG, L.; LIU, T.; ZHANG, C.; DONG, H. Climatic and seasonal suitability of phase change materials coupled with night ventilation for office buildings in Western China. **Renewable Energy**, v. 147, p. 356–373, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.069>
- LIU, S.; LI, Y. An experimental study on the thermal performance of a solar chimney without and with PCM. **Renewable Energy**, v. 81, p. 338–346, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2015.04.007>
- LU, S.; CHEN, Y.; LIU, S.; KONG, X. Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled with PCM and cool materials. **Energy & Buildings**, v. 127, p. 159–169, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.080>
- LUO, R.; WANG, S.; WANG, T.; ZHU, C.; NOMURA, T.; AKIYAMA, T. Fabrication of paraffin@SiO<sub>2</sub> shape-stabilized composite phase change material via chemical precipitation method for building energy conservation. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 373–380, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2015.09.043>

- MAHMUD, I. C.; LERNER, E. DA R.; GIERGOWICZ, F. B.; EMMANOUILIDIS, J.; SPENGLER, R. DE C. B.; SCHNEIDER, R. H. Tabagismo em idosos: uma revisão integrativa. **Scientia Medica** Porto Alegre, v. 31, n. 2, p. 1–15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15448/1980-6108.2021.1.41007>
- MARIN, P.; SAFFARI, M.; DE GRACIA, A.; ZHU, X.; FARID, M. M.; CABEZA, L. F.; Ushak, S. Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 274–283, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.007>
- MARANI, A.; NEHDI, M. L. Integrating phase change materials in construction materials: Critical review. **Construction and Building Materials**, v. 217, p. 36–49, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.064>
- MARKARIAN, E.; FAZELPOUR, F. Multi-objective optimization of energy performance of a building considering different configurations and types of PCM. **Solar Energy**, v. 191, p. 481–496, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.003>
- MATERA, N.; BEVILACQUA, P.; ARCURI, N.; OLIVETI, G.; MAZZEO, D.; ROMAGNONI, P. Optimal Design of PCM in Internal Walls for nZEB Buildings. **Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/ and CPS Europe 2018**, p. 1–6, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/eeeic.2018.8493892>
- MATHIS, D.; BLANCHET, P.; LAGIÈRE, P.; LANDRY, V. Performance of wood-based panels integrated with a bio-based phase change material: A full-scale experiment in a cold climate with timber-frame huts. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 1–15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113093>
- MAZZEO, D.; OLIVETI, G.; ARCURI, N. A method for thermal dimensioning and for energy behavior evaluation of a building envelope PCM layer by using the characteristic days. **Energies**, v. 10, n. 5, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10050659>
- MEHLING, H.; CABEZA, L. F. **Heat and Cold Storage With PCM: An up-to-Date Introduction**. 1. ed. [s.l.] Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. ISBN: 978-3-540-68557-9
- MEHRALI, M.; LATIBARI, S.; ROSEN, M. A.; AKHIANI, A. R.; NAGHAVI, M. S.; SADEGHINEZHAD, E.; METSELAAR, H.; NEJAD, M. MEHRALI, M. From rice husk to high performance shape stabilized phase change materials for thermal energy storage. **RSC Advances**, v. 6, n. 51, p. 45595–45604, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6RA03721F>
- MEMARIAN, S.; KARI, B. M.; FAYAZ, R.; ASADI, S. Single and combined phase change materials: Their effect on seasonal transition period. **Energy and Buildings**, v. 169, p. 453–472, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.085>
- MEMON, S. A. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 870–906, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.042>
- MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. C.; GALVÃO, C. M. Revisão Integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na enfermagem. **Texto e Contexto - Enfermagem**, v. 7, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-07072008000400018>
- MENG, E.; YU, H.; ZHOU, B. Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter. **Applied Thermal Engineering**, v. 126, p. 212–225, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.110>
- MI, X.; LIU, R.; CUI, H.; MEMON, S. A.; XING, F.; LO, Y. Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China. **Applied Energy**, v. 175, p. 324–336, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.110>
- MOHSENI, E.; TANG, W.; WANG, S. Development of thermal energy storage lightweight structural cementitious composites by means of macro-encapsulated PCM. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 182–195, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.136>
- MONGHASEMI, N.; VADIEE, A. A review of solar chimney integrated systems for space heating and cooling application. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2714–2730, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.078>

- MORADI, R.; KIANIFAR, A.; WONGWISES, S. Optimization of a solar air heater with phase change materials: Experimental and numerical study. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 89, p. 41–49, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.07.011>
- MUSTAPHA, A. N.; ONYEAKA, H.; OMOREGBE, O.; DING, Y.; LI, Y. Latent heat thermal energy storage: A bibliometric analysis explicating the paradigm from 2000–2019. **Journal of Energy Storage**, v. 33, p. 102026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102027>
- MUTHUVEL, S.; SARAVANASANKAR, S.; SUDHAKARAPANDIAN, R.; MUTHUKANNAN, M. Passive cooling by phase change material usage in construction. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 36, n. 4, p. 411–421, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0143624414556123>
- NATEPHRA, W.; MOTAMEDI, A.; YABUKI, N.; FUKUDA, T. Integrating 4D thermal information with BIM for building envelope thermal performance analysis and thermal comfort evaluation in naturally ventilated environments. **Building and Environment**, v. 124, p. 194–208, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.004>
- NGHANA, B.; TARIKU, F. Phase change material's (PCM) impacts on the energy performance and thermal comfort of buildings in a mild climate. **Building and Environment**, v. 99, p. 221–238, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.023>
- OLIVEIRA, R. B. DE; GONZALES, T. S.; MARQUES, M. T. Uso de PCM para edificações em região de clima quente: uma revisão sistemática. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 12, p. e021001, 2021. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v12i00.8658590>
- OROPEZA-PEREZ, I.; ØSTERGAARD, P. A. Active and passive cooling methods for dwellings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. September 2017, p. 531–544, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.059>
- OZDENEFE, M.; DEWSBURY, J. Thermal performance of a typical residential Cyprus building with phase change materials. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 37, n. 1, p. 85–102, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0143624415603004>
- PASUPATHY, A.; VELRAJ, R.; SEENIRAJ, R. V. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 1, p. 39–64, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.010>
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 2007. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- PONS, V.; STANESCU, G. Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 8, n. 2, p. 127, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v8i2.8650228>
- RAMAKRISHNAN, S.; SANJAYAN, J.; WANG, X. Experimental research on using form-stable PCM-integrated cementitious composite for reducing overheating in buildings. **Buildings**, v. 9, n. 3, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings9030057>
- RATHORE, P. K. S.; SHUKLA, S. K. Potential of macroencapsulated pcm for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 723–744, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.221>
- RATHORE, P. K. S.; SHUKLA, S. K. An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated PCM for energy savings. **Renewable Energy**, v. 149, p. 1300–1313, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.130>
- REDDY, K. S.; MUDGAL, V. Thermal Performance Analysis of Multi-Phase Change Material Layer-Integrated Building Roofs for Energy Efficiency in Built-Environment. **Energies**, v. 10, p. 1367, 2017. DOI: <https://doi.org/doi:10.3390/en10091367>
- RODRIGUEZ-UBINAS, E.; RUIZ-VALERO, L.; VEGA, S.; NEILA, J. Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 49–62, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12081260>
- SAFFARI, M.; DE GRACIA, A.; USHAK, S.; CABEZA, L. F. Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model. **Energy and Buildings**, v. 112, p. 159–172, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2015.12.006>

- SAFFARI, M.; DE GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, C.; CABEZA, L. F. Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings. **Applied Energy**, v. 202, p. 420–434, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.107>
- SAXENA, A.; VERMA, P.; SRIVASTAVA, G.; YADAV, N. Design and thermal performance evaluation of an air heater with low cost thermal energy storage. **Applied Thermal Engineering**, v. 167, p. 114768, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114768>
- SELKA, G.; KORTI, A. I. N.; ABBOUDI, S. Dynamic thermal behaviour of building using phase change materials for latent heat storage. **Thermal Science**, v. 19, n. 2, p. 603–613, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.2298/TSCI140311134S>
- SHARMA, A.; TYAGI, V. V.; CHEN, C. R.; BUDDHI, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 2, p. 318–345, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- SHARMA, V.; RAI, A. C. Performance assessment of residential building envelopes enhanced with phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 208, p. 109664, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109664>
- SILVA, T.; VICENTE, R.; RODRIGUES, F.; SAMAGAIO, A.; CARDOSO, C. Performance of a window shutter with phase change material under summer Mediterranean climate conditions. **Applied Thermal Engineering**, v. 84, p. 246–256, 2015a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.059>
- SILVA, T.; VICENTE, R.; RODRIGUES, F.; SAMAGAIO, A.; CARDOSO, C. Development of a window shutter with phase change materials: Full scale outdoor experimental approach. **Energy & Buildings**, v. 88, p. 110–121, 2015b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.053>
- SINKA, M.; BAJARE, D.; JAKOVICS, A.; RATNIEKS, J.; GENDELIS, S.; TIHANA, J. Experimental testing of phase change materials in a warm-summer humid continental climate. **Energy and Buildings**, v. 195, p. 205–215, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.030>
- SOLGI, E.; HAMEDANI, Z.; FERNANDO, R.; MOHAMMAD KARI, B.; SKATES, H. A parametric study of phase change material behaviour when used with night ventilation in different climatic zones. **Building and Environment**, v. 147, p. 327–336, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.031>
- SOUZA, M. T. DE; DIAS, M.; CARVALHO, R. DE. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein**, v. 8, p. 102–106, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1679-45082010rw1134>
- SONG, M.; NIU, F.; MAO, N.; HU, Y.; DENG, S. Review on building energy performance improvement using phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 776–793, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.066>
- SOVETOVA, M.; MEMON, S. A.; KIM, J. Thermal performance and energy efficiency of building integrated with PCMs in hot desert climate region. **Solar Energy**, v. 189, p. 357–371, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.067>
- SU, W.; DARKWA, J.; KOKOGIANNAKIS, G. Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 373–391, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.044>
- SUN, X.; ZHANG, Q.; MEDINA, M. A.; LEE, K. O.; LIAO, S. Parameter design for a phase change material board installed on the inner surface of building exterior envelopes for cooling in China. **Energy Conversion and Management**, v. 120, p. 100–108, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.096>
- THIELE, A. M.; JAMET, A.; SANT, G.; PILON, L. Annual energy analysis of concrete containing phase change materials for building envelopes. **Energy Conversion and Management**, v. 103, p. 374–386, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.068>
- THIELE, A. M.; SANT, G.; PILON, L. Diurnal thermal analysis of microencapsulated PCM-concrete composite walls. **Energy Conversion and Management**, v. 93, p. 215–227, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.078>
- TOKUÇ, A.; BASARAN, T.; YESÜGEY, C. An experimental and numerical investigation on the use of phase change materials in building elements: The case of a flat roof in Istanbul. **Energy & Buildings**, v. 102, p. 91–104, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.039>

- TORRACO, R. J. Writing Integrative Literature Reviews: Using the Past and Present to Explore the Future. **Human Resource Development Review**, v. 15, n. 4, p. 404–428, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1177/1534484316671606>
- ÜRGE-VORSATZ, D.; CABEZA, L. F.; SERRANO, S.; BARRENECHE, C.; PETRICHENKO, K. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 85–98, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039>
- VRACHOPOULOS, M. G.; KRAVVARITIS, E.; STAVLAS, D. G.; STAMATOPOULOS, V.; GONIDIS, A.; KOUKOU, M. K. Investigating the performance of a test phase change material chamber for passive solar applications: experimental and theoretical approach. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 34, n. 9, p. 614–627, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14786451.2013.853065>
- WAHID, M. A.; HOSSEINI, S. E.; HUSSEN, H. M.; AKEIBER, H. J.; Saud, S. N.; Mohammad, A. T. An overview of phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region. **Applied Thermal Engineering**, v. 112, p. 1240–1259, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.032>
- WANG, H.; LU, W.; WU, Z.; ZHANG, G. Parametric analysis of applying PCM wallboards for energy saving in high-rise lightweight buildings in Shanghai. **Renewable Energy**, v. 145, p. 52–64, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.124>
- WANG, S. M.; MATIAŠOVSKÝ, P.; MIHÁLKA, P.; LAI, C. M. Experimental investigation of the daily thermal performance of a mPCM honeycomb wallboard. **Energy and Buildings**, v. 159, p. 419–425, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.080>
- WEINGRILL, H. M.; RESCH-FAUSTER, K.; LUCYSHYN, T.; ZAUNER, C. conductive high-density polyethylene as novel phase-change material: Application-relevant long-term stability. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, n. 2, p. 1–10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.48269>
- WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: Updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546–553, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x>
- XU, B.; MA, H.; LU, Z.; LI, Z. Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cement-based composites. **Applied Energy**, v. 160, p. 358–367, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.069>
- YAO, C.; KONG, X.; LI, Y.; DU, Y.; QI, C. Numerical and experimental research of cold storage for a novel expanded perlite-based shape-stabilized phase change material wallboard used in building. **Energy Conversion and Management**, v. 155, p. 20–31, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.052>
- YU, J.; YANG, Q.; YE, H.; LUO, Y.; HUANG, J.; XU, X.; WANG, J. Thermal performance evaluation and optimal design of building roof with outer-layer shape-stabilized PCM. **Renewable Energy**, v. 145, p. 2538–2549, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.026>
- ZALBA, B.; MARIN, J. M.; CABEZA, L. F.; MEHLING, H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, p. 251–283, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
- ZHANG, Y. P.; LIN, K. P.; YANG, R.; DI, H. F.; JIANG, Y. Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 10, p. 1262–1269, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.02.009>
- ZHAO, M.; ZHANG, X.; KONG, X. Preparation and characterization of a novel composite phase change material with double phase change points based on nanocapsules. **Renewable Energy**, v. 147, p. 374–383, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.117>
- ZHONG, K.; LI, S.; SUN, G.; LI, S.; ZHANG, X. Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change material. **Energy & Buildings**, v. 106, p. 87–95, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2015.05.014>
- ZHOU, D.; EAMES, P. Phase Change Material Wallboard (PCMW) melting temperature optimisation for passive indoor temperature control. **Renewable Energy**, v. 139, p. 507–514, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.109>
- ZHOU, Q.; LIU, P. F.; TZENG, C. T.; LAI, C. M. Thermal performance of microencapsulated phase change material (mPCM) in roof modules during daily operation. **Energies**, v. 11, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11030679>

ZHU, N.; LIU, F.; LIU, P.; HU, P.; WU, M. Energy saving potential of a novel phase change material wallboard in typical climate regions of China. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 360–369, 2016a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.093>

ZHU, N.; LIU, P.; LIU, F.; HU, P.; WU, M. Energy performance of double shape-stabilized phase change materials wallboards in office building. **Applied Thermal Engineering**, v. 105, p. 180–188, 2016b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.128>

## CAPÍTULO 3: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA E PARÂMETROS DE INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE EM EDIFICAÇÕES DE ESCRITÓRIO EM CLIMAS BRASILEIROS

### RESUMO

Os Materiais de Mudança de Fase (PCMs) têm o potencial para promover, entre outros benefícios, o aumento das horas em conforto de usuários em edificações com baixa inércia térmica. Para que isso ocorra, é necessário analisar as propriedades do PCM, sua instalação e parâmetros climáticos. Logo, objetivo desse artigo é investigar a influência da incorporação de PCMs no conforto térmico de uma edificação de escritório, naturalmente ventilada, em três Zonas Bioclimáticas brasileiras. A análise foi realizada por simulação termoenergética com o EnergyPlus e considerou diferentes condições de contorno e de instalação do PCM. A incorporação do material proporcionou aumento entre 26% a 33% do conforto térmico em relação a edificação sem PCM, com melhores casos nas cidades das Zonas Bioclimáticas 1 e 4. As temperaturas de mudança de fase entre 21°C e 28°C, instalação do PCM na camada interna da parede e em climas com temperaturas médias externas próximas a 19°C e radiação de 4000 W/m<sup>2</sup>, foram os parâmetros de maior influência no aumento do conforto.

**Palavras Chave:** PCM; EnergyPlus; Inércia Térmica; Conforto térmico adaptativo; Escritório.

### ABSTRACT

Among other benefits, Phase Change Materials (PCMs) can potentially increase user comfort hours in buildings with low thermal inertia. For this, it is essential to analyze the PCM's intrinsic properties, installation aspects, and climatic variables. Therefore, this paper strives to investigate the influence of PCMs on thermal comfort for a naturally ventilated office building in three Brazilian Bioclimatic Zones. The study employed the EnergyPlus engine for thermal energy simulations with varying boundary conditions and PCM installation. The material incorporation increased thermal comfort by 26% to 33% compared to the base case with no PCM, with the best cases for the Brazilian Bioclimatic Zones 1 and 4. The parameters with the greatest influence on the adaptive thermal comfort increase were the phase change temperatures between 21°C and 28°C, inner wall construction layer installation, mean outdoor temperatures close to 19°C, and solar irradiance above 4000 W/m<sup>2</sup>.

**Keywords:** PCM; EnergyPlus; Thermal Inertia; Adaptive thermal comfort; Office.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Em situações em que se deseja aumentar a inércia térmica de ambientes que possuam restrições ao uso de materiais tradicionalmente associados à alta capacidade térmica, como tijolo, argila, concreto e rocha, tem-se como opção o uso dos Materiais de Mudança de Fase (em inglês *Phase Change Materials* - PCMs).

Os PCMs absorvem e liberam energia na forma de calor latente de acordo com a temperatura do ambiente ou das superfícies a partir de alterações do seu estado e propriedades físicas. Como comportamento ideal, os PCMs retêm energia conforme a temperatura do ar aumenta, o que resulta na mudança do seu estado físico sólido para líquido proporcionando efeito de resfriamento. Quando a temperatura do ar cai, o material libera a energia previamente armazenada, muda da fase líquida para a sólida e proporciona efeito de aquecimento ao ambiente. As mudanças de fase e parte significativa do armazenamento de energia ocorrem a uma temperatura superficial do material praticamente constante (RATHORE; SHUKLA, 2019).

Assim, a incorporação de PCMs em edificações tem potencial para promover atraso térmico e amortecimento da amplitude da temperatura do ar interno em relação à amplitude do ar externo, aumentar o conforto térmico de usuários e a eficiência energética de edificações (FRIGIONE et al., 2019; FARAJ et al., 2020). Além disso, se comparados aos materiais construtivos com alta capacidade térmica, os PCMs armazenam de 5 a 14 vezes mais energia por unidade de volume (WAHID et al., 2017; MENGJIE et al., 2018).

Porém, a incorporação irrestrita de PCMs em edificações não garante os benefícios mencionados. Para seu correto desempenho, é necessário avaliar suas propriedades físicas, químicas, econômicas e ambientais (CUNHA; AGUIAR, 2020; BAI et al., 2020). Também devem ser observadas as condições climáticas, a classificação do PCM, forma, local e características da sua incorporação nas edificações (OLIVEIRA; GONZALES; MARQUES, 2021).

Embora a maioria das publicações em PCMs investiguem a aplicação do material em climas subtropicais e frios, como em países na América do Norte, Europa, e leste da Ásia (OLIVEIRA; LUCARELLI; CARLO, 2022), algumas pesquisas demonstraram o potencial dos PCMs na redução do consumo energético e melhoria do conforto

térmico em climas quentes e parcialmente úmidos (OLIVEIRA; GONZALES; MARQUES, 2021), como grande parte do Brasil. Autores como Marin et al. (2016), Brito et al. (2017), Pons e Stanescu (2017) e Saffari et al. (2017) analisaram PCMs teóricos e disponíveis no mercado com simulações termoenergéticas e modelos matemáticos para os climas brasileiros.

Brito et al. (2017) e Pons e Stanescu (2017) indicaram melhorias do conforto dos usuários e redução do consumo energético para edificações nas Zonas Bioclimáticas Brasileiras (ZBs) mais frias, com ênfase para as ZB1 e ZB5. Nas ZBs mais quentes, os autores recomendaram aplicação ponderada de PCMs, pois a inércia térmica adicional pode piorar as condições de conforto (BRITO et al., 2017).

Marin et al. (2016), avaliaram a incorporação de PCMs em edificações para 25 cidades em todo o mundo, com destaque para Brasília, considerando a classificação climática de Köppen–Geiger. De forma semelhante, Saffari et al. (2017) avaliaram 57 cidades, incluindo Brasília, Fortaleza e Manaus. No caso de Marin et al. (2016), os autores concluíram que os benefícios da utilização de PCMs em climas tropicais foi insignificante, salvo Brasília, com redução de até 49% no consumo de energia para PCMs com temperatura de mudança de fase (TMF) de 25°C.

Saffari et al. (2017), destacaram a necessidade de avaliações individuais pois, embora Brasília (TMF otimizada do PCM de 25,66°C para resfriamento e 23,13°C para aquecimento, Aw) e Singapura (TMF otimizada do PCM de 25,50°C para resfriamento, Af) estejam no mesmo grupo climático (Grupo A – Equatorial), as duas cidades apresentaram economia de energia para resfriamento de 17% e 0,43% respectivamente. Ademais, Manaus (TMF otimizada do PCM de 26,00°C e Am) apresentou aumento no consumo de energia de 9% para resfriamento, enquanto em Fortaleza (TMF otimizada do PCM de 24,13°C e As) atingiu economia de 0,23%, considerada pelos autores como limitada.

As pesquisas que investigaram a utilização de PCMs para os climas brasileiros indicam tendência de melhor desempenho para regiões mais frias. Entretanto, foi encontrado um número reduzido de trabalhos na literatura nacional e internacional acerca do tema (OLIVEIRA; LUCARELLI; CARLO, 2022). As publicações encontradas avaliaram poucas variações construtivas, apresentaram condições de ventilação natural limitadas e poucas opções/variações na forma de incorporação do material.

Portanto, este artigo tem como **objetivo** investigar a influência da incorporação de PCMs no conforto térmico de usuários em escritórios para diferentes condições de contorno, ventilação e de instalação do PCM em fechamentos verticais leves.

## 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.2.1 Simulação Termoenergética

Foi adotado como programa de simulação o EnergyPlus 9.3.0, que é a ferramenta mais difundida para investigação dos efeitos passivos de PCMs em edificações (SAFFARI et al., 2017). O programa já foi utilizado em pesquisas sobre a influência do material em diversos climas no mundo (WANG et al., 2020; JANGELDINOV et al., 2020; YE et al., 2022; HLANZE et al., 2022) e em climas brasileiros (MARIN et al., 2016; BRITO et al., 2017; SAFFARI et al., 2017).

Para a simulação de PCMs, o EnergyPlus utiliza como método de cálculo as diferenças finitas (CondFD) que considera a relação entre condutividade térmica e temperaturas em regime transiente de trocas de calor (ENERGYPLUS, 2020). O cálculo das diferenças finitas discretiza os fechamentos do edifício, como paredes, pisos e tetos, em vários nós e os resolve numericamente por equações de transferência de calor. Para simular a mudança de calor específico pela troca de fase, o método CondFD é acoplado a uma função entalpia-temperatura. Em seguida, as entalpias em cada nó são atualizadas para cada interação e utilizadas para calcular o calor específico equivalente a cada passo de tempo (MARIN et al., 2016; ENERGYPLUS, 2020).

Tabares-Velasco, Christensen e Bianchi (2012) verificaram e validaram o algoritmo utilizado pelo EnergyPlus para a simulação de PCMs a partir de uma abordagem semelhante à ASHRAE140 (ASHRAE, 2017). Autores como Ahangari e Maerefat (2019), Baniassadi, Sailor e Bryan (2019), Beltrán e Martínez-Gómez (2019), Markarian e Fazelpour (2019), Sovetova, Memon e Kim (2019), Sharma e Rai (2020) e Wang et al. (2020) utilizaram o EnergyPlus como único procedimento metodológico e citaram a qualidade do programa embasados em publicações dedicadas à calibração e validação de simulações com PCMs. As publicações referenciadas compararam resultados obtidos com EnergyPlus à medições *in loco*, simulações termoenergéticas em outros programas, simulações com dinâmica de fluidos

(*Computational Fluid Dynamics* - CFD) e modelos matemáticos, classificando o processo simulacional como calibrado e validado.

### 3.2.2 Geometria e materiais

O modelo teórico do edifício que representa o caso base (CB) foi baseado em Oliveira e Carlo (2021) e possui área de piso  $49,7\text{m}^2$ , pé-direito de  $2,90\text{m}$  e janelas com área de  $10,3\text{m}^2$  (50,3% da área da fachada). O modelo foi simulado para as quatro orientações (norte, sul, leste e oeste) e o ambiente de interesse não possui contato com o solo ou com a cobertura, com zonas adjacentes de mesmas dimensões e características (Figura 4 a e b).

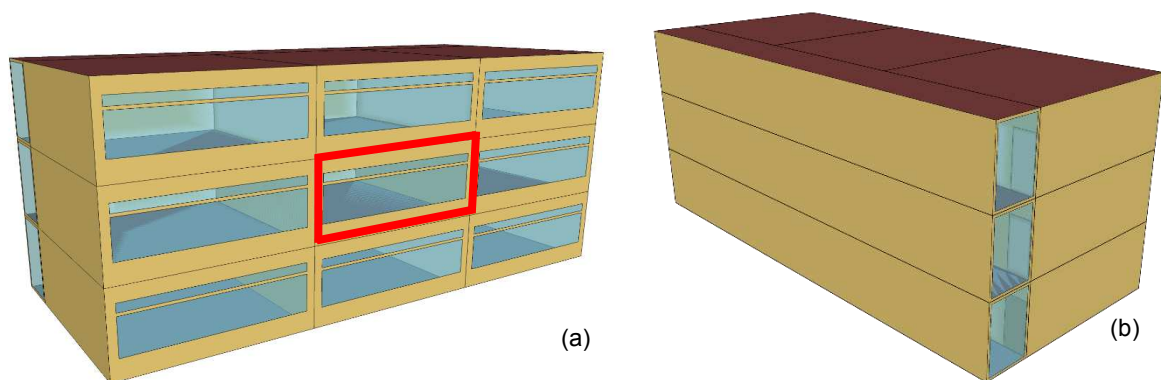


Figura 4 (a) Edificação simulada com ambiente analisado destacado em vermelho, fachada frontal; (b) Edificação simulada, fachada posterior  
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

As paredes são de *Drywall*, compostas por placa cimentícia, lã de rocha e gesso. O objetivo foi criar um ambiente com baixa capacidade térmica, conforme recomendado por Marin et al. (2016), Brito et al. (2017) e Solgi et al. (2019) para uso de PCMs. Paredes leves também contribuíram para analisar a influência da inércia térmica causada apenas pelos PCMs, reduzindo a influência dos demais componentes construtivos. As propriedades do CB estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 Parâmetros adotados na simulação

Densidade de Carga Interna de Iluminação e Equipamentos ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	28,62
Transmitância Térmica das Paredes ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )	0,45
Capacidade Térmica das Paredes ( $\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$ )	33
Transmitância Térmica do Teto/Piso ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )	3,73
Capacidade Térmica do Teto/Piso ( $\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$ )	220
Percentual de abertura em relação à fachada (%)	50,3
Fator Solar do Vidro	0,80
Absortância das Paredes ( $\alpha$ )	0,50

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

### 3.2.3 Condições de ventilação

O uso da ventilação natural em edificações com PCM segue as recomendações de Guarino et al. (2017), Konstantinidou, Lang e Papadopoulos (2018) e Laaouatni et al. (2019) em especial o uso da ventilação natural noturna (BERARDI; SOUDIAN, 2019; LIU et al., 2020; BAI et al., 2020).

Como visto na Figura 4 (a), os ambientes possuem uma abertura externa composta por duas esquadrias na mesma zona. A abertura inferior foi configurada como uma esquadria de correr e a superior, uma veneziana. A esquadria inferior possui 8,40m<sup>2</sup>, com 45% de abertura para ventilação e a superior 1,93m<sup>2</sup>, com 90% de abertura para ventilação.

Foram avaliadas quatro condições de ventilação natural. As condições de ventilação estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8 Condições de Ventilação

	Temperatura de abertura	Temperatura de fechamento	Abertura da parte Inferior	Abertura da parte Superior
Condição 1	20°C	26°C	De acordo com a temperatura 24h	Fechada
Condição 2	20°C	26°C	De acordo com a temperatura 24h	Aberta entre às 19h e 7h
Condição 3	24°C	28°C	De acordo com a temperatura 24h	Fechada
Condição 4	20°C	26°C	De acordo com a temperatura para 8h às 18h	Aberta entre às 19h e 7h

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Na primeira condição, a abertura e fechamento das esquadrias inferiores ocorreram de forma seletiva baseado nas temperaturas do ar externo. A esquadria inferior abriu ao atingir 20°C de temperatura do ar externo e se fechou gradativamente com o aumento da temperatura, com fechamento total a 26°C. Nessa condição, a esquadria superior permaneceu fechada durante todo o período (Tabela 8).

Na segunda condição de ventilação, a esquadria inferior seguiu o mesmo padrão de abertura, porém, a esquadria superior permaneceu constantemente aberta entre às 19h e 7h (Tabela 8).

Com objetivo de reduzir o número de casos simulados, a terceira e quarta opções de ventilação foram testadas apenas para os casos com maior percentual/porcentagem de horas em conforto (PHC). Na terceira opção houve uma mudança na temperatura de início da abertura da janela de 20° para 24°C, mantendo o padrão descrito de

ventilação seletiva. Na quarta opção, apenas as esquadrias superiores foram abertas durante a noite, mantendo o fechamento total das esquadrias inferiores nesse mesmo período. Para essa opção, durante o dia a ventilação seletiva funcionou normalmente e com o padrão já descrito de abertura iniciando a 20°C (Tabela 8).

### 3.2.4 PCMs

Os PCMs selecionados foram fabricados pela empresa alemã *Rubitherm® Technologies GmbH* (RUBITHERM, 2022) e utilizados também por Mazzeo, Oliveti e Arcuri (2017), Lira-Oliver e Vilchis-Martínez (2017), Meng, Yu e Zhou (2017), Lee et al. (2018) e Sharma e Rai (2020). Os autores consideraram os resultados satisfatórios, com aumento do PHC e da eficiência energética das edificações estudadas.

Para esse trabalho, foram escolhidos PCMs orgânicos da linha RT, RT21HC, RT22HC, RT25HC, RT28HC, RT35HC e RT44HC. Dentro da linha RT, foram selecionados PCMs identificados como HC por possuírem maior capacidade de armazenamento de calor latente e TMF mais estável (RUBITHERM, 2022). As propriedades dos PCMs selecionados estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 Propriedades dos PCMs

Nome do PCM	Intervalo de fusão e pico de temperatura (°C)	Intervalo de solidificação e pico de temperatura (°C)	Capacidade de armazenamento de calor (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg·K)	Condutividade térmica em ambas as fases (W/(m·K))	Densidade no estado sólido (kg/l)	Densidade no estado líquido (kg/l)
RT21HC	20/23 e 21	21/19 e 21	190	2	0,2	0,88	0,77
RT22HC	20/23 e 22	23/20 e 22	190	2	0,2	0,76	0,70
RT25HC	22/26 e 25	26/22 e 25	210	2	0,2	0,88	0,77
RT28HC	27/29 e 28	29/27 e 27	250	2	0,2	0,88	0,77
RT35HC	34/36 e 35	36/34 e 35	240	2	0,2	0,88	0,77
RT44HC	41/44 e 43	44/40 e 43	250	2	0,2	0,80	0,70

Fonte: Adaptado de RUBITHERM (2023).

Para inserção das características específicas do PCM no EnergyPlus, foi adotado o método de histerese do material conforme apresentado, discutido e recomendado por Al-Janabi e Kavgic (2019).

A escolha dos PCMs se baseou na semelhança entre os materiais disponibilizados e as TMF indicadas por Brito et al. (2017) e Saffari et al. (2017). Entretanto, por ser um material existente e com propriedades específicas, não foi possível ajustar todos os parâmetros recomendados pelos autores, que adotaram PCMs teóricos. Como

exemplo, não foi possível utilizar as recomendações de Brito et al. (2017), de capacidade de armazenamento de calor latente superior a 315 kJ/m<sup>2</sup>.

### 3.2.5 Cidades e climas avaliados

Foram selecionadas cinco cidades brasileiras para as simulações. Os critérios de seleção advêm de resultados obtidos em pesquisas correlatas (BRITO, et al., 2017; PONS; STANESCU, 2017) e do objetivo de analisar ZBs contrastantes: temperaturas medianas anuais predominantemente frias (ZB1), intermediárias (ZB4) e predominantemente quentes (ZB8), para a realidade brasileira.

Foram escolhidas duas cidades na ZB1, Campos do Jordão/SP e Bento Gonçalves/RS; uma cidade na ZB4, Brasília/DF; e duas cidades na ZB8, Rio de Janeiro/RJ e Belém/PA (ABNT, 2005) (Tabela 10). Nas zonas com duas cidades, foram consideradas latitudes as mais diferentes possível, uma vez que a incidência de radiação solar é uma das variáveis climáticas de relevância para o correto funcionamento dos PCMs (SAFFARI et al., 2017; KIM et al., 2017).

Tabela 10 Características das cidades analisadas

Cidade (Unidade Federativa)	ZB	Latitude	Temperatura média anual (°C)	Radiação direta normal - Média anual (Wh/m <sup>2</sup> dia)	Umidade relativa média anual (%)	Velocidade média do vento (m/s)
Campos do Jordão (SP)	1	22° 74' S	15,3	3750	85,2	2.84
Bento Gonçalves (RS)		29° 17' S	17,1	4250	76,3	2.05
Brasília (DF)	4	15° 47' S	21,4	4750	65,8	2.46
Rio de Janeiro (RJ)	8	22° 54' S	23,6	4500	78,8	0.99
Belém (PA)		01° 27' S	27,1	3250	84,9	1.37

Fonte: Adaptado de ABNT (2005), INMET (2021) e Pereira et al. (2017).

A escolha das cinco cidades pretende analisar as condições de contorno, de ventilação e de instalação dos PCMs frente a diferentes condições climáticas. As cidades de Campos do Jordão, Bento Gonçalves e Brasília foram escolhidas para verificar a tendência de melhor desempenho dos PCMs no agrupamento de climas mais frios identificado por Brito et al. (2017). Brasília foi escolhida como única cidade da ZB4 por apresentar resultados positivos nas pesquisas de Marin et al. (2016) e Saffari et al. (2017) e por apresentar condições climáticas intermediárias entre a ZB1 e ZB8.

Foram escolhidas duas cidades da ZB8 para investigar os resultados já apresentados em estudos anteriores (BRITO et al., 2017; SAFFARI et al., 2017). Além disso, a ZB8

ocupa 57,8% do território brasileiro e abrange diversas latitudes. Essa variação de latitudes não foi um parâmetro explorado concomitantemente nas pesquisas que investigaram PCMs para o Brasil. A maior parte delas focadas em cidades da ZB8 próximas ao equador, cuja altura solar é elevada nas fachadas norte e sul.

### 3.2.6 Instalação do PCM

Não foi encontrado um consenso na bibliografia para o melhor posicionamento do PCM em sistemas construtivos (KISHORE et al., 2020) e melhor espessura. Como exemplo, Jin et al. (2017), Kharbouch et al. (2018) e Kishore et al. (2021), obtiveram melhores resultados com PCMs próximos ao ambiente interno, enquanto Jin, Medina e Zhang (2016) obtiveram melhores resultados quando próximos ao ambiente externo.

Em relação a espessura, Arici et al. (2020), Al-Yasiri e Szabó (2021), Kishore et al. (2021) e Imghoure et al. (2021) avaliaram PCMs com espessuras próximas a 2cm. Entretanto, Brito et al. (2017) recomendaram uma maior capacidade de armazenamento de calor e, conseqüentemente, maiores espessuras de PCMs.

Logo, foram avaliadas três condições distintas de posicionamento do PCM: instalação do material na camada mais próxima ao ambiente interno; instalação em camada intermediária; e instalação na camada mais próxima ao ambiente externo (Figura 5) e duas espessuras do material: 3cm (valor próximo ao adotado pela literatura internacional); e 6cm, (para avaliar a influência de uma maior camada de PCM, conforme recomendação da literatura nacional).

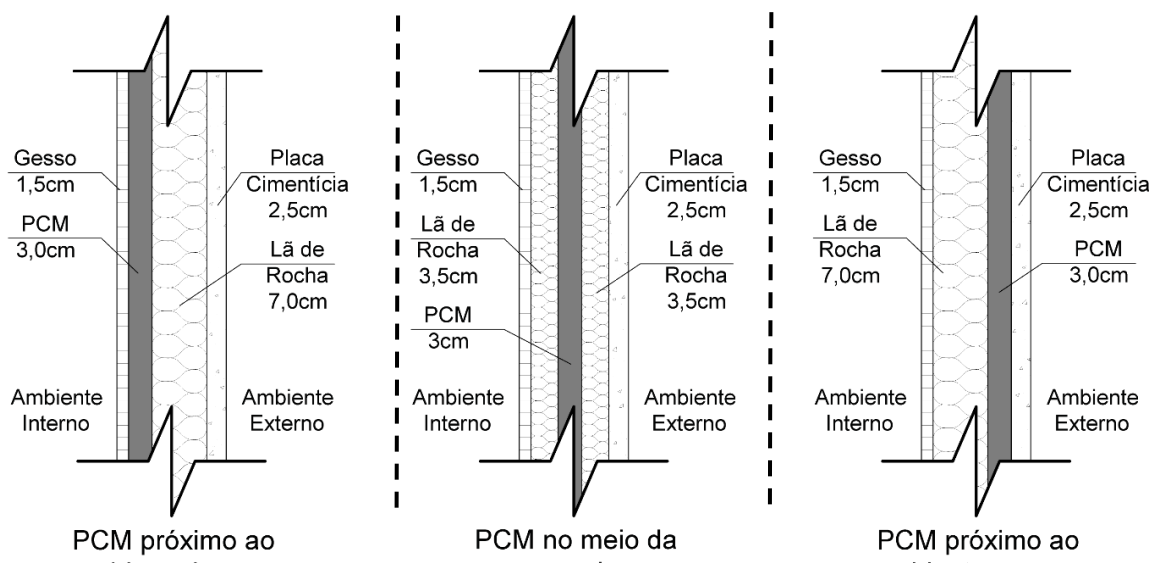


Figura 5 Seção esquemática das paredes, com camada de PCM, nesse exemplo com 3cm

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

### 3.2.7 Dados de saída e análise dos resultados

As simulações foram executadas para as 8760 horas do ano. Foram solicitados como dados de saída a temperatura externa e interna do ar, a temperatura operativa interna e fluxo do ar, variáveis necessárias para determinar a PHC de acordo com a ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020). Embora simulado para as 24h do dia, os índices de conforto térmico adaptativo foram avaliados apenas das 8h às 18h, horário compatível com a maioria das atividades de escritório. A combinação dos parâmetros discutidos ao longo dos materiais e métodos resultou em 1440 casos simulados com PCM e 20 CBs sem PCM.

### 3.3 RESULTADOS

A Tabela 11 apresenta o aumento ou decréscimo de horas em conforto, obtidas pela subtração da porcentagem de horas em conforto (PHC) nos casos simulados pela PHC dos casos base (CBs). Portanto, valores positivos representam aumento do conforto devido ao uso de PCMs, enquanto porcentagens negativas representam redução.

Na Tabela 11, os resultados positivos estão em escala de verde. Quando maior o aumento do conforto, mais escuro o verde. De forma semelhante, os resultados negativos estão em escala de vermelho. Quanto maior a redução no conforto, mais escuro o vermelho. Os casos com valores de 0% em vermelho ou em verde ocorrem devido à redução do número de casas decimais.

Tabela 11 Resultados obtidos a partir da simulação

		BG				CJ				BR				RJ				BE				
		E3		E6		E3		E6		E3		E6		E3		E6		E3		E6		
		VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	
21	N	IN	21%	20%	21%	21%	31%	30%	31%	30%	33%	31%	33%	31%	17%	14%	17%	16%	-3%	-4%	-2%	-3%
		ME	7%	6%	7%	6%	7%	3%	7%	3%	9%	8%	9%	8%	5%	3%	4%	3%	-3%	-4%	-2%	-3%
		EX	4%	3%	4%	3%	3%	0%	3%	0%	5%	4%	6%	4%	2%	1%	3%	2%	0%	-2%	0%	-1%
	S	IN	16%	15%	16%	16%	18%	18%	18%	19%	22%	23%	23%	23%	14%	13%	14%	13%	-3%	-2%	-2%	-3%
		ME	5%	6%	7%	7%	7%	5%	7%	5%	9%	8%	9%	8%	4%	4%	4%	3%	-2%	-2%	-2%	-3%
		EX	4%	4%	4%	5%	4%	2%	4%	2%	5%	4%	5%	5%	2%	2%	3%	3%	-3%	-3%	-1%	-1%
	L	IN	20%	19%	21%	20%	29%	29%	30%	29%	26%	24%	26%	25%	16%	14%	16%	15%	-1%	-1%	-1%	-2%
		ME	7%	6%	7%	7%	7%	4%	8%	4%	8%	7%	8%	7%	4%	4%	4%	4%	-1%	-1%	-1%	-2%
		EX	3%	3%	4%	4%	4%	0%	4%	0%	5%	4%	6%	5%	3%	2%	3%	2%	0%	-2%	0%	-1%
	O	IN	17%	16%	18%	17%	21%	21%	21%	21%	26%	24%	26%	25%	14%	13%	15%	14%	-3%	-4%	-2%	-3%

22	N	ME	7%	6%	7%	7%	6%	4%	6%	4%	9%	8%	8%	7%	4%	3%	4%	3%	-2%	-2%	-2%	-3%
		EX	3%	5%	4%	5%	3%	1%	4%	1%	5%	4%	6%	5%	3%	2%	3%	3%	0%	0%	-1%	-1%
	S	IN	13%	13%	15%	13%	21%	15%	21%	14%	13%	9%	13%	10%	6%	5%	7%	5%	-1%	-3%	-2%	-3%
		ME	5%	4%	5%	4%	4%	-1%	4%	-1%	4%	2%	3%	2%	2%	1%	1%	1%	-1%	-2%	-2%	-3%
	L	EX	3%	2%	3%	2%	2%	-1%	2%	-2%	3%	1%	3%	1%	0%	0%	1%	0%	-2%	-2%	0%	-1%
		IN	12%	11%	12%	11%	14%	12%	14%	12%	12%	9%	12%	10%	7%	6%	7%	6%	-1%	-4%	-2%	-3%
	O	ME	5%	5%	5%	5%	4%	2%	4%	2%	4%	4%	4%	3%	2%	1%	2%	1%	-1%	-2%	-2%	-3%
		EX	2%	4%	3%	4%	3%	1%	3%	1%	3%	2%	3%	2%	2%	1%	2%	1%	-2%	-2%	0%	-1%
	N	IN	13%	12%	13%	12%	17%	13%	17%	11%	11%	9%	11%	9%	7%	5%	7%	5%	0%	-1%	-1%	-2%
		ME	5%	4%	5%	4%	4%	0%	4%	0%	3%	2%	4%	2%	2%	1%	2%	1%	-1%	-1%	-1%	-2%
	S	EX	2%	2%	2%	2%	2%	-1%	2%	-1%	3%	1%	3%	1%	2%	1%	2%	1%	0%	0%	0%	-1%
		IN	10%	10%	12%	11%	14%	10%	13%	10%	12%	9%	13%	9%	7%	6%	7%	6%	-3%	-4%	-2%	-3%
L	ME	5%	5%	5%	5%	4%	1%	4%	1%	4%	2%	3%	3%	2%	2%	2%	1%	-1%	-2%	-2%	-3%	
	EX	3%	3%	3%	4%	3%	0%	3%	0%	3%	1%	3%	1%	2%	1%	2%	1%	0%	-2%	-1%	-1%	
25	N	IN	15%	14%	16%	14%	22%	16%	22%	16%	18%	14%	18%	14%	10%	8%	10%	8%	-2%	-2%	-1%	-2%
		ME	4%	3%	4%	3%	4%	-1%	3%	-1%	3%	1%	3%	1%	2%	0%	2%	1%	-3%	-3%	-2%	-2%
	S	EX	2%	2%	2%	1%	2%	-2%	2%	-2%	1%	0%	2%	0%	1%	-1%	1%	0%	-2%	-5%	-1%	-1%
		IN	12%	13%	13%	13%	16%	14%	16%	14%	17%	16%	18%	17%	11%	10%	12%	11%	-2%	-4%	-2%	-3%
	L	ME	4%	5%	5%	5%	4%	2%	4%	2%	3%	2%	4%	3%	3%	2%	3%	2%	-2%	-2%	-2%	-2%
		EX	2%	3%	2%	4%	3%	0%	3%	2%	2%	1%	2%	1%	2%	1%	2%	1%	0%	-3%	-2%	-2%
	O	IN	13%	12%	13%	13%	15%	14%	15%	14%	16%	14%	16%	14%	10%	9%	10%	9%	-3%	-3%	-1%	-2%
		ME	3%	2%	4%	2%	3%	-1%	3%	-1%	3%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	-1%	-2%	-1%	-2%
	N	EX	1%	2%	2%	2%	2%	-2%	2%	-2%	2%	1%	2%	1%	2%	1%	1%	0%	-2%	-3%	0%	-1%
		IN	12%	12%	13%	12%	15%	12%	15%	12%	16%	14%	17%	14%	10%	10%	11%	9%	-4%	-4%	-2%	-3%
	S	ME	4%	5%	4%	5%	4%	1%	4%	1%	2%	0%	3%	1%	2%	1%	2%	1%	-1%	-2%	-2%	-2%
		EX	2%	3%	3%	3%	2%	0%	2%	0%	2%	-1%	2%	0%	1%	0%	1%	1%	-1%	-2%	-1%	-2%
28	N	IN	12%	12%	13%	13%	16%	12%	17%	12%	17%	17%	19%	17%	14%	12%	15%	13%	-2%	-3%	0%	-1%
		ME	4%	4%	4%	4%	4%	0%	4%	0%	6%	4%	5%	4%	3%	3%	4%	3%	3%	3%	3%	3%
	S	EX	2%	2%	3%	3%	3%	0%	4%	0%	4%	2%	4%	3%	1%	0%	2%	1%	-2%	-3%	-2%	-5%
		IN	8%	10%	9%	10%	11%	9%	12%	10%	16%	16%	16%	16%	16%	15%	16%	15%	-8%	-7%	-6%	-7%
	L	ME	3%	5%	5%	5%	4%	2%	4%	2%	6%	4%	5%	4%	5%	4%	5%	4%	3%	2%	3%	3%
		EX	2%	3%	3%	4%	3%	1%	3%	2%	4%	2%	4%	2%	2%	0%	2%	1%	-4%	-3%	-2%	-3%
	O	IN	11%	11%	12%	12%	15%	12%	15%	11%	17%	16%	17%	16%	10%	9%	11%	10%	-4%	-4%	-3%	-4%
		ME	4%	4%	4%	4%	5%	0%	4%	1%	4%	3%	5%	4%	3%	3%	4%	4%	2%	1%	2%	2%
	N	EX	2%	2%	2%	3%	4%	0%	4%	0%	3%	2%	4%	3%	1%	0%	2%	1%	-1%	-2%	-2%	-2%
		IN	9%	10%	10%	11%	11%	9%	11%	9%	17%	16%	18%	16%	11%	9%	11%	10%	-2%	-5%	-3%	-4%
	S	ME	4%	4%	4%	5%	4%	2%	4%	2%	5%	5%	5%	4%	4%	4%	4%	4%	3%	2%	4%	4%
		EX	2%	3%	3%	4%	3%	1%	3%	1%	4%	3%	5%	3%	1%	2%	2%	1%	-5%	-6%	-3%	-4%
35	N	IN	10%	9%	10%	9%	14%	9%	15%	9%	12%	9%	13%	10%	6%	4%	6%	5%	0%	-1%	-2%	-4%
		ME	4%	3%	4%	3%	4%	0%	4%	0%	4%	2%	3%	2%	2%	1%	1%	0%	-1%	-2%	-2%	-3%
	S	EX	3%	2%	3%	2%	2%	-1%	3%	-1%	2%	0%	3%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	-1%	-1%	-1%
		IN	7%	8%	7%	8%	9%	7%	11%	8%	11%	9%	12%	10%	6%	5%	7%	5%	-1%	-2%	-3%	-4%
O	ME	3%	4%	3%	4%	4%	2%	4%	2%	4%	3%	4%	3%	2%	1%	2%	1%	-2%	-2%	-2%	-3%	

44	L	EX	1%	2%	2%	3%	2%	0%	3%	1%	2%	1%	3%	2%	1%	0%	2%	1%	0%	-1%	-1%	-2%
		IN	8%	8%	9%	8%	12%	8%	13%	8%	10%	8%	11%	9%	6%	4%	6%	4%	0%	-1%	-2%	-3%
		ME	3%	3%	3%	3%	4%	0%	4%	0%	4%	2%	3%	2%	2%	1%	2%	1%	-1%	-1%	-2%	-2%
	O	EX	2%	1%	2%	2%	2%	-1%	3%	0%	2%	0%	3%	1%	1%	0%	1%	1%	0%	-1%	-1%	-1%
		IN	7%	7%	8%	7%	9%	7%	10%	7%	11%	9%	12%	9%	6%	5%	6%	4%	-1%	-2%	-3%	-4%
		ME	4%	4%	4%	4%	4%	2%	4%	1%	4%	2%	4%	2%	2%	1%	2%	1%	-2%	-2%	-2%	-3%
	N	EX	2%	3%	3%	3%	2%	0%	3%	1%	2%	0%	3%	1%	1%	0%	2%	1%	0%	-1%	-1%	-2%
		IN	10%	9%	10%	9%	13%	8%	15%	9%	11%	9%	13%	10%	6%	4%	6%	5%	0%	-1%	-2%	-3%
		ME	3%	2%	4%	3%	4%	0%	4%	0%	4%	2%	3%	2%	2%	1%	1%	0%	-1%	-2%	-2%	-3%
	S	EX	1%	1%	3%	2%	2%	-1%	3%	-1%	2%	0%	3%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	-1%	-1%	-1%
		IN	7%	7%	7%	8%	9%	7%	10%	8%	11%	8%	11%	9%	6%	5%	7%	5%	0%	-1%	-2%	-3%
		ME	3%	4%	3%	4%	4%	2%	4%	2%	4%	3%	4%	3%	2%	1%	2%	1%	-2%	-2%	-2%	-3%
L	EX	1%	2%	2%	3%	2%	0%	3%	1%	2%	1%	3%	2%	1%	0%	2%	1%	0%	-3%	-1%	-2%	
	IN	9%	8%	8%	8%	12%	8%	13%	8%	10%	7%	11%	9%	6%	4%	6%	4%	0%	-1%	-2%	-2%	
	ME	2%	3%	3%	3%	5%	1%	4%	0%	4%	2%	3%	2%	2%	1%	2%	1%	-1%	-1%	-1%	-2%	
O	EX	1%	1%	2%	2%	2%	-1%	3%	0%	1%	0%	3%	1%	1%	0%	1%	1%	0%	0%	-1%	-1%	
	IN	8%	7%	8%	7%	9%	7%	10%	7%	11%	8%	12%	9%	6%	4%	6%	4%	0%	-2%	-3%	-3%	
	ME	4%	2%	4%	4%	4%	2%	4%	1%	4%	2%	4%	2%	2%	1%	2%	1%	-1%	-2%	-2%	-3%	
	EX	1%	2%	3%	3%	2%	0%	3%	1%	2%	0%	3%	1%	1%	0%	2%	1%	0%	-1%	-1%	-2%	

Legenda: Relação entre cores e intervalo de conforto

-9,0% a -6,0%	-5,9% a -3,0%	-2,9% a 0,0%	0,1% a 6,0%	6,1% a 12,0%	12,1% a 18,0%	18,1% a 24,0%	24,1% a 30,0%	30,1% a 33,0%
---------------	---------------	--------------	-------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------

**PCMs:** RT21HC (21), RT22HC (22), RT25HC (25), RT28HC (28), RT35HC (35) e RT44HC (44); **Cidades:** Campos do Jordão (CJ), Bento Gonçalves (BG), Brasília (BR), Rio de Janeiro (RJ) e Belém (BE); **PCM nas paredes:** interno (IN), meio (ME) e externo (EX); **Espessuras:** 3cm (3) e 6cm (6); **Orientações solares:** norte (N), sul (S), leste (L) e oeste (O); **Condições de ventilação:** ventilação seletiva (VS) e ventilação seletiva combinada com ventilação noturna constante (VSN).

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

### 3.3.1 Tipos de PCMs em relação as Zonas Bioclimáticas

A Figura 6 mostra que a incorporação dos PCM testados apresentou condições de conforto melhores do que no CB para a ZB1. O PCM 21 apresentou os maiores aumentos no PHC. Para os melhores casos, o uso desse PCM elevou o PHC a até 19%. Em seguida, os PCMs 22 e 25 apresentaram a segunda e terceira PHC máximas obtidas, respectivamente. Entretanto, se observados os PHCs entre os quartis e os mínimos, não houve diferenças desses PCMs em relação aos demais.

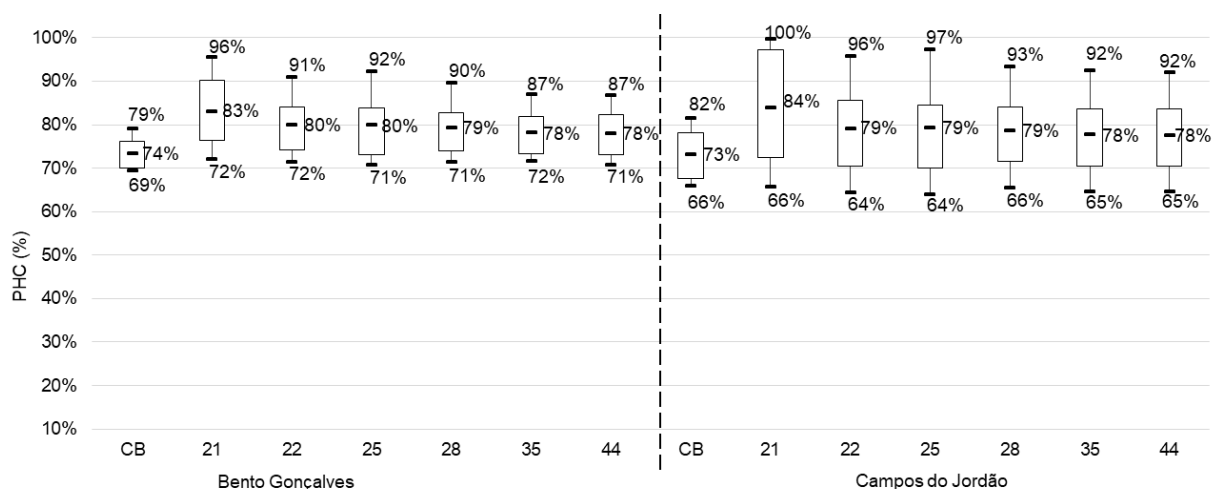


Figura 6 Comparação entre o PHC do CB e dos tipos de PCM na ZB1

Fonte: Os autores (2023).

Além disso, foi possível observar poucas diferenças entre os PCMs 35 e 44, o que sugere que as TMF mais altas testadas não proporcionam melhorias progressivas no PHC. Essa situação era esperada para a ZB1 devido à predominância de temperaturas externas do ar abaixo da TMF dos PCMs 35 e 44.

Destaca-se que, em alguns casos de Campos do Jordão, a incorporação de PCMs piorou o PHC devido ao posicionamento da camada em que o PCM foi instalado. Essa situação ocorreu para o PCM no meio ou próximo à face externa da parede (Figura 6 e Tabela 11). Essa redução do conforto em relação ao CB para Campos do Jordão advém no incorreto funcionamento dos PCMs quando instalados em camadas que não possibilitam que o material atue como um indutor do aumento da inercia térmica dos ambientes internos.

A cidade de Bento Gonçalves e Campos do Jordão apresentaram aumento médio das PHCs de 6% em relação ao CB, embora as diferenças cheguem a 10% para o PCM 21, orientado à norte e instalado próximo ao ambiente interno. Essas diferenças em relação aos parâmetros de instalação mencionados, evidencia novamente a sensibilidade do PCM frente aos parâmetros de instalação e condições de contorno.

Em Brasília (ZB4), todos os PCMs testados aumentaram o PHC em relação ao CB (Figura 7 e Tabela 11). Destaca-se que o maior PHC entre todas as simulações foi obtido nesta cidade, 95% das horas em conforto e melhoria em relação ao CB de 33% com o PCM 21, para espessuras de 3cm e 6cm, instalado internamente, orientado a norte e com ventilação seletiva noturna.

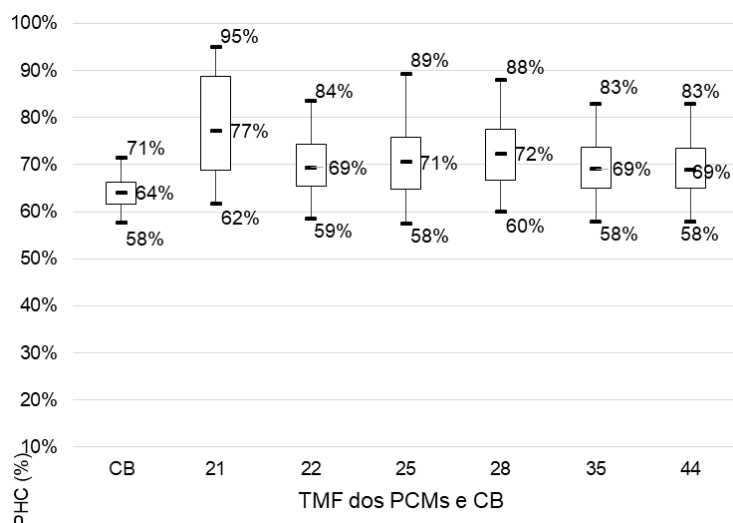


Figura 7 Comparação entre o PHC do CB e dos tipos de PCM para Brasília (ZB4)  
Fonte: Os autores (2023).

Além do PCM 21, o 25 e 28 apresentaram resultados considerados satisfatórios no contexto dessa pesquisa, com aumento da mediana de 7% e 8% em relação ao CB e com aumento das máximas de 18% e 17% respectivamente (Figura 7 e Tabela 11). Os demais tipos de PCM apresentaram desempenho equivalentes.

A Figura 8 representa uma comparação entre as temperaturas internas do ar do (CB e dos ambientes com os seis PCM) e a temperatura do ar externo. Nela é possível observar que as temperaturas internas no intervalo entre 20° C e 33° C são mais baixas em relação às temperaturas externas para os PCMs com melhor desempenho. Destaque para o PCM 21, que foi capaz de aumentar a temperatura interna quando abaixo de 20° C e reduzi-la quando acima de 25°C.

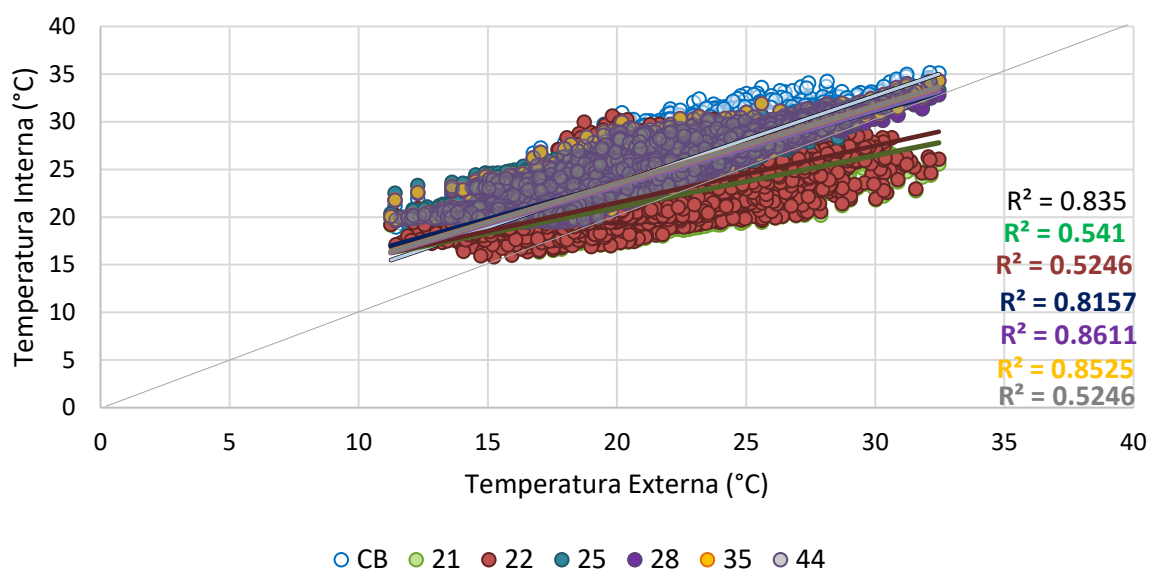


Figura 8 Relação entre Temperatura interna e externa do ambiente com PCM para Brasília  
Fonte: Os autores (2023).

Após o PCM 21, o PCM 22 apresentou as temperaturas mais baixas e são os únicos casos que resultam em temperaturas internas mais baixas que as externas. Todos os outros casos, inclusive o CB, apresentou uma temperatura interna mais altas que as externas. Também é possível observar que as linhas de tendência que cruzam a linha média do gráfico, que estão próximas a 23°C e 24°C. Este é também um ponto que ajuda na determinação do conforto pois, quando as temperaturas externas se reduzem, as internas tendem a se tornar mais altas.

Em relação à ZB8 (Figura 9), foram encontrados resultados diferentes entre as cidades analisadas. Apesar de se localizarem na mesma ZB, Belém e Rio de Janeiro apresentam condições climáticas bastante distintas, como mostrado na Tabela 10, chegando a diferenças de temperatura média anual (TMA) de 5°C.

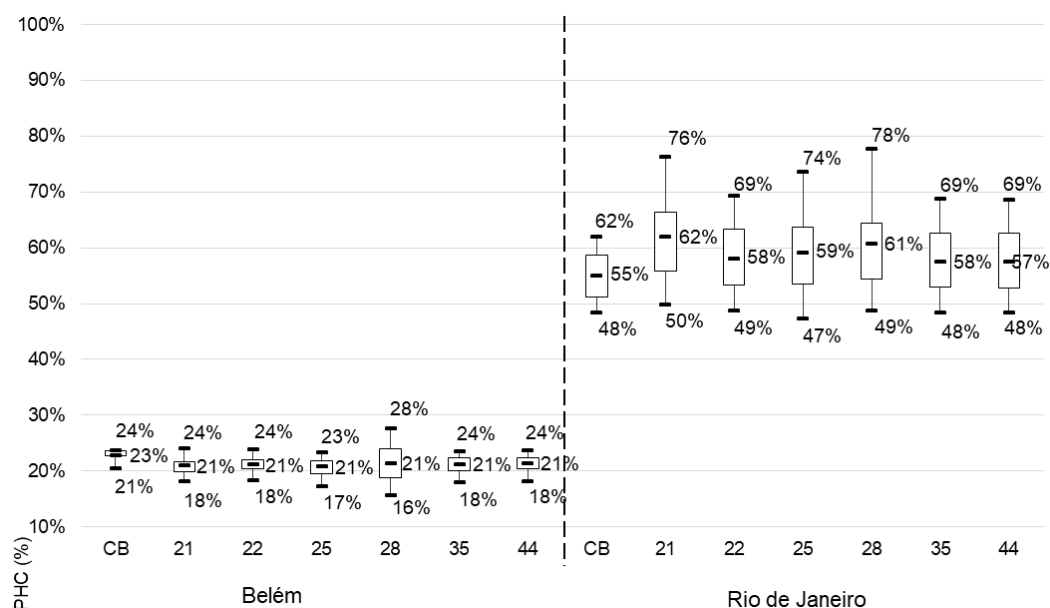


Figura 9 Comparação entre o PHC do CB e dos tipos de PCM para ZB8  
Fonte: Os autores (2023).

Para Belém, todos os PCMs adotados apresentaram piora no conforto, com mediana dos casos simulados 2% menor se comparada ao CB. Em Belém também foi encontrado o pior PHC, -8% para o PCM 28, instalado internamente e orientado à sul. Ou seja, há aumento de desconforto devido a incorporação do PCM.

Embora apresente o pior desempenho, o PCM 28 foi responsável pelo maior PHC para a cidade, 4% em relação ao CB para o PCM instalado na camada intermediária da parede, com 6cm de espessura e ventilação seletiva noturna. Porém, o valor positivo não está na escala dos demais valores máximos encontrados, próximos a 30% para Brasília e Campos do Jordão. Além disso, valores de PHC acima do CB para Belém só foram encontrados em 8% dos casos simulados para essa cidade, o que denota que o uso de PCM não é recomendado para esse clima.

Se o PCM 28 piorou o conforto em Belém, no Rio de Janeiro os PCMs 21 e 28 apresentaram os melhores resultados com mediana de 62% e 61% (CB com mediana de 55%) e máximos de 76% e 78% (para o CB, 62%). O PCM 25 apresentou resultado melhor que os PCMs 22, 35 e 44 com diferença entre medianas e quartis de aproximadamente 1%, considerado irrelevante no contexto desta pesquisa (Figura 9 e Tabela 11).

Destaca-se que os PCMs 35 e 44 não apresentaram melhorias significativas na PHC para a ZB8. Essa situação não era esperada pois, diferente da ZB1, as cidades da

ZB8 apresentam temperaturas externas mais altas em que TMF elevadas, principalmente nas horas mais quentes do dia durante o verão, ofereceriam teoricamente, maiores aumentos da inércia térmica dos ambientes.

De forma geral, os benefícios obtidos estão de acordo com as experimentações dos autores que utilizaram PCMs da marca Rubitherm®. Logo, pode-se afirmar que parte dos PCMs testados possui potencial para aumentar o PHC em parte dos climas brasileiros. Os resultados confirmam as ressalvas de Brito et al. (2017) para o uso de PCMs em ZBs quentes. Além disso, é possível traçar um paralelo entre a piora no PHC obtido para Belém (ZB8) com aumento do consumo energético obtido em Manaus (ZB8) por Saffari et al. (2017).

Se comparadas as recomendações de Brito et al. (2017) de uso de PCMs com TMF próximos a 30°C para ZB1 a ZB5 e próximos de 34°C para ZB6 a ZB8, é possível observar que as TMF mais baixas geraram melhor desempenho. A saber que os maiores PHC obtidos em relação ao CB foram de casos com TMF 21 em todos os climas, e ainda 22 e 25 em Campos do Jordão (ZB1), 25 e 28 em Brasília (ZB4), e 28 no Rio de Janeiro (ZB8). Além disso, os PCMs de maior TMF, 35 e 44, contribuíram pouco para a alteração do PHC em todas as cidades analisadas.

A diferença entre a recomendação da literatura nacional e os resultados obtidos nesse trabalho pode ser explicada pelas demais propriedades de cada PCM, tais como a capacidade de armazenamento de calor, densidade do material e TMF, que estão de acordo com um produto industrializado e não condizem com os valores teóricos e potencialmente ótimos testados pelos autores.

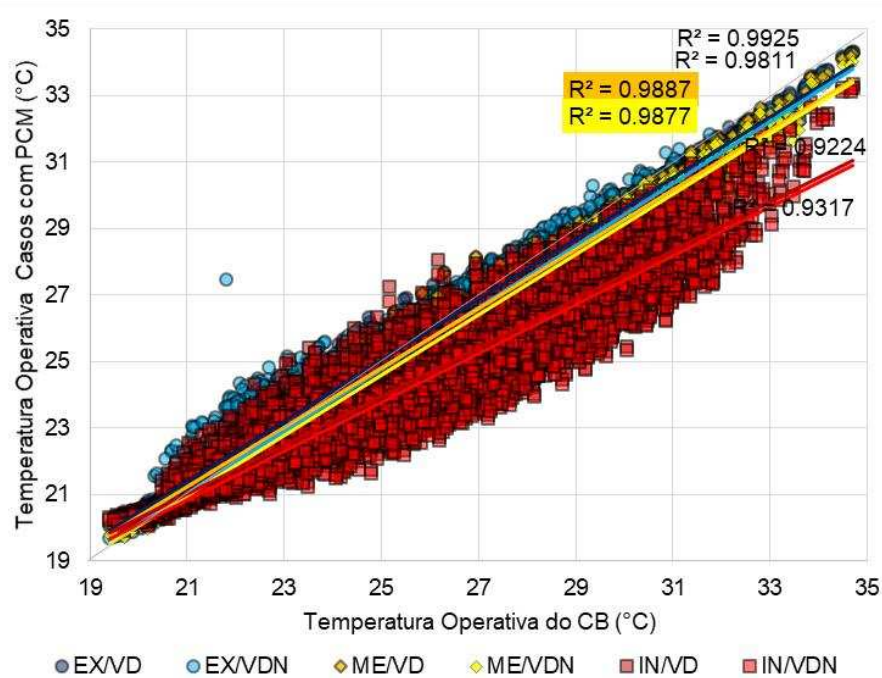
Os valores de TMF que apresentaram melhor desempenho são próximos aos de Saffari et al. (2017), tanto para climas com demanda predominante de aquecimento (recomendado pelos autores entre 18°C a 22°C), quanto para climas que requeiram resfriamento (recomendado pelos autores entre 24°C a 28°C). Os resultados encontrados também corroboram este autor que apontou existir repostas diferentes do material para cidades pertencentes ao mesmo grupo/classificação climática.

### **3.3.2 Parâmetros construtivos e de instalação do PCM**

Se avaliadas apenas as orientações solares, os casos com a abertura envidraçada orientada a norte foram os que apresentaram maior PHC, com um aumento médio de 4,7% em comparação ao CB. A fachada sul foi a que apresentou os piores resultados,

com aumento médio de 4%. As maiores diferenças entre norte e sul foram encontradas para Campos do Jordão e Brasília, quando simuladas com PCM 21, 10% e 12%, respectivamente. A combinação entre maiores médias anuais de radiação direta normal e a fachada com maior tempo de incidência de insolação, proporcionaram os melhores casos. Esse resultado é semelhante ao encontrado por Saffari et al. (2017), que ao avaliar apenas a radiação solar, obteve melhores resultados para Brasília (266 W/m<sup>2</sup>/dia, com 17% de economia de energia) em comparação com Singapura (88 W/m<sup>2</sup>/dia com 0,43% de economia de energia).

A Figura 10 foi elaborada a partir do melhor caso para Brasília, com PCM 21 e orientado a norte, a fim de avaliar os demais parâmetros: a influência da camada de instalação, da espessura e do tipo de ventilação no PHC.



(a)

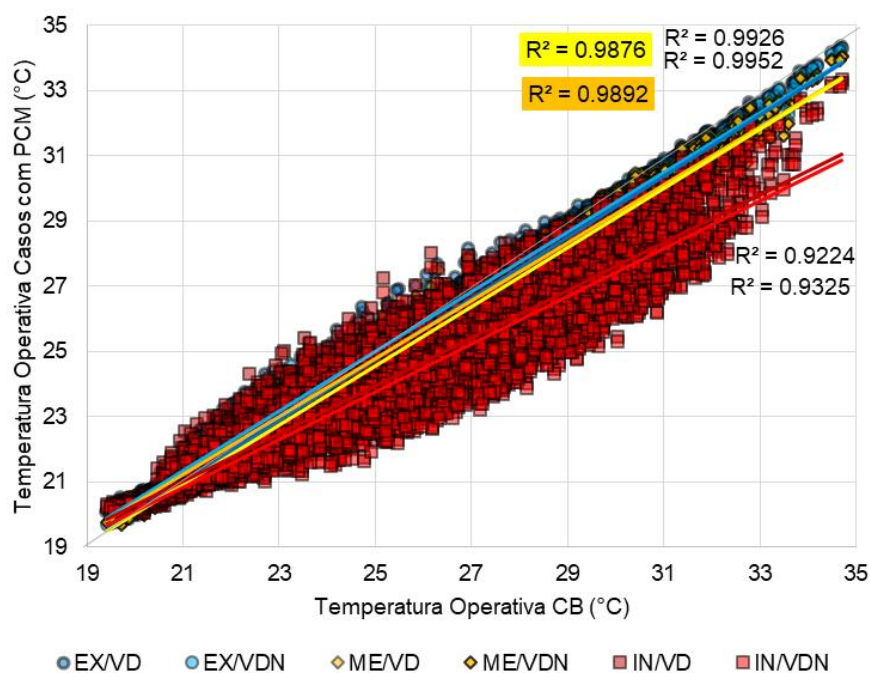


Figura 10 Comparação entre camada de instalação e condição de ventilação e espessura. Espessura 3cm (a) e espessura 6cm (b)

LEGENDA: EX – PCM instalado na camada próxima ao ambiente externo; ME – PCM instalado na camada do meio; IN – PCM instalado na camada próxima ao ambiente interno; VD – Ventilação seletiva diurna; VDN – Ventilação seletiva diurna e noturna

Fonte: Os autores (2023).

É possível observar que os resultados estão coesos com as linhas de tendência que os descrevem, visto que os coeficientes de determinação são todos superiores a 0,92, chegando a mais de 0,99 em alguns casos. Assim, a partir da temperatura operativa de 21°C, todas as linhas de tendência inclinam-se para a área abaixo da linha média de temperatura. No entanto, elas se diferenciam em três grupos determinados pela camada de instalação do PCM. As linhas de tendências vermelhas, que representam casos de instalação de PCM na camada interna, distanciam-se significativamente das demais a partir de uma temperatura operativa interna de 21°C. É possível também observar a pequena distância entre as linhas de tendência azuis (PCM instalado na camada externa) e amarelas (PCM instalado na camada intermediária da parede).

A diferença entre a ventilação é sutil, evidenciada pelas linhas de tendência quase paralelas nos gráficos. Por fim, também é possível observar a semelhança entre os as Figura 10 a e b, o que indica a baixa influência da espessura da camada do PCM na PHC.

Em relação as camadas de instalação do PCM avaliadas (na superfície interna da parede, no meio da parede e na superfície externa da parede), o melhor caso ocorreu em Campos do Jordão, com aumento do PHC de 28% se comparado com o mesmo caso, porém com o PCM instalado próximo à camada externa.

Para quantificar os resultados, as cidades de Campos do Jordão, Bento Gonçalves, Brasília e Rio de Janeiro apresentaram média de aumento do PHC de 12%, 14%, 15% e 9% para o PCM instalado próximo ao ambiente interno, enquanto os demais casos não ultrapassaram 4% independentemente do clima (4%, 3%, 4% e 2% para o PCM instalado no meio e 3%, 1%, 2% e 1% para PCM instalado próximo ao meio externo, respectivamente). Logo, como os PCMs instalados no meio da parede ou externos apresentam resultados próximos, de pequeno aumento no PHC, em que é possível afirmar que o desempenho é melhor com PCM instalados na camada mais próxima ao ambiente interno. Esse resultado é semelhante ao obtido por Jin et al. (2017), com melhor desempenho do PCM na camada mais próxima ao ambiente interno (2/16 sendo 1/16 a superfície em contato com o ambiente interno e 16/16 a superfície em contato com o ambiente externo) no verão, período de melhor desempenho do PCM.

A exceção foi em Belém, no qual foram observadas medianas comparadas ao CB de -3% para PCM interno, -1% para o meio e -1% para externo, ou seja, o desempenho piorou de fato. Ainda, em 8% dos casos simulados em Belém houve aumento do PHC quando o PCM foi instalado no meio da parede ou próximo ao ambiente externo. Deve-se lembrar que a insolação em Belém é de elevada altura em relação aos demais casos, com pouca diferença entre inverno e verão, ou entre norte e sul. A radiação direta normal é também mais baixa em relação às demais cidades (Tabela 10). Logo, quando o material foi instalado nas camadas que apresentam baixa influência no ambiente interno (como na camada intermediária e próxima ao ambiente externo), seu desempenho foi melhor, com comportamento semelhante ao de um isolante térmico.

As diferenças dos PHC entre as duas espessuras dos PCM (3cm e 6cm) apresentados na Figura 10 (a e b) para Brasília se repetiram para os demais climas, tendo alcançado uma média inferior a 2% entre as duas espessuras se considerados todas as cidades. Portanto, dobrar a espessura do PCM e, conseqüentemente, aumentar a capacidade de armazenamento de calor latente não garantiu um aumento linear do PHC. Além disso, em 64% dos casos simulados, foi obtido maior PHC para espessura 3cm. Para

maiores espessuras, o material não realiza as trocas de maneira homogênea e completa. Além disso, em situações em que o PCM não consegue realizar as trocas de fase completamente o material tende a se comportar apenas como isolante térmico ou apenas como um material de armazenamento de calor sensível. Os resultados encontrados são semelhantes ao de Sovetova, Memon e Kim (2019) e Al-Yasiri e Szabó (2021), que obtiveram resultados insignificantes ou piores no desempenho térmico para camadas de PCMs acima de 2cm.

Ao analisar os resultados obtidos com as duas condições de ventilação (Tabela 8) a segunda apresentou aumento do PHC em 90% dos casos (Figura 11 e Tabela 11). Entretanto, as diferenças foram baixas, em média 1,5%, com a maior de 7% em Campos do Jordão com o PCM 22 instalado internamente. Os resultados encontrados são semelhantes aos de Berardi e Soudian (2019), Liu et al. (2020) e Bai et al. (2020) que obtiveram melhorias no desempenho combinando PCMs e ventilação noturna. De fato, o resfriamento proporcionado pelas mais baixas temperaturas que ocorrem à noite melhorou o desempenho, mesmo no inverno.

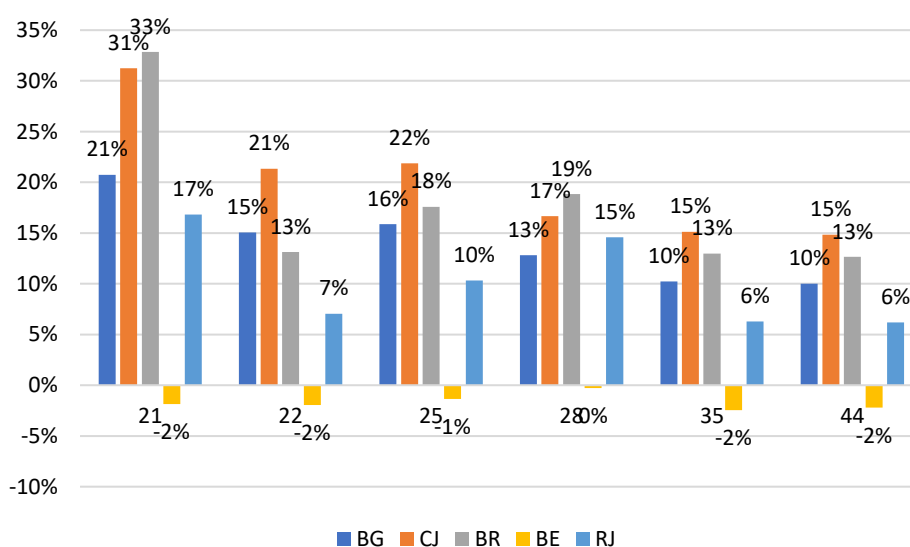


Figura 11 PHC da ventilação seletiva com ventilação noturna  
Fonte: Os autores (2023).

As outras condições de ventilação, condição três (abertura a partir de 24°C) e quatro (ventilação apenas noturna) foram testadas apenas para os melhores casos, ou seja, com PCM instalado próximo ao ambiente interno e orientado a norte, em todos os climas e para todos os PCMs. Se comparados à condição dois (Figura 11), os resultados foram piores do que os inicialmente testados (Figura 12). A exceção foi para Campos do Jordão, cuja abertura das janelas a partir de 24°C aumentou o PHC

para o PCM 21. Esse aumento se deve a diferenças sazonais de temperatura e radiação, com visualização dificultada em uma análise que considera apenas resultados médios anuais.

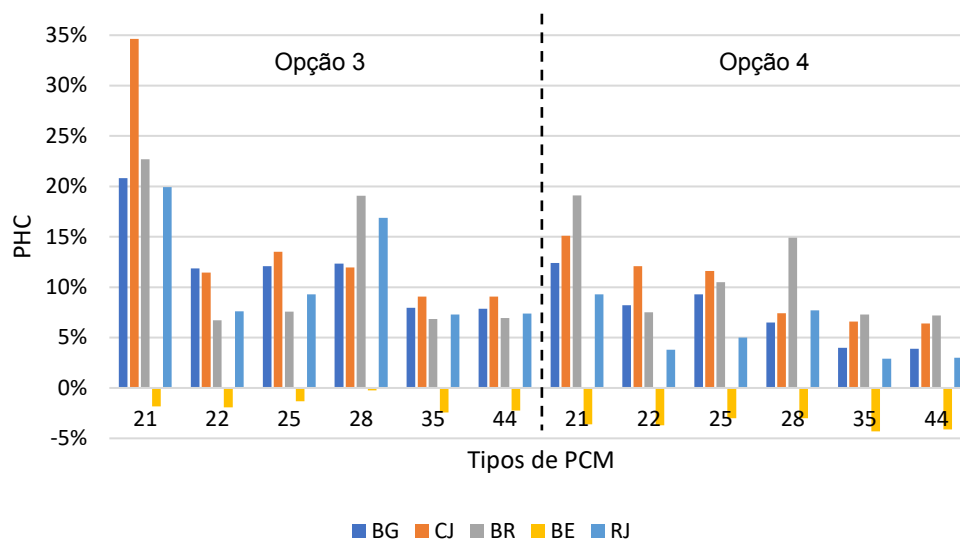


Figura 12 PHC da opção 3 (esquerda) e 4 (direita)  
Fonte: Os autores (2023).

Dessa forma, é possível afirmar que as trocas de ar proporcionadas com a ventilação seletiva ao longo do dia e noite foram suficientes para descarregar a energia térmica armazenada nos PCMs, com exceção de Belém. Logo, embora o uso da ventilação seletiva noturna (condição dois) tenha aumentado o PHC, no contexto avaliado, a diferentes configurações de ventilação tiveram baixa influência no PHC se comparadas aos parâmetros analisados anteriormente, como tipo de PCM, camada de instalação e orientação solar.

### 3.3.3 Influência dos parâmetros climáticos

Nessa etapa de análise, quatro parâmetros climáticos e sua influência no desempenho dos PCMs foram avaliadas. Para isso, foram selecionadas a temperatura externa do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar, previamente apresentadas na Tabela 10. Os parâmetros foram escolhidos por recomendação de Saffari et al. (2017), que as apontaram como uma possível justificativa para resultados diferentes em cidades classificadas no mesmo clima.

As figuras 13 e 14 foram elaboradas com os valores medianos de cada análise BoxPlot apresentados nas Figura 6, 7 e 9 e levaram em consideração todas as simulações realizadas nesse trabalho. Cada coluna de pontos indica o parâmetro climático de uma

das cidades analisadas, sendo que a cor laranja identifica o CB. As três equações descrevem as curvas dos PCMs 21, 28 e 44, ou os limites superior, mediano e inferior, respectivamente.

A Figura 13 mostra a relação entre a TMA do ar externo e o PHC por tipos de PCM adotado. Esta relação é descrita por uma curva polinomial de segunda ordem, com  $R^2$  superiores a 0,99, entre as temperaturas médias anuais e o aumento do PHC.

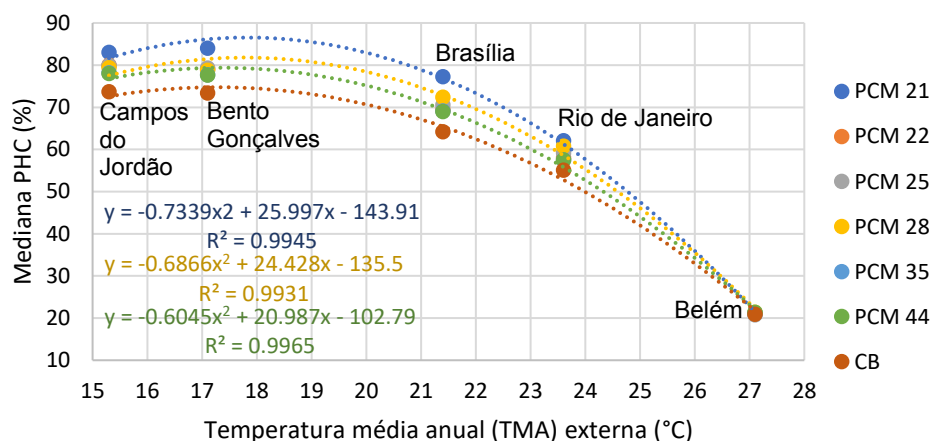


Figura 13 Relação entre PCM e temperatura externa média anual  
Fonte: Os autores (2023).

Temperaturas externas médias anuais entre 15°C e 22°C foram consideradas as mais adequadas para a utilização dos PCMs. E, a partir de 24°C, o aumento do PHC devido a incorporação de PCMs se aproximou cada vez mais do CB (sem PCM).

A Figura 14 apresenta a relação entre radiação média anual e o PHC. Nela é possível observar que o intervalo entre 3750 Wh/m<sup>2</sup> a 4250 Wh/m<sup>2</sup> apresentou os melhores resultados, com valores de  $R^2$  próximos a 0,80.

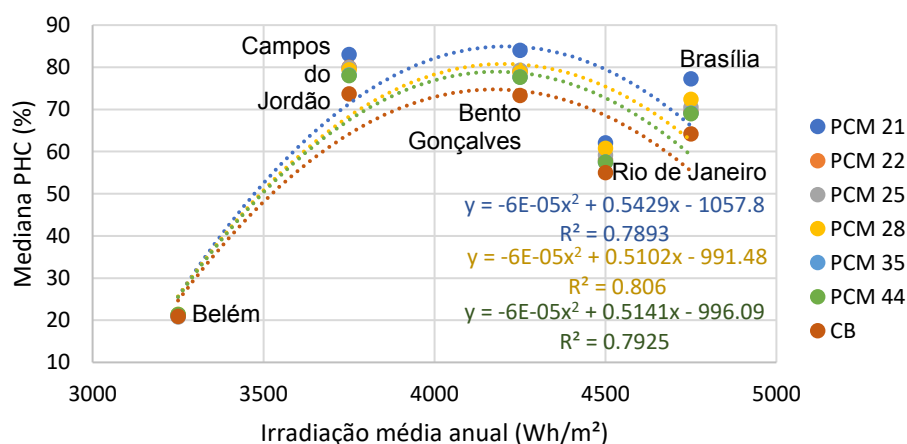


Figura 14 Relação entre PCM e radiação solar média anual  
Fonte: Os autores (2023).

Pela análise, era esperado uma estabilização a partir de valores de 4250 Wh/m<sup>2</sup>. Entretanto, pode ser observada uma inflexão na curva (Figura 14) que representa a cidade do Rio de Janeiro. Essa inflexão pode ser explicada pois, embora o Rio de Janeiro apresente valor elevado de radiação, apresenta temperaturas médias externas elevadas e por isso obteve uma queda no PHC.

Logo, a combinação entre temperatura externa mediana, próxima a 18°C e radiação elevada, acima de 3750 Wh/m<sup>2</sup>, é a melhor combinação de parâmetros climáticos ambientais para a utilização de PCMs encontrada nesse estudo.

A umidade relativa e velocidade do vento apresentaram valores baixos de R<sup>2</sup>, próximos a 0,24 e 0,43 respectivamente. A baixa relação entre essas variáveis ambientais e o PHC torna inconclusiva possíveis correlações entre médias anuais de umidade relativa, velocidade do vento e aumento do PHC devido aos PCMs.

Em relação aos parâmetros ambientais, é possível afirmar que a temperatura do ar e a radiação solar são os que mais influenciaram no PHC em edificações com PCM. Como exemplo, a cidade com maior radiação (Brasília) e a cidade com menor temperatura média externa (Campos do Jordão) apresentaram os maiores aumentos do conforto.

Ademais, essa associação pode ter contribuído para os resultados obtidos no Rio de Janeiro de aumento do PHC em relação ao CB, mesmo que esteja em uma ZB mais quente. Apesar da cidade apresentar maiores temperaturas (se comparado à Bento Gonçalves, Campos do Jordão e Brasília), possui o segundo maior índice de radiação solar (inferior apenas ao de Brasília).

Os resultados encontrados analisam parte da hipótese levantada por Saffari et al. (2017) de que determinadas variáveis climáticas justificariam diferenças nos resultados da influência de PCMs para diferentes cidades. Entretanto, destaca-se que um número reduzido de parâmetros climáticos foi avaliado e não foi possível estabelecer uma relação entre PHC, umidade relativa e velocidade do vento. Logo, mais análises e simulações são necessárias para investigar as variáveis que não apresentaram relação, para confirmar as tendências apresentadas, para extrapolar os limites de temperatura e radiação e para eventualmente determinar quais dessas últimas variáveis ambientais exerce maior influência no PHC.

### 3.4 CONCLUSÃO

Esse artigo teve como objetivo investigar a influência da incorporação de PCMs reais no PHC em uma edificação destinada à escritório, naturalmente ventilada, com paredes leves, em três ZBs brasileiras. A análise foi realizada por simulação termoenergética com o EnergyPlus e considerou diferentes combinações de condições de contorno, de instalação, tipos de PCMs e de parâmetros climáticos.

A incorporação de PCM se mostrou uma estratégia eficaz para aumentar PHC nas ZBs 1 e 4. Nos melhores casos, foi observado aumento no PHC entre 26% a 33% em relação ao CB. Já para ZB 8, o uso PCM deve ser avaliado de acordo com os parâmetros climáticos, uma vez que seu uso em Belém, com altas temperaturas e baixa radiação, piorou o PHC em quase todos os casos simulados.

O tipo do PCM, o clima (temperatura e radiação) e a camada de instalação foram os parâmetros de maior influência e resultaram em variações acima de 20% no PHC entre casos semelhantes. A orientação solar teve impacto moderado, cerca de 10%, e a espessura da camada de PCM e tipo de ventilação apresentaram menor influência na alteração do PHC, com média geral próxima a 2%.

Se levado em consideração apenas a TMF, PCMs com 21°C foram os melhores para Bento Gonçalves e Campos do Jordão, TMF de 21°C, 25°C e 28°C foram os melhores para Brasília e 21°C e 28°C para o Rio de Janeiro. O uso de PCM apresentou piora geral do PHC para Belém.

A combinação entre temperaturas anuais medianas, próximas a 18°C e radiação solar acima de 3750W/m<sup>2</sup> se mostraram os parâmetros climáticos de maior importância para garantir melhor desempenho no PHC do conjunto edificação e PCMs. Em climas com altas temperaturas médias anuais e baixo índice de radiação o PCM tende a se comportar como um isolante térmico e reduzir o PHC na maioria dos casos.

Destaca-se que uma análise mais abrangente com avaliação mais parâmetros climáticos, de mais cidades e ZBs, considerando as melhores condições de contorno e de instalação dos PCM encontrados nessa pesquisa é necessária para confirmar as tendências apontadas. Além disso, mais comparações entre cidades na mesma ZB e em ZBs diferentes são necessárias para analisar a influência dos parâmetros ambientais e sua interação com o PCM.

### 3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHANGARI, M.; MAEREFAT, M. An innovative PCM system for thermal comfort improvement and energy demand reduction in building under different climate conditions. **Sustainable Cities and Society**, v. 44, n. September 2018, p. 120–129, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.008>
- AL-JANABI, A.; KAVGIC, M. Application and sensitivity analysis of the phase change material hysteresis method in EnergyPlus: A case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 162, n. May, p. 114222, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114222>
- AL-YASIRI, Q.; SZABÓ, M. Case study on the optimal thickness of phase change material incorporated composite roof under hot climate conditions. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. 1–11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00522>
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2020.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 140**: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. Atlanta, 2017.
- ARICI, M.; BILGIN, F.; NIŽETIĆ, S.; KARABAY, H. PCM integrated to external building walls: An optimization study on maximum activation of latent heat. **Applied Thermal Engineering**, v. 165, n. October 2019, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114560>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- BAI, L.; XIE, J.; FARID, M.; WANG, W.; LIU, J. Analytical model to study the heat storage of phase change material envelopes in lightweight passive buildings. **Building and Environment**, v. 169, n. July 2019, p. 106531, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106531>
- BELTRÁN, R.; MARTÍNEZ-GÓMEZ, J. Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment. **Journal of Building Engineering**, v. 24, n. December 2017, p. 100726, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.02.018>
- BANIASSADI, A.; SAILOR, J.; BRYAN, J. Effectiveness of phase change materials for improving the resiliency of residential buildings to extreme thermal conditions. **Solar Energy**, v. 188, n. April, p. 190–199, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.011>
- BERARDI, U.; SOUDIAN, S. Experimental investigation of latent heat thermal energy storage using PCMs with different melting temperatures for building retrofit. **Energy and Buildings**, v. 185, p. 180–195, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0436-x>
- BRITO, A.; AKUTSU, M.; SALLES, E. CASTRO, G. Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 125–145, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100128>
- CUNHA, S.; AGUIAR, J. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. **Journal of Energy Storage**, v. 27, n. November 2019, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101083>
- ENERGYPLUS. **Engineering reference: EnergyPlus Version 9.3.0** Documentation - Engineering Reference U.S. Department of Energy, 2020.
- FARAJ, K.; KHALED; M.; FARAJ, J.; HACHEM, F.; CASTELAIN, C. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, n. December 2018, p. 109579, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109579>
- FRIGIONE, M.; LETTIERI, M.; SARCINELLA, A. Phase change materials for energy efficiency in buildings and their use in mortars. **Materials**, v. 12, n. 8, p. 1260, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12081260>
- GUARINO, F. ATHIENITIS, A.; CELLURA, M, BASTIEN, D. PCM thermal storage design in buildings: Experimental studies and applications to solarium in cold climates. **Applied Energy**, v. 185, p. 95–106, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.046>

- HLANZE, P.; ELHEFNY, A.; JIANG, Z.; CAI, J.; SHABGARD, H. In-duct phase change material-based energy storage to enhance building demand flexibility. **Applied Energy**, v. 310, n. September 2021, p. 118520, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118520>
- IMGHOURE, O.; BELOUAGGADIA N.; EZZINE, M.; LBIBB, R.; YOUNSI, Z. Performance evaluation of phase change materials for thermal comfort in a hot climate region. **Applied Thermal Engineering**, v. 186, n. December 2020, p. 116509, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116509>
- INMET. **INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA**. Dados Históricos Anuais, 2021.
- JANGELDINOV, B.; MEMON, S.; KIM, J.; KABDRAKHMANOVA, M. Evaluating the Energy Efficiency of PCM-Integrated Lightweight Steel-Framed Building in Eight Different Cities of Warm Summer Humid Continental Climate. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/4381495>
- JIN, X.; MEDINA, M.; ZHANG, X. Numerical analysis for the optimal location of a thin PCM layer in frame walls. **Applied Thermal Engineering**, v. 103, p. 1057–1063, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.056>
- JIN, X.; SHI, D.; MEDINA, M.; SHI, X.; ZHOU, X.; ZHANG, X. Optimal location of PCM layer in building walls under Nanjing (China) weather conditions. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 129, n. 3, p. 1767–1778, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6307-3>
- KHARBOUCH, Y.; OUHSAINE, L.; MIMET, A.; EL GANAOU, M. Thermal performance investigation of a PCM-enhanced wall/roof in northern Morocco. **Building Simulation**, v. 11, n. 6, p. 1083–1093, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0449-5>
- KIM, H.; MAE, M.; CHOI, Y.; KIYOTA, T. Experimental analysis of thermal performance in buildings with shape-stabilized phase change materials. **Energy and Buildings**, v.152 p. 524–533, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.076>
- KISHORE, R.; BIANCHI, M.; BOOTEN, C.; VIDAL, J.; JACKSON, R. Optimizing PCM-integrated walls for potential energy savings in U.S. Buildings. **Energy and Buildings**, v. 226, p. 110355, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110355>
- KISHORE, R.; BIANCHI, M.; BOOTEN, C.; VIDAL, J.; JACKSON, R. Parametric and sensitivity analysis of a PCM-integrated wall for optimal thermal load modulation in lightweight buildings. **Applied Thermal Engineering**, v. 187, n. December 2020, p. 116568, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116568>
- KONSTANTINIDOU, C. A.; LANG, W.; PAPADOPOULOS, A. M. Multiobjective optimization of a building envelope with the use of phase change materials (PCMs) in Mediterranean climates. **International Journal of Energy Research**, v. 42, n. 9, p. 3030–3047, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3969>
- LAAOUATNI, A.; MARTAJ, N.; BENNACER, R.; LACHI, M.; EL OMARI, M.; EL GANAOU, M. Thermal building control using active ventilated block integrating phase change material. **Energy and Buildings**, v. 187, p. 50–63, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.024>
- LEE, K.; MEDINAA, M.; SUN, X.; JIN, X. Thermal performance of phase change materials (PCM)-enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls. **Solar Energy**, v. 163, n. February, p. 113–121, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.086>
- LIRA-OLIVER, A.; VILCHIS-MARTÍNEZ, S. Thermal Inertia Performance Evaluation of Light-Weighted Construction Space Envelopes Using Phase Change Materials in Mexico City's Climate. **Technologies**, v. 5, n. 4, p. 69, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies5040069>
- LIU, J.; LIU, Y.; YANG, L.; LIU, T.; ZHANG, C.; DONG, H. et al. Climatic and seasonal suitability of phase change materials coupled with night ventilation for office buildings in Western China. **Renewable Energy**, v. 147, p. 356–373, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.069>
- MARIN, P.; SAFFARI M.; GRACIA, A.; ZHU, X.; FARID, M.; CABEZA, L.; USHAK, S. Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 274–283, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.007>
- MARKARIAN, E.; FAZELPOUR, F. Multi-objective optimization of energy performance of a building considering different configurations and types of PCM. **Solar Energy**, v. 191, n. May, p. 481–496, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.003>

MAZZEO, D.; OLIVETI, G.; ARCURI, N. A method for thermal dimensioning and for energy behavior evaluation of a building envelope PCM layer by using the characteristic days. **Energies**, v. 10, n. 5, 2017. DOI: <http://doi.org/doi:10.3390/en10050659>

MENG, E.; YU, H.; ZHOU, B. Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter. **Applied Thermal Engineering**, v. 126, p. 212–225, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.110>

MENGJIE, S.; FUXIN, N.; NING, M.; YANXIN, H.; SHIMING, D. Review on building energy performance improvement using phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 776–793, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.066>

OLIVEIRA, M.; CARLO, J. Avaliação do conforto térmico e renovação de ar em ambientes com chaminés solares. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 293-314, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100506>

OLIVEIRA, M.; LUCARELLI, C.; CARLO, J. Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura. **Ambiente Construído**, v. 22, p. 67-111, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000300610>

OLIVEIRA, R.; GONZALES, T.; CARVALHO, M. Uso de PCM para edificações em região de clima quente: uma revisão sistemática. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 12, p. e021001, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.066>

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos, 2017.

PONS, V.; STANESCU, G. Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 8, n. 2, p. 127, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v8i2.8650228>

RATHORE, P.; SHUKLA, S. Potential of macroencapsulated pcm for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 723–744, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.068>

**RUBITHERM**. PCM RT - LINE. Disponível em: <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>. Acesso em março de 2022.

SAFFARI, M.; GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, C.; CABEZA, L. Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings. **Applied Energy**, v. 202, p. 420–434, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.107>

SAFFARI, M.; GRACIA, A.; USHAK, S.; CABEZA, L. Passive cooling of buildings with phase change materials using whole building energy simulation tools: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p.1239–1255, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.139>

SHARMA, V.; RAI, A. Performance assessment of residential building envelopes enhanced with phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 208, p. 109664, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109664>

SOLGI, E.; HAMEDANI, Z.; FERNANDO, R.; KARIB, B.; SKATES, H. A parametric study of phase change material behaviour when used with night ventilation in different climatic zones. **Building and Environment**, v. 147, n. October 2018, p. 327–336, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.031>

SOVETOVA, M.; MEMON, S. A.; KIM, J. Thermal performance and energy efficiency of building integrated with PCMs in hot desert climate region. **Solar Energy**, v. 189, n. April, p. 357–371, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.067>

TABARES-VELASCO, P.; CHRISTENSEN, C.; BIANCHI M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building and Environment**, v.54, p. 186-196, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.019>

WAHID, M.; HOSSEINI, S.; HUSSEN, H.; AKEIBER, H.; SAUD, S.; MOHAMMAD, A. An overview of phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region. **Applied Thermal Engineering**, v. 112, p. 1240–1259, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.032>

WANG, H.; LU, W.; WU, Z.; ZHANG, G. Parametric analysis of applying PCM wallboards for energy saving in high-rise lightweight buildings in Shanghai. **Renewable Energy**, v. 145, p. 52–64, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.124>

YE, R.; JIANG, H.; WANG, J.; YANG, X.; SHU, X. Fabrication and characteristics of eutectic hydrated salts/fumed silica composite as form-stable phase change materials for thermal energy storage. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 238, n. June 2021, p. 111584, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111584>

## CAPÍTULO: 4 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS NO CONFORTO TÉRMICO DOS USUÁRIOS EM ESCRITÓRIOS COM PCMs NOS CLIMAS BRASILEIROS

### RESUMO

A incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCMs) em ambientes internos tem o potencial de aumentar o conforto de usuários e a eficiência energética de edificações. Entretanto, pesquisas com PCMs para climas quentes e úmidos, como grande parte dos climas brasileiros, é comparativamente menor que pesquisas para climas temperados. Além disso, poucos trabalhos avaliaram diferentes climas concomitantemente ou quantificaram a influência de parâmetros climáticos no desempenho de edificações com PCMs. O objetivo desse artigo é investigar a influência de parâmetros climáticos no funcionamento de PCMs para a potencialização do conforto térmico dos usuários em um modelo de escritório nos climas brasileiros. Para isso, foi utilizado a simulação termoenergética no EnergyPlus para 95 cidades brasileiras com conforto térmico adaptativo como indicador de desempenho. Para quantificar a influência dos parâmetros climáticos, foi utilizado a técnica de *machine learning* por *Gradient Boosting e Feature Importance*, e para agrupar as cidades, foi utilizado a Análise de Componentes Principais. Os resultados mostram que a incorporação de PCMs têm potencial para aumentar o conforto térmico dos usuários em parte do Brasil, principalmente em cidades com temperaturas médias anuais abaixo de 21°C. Porém, esse aumento não é homogêneo, mais relevante em regiões com temperaturas mais baixas e maior altitude. Se considerada as cidades com desempenho acima de 10%, os parâmetros climáticos que mais influenciaram no conforto foram a temperatura de bulbo seco, a umidade relativa e a direção de incidência do vento.

**Palavras Chave:** PCM; Climas Brasileiros; Conforto Térmico Adaptativo; EnergyPlus; Parâmetros Climáticos

### ABSTRACT

Incorporating Phase Change Materials (PCMs) in indoor environments can increase users' thermal comfort and the building's energy efficiency. However, PCM studies in hot and humid climates, like most Brazilian conditions, are comparatively less developed than research for temperate climates. In addition, few works have evaluated different climates concomitantly or quantified the influence of climate parameters on the building's performance employing PCMs. This article investigates the influence of climatic parameters on the PCMs' function to enhance user thermal comfort in an office model in Brazilian climates employing thermo-energy simulation using EnergyPlus for 95 Brazilian cities with adaptive thermal comfort as a performance indicator. The machine learning techniques of Gradient Boosting and Feature Importance were used to quantify the influence of climate parameters, followed by Principal Component Analysis clustering. Results show that incorporating PCMs can potentially increase user thermal comfort in part of Brazil, mainly in cities with average temperatures below 21°C. The comfort increase is not homogeneous, being more relevant in regions with colder temperatures and higher altitudes. When considering better-performing cities, the most influential climatic parameters were dry bulb temperature, relative humidity, and wind direction.

**Keywords:** PCM; Brazilian climates; Adaptive Thermal Comfort; EnergyPlus; Climate Parameters

## 4.1 INTRODUÇÃO

Os principais benefícios da incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCMs) em edificações são o amortecimento da amplitude da temperatura do ar interno em relação à temperatura externa, o aumento do conforto térmico de usuários e da eficiência energética da edificação (FARAJ et al., 2020; CAI et al., 2021). Afinal, se comparados aos materiais construtivos tradicionalmente associados a alta capacidade térmica, como concreto, rocha e argila, os PCMs armazenam entre 5 e 14 vezes mais energia por unidade de volume semelhante (WAHID et al., 2017; MENGJIE et al., 2018).

Os PCMs podem ser incorporados de forma passiva em componentes construtivos como paredes, pisos e coberturas e possuem como principal mecanismo de funcionamento o armazenamento/liberação de energia na forma de calor latente. Esse processo acontece a uma temperatura superficial praticamente constante na qual o material usualmente muda da fase líquida para a sólida ou da sólida para a líquida. Esse processo de carga (armazenamento de calor) e descarga (liberação de calor) é cíclico e está relacionado, entre outros parâmetros, à sua temperatura de mudança de fase (TMF) e às condições de contorno (RATHORE; SHUKLA, 2019; FARAJ et al., 2020; WANG et al., 2022).

Os trabalhos publicados sobre a incorporação de PCMs em climas quentes são escassos se comparadas a outros climas. Essa escassez fica mais evidente se considerando os trabalhos que investigaram PCMs e climas quentes e úmidos, como grande parte do Brasil (OLIVEIRA; GONZALES; CARVALHO, 2021; OLIVEIRA; LUCARELLI; CARLO, 2022). Embora o cenário apresentado, Marin et al. (2016), Brito et al. (2017), Pons e Stanescu (2017), Saffari et al. (2017), Kabdrakhmanova, Memon, Saurbayeva (2021) e Almeida, Brandalise e Mizgier (2022) realizaram simulações computacionais e/ou desenvolveram modelos matemáticos para adoção de PCMs teóricos e disponíveis no mercado para edificações em cidades/climas brasileiros.

Brito et al. (2017) e Pons e Stanescu (2017) indicaram existir melhoras do conforto dos usuários e redução do consumo energético para edificações com PCMs nas Zonas Bioclimáticas (ZBs) brasileiras mais frias e recomendaram uso de PCMs de forma ponderada nas ZBs mais quentes.

Marin et al. (2016) avaliaram a incorporação de PCMs em edificações para 25 cidades em todo o mundo, dentre elas, Brasília, enquanto Saffari et al. (2017) avaliaram 57 cidades, incluindo Brasília, Fortaleza e Manaus.

Marin et al. (2016) concluíram que a utilização de PCMs em Brasília alcançou uma redução de até 49% no consumo de energia com TMF de 25°C. Com resultados semelhantes aos de Brito et al. (2017) e Pons e Stanescu (2017), Saffari et al. (2017) obtiveram baixo desempenho para incorporação de PCMs nos climas quentes brasileiros. A cidade de Manaus apresentou aumento no consumo de energia de 9% para resfriamento e Fortaleza atingiu economia de apenas 0,23% devido ao uso de PCMs. Apesar de Brasília apresentar resultados satisfatórios para economia de energia, os autores destacaram a necessidade de avaliações mais aprofundadas devido à discrepância entre cidades do grupo climático equatorial (Classificação A por Koppen-Geiger). A saber, a economia de energia para resfriamento em Brasília chegou a 17%, enquanto Singapura, cidade classificada no mesmo grupo climático, apresentou apenas 0,43%.

Almeida, Brandalise e Mizgier (2022) avaliaram a incorporação de PCMs em edificações de interesse social pré-fabricadas, naturalmente ventiladas, durante os meses de verão em Santa Maria, Brasília e Palmas. Em todos os casos, a utilização do PCM diminuiu a amplitude térmica e aumentou a inércia das edificações. PCMs com TMF 22°C apresentaram os melhores resultados para conforto térmico, atingindo 100% das horas em conforto em Brasília.

As pesquisas em climas brasileiros indicam tendência de melhoria de desempenho do material para regiões mais frias. Entretanto, foi encontrado um número reduzido de trabalhos na literatura nacional e internacional acerca do tema. Além disso, foram encontrados resultados conflitantes em relação ao uso de PCMs em cidades com climas quentes. Para essas cidades, Almeida, Brandalise e Mizgier (2022) obtiveram resultados positivos para Palmas (ZB7) enquanto Brito et al. (2017) e Saffari et al. (2017) encontraram resultados negativos ou insignificantes para cidades na ZB8.

Outra limitação encontrada nos trabalhos avaliados foi o foco na obtenção da TMF de PCMs adequada para cada clima individualmente. Como exemplo, podemos citar pesquisas que se restringiram a investigar apenas climas quentes (SOVETOVA et al, 2019; IMGHOURE et al, 2021; AL-YASIRI; SZABÓ, 2021), frios (KENZHEKHANOV;

MEMON; ADILKHANOVA, 2020; LI et al., 2020) e mediterrânicos (KONSTANTINIDOU; LANG; PAPADOPOULOS, 2017).

Por outro lado, pesquisas já mencionadas como as desenvolvidas por Marin et al. (2016) e Saffari et al. (2017), além de outros trabalhos, como o de Solgi et al. (2019), Ahangari, Maerefat, (2019) e Li et al. (2022) avaliaram a incorporação de PCMs para diversos climas concomitantemente. Os autores mencionam a importância dos parâmetros climáticos para o desempenho do material, com foco na temperatura do ar.

Entretanto, apenas Saffari et al. (2017) apresentou uma discussão sobre a necessidade de avaliar a influência dos parâmetros climáticos para a obtenção de conforto térmico ou eficiência energética em edificações com PCMs. Os principais parâmetros discutidos foram temperatura do ar, radiação solar, umidade, cobertura do céu e velocidade do vento. Porém, os autores não aprofundam ou quantificam sua influência individual ou combinada. Além disso, não apresentam valores de referência da influência destes parâmetros no desempenho de edificações com PCMs.

Logo, o **objetivo** deste trabalho é investigar a influência dos parâmetros climáticos no conforto térmico dos usuários em um modelo de escritório com PCMs nos diferentes climas brasileiros.

## **4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

### **4.2.1 Simulação Termoenergética**

Esse trabalho emprega simulação termoenergética no EnergyPlus versão 9.3.0 que, segundo Saffari et al. (2017), é a ferramenta mais difundida para investigação dos efeitos passivos de PCMs em edificações.

O EnergyPlus utiliza como método de cálculo as diferenças finitas (CondFD) que considera a relação entre condutividade térmica e temperaturas em regime transiente de trocas de energia (ENERGYPLUS, 2020). Para simular a mudança de calor específico pela troca de fase, o método CondFD é acoplado à uma função entalpia-temperatura. Em seguida, as entalpias em cada nó são atualizadas para cada interação e utilizadas para calcular o calor específico equivalente a cada passo de tempo (MARIN et al., 2016; ENERGYPLUS, 2020).

Tabares-Velasco, Christensen e Bianchi (2012) verificaram, validaram e recomendaram parâmetros de entrada para o algoritmo utilizado pelo EnergyPlus na simulação de PCMs a partir de uma abordagem semelhante à ASHRAE140 (ASHRAE, 2017). As recomendações dos autores foram seguidas e corroboradas por Ahangari e Maerefat (2019), Baniassadi, Sailor e Bryan (2019), Beltrán e Martínez-Gómez (2019), Markarian e Fazelpour (2019), Sovetova, Memon e Kim (2019), Sharma e Rai (2020), Wang et al. (2020) e Kim et al (2021) que utilizaram o EnergyPlus como único procedimento metodológico e citaram a qualidade do programa embasados em publicações dedicadas à calibração e validação de simulações com PCMs.

As publicações referenciadas compararam resultados obtidos com EnergyPlus a medições *in loco*, simulações termoenergéticas em outros programas, simulações com dinâmica de fluidos (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) e modelos matemáticos, classificando o processo simulacional como calibrado e validado.

#### **4.2.2 Definição do modelo, propriedades construtivas e condições de contorno**

A instalação do material e características construtivas, como diferentes espessuras e camadas de instalação do PCM, orientação solar da edificação, e diferentes condições de ventilação, já foram avaliadas no artigo/capítulo anterior deste trabalho. Os melhores parâmetros foram incorporados nas simulações deste artigo/capítulo, que possui como foco analisar a influência dos parâmetros climáticos, e serão apresentados a seguir.

O modelo do simulado de ambiente de escritórios que representa o caso-base (CB) foi baseado no criado por Oliveira e Carlo (2021) e possui área de piso 49,7m<sup>2</sup>, pé-direito de 2,90m e janelas com área de 10,3m<sup>2</sup> (50,3% da área da fachada) e sem PCMs. O modelo foi simulado para orientação norte e o ambiente de interesse (marcado em vermelho na Figura 15 a e b) não possui contato com o solo ou com a cobertura, com zonas adjacentes de mesmas dimensões e características.

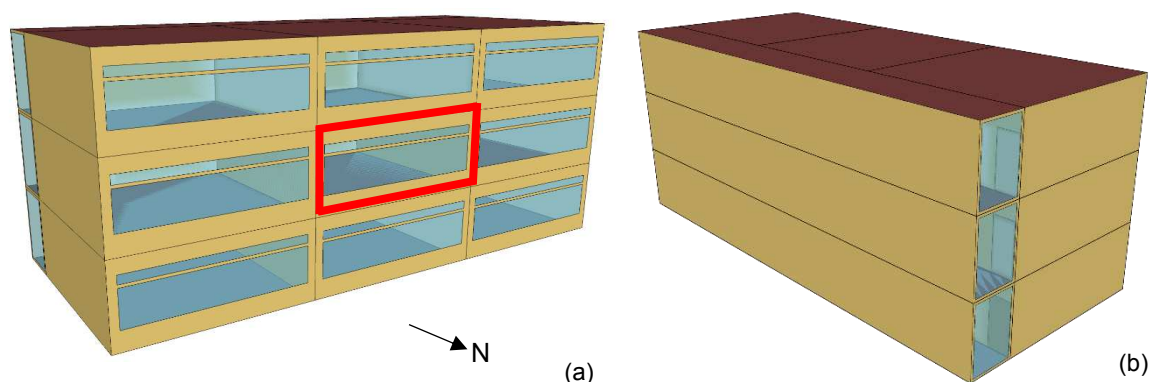


Figura 15 (a) Edificação simulada com ambiente analisado destacado em vermelho, fachada frontal; (b) Edificação simulada, fachada posterior  
 Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

As paredes internas e externas são leves, em *Drywall* composto por camadas homogêneas de placa cimentícia de 2,5cm, lã de rocha de 7cm e gesso de 1,5cm para criar um ambiente com baixa capacidade térmica, conforme recomendado por Marin et al. (2016), Brito et al. (2017) e Solgi et al. (2019). Paredes leves também contribuem para evidenciar a inércia térmica gerada apenas pelos PCMs, reduzindo a influência dos demais componentes construtivos. As propriedades do CB estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 Parâmetros adotados na simulação do CB

Densidade de Carga Interna de Iluminação e Equipamentos (W/m <sup>2</sup> )	28,62
Transmitância Térmica das Paredes (W/m <sup>2</sup> K)	0,45
Capacidade Térmica das Paredes (kJ/m <sup>2</sup> K)	33
Transmitância Térmica do Teto/Piso (W/m <sup>2</sup> K)	3,73
Capacidade Térmica do Teto/Piso (kJ/m <sup>2</sup> K)	220
Percentual de abertura em relação à fachada (%)	50,3
Fator Solar do Vidro	0,80
Absortância das Paredes ( $\alpha$ )	0,50

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A edificação foi simulada com ventilação seletiva, seguindo as recomendações do artigo/capítulo anterior desse trabalho que, por sua vez, foi baseado em Berardi e Soudian (2019), Liu et al. (2020) e Bai et al. (2020). Assim, a abertura inferior (Figura 15 a) foi configurada como uma esquadria de correr e a superior, uma veneziana de uma folha. A esquadria inferior possui 8,40m<sup>2</sup>, com 45% de abertura para ventilação e a superior 1,93m<sup>2</sup>, com 90% de abertura para ventilação. A abertura e fechamento das esquadrias inferiores ocorreram de forma seletiva, baseados nas temperaturas do ar externo. Ela abre ao atingir 20°C de temperatura do ar externo e se fecha

gradativamente com o aumento da temperatura, com fechamento total a 26°C. A esquadria superior permaneceu constantemente aberta entre às 19h e 7h.

#### 4.2.3 Tipos de PCMs

Seis tipos de PCMs foram simulados para a mesma geometria e condições de contorno do CB. A escolha dos PCMs se baseou nos resultados obtidos no artigo/capítulo anterior, que por sua vez foram baseados na semelhança entre os materiais disponibilizados e as TMF indicadas por Brito et al. (2017) e Saffari et al. (2017) e Kabdrakhmanova, Memon e Saubayeva (2021). Entretanto, por ser um material existente e com propriedades específicas, não foi possível ajustar todos os parâmetros recomendados pelos autores, que adotaram PCMs teóricos.

Os PCMs selecionados são fabricados pela empresa alemã *Rubitherm® Technologies GmbH* (RUBITHERM, 2022) e consistentemente apresentam resultados positivos para aumento do percentual de horas em conforto (PHC) e eficiência energética em edificações em diversas pesquisas (MAZZEO; OLIVETI; ARCURI, 2017; LIRA-OLIVER; VILCHIS-MARTÍNEZ, 2017; MENG; YU; ZHOU, 2017; LEE et al., 2018; SHARMA; RAI, 2020).

Para esse trabalho, foram selecionados os PCMs orgânicos denominados RT18HC, RT21HC, RT22HC, RT25HC, RT28HC e RT35HC. As propriedades destes PCMs estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 Propriedades dos PCMs

Nome do PCM	Intervalo de fusão e pico de temperatura (°C)	Intervalo de solidificação e pico de temperatura (°C)	Capacidade de armazenamento de calor (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg.K)	Condutividade térmica em ambas as fases (W/(m.K))	Densidade no estado sólido (kg/l)	Densidade no estado líquido (kg/l)
RT18HC	17/19 e 18	19/17 e 17	260	2	0,2	0,88	0,77
RT21HC	20/23 e 21	21/19 e 21	190	2	0,2	0,88	0,77
RT22HC	20/23 e 22	23/20 e 22	190	2	0,2	0,76	0,70
RT25HC	22/26 e 25	26/22 e 25	210	2	0,2	0,88	0,77
RT28HC	27/29 e 28	29/27 e 27	250	2	0,2	0,88	0,77
RT35HC	34/36 e 35	36/34 e 35	240	2	0,2	0,88	0,77

Fonte: Adaptado de RUBITHERM (2023).

Se comparados aos PCMs analisados no artigo/capítulo anterior, é possível observar a exclusão do PCM 44 e inclusão do PCM 18. Essas modificações foram efetuadas pois o PCM 44 apresentou os menores desenhos para conforto térmico nas cidades

analisadas. Devido à exclusão desse PCM e pelo fato de o PCM 21 ter apresentado o melhor desempenho do artigo/capítulo anterior, optou-se por incluir o PCM 18 para verificar se uma TMF mais baixa resultaria em melhor desempenho, principalmente nas cidades mais frias.

Os PCMs foram incorporados com 3cm de espessura na camada interna da parede, na superfície em contato com o ambiente interno. Para inserção das características específicas do PCM no EnergyPlus, foi adotado o método de histerese do material conforme apresentado, discutido e recomendado por Al-Janabi e Kavgic (2019).

#### 4.2.4 Cidades avaliadas

Para avaliar o desempenho dos PCMs para diferentes climas brasileiros, foram escolhidas 95 cidades considerando a classificação geral de Köppen-Geiger e o Zoneamento Bioclimático da NBR 15220 (ABNT, 2005). A seleção buscou a maior variabilidade possível de parâmetros climáticos, mesmo em cidades na mesma ZB. Para isso, foi levado em consideração diferentes latitudes, distribuição geográfica, altitudes, temperaturas médias, mínimas e máximas anuais, velocidades do vento, radiação direta normal e umidade relativa (Figura 16, a e b).

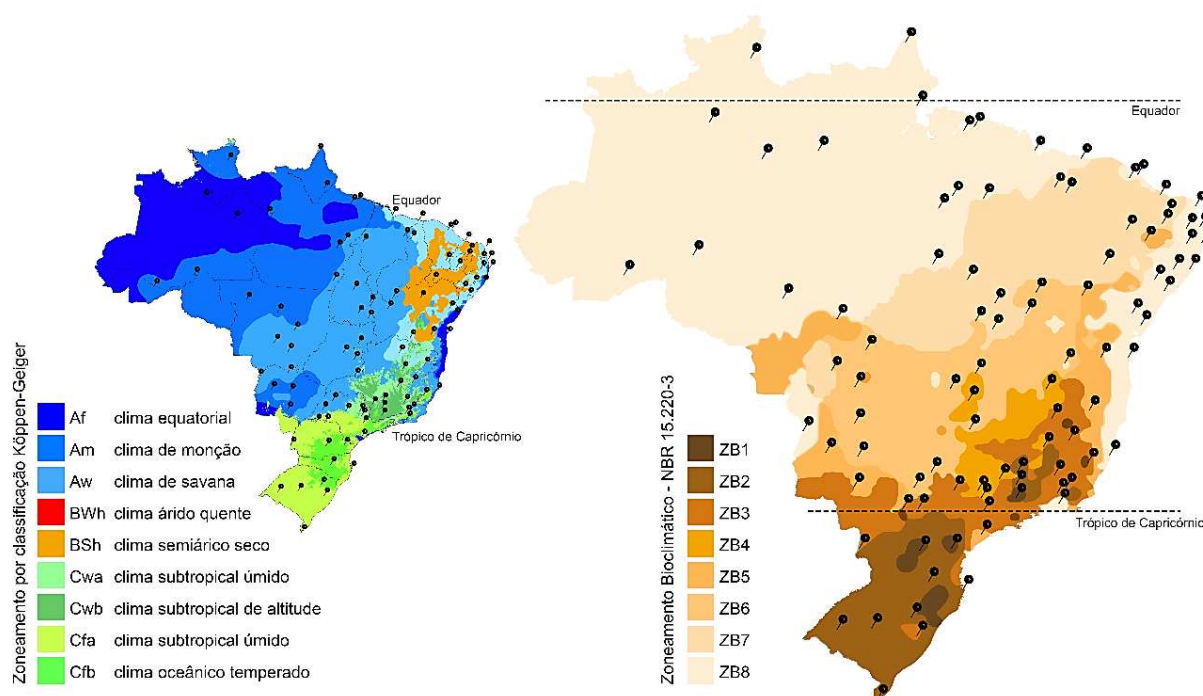


Figura 16 Cidades selecionadas para simulação plotadas sobre o mapa do Brasil (a) Classificação Climática de Köppen-Geiger (b) Classificação Climática da NBR 15220.

Figura 18 com maior qualidade no Apêndice B

Fonte: Elaborado pelos autores, adaptado de Beck et al (2018) e ABNT (2005).

Foram adotados arquivos INMET obtidos na base do Climate.OneBuilding.Org (2022) para quase todas as simulações. As exceções foram as cidades de Monte Azul (MG), única cidade mineira pertencente a ZB7 com arquivo climático disponibilizado apenas em TMY, e Parauapebas (PA), que apresentava divergências entre as condições climáticas dos arquivos INMET e TMY, com temperaturas abaixo das normais climatológicas com maior coerência no TMY.

A Tabela 14 apresenta todas as cidades selecionadas agrupadas em suas respectivas ZBs. Junto ao nome das cidades, é apresentada a latitude, a temperatura mínima e máxima (Temp Mín/Máx), as médias anuais de temperatura (Temp. M.A.), de radiação direta normal (radiação M.A.) e de umidade relativa (Umidade relativa M.A.) e a altitude. O Apêndice C permite uma análise mais detalhada por meio de uma representação BoxPlot das temperaturas mínimas, médias e máximas das cidades da Tabela 14.

Tabela 14 Características climáticas das cidades analisadas

ZB	Cidade	Latitude	Temp Mín/ Máx (°C)	Temp. M.A. (°C)	radiação M.A. (Wh/m <sup>2</sup> dia)	Umidade relativa M.A. (%)	Altitude (m)
ZB1	1 - Campos do Jordão (SP)	22° 44'	2.8/ 28.0	15.3	3847	80	1628
	2 - Curitiba (PR)	25° 25'	3.7/ 32.2	17.4	3220	79	934
	3 - Maringá (PR)	23° 25'	6.8/ 35.4	23.0	4699	66	596
	4 - Bento Gonçalves (RS)	29° 10'	2.7/ 33.1	17.2	4090	78	691
	5 - Poços de Caldas (MG)	21° 47'	0.3/ 30.7	17.9	4300	79	1196
ZB2	6 - Varginha (MG)	21° 33'	5.9/ 32.8	19.6	4444	74	916
	7 - Maria da Fé (MG)	22° 18'	1.3/ 29.0	16.3	4193	83	1278
	8 - Teresópolis (RJ)	22° 24'	5.6/ 29.8	17.8	3657	84	871
	9 - Piracicaba (SP)	22° 42'	5.3/ 34.8	20.9	4636	74	547
	10 - Inácio Martins (PR)	25° 34'	0.4/ 28.5	16.3	3367	82	509
	11 - Chuí (RS)	33° 41'	1.1/ 35.5	17.2	4507	80	22
	12 - Santa Maria (RS)	29° 41'	1.1/ 38.3	19.0	4347	76	151
	13 - Alegrete (RS)	29° 47'	1.1/ 37.7	19.2	4993	73	102
	14 - Curitiba (SC)	27° 16'	0.5/ 31.3	16.1	3562	80	987
	ZB3	15 - Belo Horizonte (MG)	19° 55'	8.3/ 34.8	21.8	4858	68
16 - Diamantina (MG)		18° 14'	9.7/ 30.1	18.6	4674	78	1113
17 - Timóteo (MG)		19° 34'	14.1/ 34.6	22.8	4205	72	333
18 - Juiz de Fora (MG)		21° 41'	9.2/ 31.1	18.6	3753	82	695
19 - São Paulo (SP)		23° 33'	8.5/ 33.8	19.6	3689	72	760
20 - Sorocaba (SP)		23° 30'	8.5/ 33.8	19.6	4364	72	601
21 - Dourados (MS)		22° 13'	4.3/ 37.4	22.7	4835	69	430
22 - Londrina (PR)		23° 18'	4.2/ 36.4	21.8	4712	77	585
23 - Foz do Iguaçu (PR)		25° 32'	1.3/ 37.5	21.5	4642	80	164
24 - Porto Alegre (RS)		30° 01'	2.8/ 37.4	20.0	4188	74	10
25 - Florianópolis (SC)		27° 35'	5.1/ 31.9	20.9	3634	75	3
26 - Valença (RJ)		22° 14'	6.1/ 35.5	22.1	4105	77	560
ZB4	27 - Uberlândia (MG)	18° 55'	8.9/ 34.4	22.9	5073	59	863
	28 - Bauru (SP)	22° 18'	5.0/ 36.0	20.8	4807	73	526
	29 - Pires do Rio (GO)	17° 18'	7.6/ 35.1	22.9	5210	71	758
	30 - Brasília (DF)	15° 47'	11.2/ 32.7	21.1	4895	66	1171
ZB	31 - Vitória da Conquista (BA)	14° 51'	9.9/ 33.7	20.6	4348	80	923

	32 - Guarimiranga (CE)	4° 15'	16.4/ 28.5	20.7	4709	89	900
	33 - Alegre (ES)	20° 45'	10.0/ 39.3	24.0	4567	73	254
	34 - Teófilo Otoni (MG)	17° 51'	11.3/ 34.7	22.4	4129	77	334
	35 - Iguapé (SP)	24° 42'	4.5/ 36.5	21.1	3031	86	3
	36 - Sorriso (MT)	12° 32'	13.5/ 36.9	25.4	4234	71	365
	37 - Miranda (MS)	20° 14'	7.2/ 38.8	24.6	4745	68	125
	38 - Niterói (RJ)	22° 52'	10.8/ 34.8	21.9	4490	78	2
ZB6	39 - Paranã (TO)	12° 36'	12.8/ 39.6	25.9	5361	67	274
	40 - Santa Rita de Cassia (BA)	11° 0'	11.5/ 39.5	26.1	5983	60	440
	41 - Irecê (BA)	11° 18'	14.0/ 36.5	23.9	5699	65	721
	42 - Serra Talhada (PE)	7° 59'	16.1/ 36.6	25.3	5697	66	429
	43 - Montes Claros (MG)	16° 44'	9.0/ 36.8	23.7	5630	62	648
	44 - Prest. Prudente (SP)	22° 07'	8.3/ 36.5	23.8	5053	62	475
	45 - Goiânia (GO)	16° 40'	6.7/ 37.8	23.2	4941	66	749
	46 - Rondonópolis (MT)	16° 28'	9.7/ 40.5	25.5	4828	68	227
	47 - Paranatinga (MT)	14° 25'	9.8/ 38.5	24.5	4657	70	460
	48 - Campo Grande (MS)	20° 28'	8.0/ 37.9	23.4	4780	66	532
	49 - Coxim (MS)	18° 30'	7.8/ 39.1	24.7	4957	72	238
	ZB7	50 - Palmas (TO)	10° 21'	17.2/ 38.1	26.8	4670	66
51 - Dianópolis (TO)		11° 37'	17.5/ 35.5	24.2	5240	69	693
52 - Barreiras (BA)		12° 09'	12.3/ 38.2	25.1	6028	60	452
53 - Barbalha (CE)		7° 18'	16.1/ 36.2	25.6	5618	68	414
54 - Imperatriz (MA)		5° 31'	17.2/ 37.2	26.9	4045	74	116
55 - Caxias (MA)		4° 51'	17.3/ 37.8	26.4	4988	76	66
56 - Patos (PB)		7° 01'	18.8/ 37.7	27.2	5933	62	242
57 - Petrolina (PE)		9° 23'	18.6/ 37.2	26.9	5552	58	376
58 - Teresina (PI)		5° 05'	17.4/ 39.9	27.7	5147	68	72
59 - Caicó (RN)		6° 27'	18.9/ 38.0	27.8	5811	60	151
60 - Mossoró (RN)		5° 11'	17.5/ 35.2	26.7	5624	72	16
61 - Monte Azul (MG)		15° 09'	12.1/ 37.6	24.1	5812	62	582
62 - M. Alegre de Goiás (GO)		13° 15'	13.8/ 36.2	25.0	5461	67	557
63 - Cuiabá (MT)		15° 35'	9.6/ 40.0	26.3	4649	71	176
ZB8		64 - Rio Branco (AC)	9° 58'	11.1/ 36.0	25.1	3259	83
	65 - Macapá (AP)	0° 02'	19.7/ 36.0	25.8	3856	83	16
	66 - Oiapoque (AP)	3° 49' N	19.9/ 35.4	25.6	3362	85	10
	67 - Manaus (AM)	3° 4'	20.6/ 37.0	27.3	2596	80	92
	68 - Barcelos (AM)	0° 58'	20.3/ 35.9	26.3	3199	85	47
	69 - Parintins (AM)	2° 37'	22.3/ 37.0	27.5	3258	79	27
	70 - Belém (PA)	1° 12'	22.1/ 34.4	27.2	3663	80	10
	71 - Marabá (PA)	5° 22'	18.6/ 35.9	26.5	3755	79	84
	72 - Parauapebas (PA)	6° 04'	17.9/ 31.3	23.7	3568	80	18
	73 - Castanhal (PA)	1° 17'	20.3/ 35.0	26.2	3335	82	41
	74 - Santana do Araguaia (PA)	9° 19'	17.6/ 38.5	26.3	4238	75	160
	75 - Porto Velho (RO)	8° 45'	16.8/ 36.3	25.9	2911	83	85
	76 - Boa Vista (RR)	2°49' N	21.2/ 36.2	27.0	3737	77	85
	77 - Maceió (AL)	9° 39'	18.3/ 34.2	25.5	5067	79	16
	78 - Arapiraca (AL)	9° 45'	17.6/ 36.3	24.8	4614	79	264
	79 - Salvador (BA)	13° 38'	20.4/ 33.9	25.9	5015	78	8
	80 - Feira de Santana (BA)	12° 16'	14.3/ 36.5	24.6	4136	77	234
	81 - Ilhéus (BA)	14° 47'	14.0/ 33.4	23.4	4721	85	52
	82 - Fortaleza (CE)	3° 43'	21.0/ 32.4	26.7	5485	76	21
	83 - São Luís (MA)	2° 31'	22.1/ 32.8	26.8	4355	82	24
	84 - João Pessoa (PB)	7° 07'	19.6/ 31.8	26.0	4915	77	47
	84 - Campina Grande (PB)	7° 13'	16.6/ 32.9	23.6	4264	78	551
	86 - Recife (PE)	8° 03'	18.5/ 32.1	25.8	4809	75	4
	87 - Caruaru (PE)	8° 16'	12.8/ 33.4	23.3	4359	76	554
	88 - Parnaíba (PI)	2° 54'	19.2/ 37.6	27.3	5112	73	5
	89 - Natal (RN)	5° 47'	20.4/ 34.6	26.9	5500	73	30
	90 - Aracaju (SE)	10° 54'	19.2/ 31.8	26.5	5048	75	4
91 - Carira (SE)	10° 21'	15.4/ 35.8	24.2	4559	79	351	
92 - Vitória (ES)	20° 19'	14.2/ 37.0	24.4	4739	77	3	
93 - Rio de Janeiro (RJ)	22° 54'	10.9/ 37.0	23.6	4379	79	2	
94 - Juína (MT)	11° 22'	12.0/ 35.7	24.8	3647	79	442	
95 - Corumbá (MS)	19° 0'	4.0/ 40.0	25.9	4623	70	118	

Fonte: Adaptado de ABNT (2005), INMET (2022) e Pereira et al. (2017).

#### 4.2.5 Dados de saída de simulação

As simulações foram executadas para as 8760 horas do ano. Foram solicitados como dados de saída a temperatura externa e interna do ar, a temperatura operativa interna e o fluxo do ar pelas aberturas, variáveis necessárias para determinar o percentual de horas em conforto (PHC) de acordo com a ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020). Embora solicitados os dados de saída para as 24h do dia, foram considerados os resultados de conforto das 8h às 18h, horário compatível com a maior parte das atividades de escritório. A combinação dos PCMs e cidades apresentadas ao longo dos procedimentos metodológicos resultou em 570 casos simulados com PCM e 95 CBs, sem PCM.

#### 4.2.6 Análise dos parâmetros climáticos

##### 4.2.6.1 Impacto dos parâmetros climáticos

Inicialmente, foi aplicado o método de *machine learning* Gradient Boosting para avaliar o impacto de cada um dos parâmetros climáticos nos resultados de PHC. O método foi aplicado através da linguagem de programação Python e está disponível na biblioteca Scikit-learn (PEDREGOSA et al., 2011). O Gradient Boosting soluciona problemas de regressão e classificação que combina resultados de preditores fracos para gerar um modelo preditivo robusto ao final do processo. Na técnica de Boosting, cada classificador fraco é treinado com um conjunto de dados, de forma sequencial e adaptativa, onde um modelo base depende dos anteriores para, ao final do processo, serem combinados de uma maneira determinística (LEE et al., 2021; LIU et al., 2021).

As configurações *default* do método de *Gradient Boosting* foram adotadas, exceto o número de estimadores, que foi definido em 4000 com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) dos modelos de regressão para as cidades.

Após o treinamento e avaliação da qualidade dos modelos de regressão obtidos, a importância dos parâmetros climáticos nos valores de PHC foi quantificada através da aplicação do método *Feature Importance*. O método avalia o impacto não linear de cada uma das variáveis independentes na variável dependente, atribuindo pesos para prever sua importância. A aplicação do método *Feature Importance* pode ser encontrada em Hosseini, Bigtashi, Lee (2020) que o utilizaram para determinar a importância dos parâmetros climáticos na construção de arquivos climáticos.

Para esse estudo, a PHC foi a variável dependente, enquanto a Temperatura de bulbo seco (TBS), Temperatura de ponto de orvalho (TPO), Umidade relativa (UR), Radiação infravermelha (Rinf), Radiação Direta (Rdir), Radiação Difusa (Rdif), Direção do Vento (Vdir) e Velocidade do Vento (Vvel), foram as variáveis independentes. Tais parâmetros foram selecionados por serem levados em consideração pelo EnergyPlus para as simulações termoenergéticas (ENERGYPLUS, 2020).

Deste modo, após a aplicação do método Gradient Boosting e do Feature Importance, foram obtidos os impactos dos nove parâmetros climáticos no PHC para os CBs e para todos os casos com PCM nas 95 cidades.

Após a obtenção do impacto de cada um dos parâmetros ambientais, foi aplicada uma Análise de Componentes Principais (PCA) através da linguagem de programação R. A PCA foi utilizada para obter o impacto geral dos parâmetros climáticos no desempenho da cidade. Este procedimento permitiu identificar a influência dos parâmetros climáticos das cidades que possuem maior potencial do PCM em proporcional conforto.

Em seguida, foi aplicado um recorte e um novo PCA em que apenas as cidades que apresentaram melhoria acima de 10% no PHC foram avaliadas. Essa porcentagem foi definida pela subtração dos resultados de conforto dos casos com PCM em relação aos resultados de conforto obtidos no CB.

Após a seleção das cidades, o PCA foi aplicado, inicialmente, com os nove parâmetros climáticos. O impacto dos parâmetros foi utilizado para analisar a variância do modelo obtido pelo PCA. A avaliação da qualidade do modelo foi realizada por meio da soma dos percentuais das dimensões 1 e 2, isto é, da capacidade de explicação da variância do modelo pelos parâmetros de maior impacto em cada uma das duas dimensões.

Os parâmetros de menor impacto foram excluídos e um novo PCA foi aplicado, somente com os parâmetros de maior impacto nas dimensões 1 e 2. Esse novo PCA teve como finalidade obter um modelo com maior capacidade de explicação da variância e, conseqüentemente, melhor capacidade de generalização dos resultados.

#### **4.2.6.2 Agrupamento das cidades**

Por fim, um processo de agrupamento hierárquico por meio de *clusters* foi aplicado também com a linguagem R. A definição do número de *clusters* utilizou a biblioteca

NBClust, que apresenta uma metodologia de determinação do número ideal de *clusters* para um banco de dados por meio da avaliação deste mesmo banco por diferentes índices (CHARRAD et al., 2014). Após a definição do número ideal, os *clusters* agruparam as cidades cujo potencial de melhoria era superior 10% no PHC, sob o critério de influência do parâmetro climático sobre essa melhoria.

## 4.3 RESULTADOS

### 4.3.1 Comparação do caso base às simulações com PCMs incorporados

A Tabela 15 apresenta as diferenças entre a Porcentagem de Horas de Conforto (PHC) térmico adaptativo dos casos com PCM subtraídas do caso-base (CB), obtidas a partir dos dados de saída da simulação termoenergética no EnergyPlus. O aumento do conforto térmico pela utilização do PCM é indicado em verde, variando do verde claro para menores porcentagens ao verde escuro, para maiores porcentagens. Os resultados negativos (redução do conforto devido ao uso do PCM) estão em vermelho: quanto maior a redução, mais escuro o vermelho, quanto menor a redução, mais tende ao rosa.

As médias de aumento ou redução do PHC indicam uma perspectiva da influência da incorporação dos PCMs por cidade e foram utilizadas para classificar os principais casos. As 26 cidades em que a média do aumento do PHC foi maior do que 10% estão marcadas com asterisco (Tabela 15). Essas cidades correspondem, no contexto dessa pesquisa, aos casos de interesse que serão analisados de forma mais detalhada.

Tabela 15 Resultado comparativo entre casos com PCM, CB e média dos 6 PCMs

Cidade	PCM 18	PCM 21	PCM 22	PCM 25	PCM 28	PCM 35	Média
Campos do Jordão (SP) *	23%	31%	21%	21%	16%	14%	21%
Curitiba (PR) *	14%	23%	16%	17%	14%	11%	16%
Maringá (PR)	6%	12%	3%	6%	3%	5%	6%
Bento Gonçalves (RS) *	12%	20%	10%	13%	10%	9%	12%
Poços de Caldas (MG) *	12%	32%	16%	16%	14%	12%	17%
Varginha (MG) *	14%	30%	16%	16%	14%	12%	17%
Maria da Fé (MG) *	19%	36%	21%	20%	15%	13%	21%
Teresópolis (RJ) *	14%	31%	15%	16%	11%	10%	16%
Piracicaba (SP) *	10%	23%	11%	10%	9%	8%	12%
Inácio Martins (PR) *	17%	26%	18%	18%	14%	11%	17%
Chuí (RS) *	11%	16%	12%	10%	8%	8%	11%
Santa Maria (RS)	9%	14%	10%	9%	6%	6%	9%
Alegrete (RS)	8%	15%	11%	9%	5%	6%	9%

Curitiba (SC)	14%	21%	16%	16%	13%	11%	15%
Belo Horizonte (MG) *	11%	24%	13%	12%	11%	10%	14%
Diamantina (MG) *	18%	29%	22%	25%	21%	15%	22%
Timóteo (MG)	8%	17%	9%	8%	7%	7%	9%
Juiz de Fora (MG) *	14%	25%	17%	19%	15%	11%	17%
São Paulo (SP) *	13%	23%	15%	17%	13%	10%	15%
Sorocaba (SP) *	9%	20%	11%	11%	7%	7%	11%
Dourados (MS)	7%	15%	9%	7%	5%	5%	8%
Londrina (PR)	6%	16%	8%	1%	-2%	0%	5%
Foz do Iguaçu (PR)	5%	10%	7%	5%	2%	3%	5%
Porto Alegre (RS) *	10%	16%	11%	10%	8%	7%	10%
Florianópolis (SC) *	9%	15%	12%	13%	12%	9%	12%
Valença (RJ)	10%	16%	8%	7%	4%	5%	8%
Uberlândia (MG)	5%	14%	6%	3%	1%	5%	6%
Bauru (SP) *	9%	24%	12%	11%	9%	8%	12%
Pires do Rio (GO)	4%	14%	4%	1%	-1%	4%	4%
Brasília (DF) *	12%	33%	13%	18%	19%	12%	18%
Vitória da Conquista (BA) *	9%	31%	13%	13%	11%	9%	14%
Guaramiranga (CE) *	18%	28%	26%	28%	26%	19%	24%
Alegre (ES)	3%	11%	3%	1%	-1%	1%	3%
Teófilo Otoni (MG)	7%	17%	9%	8%	5%	7%	9%
Iguapé (SP) *	10%	18%	13%	13%	11%	10%	13%
Sorriso (MT)	2%	5%	2%	-2%	-4%	1%	1%
Miranda (MS)	3%	10%	4%	1%	-2%	1%	3%
Niterói (RJ) *	11%	20%	14%	16%	13%	11%	14%
Paraná (TO)	0%	2%	0%	-4%	-6%	-2%	-2%
St. Rita de Cassia (BA)	0%	3%	1%	-3%	-4%	-1%	-1%
Irecê (BA)	6%	12%	6%	5%	4%	6%	7%
Serra Talhada (PE)	4%	7%	5%	3%	3%	4%	4%
Montes Claros (MG)	6%	14%	8%	7%	5%	6%	8%
Prest. Prudente (SP)	5%	9%	7%	5%	3%	4%	6%
Goiânia (GO)	5%	15%	5%	3%	3%	5%	6%
Rondonópolis (MT)	3%	7%	4%	1%	0%	2%	3%
Paranatinga (MT)	3%	10%	2%	0%	-1%	2%	3%
Campo Grande (MS)	7%	15%	9%	9%	7%	7%	9%
Coxim (MS)	3%	9%	4%	2%	0%	2%	3%
Palmas (TO)	2%	2%	2%	-1%	-3%	1%	1%
Dianópolis (TO)	5%	10%	6%	5%	3%	5%	6%
Barreiras (BA)	2%	7%	2%	-1%	-3%	1%	1%
Barbalha (CE)	2%	2%	1%	-1%	-3%	1%	0%
Imperatriz (MA)	0%	1%	0%	-4%	-5%	-2%	-2%
Caxias (MA)	0%	1%	0%	-4%	-6%	-2%	-2%
Patos (PB)	1%	1%	0%	-3%	-5%	-2%	-1%
Petrolina (PE)	2%	3%	2%	-1%	-3%	0%	1%
Teresina (PI)	-1%	-1%	-1%	-5%	-6%	-4%	-3%
Caicó (RN)	0%	1%	0%	-3%	-5%	-2%	-2%
Mossoró (RN)	0%	1%	0%	-4%	-5%	-1%	-2%
Monte Azul (MG)	3%	9%	3%	-2%	-5%	2%	2%
Monte Alegre de Goiás (GO)	1%	4%	1%	-4%	-7%	-1%	-1%
Cuiabá (MT)	1%	3%	1%	-3%	-4%	-1%	-1%
Rio Branco (AC)	3%	5%	3%	0%	-2%	2%	2%
Macapá (AP)	2%	3%	2%	-2%	-3%	1%	1%

Oiapoque (AP)	2%	3%	2%	-1%	-2%	2%	1%
Manaus (AM)	-1%	0%	-1%	-3%	-5%	-3%	-2%
Barcelos (AM)	1%	2%	1%	-3%	-5%	-1%	-1%
Parintins (AM)	0%	0%	-1%	-4%	-5%	-3%	-2%
Belém (PA)	0%	-3%	-1%	-2%	-2%	0%	-1%
Marabá (PA)	0%	0%	-1%	-4%	-7%	-2%	-2%
Parauapebas (PA)	4%	6%	5%	1%	-1%	2%	3%
Castanhal (PA)	2%	2%	2%	-1%	-3%	1%	1%
Sant. do Araguaia (PA)	0%	1%	0%	-4%	-7%	-2%	-2%
Porto Velho (RO)	1%	2%	1%	-2%	-4%	0%	0%
Boa Vista (RR)	1%	1%	0%	-4%	-5%	-2%	-2%
Maceió (AL)	3%	4%	3%	1%	0%	3%	2%
Arapiraca (AL)	5%	8%	6%	4%	3%	4%	5%
Salvador (BA)	1%	1%	0%	-4%	-6%	-1%	-2%
Feira de Santana (BA)	6%	11%	7%	5%	3%	5%	6%
Ilhéus (BA) *	8%	19%	10%	9%	8%	8%	10%
Fortaleza (CE)	1%	1%	0%	-4%	-5%	-1%	-1%
São Luís (MA)	0%	1%	0%	-4%	-6%	-1%	-2%
João Pessoa (PB)	1%	2%	1%	-4%	-5%	-1%	-1%
Campina Grande (PB)	8%	16%	10%	9%	9%	8%	10%
Recife (PE)	0%	0%	-1%	-5%	-7%	-2%	-3%
Caruaru (PE) *	8%	20%	10%	8%	8%	8%	10%
Parnaíba (PI)	0%	0%	-1%	-4%	-5%	-2%	-2%
Natal (RN)	2%	2%	2%	2%	-3%	1%	1%
Aracaju (SE)	3%	4%	3%	-2%	-3%	1%	1%
Carira (SE)	8%	16%	10%	8%	8%	8%	10%
Vitória (ES)	5%	14%	6%	5%	4%	4%	6%
Rio de Janeiro (RJ)	6%	17%	6%	10%	14%	6%	10%
Juína (MT)	3%	5%	3%	-1%	-3%	2%	2%
Corumbá (MS)	2%	6%	4%	2%	-1%	0%	2%

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

As cidades mais frias, com TMA iguais ou abaixo de 21°C, consistentemente apresentaram os maiores aumentos no PHC (Tabela 14 e 15 e Figura 17). Essas cidades estão concentradas nas ZBs 1, 2, 3 e 4 e se destacaram devido aos resultados positivos para todos os tipos de PCMs analisados. Além TMA mais baixas, essas cidades apresentam maiores altitudes, com média de 683m. Como exceção, foram obtidos bons desempenhos nas cidades de Piracicaba, Belo Horizonte, Vitória da Conquista, Guaramiranga, Iguapé, Niterói, Ilhéus e Caruaru, com TMAs acima de 21°C e próximas a 23°C. Para esses casos, a TMA influenciou parcialmente o PCM, demandando análise dos demais parâmetros climáticos para explicar a contribuição do material.

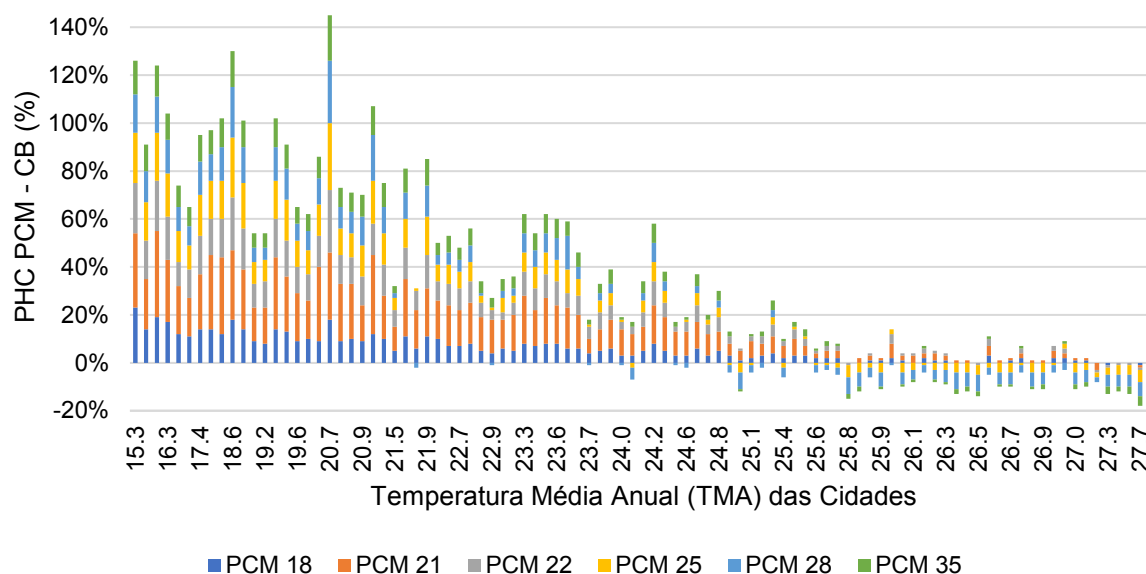


Figura 17 Diferenças entre os PHCs do caso-base (CB) com cada caso com PCM para as 95 cidades em relação às temperaturas médias anuais das cidades  
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Em relação ao tipo de PCM, a TMF de 21°C foi a que proporcionou maior aumento do PHC em relação ao CB (Figura 18), com média de 11% e máximo de 36% para Maria da Fé (MG). Na sequência, estão os PCMs 22 e 18, com média de 6% (Figura 18). Os piores resultados foram obtidos para os PCM 28 e 25, justificado pelo aumento da inércia térmica em cidades quentes, como as localizadas nas ZB7 e ZB8, com TMA próximas a 26°C (Tabela 14). Nas cidades da ZB8, a NBR 15220 (ABNT, 2005) não recomenda inércia térmica nos fechamentos verticais das habitações naturalmente ventiladas, portanto, seu uso pode piorar as condições de conforto, como confirmado pelos resultados (Figura 18 e Tabela 15).

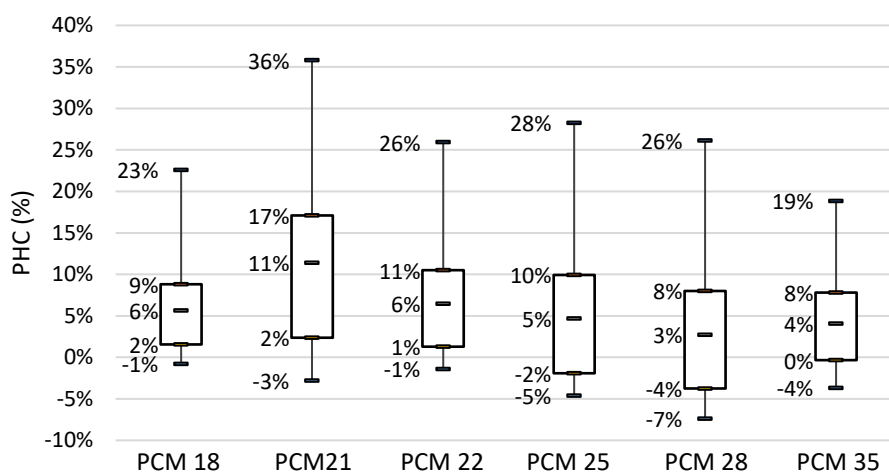


Figura 18 Diferenças entre os casos com PCM e seus respectivos CB, para as 95 cidades  
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A discussão a seguir pretende comparar os resultados obtidos até esta etapa com o encontrado na literatura. Os resultados alcançados corroboram com as conclusões obtidas por Brito et al. (2017) e Pons e Stanescu (2017), que indicaram melhora do desempenho de ambientes com PCMs nas ZBs mais frias, de 1 a 5. Além disso, os autores recomendaram uso ponderado de PCMs nas zonas mais quentes, resultado compatível com os obtidos nessa pesquisa. A saber, apenas duas cidades das ZBs mais quentes (considerando as ZB 6, 7 e 8), Ilhéus e Caruaru, obtiveram resultados significativamente positivos, acima de 10%.

Após Maria da Fé, Brasília apresentou resultados superiores às demais cidades analisadas para o PCM 21, assim como indicado nos trabalhos de Marin et al. (2016) e Saffari et al. (2017). Embora os autores tenham utilizado a economia de energia como indicador de desempenho, a cidade de Brasília atingiu 33% de aumento do PHC para o PCM 21 e aumento médio de 18% para os seis tipos de PCMs.

Ainda sobre Brasília, Marin et al. (2016) e Saffari et al. (2017) utilizaram uma aproximação contrária à adotada nesse trabalho, em que os autores adaptaram o PCM à cidade, indicando a TMF de 25°C como mais adequada para a obtenção de desempenho. Nesta pesquisa, considerando apenas conforto térmico adaptativo, as TMFs mais adequadas foram de 21°C, seguida de 28°C. Além da diferença no objetivo, a divergência das TMF pode ser compreendida pelas diferenças na geometria, nas condições de contorno das simulações e nas demais propriedades do PCM.

Almeida, Brandalise e Mizgier (2022) obtiveram 100% das horas em conforto térmico com a adoção de PCM com TMF de 22°C para habitações de interesse social em Brasília. Porém, os resultados encontrados nesta pesquisa não identificaram o PCM com uma TMF de 22°C como o melhor entre os avaliados. Novamente, essa diferença se deve ao tipo de material e instalação que, apesar de condições semelhantes, não possuem os mesmos parâmetros. Nesta pesquisa, a TMF de 21°C proporcionou máximo de 95% das horas em conforto térmico no ambiente em algumas horas do ano, enquanto o CB proporcionou máximo de 58% e o PCM 22 proporcionou 70%.

Os resultados encontrados em Manaus e Fortaleza também se assemelham aos de Saffari et al. (2017). As duas cidades apresentaram baixo desempenho após incorporação de PCMs, com média em Manaus para os seis PCMs de -1%, sem que

nenhum aumentasse a PHC em relação ao CB. Fortaleza também apresentou média de -1%, entretanto, os PCMs 18, 21 e 22 apresentaram melhorias pouco expressivas no PHC, de 0,6%, 0,1% e 0,2% respectivamente.

Em relação a Palmas, Almeida, Brandalise e Mizgier (2022) obtiveram conforto em aproximadamente 82% das horas do ambiente analisado com PCM, o que não corresponde aos valores absolutos (sem subtração do PHC do CB) encontrados em nenhum dos PCMs testados: PCM 18 (30,8%), PCM 21 (31,2%), PCM 22 (30,7%), PCM 25 (28,0%), PCM 28 (26,3%) e PCM 35 (29,6%).

#### **4.3.2 Análise da influência dos parâmetros climáticos**

Como indicado por Saffari et al. (2017) e confirmado nesta pesquisa, há a necessidade de investigar a influência da combinação dos parâmetros climáticos para o funcionamento adequado do PCM. Em algumas poucas cidades de ZBs mais frias os PCMs apresentaram baixo desempenho, como Maringá (TMA de 23,0°C) e Londrina (TMA de 21,8°C) e, em algumas poucas cidades das ZBs mais quentes, o PCM apresentou altos PHC, como, Caruaru (TMA de 23,3°C) e Ilhéus (TMA de 23,4°C). Esse aspecto aparenta ser uma imprecisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ABNT, 2005)<sup>1</sup> e, portanto, a classificação das zonas bioclimáticas foi desconsiderada parcialmente das análises.

A quantificação da contribuição de cada um dos parâmetros climáticos para o PHC dos CBs e dos casos com PCM resultou em uma maior compreensão do fenômeno, exemplificado na Tabela 16 e Figura 19 (a e b) com os resultados para Maria da Fé, cidade com maior desempenho geral alcançado para o PCM 21 (Tabela 15).

---

<sup>1</sup> Até o momento de defesa deste trabalho em fevereiro de 2023, o Zoneamento Bioclimático Brasileiro da NBR 15.220 está em revisão desde 2022 no âmbito da ABNT.

Tabela 16 Porcentagem da influência dos parâmetros climáticos na PHC em Maria da Fé

		CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
Parâmetros Climáticos	TBS	24%	39%	27%	37%	33%	36%	33%
	TPO	3%	3%	3%	4%	5%	3%	3%
	UR	10%	3%	16%	6%	6%	6%	7%
	P	8%	12%	6%	9%	9%	9%	9%
	R inf	3%	3%	6%	4%	3%	4%	3%
	R dir	10%	12%	15%	9%	10%	10%	10%
	R dif	25%	20%	18%	20%	24%	21%	23%
	V dir	13%	6%	7%	8%	8%	8%	8%
	V vel	4%	2%	4%	3%	3%	3%	3%
Indicadores estatísticos	MAE	0.065	0.038	0.008	0.046	0.046	0.055	0.056
	MSE	0.009	0.003	0.000	0.005	0.005	0.007	0.007
	RMSE	0.094	0.058	0.013	0.071	0.070	0.083	0.083
	R <sup>2</sup>	0.963	0.979	0.996	0.971	0.970	0.964	0.965

Legenda: temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de ponto de orvalho (TPO), umidade relativa (UR), radiação infravermelha (Rinf), radiação direta (Rdir), radiação difusa (Rdif), direção do vento (Vdir), velocidade do vento (Vvel), erro médio absoluto (MAE), erro médio quadrático (MSE), raiz do erro médio quadrático (RMSE), R-quadrado (R<sup>2</sup>).

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

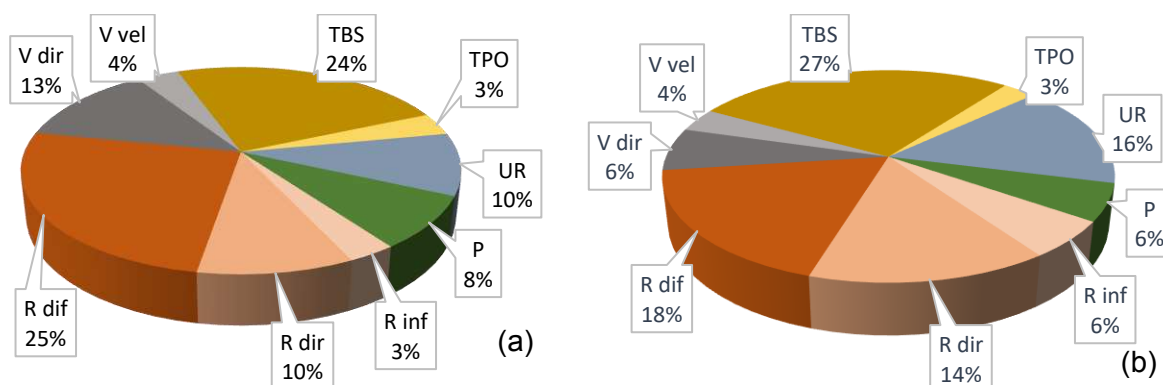


Figura 19 Contribuição dos parâmetros climáticos na cidade de Maria da Fé (a) CB e (b) PCM 21

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Para essa cidade, é possível observar que os maiores contribuintes para o conforto térmico no CB foram Rdif (25%), TBS (24%) e Vdir (13%). Já os casos com PCM, existe uma mudança nas porcentagens, na ordem de importância e nos parâmetros. Os mais influentes para o PCM 21 passaram a ser TBS (27%), Rdif (18%) e UR (16%). O aumento da porcentagem de influência da TBS e Vdir é esperado, visto que o PCM funciona baseado na mudança de fase por diferença de temperatura e por trocas convectivas. Logo, é possível dizer que, para Maria da Fé, a incorporação de PCMs tornou o ambiente mais sensível aos parâmetros mencionados, com destaque para TBS, cuja influência máxima chegou a 38% para o PCM 18, ou 15 pontos percentuais a mais que o CB (Tabela 16).

Após a análise de todas as cidades e dos pesos dos respectivos parâmetros climáticos (Apêndice D), percebeu-se que a TBS se destacou ao apresentar um aumento médio da sensibilidade de 5% para as simulações com PCM. Analisando apenas as cidades das ZBs mais frias (1 a 5), esse aumento foi mais significativo, com média de 10%. Logo, classificar os pesos dos parâmetros climáticos para todas as 95 cidades concomitantemente se mostrou ineficaz, pois na mesma análise consideraria cidades com desempenho significativo (acima de 10% de aumento do PHC), cidades com desempenho mediano/insignificante (entre 0% e 9,9%) e cidades com piora no desempenho (valores negativos).

Portanto, esta foi a indicação de seleção das cidades para determinar quais dos parâmetros climáticos eram os mais relevantes segundo a técnica *Feature Importance*, com aumento médio (considerando os 6 PCMs) superior a 10% na PHC dos casos com PCM em relação ao CB.

Os resultados indicaram que, para as cidades selecionadas, a TBS, UR e Vdir foram os parâmetros climáticos mais relevantes. Na Figura 20, a contribuição da TBS no CB ao lado dos casos com PCMs foi quantificada. É possível observar o aumento da sensibilidade do ambiente com PCM para TBS nos PCMs 18, 21, 22, 25, 28 em relação ao aumento existente, porém menos expressivo, do caso com o PCM 35.

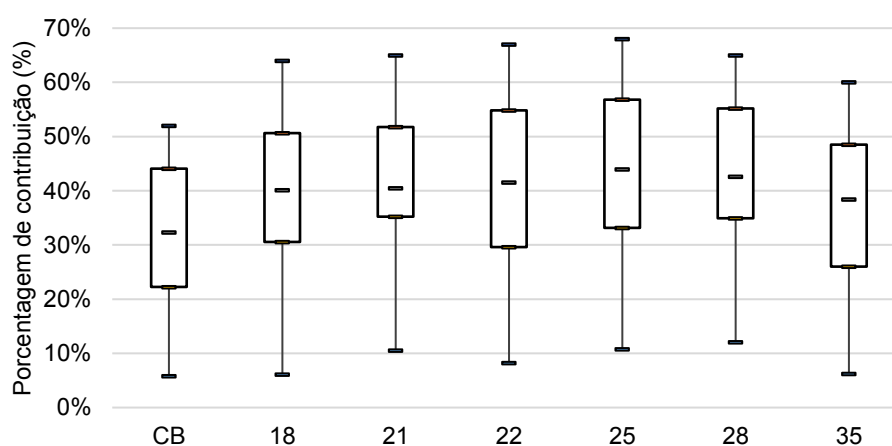


Figura 20 Contribuição da TBS no conforto do CB e dos PCMs testados  
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Apesar do PCM 21 ter apresentado os melhores resultados em relação ao aumento do PHC, as medianas da influência da TBS em todos os casos com PCM foram próximas. Os resultados máximos e mínimos afastados em relação às medianas e quartis acompanha o padrão do CB, cuja variação depende do clima da cidade.

Na sequência, as Figuras 21 e 22 apresentam os demais parâmetros climáticos de maior importância, UR e Vdir, onde é possível observar que a presença dos PCM reduziu a influência destes parâmetros no PHC do CB. Isso corrobora, mais uma vez, para considerar a TBS a variável mais influente no funcionamento dos PCMs, com ação diretamente sobre a inércia e atraso térmicos. Deve-se observar, no entanto, que esta redução é mais sutil, visto que as Figuras 21 e 22 apresentam uma diferente escala do eixo das ordenadas em relação à Figura 20, a fim de facilitar a visualização.

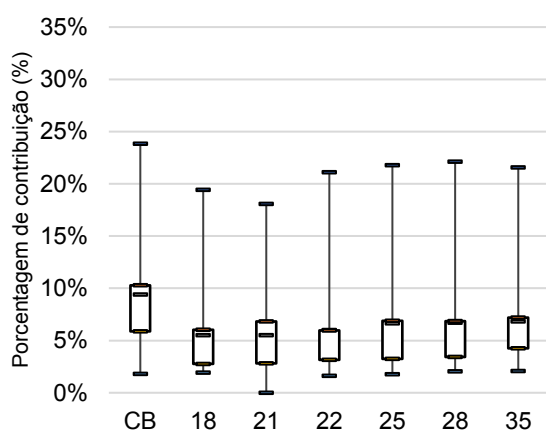


Figura 21 Contribuição da UR no conforto do CB e PCMs testados

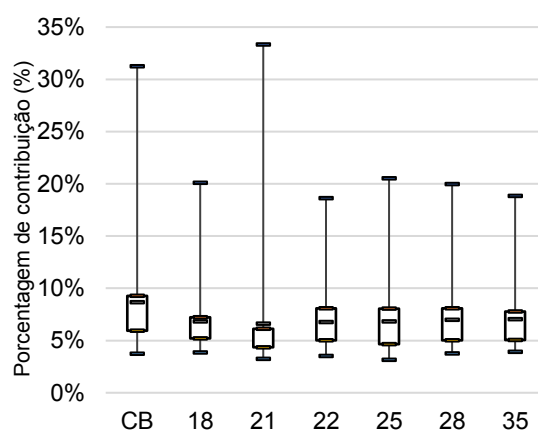


Figura 22 Contribuição da Vdir no conforto do CB e PCMs testados

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A partir das Figuras 21 e 22, é possível estabelecer uma correlação entre UR e Vdir, pois ao aumentar a TBS existe uma tendência de queda da UR. Além disso, a Vdir está diretamente relacionada às trocas convectivas entre o ar e as superfícies, fenômeno de importância para o correto efeito do material. Para as trocas convectivas em ambientes com PCMs, verificou-se que é mais importante a direção de incidência do vento do que sua velocidade no arquivo climático.

#### 4.3.3 Agrupamento das cidades com melhor desempenho

A terceira etapa, a aplicação da técnica de Análise de Componentes Principais (PCA), gera pontuações (*scores*) calculadas após a análise pelo *Feature Importance*. Como essa análise centraliza as médias para que as principais variáveis descrevam melhor o problema, as variáveis menos representativas foram excluídas. Assim, a aproximação dos dados gera uma média mais representativa e o erro quadrático se reduz, o que aumenta a robustez do modelo.

O primeiro teste realizado mostrou que a utilização de todos os parâmetros concomitantemente resultou em uma baixa representatividade, entre 45% e 50%, como mostra a Figura 23.

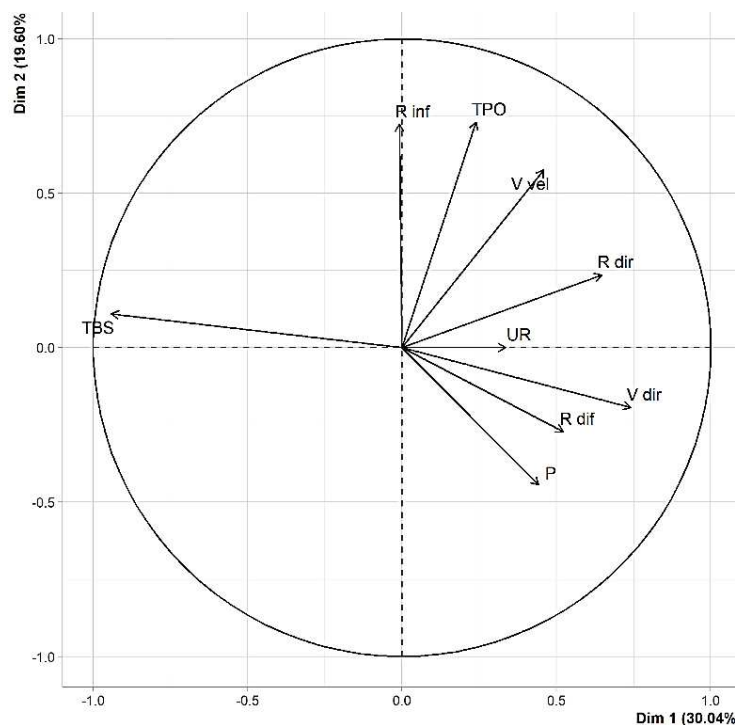


Figura 23 Análise do PCM 21 considerando todos os parâmetros climáticos  
Fonte: Os autores (2023).

A análise considerando a TBS, UR e Vdir aumentou o grau de representatividade do agrupamento para 90%, aplicados aos casos com o mesmo tipo de componentes, ou seja, um para os CBs e seis para os casos com PCMs. As Figuras 24 a 30 (com melhor qualidade no Apêndice E) abrangem as cidades com melhorias em relação ao CB acima de 10% com a divisão em *clusters* (representada em cores) de acordo com os parâmetros climáticos de maior importância já discutidos. Os números nos gráficos *biPlot* representam as cidades de acordo com a legenda: Campos do Jordão (1); Curitiba (2); Bento Gonçalves (3); Poços de Caldas (4); Varginha (5); Maria da Fe (6); Teresópolis (7); Piracicaba (8); Inacio Martins (9); Chuí (10); Curitibaanos (11); Belo Horizonte (12); Diamantina (13); Juiz de Fora (14); São Paulo (15); Sorocaba (16); Porto Alegre (17); Florianópolis (18); Bauru (19); Brasília (20); Vitória da Conquista (21); Guaramiranga (22); Iguape (23); Niterói (24); Ilhéus (25); Caruaru (26).

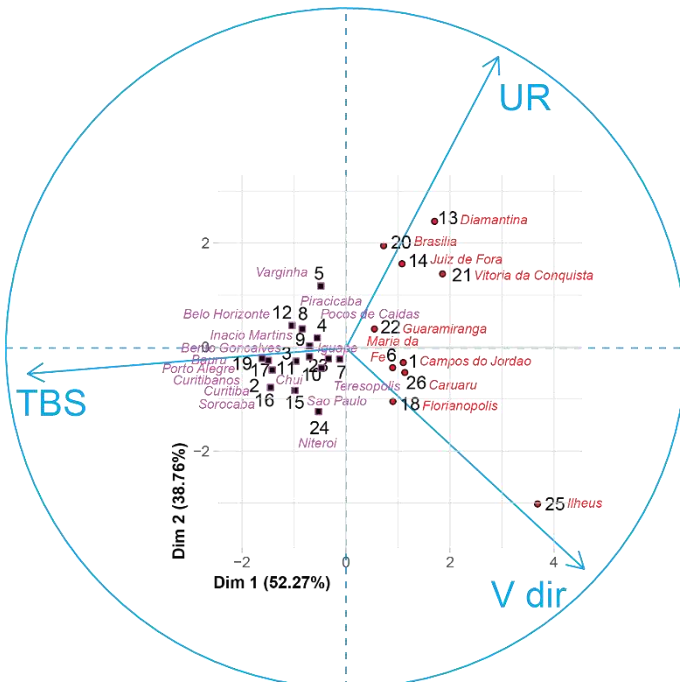


Figura 24 Biplot – Clusters das cidades com os CB sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

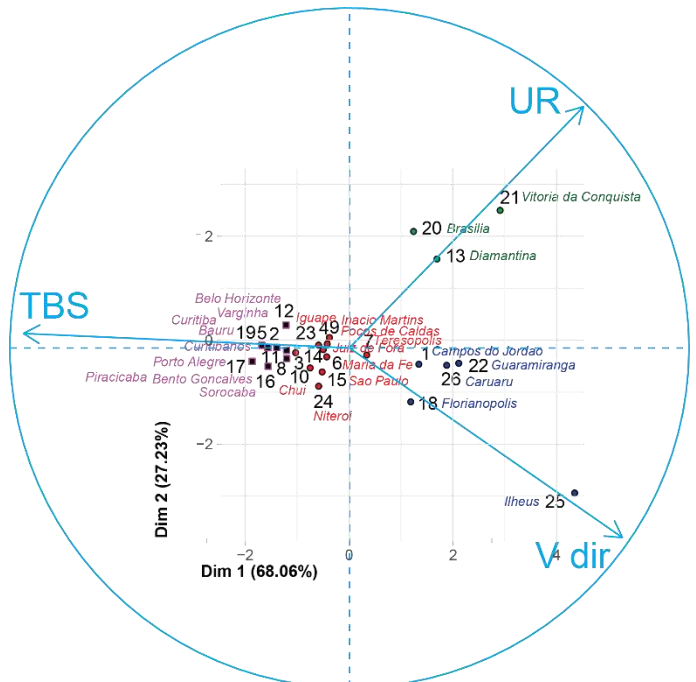


Figura 25 Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 18 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

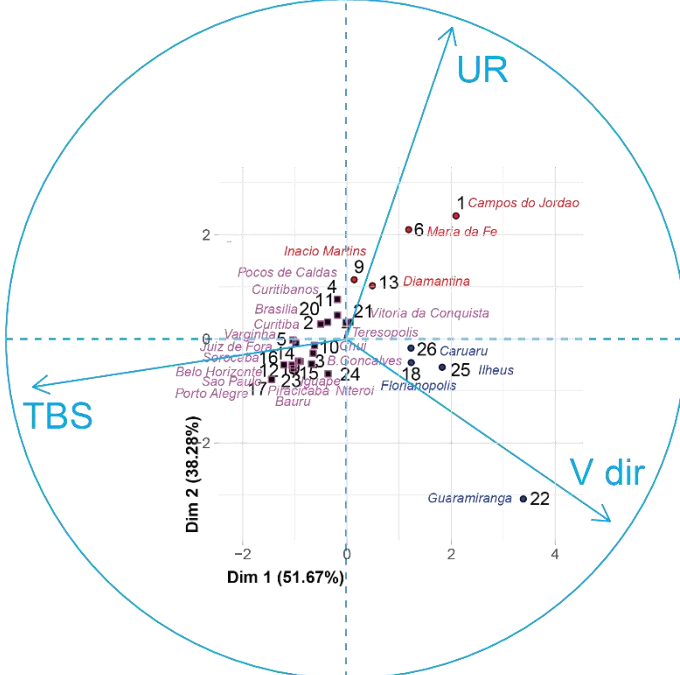


Figura 26 Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 21 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

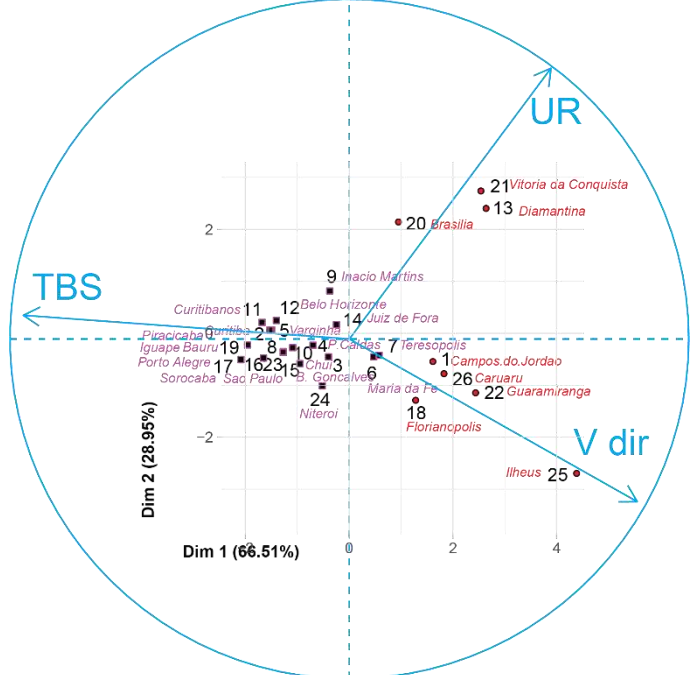


Figura 27 Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 22 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

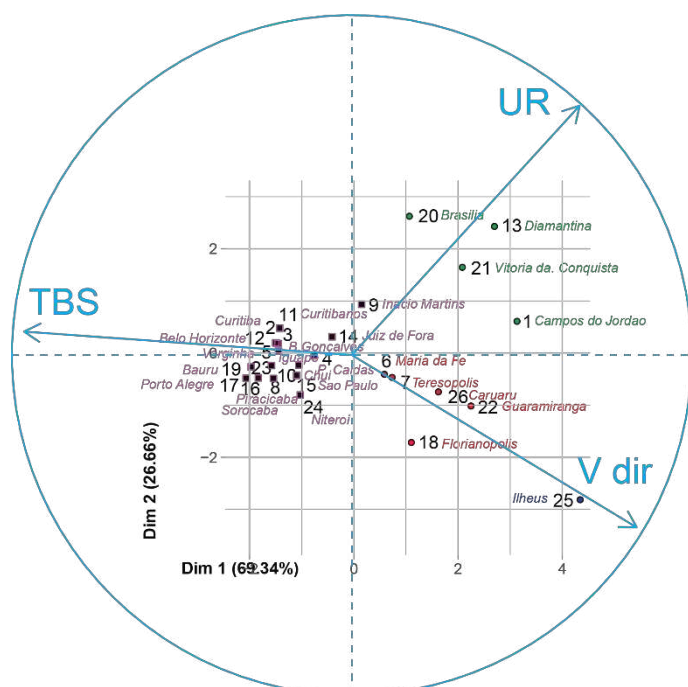


Figura 28 Biplot - *Clusters* das cidades com casos com PCM 25 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

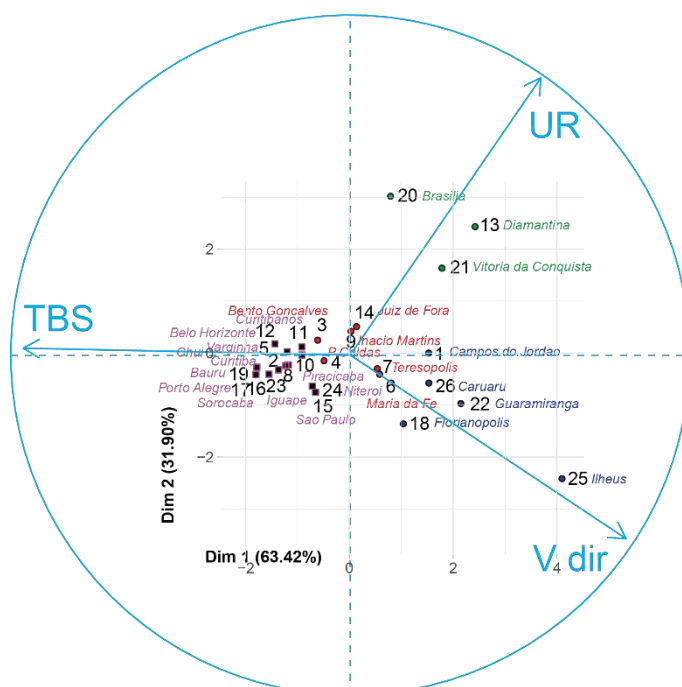


Figura 29 Biplot - *Clusters* das cidades com casos com PCM 28 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

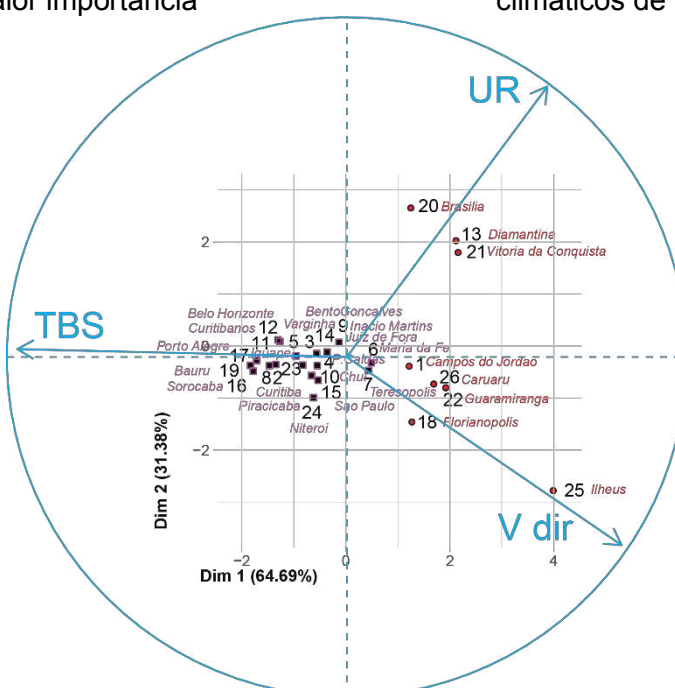


Figura 30 Biplot - *Clusters* das cidades com casos com PCM 35 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância  
Fonte das Figuras 24 a 30: Os autores (2023).

As cores indicam os *clusters* que agrupam as cidades. A proximidade com os eixos dos três parâmetros climáticos de maior importância, TBS, UR e Vdir, indica o quanto essas cidades são sensíveis e, consequentemente, mais influenciadas por cada um

deles. Cidades entre dois parâmetros têm suas influências principais compartilhadas por ambos.

Em todos os casos, as cargas fatoriais do componente 1 e 2 para TBS foram negativas, o que indica que, quanto mais elevadas as temperaturas, menor é a influência do PCM na geração do conforto. Logo, quanto mais próxima a extremidade da seta, menor o valor da dimensão 1, maior a TBS e a possibilidade de gerar conforto é menor. Por esse motivo, as cidades com maior influência da TBS e altas PHC tendem a se concentrar no centro, consequência da PHC dessas cidades já ser elevada.

A Vdir tem o valor do componente fatorial de maior importância positivo para a dimensão 1 e negativo para a dimensão 2. Sabe-se que o ângulo de incidência da direção do vento impacta o coeficiente de pressão na fachada e, conseqüentemente a ventilação no interior dos ambientes. Por conseguinte, a ventilação no interior do ambiente aumenta as trocas convectivas e pode melhorar do desempenho dos PCMs. Porém, a determinação do ângulo em relação à fachada é variável. Assim, embora seja um parâmetro com incertezas para o passo de tempo adotado nas simulações, sua importância foi suficientemente significativa para ser selecionado como parâmetro relevante. Essa situação pode ser evidenciada pela diferença de localização do CB de Guaramiranga na Figura 24 em relação às demais figuras com os casos com PCMs. Para essa cidade, as mudanças na direção do vento podem mudar sua contribuição no PHC em até 23% para o PCM21 (Figura 26).

Já para a UR, o componente fatorial é positivo tanto para o fator 1 quanto para o 2. Como todos os outros parâmetros climáticos, ela é melhor representada pela dimensão 1. Como ela é positiva, a sua influência é diretamente proporcional à capacidade de proporcionar conforto. Logo, quanto mais próxima a cidade está da extremidade da seta, menor é a umidade nela e, quando acima de 80%, menor é a possibilidade de gerar de conforto.

Assim, vemos que a incorporação do PCM 21 em Brasília, cidade com baixa UR, resultou em uma mudança de agrupamento e seu deslocamento para o centro da Figura 26 (se comparado ao CB da Figura 24) indicando uma redução da influência

da TBS e aumento da influência da UR. Além disso, o aumento da UR relativa estabilizou as amplitudes da TBS, já mais baixa devido a influência dos PCMs.

No agrupamento lilás (Figuras 24 a 30), é possível observar um maior aumento da sensibilidade à TBS do conjunto dos casos com PCM. Esse agrupamento contém o maior número de cidades, exceto nas Figuras 25 e 39 referentes aos casos com os PCMs 18 e 28. Para esses casos, foi possível observar a criação de um agrupamento central que contém as cidades cujos casos são influenciados pelos três parâmetros equilibradamente.

As cidades com climas litorâneos, como Florianópolis, Niterói, Ilhéus tiveram casos com maior influência da Vdir, seguida da TBS. Já cidades com elevadas altitudes, como Brasília, Vitória da Conquista, Diamantina e Campos do Jordão tiveram casos fortemente influenciados pela UR. Para os PCMs 18, 25 e 28, algumas dessas cidades foram agrupadas separadamente, (identificadas em verde nas Figuras 25, 28 e 29), o que destaca ainda mais a influência da UR em cidades com elevada altitude.

No caso de Diamantina, o PCM foi capaz de aumentar a influência da UR no conforto (também pela redução da TBS), ao mesmo tempo que aumentou a influência do ângulo da direção do vento, o que fomentou as trocas convectivas e consequentemente o elevado desempenho do PCM para essa cidade (Tabela 15).

Se comparados os resultados obtidos nessa pesquisa aos de Saffari et al. (2017), é possível observar que a classificação climática de Köppen–Geiger que, embora adotada frequentemente, não comporta uma classificação para o tipo de ambiente simulado com PCMs. Na classificação de Köppen–Geiger, o Grupo A corresponde aos climas equatoriais e, dentro do grupo A, Brasília está localizada no Aw, clima quente e seco e Singapura em Af, clima quente e úmido, o que pode dificultar sua comparação/classificação como clima semelhante. Uma análise biplot com contribuição e peso dos parâmetros climáticos poderia contribuir para o entendimento das diferenças entre os desempenhos das simulações com PCM nas cidades mencionadas.

Ao buscar a explicação para o desempenho divergente encontrado nas duas cidades, Saffari et al. (2017) aponta para a diferença de altitude, que influencia a radiação solar por meio da cobertura do céu e influencia o regime de ventos. A radiação direta e difusa são parâmetros climáticos de importância, mas não foram selecionados como

um dos três mais relevantes para as cidades com desempenho em conforto devido a incorporação de PCMs acima de 10% nos climas brasileiros. Entretanto, houve casos em que a radiação (direta e difusa) influenciou no aumento do conforto, como apresentando para Santa Maria, evidenciado na Tabela 16 e Figura 19. A exclusão da radiação solar foi devido à análise com recorte abrangente, que eliminou as especificidades. Para estudos mais restritivos, com menor número de cidades ou focados em apenas uma ou um pequeno grupo de ZBs, é recomendado analisar os efeitos da  $R_{dir}$  e  $R_{dif}$ .

Por fim, a UR se mostrou um parâmetro de forte influência no desempenho do PCM para proporcionar conforto, corroborando com a indicação de Saffari et al. (2017) sobre a possibilidade de diferenças entre umidade serem decisivas no desempenho de edificações com PCMs. Embora Saffari et al. (2017) tenham trabalhado com condicionamento artificial, em que o excesso de umidade aumenta o consumo energético, a UR também se mostrou importante em ambientes naturalmente condicionados com PCMs, conforme apresentados nesse estudo.

#### **4.4 CONCLUSÃO**

Esse trabalho investigou a influência dos parâmetros climáticos no desempenho de uma edificação destinada a escritórios, com seis tipos de PCMs incorporados nas paredes, para 95 cidades brasileiras. A análise foi realizada a partir de simulação termoenergética no EnergyPlus e utilizou o conforto térmico adaptativo como indicador de desempenho.

A partir dos resultados obtidos, é possível afirmar que a incorporação de PCMs em um modelo de escritório de baixa capacidade térmica tem potencial para aumentar o PHC em parte do Brasil. Porém, esse aumento do PHC não é homogêneo, maior em regiões com clima mais frio e maior altitude, como parte das cidades da ZB1 a ZB5. No entanto, a melhor referência não está relacionada ao Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ABNT, 2005), tampouco à classificação de Köppen–Geiger, sendo necessário verificar os parâmetros de TMA, UR e  $V_{dir}$ .

Esses resultados corroboram com pesquisas anteriores que investigaram a utilização de PCMs para os climas brasileiros e indicaram tendência de melhor desempenho do material para regiões com temperaturas médias anuais abaixo de 21°C. Entretanto, é

importante destacar que existem exceções, uma vez que foram obtidos resultados de desempenho insatisfatórios em climas frios e cidades com TMA medianas (entre 21 °C e 23°C) com alto desempenho. Reforça-se a necessidade de analisar, no mínimo, os parâmetros climáticos mais relevantes encontrados neste trabalho.

De maneira geral, os PCM reduziram a TBS dos ambientes e homogeneizaram as diferenças entre máximos e mínimos diários. A UR também apresentou destaque, uma vez que é um dos principais parâmetros para proporcionar conforto térmico aos usuários e auxilia na redução da amplitude térmica e estabilização da TBS. A disponibilidade do vento e sua direção da fachada foi fator de maior importância que sua velocidade.

Deve-se lembrar que a TBS, a UR e a Vdir foram os mais representativos e de maior influência para a obtenção de conforto nas cidades que apresentaram desempenho médio com a incorporação de PCMs acima de 10%. Outros critérios podem ser adotados em função do rigor de melhoria desejada no conforto.

#### 4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHANGARI, M.; MAEREFAT, M. An innovative PCM system for thermal comfort improvement and energy demand reduction in building under different climate conditions. **Sustainable Cities and Society**, v. 44, n. September 2018, p. 120–129, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.008>
- AL-JANABI, A.; KAVGIC, M. Application and sensitivity analysis of the phase change material hysteresis method in EnergyPlus: A case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 162, n. May, p. 114222, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114222>
- ALMEIDA, F.; BRANDALISE, M.; MIZGIER, M. Materiais de mudança de fase como sistema de resfriamento passivo em habitações de interesse social pré-fabricadas leves. **PARC**. v.13, p.e022027, 2022. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v13i00.8666777>
- AL-YASIRI, Q.; SZABÓ, M. Case study on the optimal thickness of phase change material incorporated composite roof under hot climate conditions. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. 1–11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00522>
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 140**: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. Atlanta, 2017.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- BAI, L.; XIE, J.; FARID, M.; WANG, W.; LIU, J. Analytical model to study the heat storage of phase change material envelopes in lightweight passive buildings. **Building and Environment**, v. 169, n. July 2019, p. 106531, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106531>
- BANIASSADI, A.; SAILOR, J.; BRYAN, J. Effectiveness of phase change materials for improving the resiliency of residential buildings to extreme thermal conditions. **Solar Energy**, v. 188, n. April, p. 190–199, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.011>

- BELTRÁN, R.; MARTÍNEZ-GÓMEZ, J. Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment. **Journal of Building Engineering**, v. 24, n. December 2017, p. 100726, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.018>
- BERARDI, U.; SOUDIAN, S. Experimental investigation of latent heat thermal energy storage using PCMs with different melting temperatures for building retrofit. **Energy and Buildings**, v. 185, p. 180–195, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0436-x>
- BRITO, A.; AKUTSU, M.; SALLES, E. CASTRO, G. Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 125–145, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100128>
- CAI, R.; SUN, Z.; YU, H.; MENG, E.; WANG, J. DAI, M. Review on optimization of phase change parameters in phase change material building envelopes. **Journal of Building Engineering**. n. 35, p. 101979, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101979>
- CHARRAD, M.; GHAZZALI, N.; BOITEAU, V.; NIKNAFS, A. NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. **Journal of Statistical Software**. v. 61, n. 6, p. 1–36, 2014. DOI: 10.18637/jss.v061.i06.
- CLIMATE.ONEBUILDING.ORG. **Repository of free climate data for building performance simulation from the creators of the EPW**. Disponível em: <<https://climate.onebuilding.org/>> Acesso em 09 de dezembro de 2022.
- ENERGYPLUS. **Engineering reference**: EnergyPlus Version 9.3.0 Documentation - Engineering Reference U.S. Department of Energy, 2020.
- FARAJ, K.; KHALED; M.; FARAJ, J.; HACHEM, F.; CASTELAIN, C. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, n. December 2018, p. 109579, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109579>
- HOSSEINI, M.; BIGTASHI, A.; LEE, B. A systematic approach in constructing typical meteorological year weather files using machine learning. **Energy & Buildings**. v. 226, p. 110375, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110375>
- IMGHOURE, O.; BELOUAGGADIA N.; EZZINE, M.; LBIBB, R.; YOUNSI, Z. Performance evaluation of phase change materials for thermal comfort in a hot climate region. **Applied Thermal Engineering**, v. 186, n. December 2020, p. 116509, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116509>
- INMET. **INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA**. Dados Históricos Anuais, 2021.
- KABDRAKHMANOVA, M; MEMON, S.; SAURBAYEVA, A. Implementation of the panel data regression analysis in PCM integrated buildings located in a humid subtropical climate. **Energy**. v. 237, p. 121651, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121651>
- KENZHEKHANOV, S.; MEMON, S. A.; ADILKHANOVA, I. Quantitative evaluation of thermal performance and energy saving potential of the building integrated with PCM in a subarctic climate. **Energy**, v. 192, p. 116607, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116607>
- KIM, H.; MAE, M.; CHOI, Y; HEO, J. Evaluation of shape-stabilization phase change material sheets to improve the heating load reduction based on the indoor application method. **Solar Energy**. v. 220, p. 1006–1015, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.059>
- KONSTANTINIDOU, C. A.; LANG, W.; PAPADOPOULOS, A. M. Multiobjective optimization of a building envelope with the use of phase change materials (PCMs) in Mediterranean climates. **International Journal of Energy Research**, v. 42, n. 9, p. 3030–3047, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3969>
- LEE, K.; MEDINAA, M.; SUN, X.; JIN, X. Thermal performance of phase change materials (PCM)-enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls. **Solar Energy**, v. 163, n. February, p. 113–121, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.086>
- LEE, S.; VO, T.; THAI, H.; LEE, J.; PATEL, V. Strength prediction of concrete-filled steel tubular columns using Categorical Gradient Boosting algorithm. **Engineering Structures**. v. 238, p. 112109, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112109>
- LI, C.; WEN, X.; CAI, W.; WU, J.; SHAO, J.; YANG, Y.; YU, H.; LIU, D.; WANG, M. Energy performance of buildings with composite phase-change material wallboards in different climatic zones of China. **Energy & Buildings**. n. 273, p. 112398, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112398>

- LI, D.; ZHANG, C.; LI, Q.; LIU, C.; ARICI, M.; WU, Y. Thermal performance evaluation of glass window combining silica aerogels and phase change materials for cold climate of China. **Applied Thermal Engineering**, v. 165, p. 114547, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114547>
- LIRA-OLIVER, A.; VILCHIS-MARTÍNEZ, S. Thermal Inertia Performance Evaluation of Light-Weighted Construction Space Envelopes Using Phase Change Materials in Mexico City's Climate. **Technologies**, v. 5, n. 4, p. 69, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies5040069>
- LIU, J.; LIU, Y.; YANG, L.; LIU, T.; ZHANG, C.; DONG, H. et al. Climatic and seasonal suitability of phase change materials coupled with night ventilation for office buildings in Western China. **Renewable Energy**, v. 147, p. 356–373, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.069>
- LIU, J.; WANG, B.; XIAO, L. Non-linear associations between built environment and active travel for working and shopping: An extreme gradient boosting approach. **Journal of Transport Geography**. v. 92, p. 103034, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103034>
- LIU, M.; CHEN, H.; WEI, D.; WU, Y.; LI, C. Nonlinear relationship between urban form and street-level PM2.5 and CO based on mobile measurements and gradient boosting decision tree models. **Building and Environment**. v. 205, p. 108265, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108265>
- MARIN, P.; SAFFARI M.; GRACIA, A.; ZHU, X.; FARID, M.; CABEZA, L.; USHAK, S. Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 274–283, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.007>
- MARKARIAN, E.; FAZELPOUR, F. Multi-objective optimization of energy performance of a building considering different configurations and types of PCM. **Solar Energy**, v. 191, n. May, p. 481–496, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.003>
- MAZZEO, D.; OLIVETI, G.; ARCURI, N. A method for thermal dimensioning and for energy behavior evaluation of a building envelope PCM layer by using the characteristic days. **Energies**, v. 10, n. 5, 2017. DOI: <http://doi.org/doi:10.3390/en10050659>
- MENG, E.; YU, H.; ZHOU, B. Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter. **Applied Thermal Engineering**, v. 126, p. 212–225, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.110>
- MENGJIE, S.; FUXIN, N.; NING, M.; YANXIN, H.; SHIMING, D. Review on building energy performance improvement using phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 776–793, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.066>
- OLIVEIRA, M.; CARLO, J. Avaliação do conforto térmico e renovação de ar em ambientes com chaminés solares. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 293-314, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100506>
- OLIVEIRA, M.; LUCARELLI, C.; CARLO, J. Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura. **Ambiente Construído**, v. 22, p. 67-111, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000300610>
- OLIVEIRA, R.; GONZALES, T.; CARVALHO, M. Uso de PCM para edificações em região de clima quente: uma revisão sistemática. **PARC**, v. 12, p. e021001, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.066>
- PEDREGOSA, F.; VAROQUAUX, G.; GRAMFORT, A.; MICHEL, V.; THIRION, B.; GRISEL, O. BLONDEL, M.; MÜLLER, A.; NOTHMAN, J.; LOUPPE, G.; PRETTENHOFER, P.; WEISS, R.; DUBOURG, V.; VANDERPLAS, J.; PASSOS, A; COURNAPEAU, D.; BRUCHER, M.; PERROT, M.; DUCHESNAY, E. Scikit-learn: Machine Learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**. n. 12, p. 2825-2830, 2011. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1201.0490>
- PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos, 2017.
- PONS, V.; STANESCU, G. Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil. **PARC**, v. 8, n. 2, p. 127, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v8i2.8650228>
- RATHORE, P.; SHUKLA, S. Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 723–744, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.068>

RUBITHERM. **PCM RT - LINE.** Disponível em: <<https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>>. Acesso em 09 de dezembro de 2022.

SAFFARI, M.; GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, C.; CABEZA, L. Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings. **Applied Energy**, v. 202, p. 420–434, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.107>

SHARMA, V.; RAI, A. Performance assessment of residential building envelopes enhanced with phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 208, p. 109664, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109664>

SOLGI, E.; HAMEDANI, Z.; FERNANDO, R.; KARIB, B.; SKATES, H. A parametric study of phase change material behaviour when used with night ventilation in different climatic zones. **Building and Environment**, v. 147, n. October 2018, p. 327–336, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.031>

SOVETOVA, M.; MEMON, S. A.; KIM, J. Thermal performance and energy efficiency of building integrated with PCMs in hot desert climate region. **Solar Energy**, v. 189, n. April, p. 357–371, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.067>

TABARES-VELASCO, P.; CHRISTENSEN, C.; BIANCHI M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building and Environment**, v.54, p. 186–196, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.019>

WAHID, M.; HOSSEINI, S.; HUSSEN, H.; AKEIBER, H.; SAUD, S.; MOHAMMAD, A. An overview of phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region. **Applied Thermal Engineering**, v. 112, p. 1240–1259, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.032>

WANG, H.; LU, W.; WU, Z.; ZHANG, G. Parametric analysis of applying PCM wallboards for energy saving in high-rise lightweight buildings in Shanghai. **Renewable Energy**, v. 145, p. 52–64, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.124>

WANG, X.; LI, W.; LUO, Z. WANG, K.; SHAH, S. A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application. **Energy & Buildings**, v. 260, p. 111923, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111923>

## CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO GERAL

Essa tese objetivou analisar a influência da incorporação de PCMs no conforto térmico de usuários em um modelo de escritório naturalmente ventilado nos climas brasileiros. Para isso, foi empregada uma revisão integrativa de literatura e simulações termoenergéticas com o programa EnergyPlus.

A revisão de literatura teve como objetivo entender as características físico-químicas e o funcionamento dos PCMs e identificar e discutir as potencialidades, restrições e aplicações do material em sistemas construtivos como estratégia passiva.

Como resultados da revisão de literatura, foram apresentados diferentes tipos de PCMs, suas formas de aplicação, seu funcionamento e suas características térmicas, físicas e químicas necessárias para seu uso na construção civil. Na sequência, foram discutidas as vantagens e desvantagens dos tipos de PCM e sua forma de incorporação em elementos construtivos.

Também foi possível identificar que a utilização de PCMs apresentou potencial de aumento das horas de conforto térmico dos usuários e redução do consumo de energia das edificações em todos os sistemas construtivos (paredes, coberturas, envoltória, elementos envidraçados e outros sistemas), com algumas exceções.

A maioria dos trabalhos investigou PCMs orgânicos, encapsulados, com temperatura de fusão entre 22°C e 28°C e com capacidades de armazenamento de calor latente entre 150 kJ/kg e 210 kJ/kg. As principais abordagens metodológicas foram ensaios e simulações termoenergéticas, com destaque para o programa EnergyPlus, utilizado em 28% dos artigos revisados. Os ambientes analisados possuem, quase sempre, baixa capacidade térmica, composto por matérias leves e delgados e condicionados artificialmente.

Parte dos autores recomendou uso do PCM com ventilação seletiva, principalmente a noturna. Com isso, os PCMs têm condições de armazenar energia durante o dia e liberá-la durante a noite. Sem esse ciclo o material funciona apenas como um armazenador de calor sensível e perde grande parte dos seus benefícios.

A partir dos parâmetros investigados, fica evidente da relação entre as condições climáticas e o desempenho dos PCMs. As condições climáticas vão além das diferenças regionais, com influências na variação entre temperaturas diurnas e

noturnas e entre as estações. Além das relações climáticas, destacam-se a espessura da camada de PCM, a geometria dos ambientes e da edificação, a temperatura de mudança de fase, o tipo e a capacidade de armazenamento de energia dos PCMs, a orientação solar da edificação, a camada de instalação do PCM, o tipo de material construtivo em contato com o PCM, as condições de contorno da edificação e questões relacionadas à ocupação dos espaços internos, como seu padrão de uso e carga interna de pessoas, iluminação e equipamentos.

A diversidade de parâmetros associada ao uso dos PCMs e a possibilidade de ajustar cada um deles é o que, possivelmente, garante a versatilidade do material e a possibilidade de aplicação em diversos locais com diferenças significativas de climáticas e de usos. Entretanto, esse cenário contribui para resultados discrepantes e a dificuldade de comparação entre pesquisas.

Por fim, apesar de demonstrado o desempenho dos PCMs em proporcionar conforto e economia de energia para grande parte dos climas do mundo, as pesquisas estão concentradas em regiões temperadas, com latitudes médias. Os trabalhos em climas tropicais com baixas latitudes é comparativamente escasso.

Após identificados os parâmetros mais importantes para o desempenho dos PCMs e a lacuna de estudos em climas quentes e parcialmente úmidos, como em grande parte do Brasil, foram realizadas as simulações termoenergéticas no EnergyPlus.

Embora as simulações não tenham sido calibradas e validadas com medições, esse trabalho se baseou em outras pesquisas o fizeram. Essas pesquisas se destacaram pelo rigor na investigação de PCMs no EnergyPlus, com recomendações para simulações desses materiais que foram rigorosamente seguidas. Também foram apresentados outros trabalhos que apenas se basearam em simulação, e, da mesma forma, não realizaram calibrações e validações com outros resultados. Esses artigos foram publicados em periódicos de alto fator de impacto e classificação máxima pelo Qualis/CAPES em 2023.

As simulações foram divididas em duas abordagens (capítulos/artigos 2 e 3), a primeira com objetivo de investigar a influência do desempenho de diferentes tipos e espessuras de PCMs em diferentes condições de contorno, de ventilação e de instalação do em fechamentos verticais leves. A segunda investigou a influência de parâmetros climáticos no desempenho de PCMs para todos os climas brasileiros.

Nos dois capítulos de simulação, foram utilizados PCMs orgânicos, da empresa alemã Rubitherm. As temperaturas de mudança de fase dos PCMs variaram entre 18°C e 44°C. O ambiente simulado equivalia a um escritório de baixa capacidade térmica condicionado apenas naturalmente. Como indicador de desempenho, foi escolhido o conforto térmico adaptativo.

As cidades foram utilizadas na análise dedicada às condições de contorno, de instalação, tipos de PCMs e de climas predominantemente frios (ZB1), medianos (ZB4) e predominantemente quentes (ZB8). A incorporação de PCM foi eficaz para aumentar conforto nas ZBs mais frias, ZB 1 e 4. Nos melhores casos, foi obtido aumento entre 26% a 33% do conforto em relação ao mesmo ambiente sem PCMs. Já para ZB8, o uso PCM deve ser avaliado de acordo com os parâmetros climáticos, uma vez que as altas temperaturas e baixa radiação em superfícies verticais piorou o conforto térmico em quase todos os casos simulados.

O tipo do PCM (que no contexto dessa pesquisa concentrou-se nas diferentes temperaturas de mudança de fase), o clima (indicado pela temperatura e radiação) e a camada de instalação foram os parâmetros de maior influência, que resultaram em variações no conforto entre casos semelhantes superiores a 20%. A orientação solar teve impacto moderado, cerca de 10% de influência no conforto, e a espessura do PCM e tipo de ventilação apresentaram baixa influência, com média geral próxima a 2% no conforto.

A simulação dos casos em apenas 5 cidades permitiu estabelecer e entender os melhores parâmetros de instalação e condições de contorno para climas predominantemente frios, medianos e quentes. Após análises do primeiro grupo de simulações, ficou evidente a necessidade de expandir o escopo dos parâmetros climáticos e do número de cidades simuladas. Para isso, os melhores parâmetros de instalação e condições de contorno encontrados foram fixados, pois não apresentaram variações relevantes por cidade. Isto viabilizou uma análise focada no clima de 95 cidades brasileiras.

No segundo momento de simulação, os resultados indicaram que a incorporação de PCMs tem potencial para aumentar o conforto em parte do Brasil, principalmente nas cidades da ZB1 a ZB5. Esses resultados corroboram com pesquisas anteriores que investigaram a utilização de PCMs para os climas brasileiros e indicaram tendência

de melhor desempenho do material para regiões com temperaturas médias anuais iguais ou abaixo de 21°C.

Se consideradas apenas as cidades com melhor desempenho, acima de 10% de aumento do conforto devido aos PCMs em comparação ao caso base, a temperatura de bulbo seco, a umidade relativa e a direção do vento foram os parâmetros mais representativos e de maior influência nas simulações.

É possível dizer que os PCMs reduziram a temperatura dos ambientes e homogeneizaram as diferenças entre máximos e mínimos diários. A umidade relativa contribuiu diretamente no conforto, além de auxiliar na redução da amplitude térmica e estabilização da temperatura. A disponibilidade do vento e seu ângulo de incidência em relação a fachada apresentou maior importância que a velocidade. Esse resultado demonstrou a importância da presença do vento para trocas convectivas, muitas vezes apontada na literatura, mas ainda sem um estudo detalhado para os climas brasileiros.

A partir do que foi apresentado, é possível afirmar que PCMs disponíveis no mercado internacional apresentaram potencial para melhorar o conforto térmico em parte dos climas brasileiros.

Logo, a *hipótese* de que o uso de PCMs influencia positivamente no conforto térmico dos usuários em um modelo de escritório naturalmente ventilado nos climas brasileiros foi parcialmente refutada, pois foram encontrados climas em que o conforto térmico se reduz com a instalação do material. No entanto, os resultados levaram à indicação dos parâmetros em que os PCMs foram benéficos. Os PCMs têm o potencial de melhorar o conforto em escritórios de baixa capacidade térmica, porém, dependem de uma combinação de condições de instalação, do tipo de PCM, e de parâmetros climáticos, como temperatura de bulbo seco, umidade relativa e direção/disponibilidade de vento.

Logo, como resposta à *pergunta de pesquisa*: Quais são as características de instalação dos PCMs e os parâmetros climáticos mais influentes para melhoria do conforto térmico dos usuários em um modelo de escritório nos climas brasileiros?

No Brasil, para as cidades analisadas, os PCMs com temperaturas de mudança de fase entre 18°C e 28°C devem ser instalados na camada das paredes mais voltada ao ambiente interno, com espessuras próximas a 3 cm, desde que a cidade apresente

temperaturas médias anuais de até 21°C, salvo exceções que devem ser analisadas caso a caso. O aumento da espessura não prejudica o desempenho, mas é um gasto que pouco contribui para o aumento do conforto térmico. Além disso, os PCMs dependem da ventilação seletiva, principalmente com auxílio da ventilação noturna e da disponibilidade do vento acessar o interior dos ambientes. Por fim, é evidenciada a importância da incidência de radiação solar, recomendado orientação solar da edificação a norte.

Deve-se observar algumas limitações neste trabalho. Somente duas espessuras da camada de PCM foram analisadas, mesmo que baseadas na literatura. A tipologia de escritórios não incluiu o condicionamento artificial, embora saiba-se que ele é comum para este tipo de atividade, bem como outras dimensões do ambiente interno. No quarto capítulo, de análise dos parâmetros climáticos, a orientação norte foi fixada, o que pode ter direcionado o modelo numérico a indicar a direção do vento como parâmetro mais impactante no conforto do que a sua velocidade. Por fim, não foram realizados experimentos em campo para validar as simulações, tendo o programa sido considerado válido para a simulação dos PCMs com base na literatura.

## **5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Analisar o desempenho dos PCMs em relação ao conforto térmico adaptativo para às 24h do dia. Devido ao recorte de horário (das 8 às 18h), as variações do conforto em decorrência do uso dos PCMs não foram quantificadas para os horários mais frios da noite, principalmente no inverno nas ZBs 1, 2 e 3.
- Analisar a influência mensal no conforto térmico de PCMs ao longo do ano, a fim de identificar seu comportamento frente a sazonalidades.
- Analisar diferentes geometrias, componentes construtivos e condições de contorno, bem como novas tipologias de edificação, como comercial e residencial.
- Realizar uma análise com a mesma (ou maior) abrangência de cidades apresentadas no quarto capítulo para outras condições de contorno, tais como

outras orientações solares das aberturas, a fim de verificar a maior influência da direção do vento em detrimento da velocidade.

- Analisar a incorporação e combinação de dois ou mais PCMs com diferentes temperaturas de mudança de fase no mesmo ambiente ou componente construtivo. Essa recomendação possui respaldo na literatura, com investigações semelhantes para locais com grande amplitude diária, mensal e anual de temperaturas.
- Analisar outros tipos de PCM de diferentes fabricantes, em uma pesquisa direcionada para as propriedades inerentes do material, como capacidade de armazenamento de calor latente, curva de entalpia, densidade, condutividade, entre outros.
- Realizar experimentação e ensaios com PCMs em escala e em edificação real. Esses ensaios são recomendados para verificar as especificações técnicas dos materiais, assim como realizar eventuais ajustes nas configurações do EnergyPlus para simulação de PCMs em condições climáticas brasileiras.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A

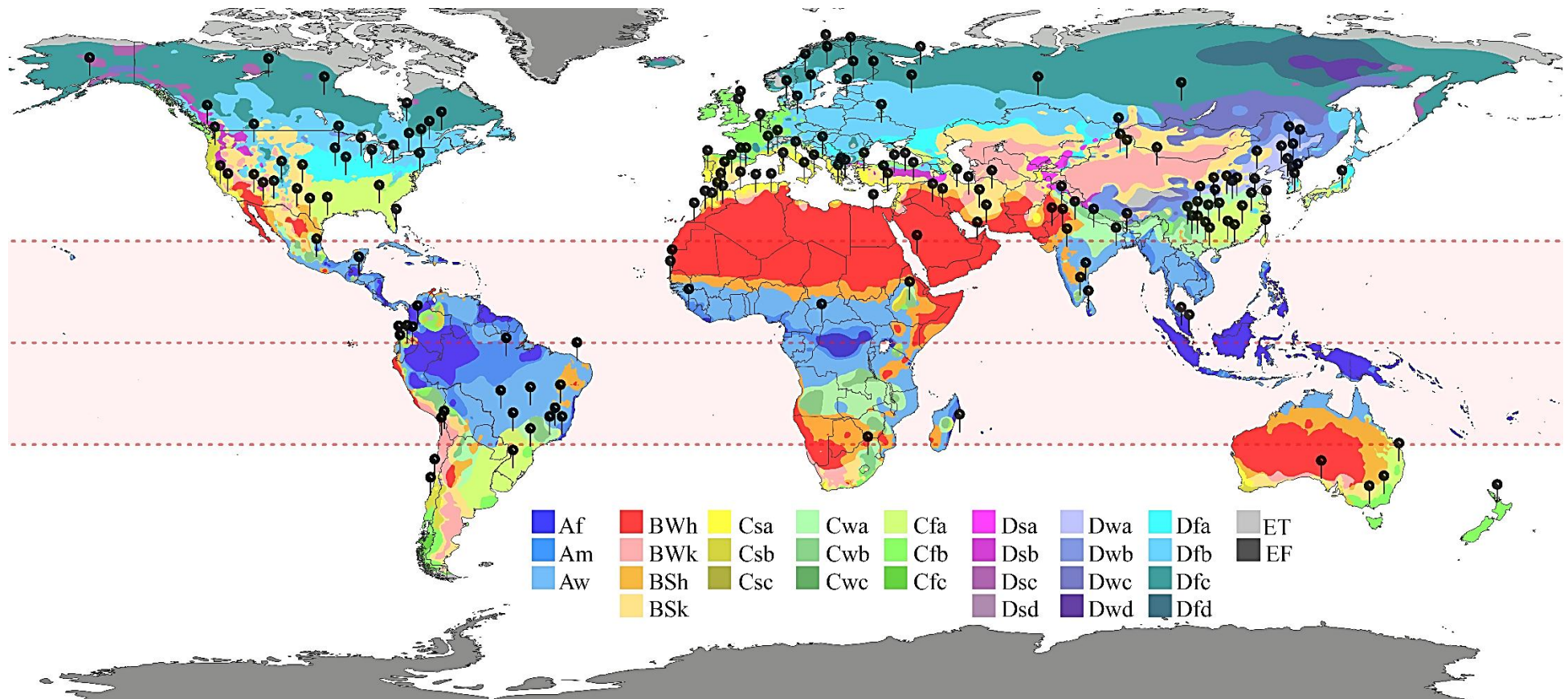


Figura 31 (Equivalente a Figura 3) Cidades contempladas em pesquisas com PCMs – Região dos trópicos destacada em rosa

APÊNDICE B

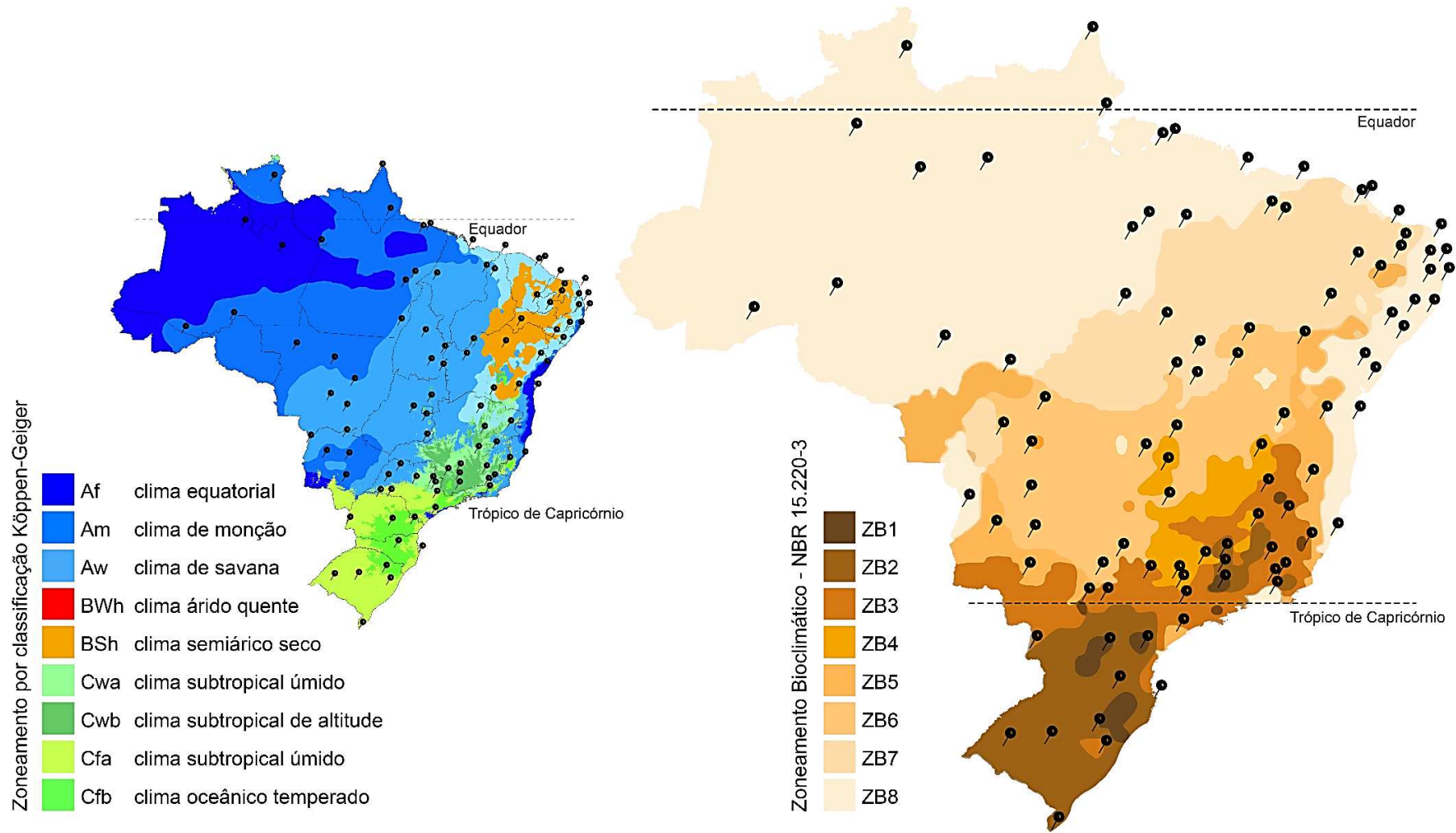


Figura 32 (Equivalente a Figura 18) Cidades selecionadas para simulação plotadas sobre o mapa do Brasil

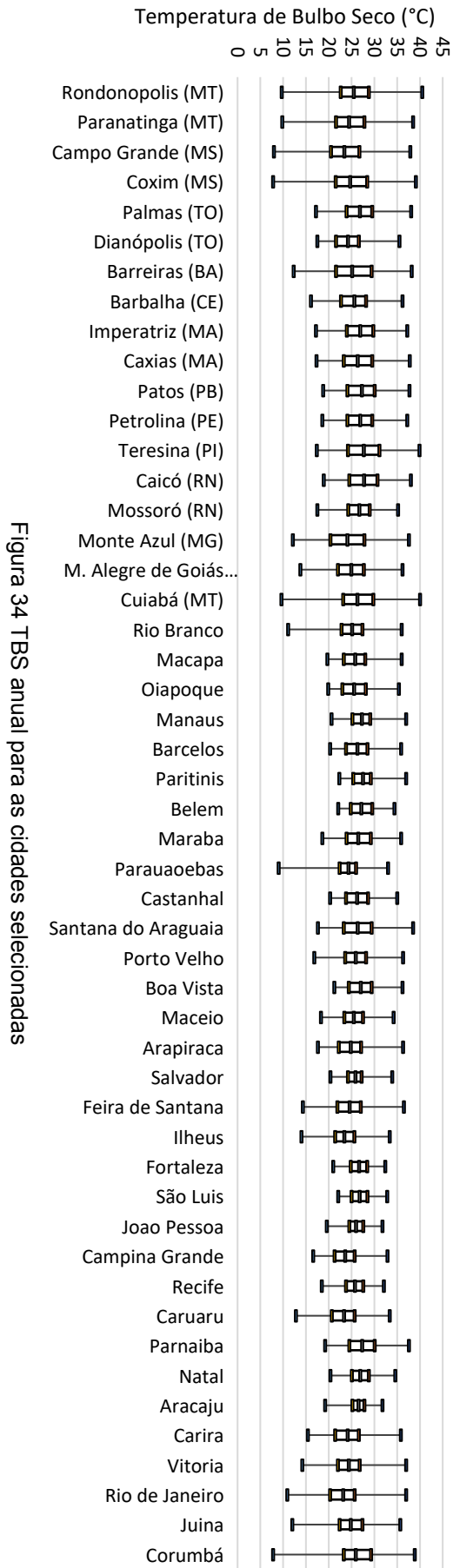


Figura 34 TBS anual para as cidades selecionadas

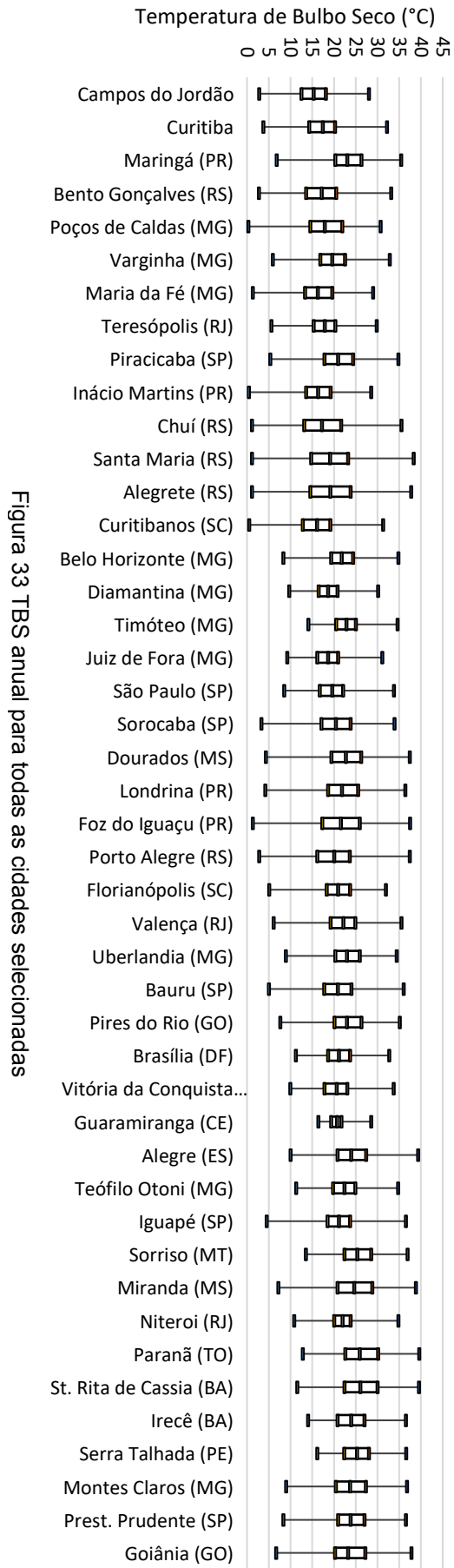


Figura 33 TBS anual para todas as cidades selecionadas

## APÊNDICE D

Tabela 17 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Campos do Jordão

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	22%	20%	17%	15%	18%	22%	23%
TPO	5%	7%	5%	5%	4%	4%	4%
UR	10%	6%	18%	6%	16%	9%	8%
P	6%	7%	9%	6%	6%	5%	5%
R inf	4%	12%	5%	19%	7%	7%	6%
R dir	12%	14%	15%	11%	14%	15%	14%
R dif	23%	19%	17%	25%	20%	26%	26%
V dir	13%	8%	10%	8%	11%	8%	9%
V vel	4%	7%	4%	5%	3%	4%	4%
MAE	0.060	0.036	0.009	0.033	0.033	0.040	0.046
MSE	0.008	0.004	0.000	0.003	0.003	0.005	0.006
RMSE	0.091	0.065	0.021	0.052	0.053	0.068	0.076
R <sup>2</sup>	0.963	0.960	0.983	0.976	0.973	0.968	0.965

Tabela 18 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Curitiba

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	47%	52%	46%	55%	55%	53%	51%
TPO	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
UR	5%	3%	6%	4%	4%	3%	3%
P	6%	6%	5%	6%	5%	5%	5%
R inf	4%	5%	6%	5%	4%	3%	4%
R dir	7%	10%	11%	10%	10%	9%	10%
R dif	18%	13%	16%	11%	12%	14%	16%
V dir	6%	4%	4%	4%	4%	5%	5%
V vel	4%	3%	3%	3%	3%	4%	3%
MAE	0.051	0.024	0.010	0.017	0.015	0.026	0.036
MSE	0.006	0.002	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004
RMSE	0.078	0.039	0.017	0.028	0.024	0.043	0.063
R <sup>2</sup>	0.971	0.989	0.996	0.994	0.995	0.986	0.975

Tabela 19 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Maringá

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	62%	65%	64%	66%	69%	67%	65%
TPO	3%	2%	2%	2%	2%	2%	3%
UR	4%	2%	3%	2%	2%	2%	3%
P	4%	4%	4%	4%	4%	3%	3%
R inf	2%	3%	5%	3%	2%	3%	3%
R dir	5%	7%	9%	6%	5%	5%	6%
R dif	12%	11%	7%	11%	8%	11%	11%
V dir	6%	4%	4%	4%	4%	5%	4%
V vel	3%	2%	3%	2%	3%	2%	2%
MAE	0,044	0,040	0,041	0,039	0,040	0,042	0,041
MSE	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
RMSE	0,067	0,061	0,065	0,063	0,060	0,066	0,063
R <sup>2</sup>	0,982	0,985	0,982	0,984	0,985	0,983	0,984

Tabela 20 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Bento Gonçalves

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	44%	46%	44%	38%	60%	49%	38%
TPO	5%	4%	6%	4%	3%	4%	5%
UR	9%	3%	3%	3%	5%	7%	5%
P	5%	5%	7%	5%	5%	5%	6%
R inf	6%	16%	14%	27%	4%	6%	25%
R dir	7%	8%	12%	7%	8%	10%	7%
R dif	11%	9%	9%	8%	8%	11%	8%
V dir	9%	5%	4%	5%	5%	5%	5%
V vel	4%	3%	3%	2%	2%	3%	2%
MAE	0,050	0,023	0,013	0,021	0,021	0,030	0,030
MSE	0,006	0,002	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003
RMSE	0,077	0,042	0,023	0,036	0,040	0,055	0,054
R <sup>2</sup>	0,972	0,989	0,994	0,991	0,988	0,980	0,982

Tabela 21 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Poços de Caldas

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	36%	43%	40%	46%	46%	45%	42%
TPO	3%	3%	3%	4%	4%	4%	3%
UR	8%	5%	8%	4%	4%	5%	5%
P	7%	6%	7%	6%	6%	7%	6%
R inf	3%	3%	4%	3%	3%	3%	3%
R dir	10%	9%	13%	10%	9%	9%	9%
R dif	25%	22%	19%	18%	19%	18%	22%
V dir	6%	6%	3%	6%	5%	6%	6%
V vel	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,053	0,048	0,020	0,045	0,043	0,048	0,048
MSE	0,006	0,005	0,001	0,005	0,004	0,005	0,005
RMSE	0,078	0,071	0,031	0,067	0,065	0,072	0,071
R <sup>2</sup>	0,975	0,977	0,990	0,977	0,979	0,975	0,976

Tabela 22 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Varginha

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	37%	56%	55%	56%	56%	56%	51%
TPO	2%	2%	3%	2%	2%	2%	3%
UR	14%	3%	5%	4%	4%	5%	5%
P	5%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
R inf	2%	2%	4%	2%	2%	2%	2%
R dir	8%	8%	11%	8%	8%	7%	8%
R dif	25%	18%	12%	16%	16%	16%	19%
V dir	4%	4%	4%	4%	4%	5%	4%
V vel	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,047	0,038	0,018	0,035	0,035	0,039	0,042
MSE	0,005	0,003	0,001	0,003	0,003	0,004	0,004
RMSE	0,069	0,058	0,029	0,054	0,054	0,060	0,063
R <sup>2</sup>	0,980	0,983	0,992	0,985	0,985	0,983	0,981

Tabela 23 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Maria da Fé

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	24%	39%	27%	37%	33%	36%	33%
TPO	3%	3%	3%	4%	5%	3%	3%
UR	10%	3%	16%	6%	6%	6%	7%
P	8%	12%	6%	9%	9%	9%	9%
R inf	3%	3%	6%	4%	3%	4%	3%
R dir	10%	12%	15%	9%	10%	10%	10%
R dif	25%	20%	18%	20%	24%	21%	23%
V dir	13%	6%	7%	8%	8%	8%	8%
V vel	4%	2%	4%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,065	0,038	0,008	0,046	0,046	0,055	0,056
MSE	0,009	0,003	0,000	0,005	0,005	0,007	0,007
RMSE	0,094	0,058	0,013	0,071	0,070	0,083	0,083
R <sup>2</sup>	0,963	0,979	0,996	0,971	0,970	0,964	0,965

Tabela 24 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Teresópolis

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	32%	37%	37%	37%	35%	37%	36%
TPO	4%	4%	5%	4%	5%	5%	4%
UR	8%	6%	6%	6%	6%	7%	7%
P	6%	6%	5%	6%	7%	7%	6%
R inf	4%	5%	4%	4%	3%	3%	3%
R dir	8%	8%	10%	8%	9%	8%	9%
R dif	23%	20%	22%	19%	19%	19%	19%
V dir	9%	8%	5%	8%	9%	8%	8%
V vel	7%	7%	5%	7%	6%	7%	7%
MAE	0,069	0,053	0,022	0,053	0,053	0,057	0,058
MSE	0,010	0,006	0,001	0,006	0,006	0,007	0,007
RMSE	0,098	0,078	0,035	0,078	0,077	0,083	0,084
R <sup>2</sup>	0,960	0,970	0,987	0,969	0,969	0,968	0,968

Tabela 25 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Piracicaba

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	45%	55%	52%	56%	58%	57%	57%
TPO	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%
UR	11%	3%	3%	3%	2%	4%	4%
P	5%	6%	7%	5%	5%	4%	4%
R inf	2%	2%	5%	2%	3%	2%	2%
R dir	6%	7%	9%	6%	6%	6%	6%
R dif	19%	16%	13%	16%	16%	16%	16%
V dir	6%	6%	4%	6%	5%	5%	5%
V vel	4%	3%	4%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,045	0,043	0,038	0,042	0,041	0,043	0,043
MSE	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
RMSE	0,066	0,065	0,058	0,063	0,061	0,065	0,065
R <sup>2</sup>	0,983	0,982	0,983	0,983	0,984	0,982	0,982

Tabela 26 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Inacio Martins

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	40%	45%	39%	47%	44%	42%	42%
TPO	4%	4%	6%	4%	4%	3%	4%
UR	8%	6%	11%	9%	11%	8%	8%
P	5%	4%	18%	5%	6%	6%	5%
R inf	3%	4%	5%	3%	4%	3%	3%
R dir	9%	11%	7%	11%	10%	11%	10%
R dif	17%	13%	5%	11%	11%	14%	16%
V dir	7%	6%	5%	5%	6%	6%	7%
V vel	6%	6%	4%	5%	5%	7%	5%
MAE	0,053	0,024	0,004	0,020	0,024	0,035	0,039
MSE	0,006	0,002	0,000	0,001	0,002	0,004	0,004
RMSE	0,079	0,044	0,007	0,036	0,048	0,060	0,064
R <sup>2</sup>	0,970	0,983	0,999	0,987	0,977	0,973	0,973

Tabela 27 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Chuí

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	39%	51%	49%	52%	52%	49%	47%
TPO	4%	3%	4%	3%	3%	3%	4%
UR	7%	3%	5%	4%	4%	4%	4%
P	6%	4%	6%	4%	4%	5%	5%
R inf	4%	3%	5%	3%	3%	3%	3%
R dir	19%	14%	11%	14%	12%	12%	16%
R dif	6%	5%	4%	4%	3%	4%	5%
V dir	9%	7%	5%	5%	5%	5%	7%
V vel	6%	9%	11%	11%	15%	16%	8%
MAE	0,049	0,026	0,016	0,022	0,023	0,029	0,036
MSE	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003
RMSE	0,072	0,041	0,025	0,034	0,036	0,044	0,055
R <sup>2</sup>	0,975	0,989	0,995	0,992	0,992	0,989	0,982

Tabela 28 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Santa Maria

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	57%	65%	66%	69%	74%	69%	65%
TPO	4%	3%	4%	3%	3%	3%	3%
UR	5%	3%	2%	2%	2%	2%	3%
P	6%	6%	5%	5%	4%	4%	5%
R inf	4%	4%	6%	4%	3%	3%	3%
R dir	5%	4%	4%	4%	3%	4%	4%
R dif	11%	7%	7%	7%	6%	7%	9%
V dir	5%	4%	4%	3%	3%	4%	4%
V vel	3%	4%	3%	3%	3%	3%	4%
MAE	0,051	0,034	0,025	0,028	0,025	0,034	0,038
MSE	0,006	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	0,004
RMSE	0,080	0,057	0,043	0,049	0,044	0,058	0,063
R <sup>2</sup>	0,972	0,983	0,989	0,987	0,990	0,984	0,981

Tabela 29 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Alegrete

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	54%	66%	67%	71%	71%	67%	64%
TPO	3%	3%	3%	2%	3%	3%	3%
UR	9%	4%	2%	3%	3%	4%	4%
P	5%	4%	4%	3%	3%	4%	4%
R inf	3%	2%	3%	2%	2%	3%	3%
R dir	7%	6%	8%	6%	4%	4%	6%
R dif	11%	8%	6%	7%	7%	7%	8%
V dir	5%	4%	5%	4%	5%	6%	5%
V vel	3%	2%	3%	2%	2%	2%	3%
MAE	0,047	0,031	0,025	0,023	0,026	0,033	0,036
MSE	0,006	0,003	0,002	0,001	0,002	0,003	0,003
RMSE	0,075	0,050	0,040	0,036	0,046	0,054	0,058
R <sup>2</sup>	0,976	0,988	0,991	0,994	0,990	0,987	0,984

Tabela 30 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Curitibaanos

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	44%	50%	42%	57%	54%	52%	47%
TPO	4%	4%	3%	3%	3%	3%	4%
UR	7%	3%	7%	4%	5%	5%	5%
P	4%	4%	7%	3%	3%	3%	4%
R inf	3%	4%	4%	3%	3%	2%	4%
R dir	23%	24%	25%	22%	22%	21%	23%
R dif	3%	3%	4%	2%	3%	3%	4%
V dir	7%	5%	5%	4%	3%	5%	5%
V vel	4%	4%	3%	3%	4%	5%	4%
MAE	0,041	0,015	0,004	0,009	0,010	0,018	0,026
MSE	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002
RMSE	0,065	0,026	0,008	0,017	0,020	0,035	0,047
R <sup>2</sup>	0,977	0,993	0,998	0,996	0,994	0,988	0,981

Tabela 31 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Belo Horizonte

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	41%	51%	54%	55%	57%	56%	49%
TPO	2%	2%	3%	2%	2%	3%	2%
UR	9%	4%	3%	5%	4%	5%	5%
P	8%	6%	8%	6%	6%	6%	6%
R inf	2%	2%	4%	2%	2%	2%	2%
R dir	7%	8%	12%	7%	6%	6%	8%
R dif	26%	21%	9%	16%	16%	16%	21%
V dir	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
V vel	3%	2%	3%	3%	2%	3%	3%
MAE	0,047	0,045	0,034	0,043	0,043	0,045	0,047
MSE	0,005	0,005	0,003	0,004	0,004	0,005	0,005
RMSE	0,071	0,068	0,052	0,064	0,065	0,067	0,070
R <sup>2</sup>	0,980	0,981	0,986	0,983	0,982	0,981	0,980

Tabela 32 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Diamantina

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	14%	29%	35%	24%	26%	23%	21%
TPO	4%	3%	4%	4%	4%	4%	4%
UR	24%	15%	10%	21%	22%	22%	21%
P	8%	7%	5%	7%	7%	7%	9%
R inf	3%	3%	8%	4%	5%	4%	3%
R dir	17%	18%	15%	19%	14%	17%	16%
R dif	19%	15%	13%	9%	9%	10%	15%
V dir	6%	7%	6%	8%	8%	8%	7%
V vel	5%	4%	5%	4%	5%	5%	4%
MAE	0,056	0,028	0,002	0,018	0,012	0,023	0,034
MSE	0,007	0,002	0,000	0,001	0,000	0,001	0,003
RMSE	0,084	0,045	0,003	0,030	0,019	0,037	0,053
R <sup>2</sup>	0,967	0,982	0,999	0,989	0,994	0,985	0,979

Tabela 33 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Timoteo

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	52%	60%	60%	62%	63%	62%	60%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
UR	6%	3%	2%	3%	3%	2%	3%
P	6%	5%	8%	6%	5%	5%	5%
R inf	1%	2%	3%	1%	2%	2%	1%
R dir	4%	5%	8%	5%	4%	4%	5%
R dif	22%	18%	11%	16%	16%	15%	17%
V dir	4%	3%	3%	4%	3%	4%	4%
V vel	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
MAE	0,046	0,041	0,037	0,040	0,039	0,042	0,043
MSE	0,005	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
RMSE	0,069	0,062	0,057	0,061	0,060	0,064	0,065
R <sup>2</sup>	0,981	0,984	0,984	0,984	0,985	0,983	0,982

Tabela 34 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Juiz de Fora

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	27%	45%	54%	47%	48%	44%	43%
TPO	3%	3%	2%	2%	3%	3%	3%
UR	21%	5%	5%	7%	7%	10%	7%
P	8%	7%	5%	7%	7%	6%	6%
R inf	3%	2%	3%	2%	2%	2%	3%
R dir	6%	7%	11%	8%	9%	9%	9%
R dif	20%	21%	10%	16%	15%	16%	20%
V dir	9%	6%	4%	6%	6%	7%	6%
V vel	4%	3%	5%	4%	4%	4%	3%
MAE	0,050	0,028	0,008	0,025	0,021	0,031	0,032
MSE	0,006	0,002	0,000	0,002	0,001	0,002	0,002
RMSE	0,075	0,044	0,012	0,040	0,034	0,047	0,050
R <sup>2</sup>	0,974	0,986	0,998	0,987	0,990	0,984	0,985

Tabela 35 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: São Paulo

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	46%	48%	49%	53%	56%	53%	47%
TPO	3%	3%	5%	3%	3%	3%	3%
UR	5%	4%	3%	3%	3%	3%	4%
P	5%	6%	5%	5%	4%	4%	5%
R inf	3%	5%	6%	4%	4%	4%	4%
R dir	6%	6%	10%	5%	6%	6%	7%
R dif	19%	18%	11%	16%	15%	16%	19%
V dir	9%	7%	6%	6%	6%	8%	7%
V vel	5%	4%	5%	3%	3%	4%	4%
MAE	0,055	0,040	0,025	0,032	0,031	0,039	0,047
MSE	0,006	0,004	0,002	0,003	0,003	0,004	0,005
RMSE	0,081	0,062	0,042	0,051	0,050	0,060	0,071
R <sup>2</sup>	0,972	0,979	0,985	0,984	0,984	0,980	0,974

Tabela 36 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Sorocaba

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	52%	59%	56%	59%	62%	60%	60%
TPO	3%	3%	3%	3%	2%	2%	3%
UR	4%	2%	2%	2%	2%	2%	3%
P	5%	5%	5%	5%	4%	3%	5%
R inf	2%	2%	5%	3%	2%	2%	2%
R dir	4%	5%	8%	5%	5%	5%	5%
R dif	19%	15%	13%	16%	15%	16%	15%
V dir	8%	6%	4%	5%	5%	5%	5%
V vel	4%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,044	0,037	0,030	0,034	0,033	0,035	0,037
MSE	0,004	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,003
RMSE	0,063	0,055	0,046	0,052	0,050	0,052	0,055
R <sup>2</sup>	0,984	0,987	0,988	0,988	0,989	0,988	0,987

Tabela 37 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Dourados

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	53%	58%	56%	59%	61%	58%	59%
TPO	4%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
UR	5%	3%	3%	3%	3%	4%	3%
P	6%	8%	11%	8%	8%	8%	7%
R inf	3%	3%	3%	2%	2%	2%	3%
R dir	8%	7%	8%	7%	7%	7%	7%
R dif	13%	11%	9%	12%	9%	10%	12%
V dir	5%	4%	5%	4%	4%	5%	4%
V vel	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,052	0,048	0,046	0,046	0,043	0,047	0,049
MSE	0,006	0,005	0,005	0,005	0,004	0,005	0,005
RMSE	0,076	0,072	0,071	0,070	0,065	0,069	0,073
R <sup>2</sup>	0,977	0,979	0,979	0,980	0,983	0,981	0,979

Tabela 38 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Londrina

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	70%	70%	64%	71%	28%	29%	24%
TPO	2%	2%	4%	2%	7%	7%	8%
UR	1%	2%	2%	2%	5%	5%	6%
P	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
R inf	2%	3%	6%	3%	19%	18%	18%
R dir	3%	4%	5%	4%	10%	10%	11%
R dif	16%	13%	11%	12%	13%	14%	15%
V dir	3%	4%	5%	4%	11%	11%	12%
V vel	2%	2%	3%	2%	6%	6%	7%
MAE	0,036	0,037	0,039	0,036	0,082	0,086	0,096
MSE	0,003	0,004	0,004	0,003	0,014	0,015	0,018
RMSE	0,056	0,060	0,061	0,057	0,117	0,122	0,133
R <sup>2</sup>	0,987	0,984	0,981	0,986	0,943	0,940	0,928

Tabela 39 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Foz do Iguaçu

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	61%	70%	73%	73%	74%	70%	68%
TPO	3%	3%	3%	3%	3%	2%	3%
UR	9%	3%	2%	3%	3%	6%	4%
P	4%	3%	3%	3%	3%	2%	3%
R inf	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
R dir	4%	4%	4%	3%	3%	3%	4%
R dif	10%	9%	6%	8%	7%	8%	9%
V dir	5%	4%	4%	3%	3%	4%	4%
V vel	3%	2%	3%	2%	2%	3%	2%
MAE	0,038	0,030	0,028	0,026	0,026	0,028	0,033
MSE	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003
RMSE	0,058	0,047	0,043	0,039	0,039	0,042	0,050
R <sup>2</sup>	0,986	0,991	0,992	0,993	0,994	0,993	0,990

Tabela 40 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Porto Alegre

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	50%	64%	65%	67%	68%	65%	60%
TPO	4%	3%	3%	3%	2%	2%	3%
UR	6%	2%	2%	2%	2%	2%	4%
P	5%	5%	4%	4%	4%	4%	5%
R inf	3%	2%	4%	2%	2%	2%	2%
R dir	4%	4%	4%	3%	3%	4%	4%
R dif	17%	11%	7%	9%	10%	11%	13%
V dir	6%	5%	6%	5%	5%	5%	5%
V vel	4%	5%	6%	4%	3%	3%	3%
MAE	0,050	0,038	0,028	0,032	0,031	0,038	0,045
MSE	0,007	0,004	0,002	0,003	0,002	0,004	0,006
RMSE	0,081	0,063	0,049	0,056	0,050	0,063	0,075
R <sup>2</sup>	0,973	0,981	0,987	0,985	0,988	0,982	0,975

Tabela 41 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Florianópolis

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	17%	25%	19%	28%	34%	34%	24%
TPO	5%	4%	4%	4%	4%	4%	5%
UR	5%	4%	4%	4%	3%	4%	4%
P	13%	13%	11%	10%	9%	9%	11%
R inf	11%	11%	23%	13%	9%	7%	12%
R dir	17%	15%	14%	15%	14%	15%	15%
R dif	12%	11%	9%	10%	9%	9%	11%
V dir	12%	10%	10%	10%	12%	11%	11%
V vel	8%	6%	7%	6%	6%	6%	7%
MAE	0,071	0,050	0,036	0,043	0,040	0,044	0,052
MSE	0,010	0,006	0,003	0,005	0,004	0,005	0,006
RMSE	0,102	0,076	0,059	0,069	0,063	0,070	0,079
R <sup>2</sup>	0,951	0,966	0,975	0,969	0,973	0,968	0,963

Tabela 42 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Valença

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	52%	9%	57%	58%	61%	61%	59%
TPO	2%	11%	3%	2%	2%	3%	2%
UR	4%	7%	2%	3%	2%	2%	3%
P	6%	15%	7%	5%	7%	6%	6%
R inf	2%	13%	6%	2%	2%	2%	2%
R dir	4%	12%	6%	4%	4%	4%	4%
R dif	19%	13%	9%	16%	12%	12%	16%
V dir	7%	11%	7%	6%	6%	7%	5%
V vel	4%	9%	3%	4%	3%	3%	4%
MAE	0,046	0,115	0,036	0,045	0,041	0,047	0,045
MSE	0,005	0,023	0,003	0,005	0,004	0,005	0,005
RMSE	0,068	0,150	0,055	0,068	0,063	0,069	0,068
R <sup>2</sup>	0,981	0,908	0,987	0,982	0,984	0,981	0,981

Tabela 43 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Uberlândia

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	45%	47%	56%	48%	50%	51%	48%
TPO	2%	2%	3%	3%	3%	2%	2%
UR	8%	8%	3%	10%	10%	9%	8%
P	6%	5%	6%	5%	7%	7%	5%
R inf	2%	3%	3%	2%	3%	3%	2%
R dir	9%	11%	10%	10%	9%	8%	10%
R dif	20%	18%	12%	16%	13%	13%	17%
V dir	5%	4%	4%	4%	4%	5%	4%
V vel	3%	2%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,043	0,045	0,047	0,046	0,046	0,046	0,046
MSE	0,004	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
RMSE	0,064	0,066	0,070	0,068	0,069	0,068	0,068
R <sup>2</sup>	0,983	0,983	0,980	0,982	0,981	0,981	0,981

Tabela 44 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Bauru

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	49%	58%	52%	61%	61%	60%	58%
TPO	3%	2%	3%	2%	2%	2%	2%
UR	5%	3%	3%	2%	2%	2%	3%
P	5%	5%	7%	5%	6%	5%	4%
R inf	2%	2%	6%	2%	2%	2%	2%
R dir	5%	5%	9%	5%	5%	5%	5%
R dif	22%	17%	12%	15%	16%	16%	18%
V dir	5%	4%	5%	4%	4%	4%	4%
V vel	3%	3%	4%	3%	2%	3%	3%
MAE	0,046	0,044	0,035	0,041	0,041	0,043	0,045
MSE	0,005	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005
RMSE	0,067	0,067	0,055	0,062	0,062	0,065	0,067
R <sup>2</sup>	0,982	0,981	0,984	0,983	0,984	0,982	0,981

Tabela 45 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Pires do Rio

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	45%	50%	49%	53%	55%	52%	51%
TPO	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%
UR	5%	4%	2%	4%	5%	4%	4%
P	14%	12%	15%	11%	11%	13%	12%
R inf	1%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
R dir	5%	5%	10%	4%	4%	4%	5%
R dif	21%	20%	11%	18%	14%	15%	19%
V dir	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
V vel	3%	2%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,037	0,039	0,045	0,041	0,040	0,040	0,040
MSE	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
RMSE	0,054	0,058	0,066	0,060	0,059	0,059	0,059
R <sup>2</sup>	0,988	0,987	0,982	0,986	0,986	0,985	0,986

Tabela 46 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Brasília

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	24%	35%	47%	35%	38%	39%	31%
TPO	3%	3%	3%	3%	3%	2%	3%
UR	20%	16%	7%	16%	19%	21%	22%
P	10%	6%	6%	5%	4%	5%	6%
R inf	3%	4%	5%	4%	3%	2%	4%
R dir	8%	8%	9%	8%	9%	9%	8%
R dif	22%	19%	14%	18%	16%	14%	18%
V dir	5%	6%	5%	5%	5%	4%	5%
V vel	3%	4%	3%	4%	4%	3%	4%
MAE	0,048	0,044	0,013	0,045	0,037	0,033	0,044
MSE	0,005	0,005	0,000	0,005	0,003	0,003	0,005
RMSE	0,073	0,070	0,022	0,074	0,058	0,054	0,071
R <sup>2</sup>	0,978	0,976	0,995	0,974	0,982	0,984	0,976

Tabela 47 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Vitória da Conquista

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	12%	15%	37%	21%	27%	26%	16%
TPO	3%	4%	4%	3%	4%	3%	4%
UR	19%	19%	6%	21%	17%	17%	19%
P	17%	16%	14%	12%	11%	12%	15%
R inf	2%	2%	4%	3%	3%	3%	2%
R dir	11%	11%	11%	11%	10%	10%	11%
R dif	22%	21%	16%	17%	15%	16%	21%
V dir	10%	7%	5%	7%	8%	7%	7%
V vel	4%	4%	3%	5%	5%	5%	5%
MAE	0,066	0,062	0,037	0,059	0,061	0,062	0,063
MSE	0,009	0,008	0,003	0,008	0,008	0,008	0,008
RMSE	0,093	0,089	0,058	0,087	0,088	0,090	0,090
R <sup>2</sup>	0,965	0,967	0,979	0,967	0,967	0,966	0,967

Tabela 48 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Guaramiranga

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	14%	14%	15%	12%	15%	15%	13%
TPO	4%	5%	6%	9%	7%	7%	6%
UR	8%	8%	6%	6%	7%	6%	7%
P	28%	21%	17%	17%	11%	14%	20%
R inf	2%	5%	10%	7%	6%	6%	4%
R dir	12%	10%	11%	11%	12%	13%	12%
R dif	18%	16%	15%	14%	14%	16%	17%
V dir	5%	10%	14%	11%	11%	11%	10%
V vel	8%	10%	6%	13%	16%	13%	11%
MAE	0,058	0,037	0,007	0,017	0,007	0,017	0,037
MSE	0,008	0,004	0,000	0,001	0,000	0,001	0,004
RMSE	0,091	0,063	0,031	0,031	0,012	0,031	0,063
R <sup>2</sup>	0,961	0,962	1,000	0,977	0,992	0,975	0,961

Tabela 49 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Alegre

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	49%	54%	53%	56%	56%	55%	54%
TPO	2%	2%	3%	2%	2%	3%	2%
UR	4%	3%	3%	3%	3%	4%	3%
P	5%	5%	7%	6%	5%	7%	5%
R inf	2%	2%	5%	2%	2%	2%	2%
R dir	6%	5%	7%	4%	6%	6%	5%
R dif	24%	21%	15%	19%	15%	15%	20%
V dir	5%	5%	4%	5%	5%	5%	5%
V vel	4%	3%	3%	3%	4%	4%	3%
MAE	0,041	0,042	0,046	0,042	0,042	0,042	0,043
MSE	0,004	0,004	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004
RMSE	0,061	0,062	0,069	0,062	0,062	0,061	0,064
R <sup>2</sup>	0,984	0,984	0,981	0,984	0,983	0,983	0,983

Tabela 50 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Teófilo Otoni

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	53%	58%	61%	60%	62%	60%	59%
TPO	2%	2%	3%	2%	3%	3%	2%
UR	10%	6%	2%	5%	4%	5%	5%
P	7%	7%	8%	6%	6%	6%	6%
R inf	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%
R dir	4%	6%	8%	5%	5%	5%	5%
R dif	14%	14%	9%	13%	11%	11%	14%
V dir	5%	4%	4%	4%	5%	5%	4%
V vel	3%	3%	2%	2%	2%	3%	2%
MAE	0,041	0,038	0,035	0,038	0,043	0,044	0,038
MSE	0,004	0,003	0,003	0,004	0,005	0,005	0,003
RMSE	0,063	0,059	0,055	0,060	0,067	0,067	0,059
R <sup>2</sup>	0,984	0,986	0,987	0,985	0,981	0,982	0,986

Tabela 51 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Iguapé

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	35%	46%	54%	55%	60%	59%	48%
TPO	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
UR	8%	5%	2%	3%	3%	3%	5%
P	9%	9%	9%	8%	6%	6%	9%
R inf	3%	3%	7%	3%	3%	3%	3%
R dir	8%	6%	5%	5%	5%	5%	6%
R dif	18%	15%	10%	12%	11%	11%	15%
V dir	8%	6%	5%	5%	5%	5%	6%
V vel	9%	6%	6%	6%	5%	5%	6%
MAE	0,059	0,050	0,032	0,039	0,039	0,042	0,050
MSE	0,007	0,006	0,003	0,004	0,004	0,004	0,006
RMSE	0,085	0,076	0,052	0,061	0,061	0,066	0,076
R <sup>2</sup>	0,970	0,973	0,985	0,981	0,982	0,979	0,973

Tabela 52 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Sorriso

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	35%	36%	33%	38%	41%	43%	37%
TPO	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%
UR	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
P	29%	27%	28%	26%	23%	22%	26%
R inf	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%
R dir	7%	6%	6%	7%	7%	7%	7%
R dif	14%	14%	14%	13%	12%	12%	13%
V dir	5%	6%	6%	6%	6%	5%	6%
V vel	3%	3%	3%	3%	4%	3%	3%
MAE	0,038	0,043	0,047	0,042	0,039	0,037	0,041
MSE	0,003	0,004	0,005	0,004	0,003	0,003	0,004
RMSE	0,057	0,063	0,069	0,062	0,057	0,056	0,060
R <sup>2</sup>	0,985	0,982	0,979	0,983	0,984	0,985	0,984

Tabela 53 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Miranda

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	57%	58%	52%	59%	62%	61%	58%
TPO	2%	3%	4%	3%	3%	3%	2%
UR	4%	3%	3%	3%	4%	4%	4%
P	7%	9%	13%	10%	8%	6%	10%
R inf	3%	3%	8%	3%	3%	4%	4%
R dir	4%	4%	5%	4%	3%	4%	5%
R dif	15%	12%	8%	11%	11%	11%	11%
V dir	5%	5%	4%	4%	4%	4%	4%
V vel	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,039	0,036	0,042	0,036	0,033	0,036	0,036
MSE	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003
RMSE	0,059	0,055	0,062	0,056	0,051	0,055	0,055
R <sup>2</sup>	0,984	0,987	0,984	0,987	0,988	0,986	0,987

Tabela 54 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Niterói

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	35%	44%	42%	46%	52%	47%	43%
TPO	2%	2%	3%	3%	3%	3%	3%
UR	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
P	6%	7%	8%	7%	4%	6%	7%
R inf	4%	8%	14%	8%	7%	8%	8%
R dir	10%	6%	5%	5%	6%	6%	6%
R dif	19%	14%	11%	12%	12%	12%	14%
V dir	10%	7%	6%	7%	6%	6%	7%
V vel	12%	10%	10%	9%	7%	9%	10%
MAE	0,056	0,050	0,037	0,046	0,040	0,044	0,052
MSE	0,007	0,006	0,003	0,005	0,004	0,004	0,006
RMSE	0,081	0,075	0,057	0,069	0,061	0,067	0,077
R <sup>2</sup>	0,974	0,975	0,983	0,978	0,982	0,980	0,974

Tabela 55 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Paraná

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	50%	54%	47%	56%	58%	58%	55%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
UR	2%	2%	2%	3%	3%	3%	3%
P	25%	23%	27%	21%	19%	18%	22%
R inf	2%	2%	2%	2%	2%	3%	2%
R dir	5%	4%	5%	4%	5%	5%	4%
R dif	9%	9%	10%	8%	7%	6%	8%
V dir	3%	2%	3%	3%	3%	3%	3%
V vel	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
MAE	0,025	0,024	0,029	0,024	0,021	0,020	0,024
MSE	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001
RMSE	0,039	0,039	0,045	0,039	0,033	0,032	0,038
R <sup>2</sup>	0,993	0,993	0,991	0,993	0,994	0,995	0,993

Tabela 56 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Santa Rita de Cassia

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	49%	48%	45%	47%	45%	43%	47%
TPO	3%	4%	4%	4%	5%	5%	4%
UR	3%	4%	3%	3%	4%	4%	4%
P	16%	14%	15%	13%	13%	12%	14%
R inf	2%	3%	4%	3%	4%	5%	4%
R dir	7%	8%	9%	9%	9%	9%	9%
R dif	13%	11%	11%	12%	11%	11%	10%
V dir	3%	4%	4%	5%	6%	6%	5%
V vel	3%	4%	4%	4%	4%	5%	4%
MAE	0,039	0,046	0,051	0,047	0,050	0,050	0,047
MSE	0,004	0,005	0,006	0,005	0,006	0,006	0,005
RMSE	0,060	0,071	0,077	0,072	0,076	0,076	0,072
R <sup>2</sup>	0,983	0,976	0,973	0,975	0,971	0,970	0,975

Tabela 57 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Irecê

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	46%	45%	43%	45%	48%	46%	45%
TPO	3%	3%	3%	3%	4%	4%	3%
UR	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
P	11%	13%	18%	15%	15%	16%	15%
R inf	2%	3%	3%	3%	2%	3%	2%
R dir	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
R dif	19%	14%	9%	10%	7%	7%	12%
V dir	4%	5%	6%	6%	6%	6%	5%
V vel	3%	3%	4%	3%	4%	4%	4%
MAE	0,054	0,059	0,061	0,063	0,066	0,067	0,061
MSE	0,007	0,008	0,008	0,009	0,010	0,010	0,009
RMSE	0,083	0,090	0,089	0,093	0,098	0,099	0,093
R <sup>2</sup>	0,972	0,967	0,968	0,965	0,962	0,961	0,965

Tabela 58 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Serra Talhada

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	36%	44%	47%	47%	51%	50%	45%
TPO	3%	3%	3%	3%	4%	4%	3%
UR	4%	4%	3%	4%	4%	4%	4%
P	22%	16%	20%	17%	14%	14%	17%
R inf	2%	2%	2%	2%	3%	3%	2%
R dir	8%	9%	8%	9%	8%	8%	8%
R dif	18%	14%	10%	10%	8%	8%	12%
V dir	6%	5%	5%	5%	5%	6%	5%
V vel	2%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,046	0,050	0,049	0,052	0,053	0,057	0,051
MSE	0,005	0,006	0,005	0,006	0,006	0,007	0,006
RMSE	0,069	0,075	0,074	0,077	0,079	0,085	0,076
R <sup>2</sup>	0,979	0,976	0,978	0,975	0,973	0,969	0,975

Tabela 59 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Montes Claros

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	48%	47%	42%	48%	49%	47%	47%
TPO	4%	4%	4%	4%	5%	5%	4%
UR	3%	3%	3%	3%	4%	3%	3%
P	12%	13%	19%	13%	11%	12%	14%
R inf	4%	4%	7%	3%	4%	4%	4%
R dir	8%	9%	8%	9%	9%	9%	9%
R dif	13%	11%	8%	9%	8%	8%	10%
V dir	5%	5%	5%	5%	6%	6%	5%
V vel	4%	5%	5%	5%	4%	4%	5%
MAE	0,061	0,066	0,065	0,066	0,069	0,074	0,067
MSE	0,008	0,009	0,009	0,009	0,010	0,011	0,010
RMSE	0,092	0,097	0,096	0,096	0,100	0,107	0,099
R <sup>2</sup>	0,966	0,962	0,962	0,963	0,960	0,954	0,961

Tabela 60 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Presidente Prudente

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	50%	49%	47%	50%	47%	45%	49%
TPO	4%	4%	4%	4%	5%	5%	5%
UR	3%	4%	5%	3%	4%	4%	4%
P	11%	11%	11%	11%	10%	11%	10%
R inf	5%	7%	9%	8%	9%	8%	7%
R dir	6%	7%	7%	6%	6%	6%	7%
R dif	9%	7%	7%	7%	8%	8%	7%
V dir	8%	8%	6%	7%	8%	8%	7%
V vel	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
MAE	0,066	0,066	0,070	0,062	0,064	0,069	0,068
MSE	0,010	0,010	0,011	0,009	0,010	0,011	0,011
RMSE	0,101	0,101	0,106	0,095	0,099	0,107	0,103
R <sup>2</sup>	0,959	0,959	0,954	0,964	0,961	0,954	0,957

Tabela 61 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Goiânia

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	35%	33%	20%	35%	34%	33%	33%
TPO	3%	4%	5%	4%	5%	5%	4%
UR	3%	3%	5%	3%	4%	5%	4%
P	19%	20%	32%	19%	19%	19%	21%
R inf	3%	4%	6%	4%	4%	4%	4%
R dir	9%	10%	9%	9%	10%	10%	9%
R dif	19%	16%	11%	14%	12%	12%	15%
V dir	6%	7%	7%	7%	8%	9%	7%
V vel	4%	4%	5%	4%	5%	5%	4%
MAE	0,056	0,072	0,078	0,073	0,078	0,080	0,073
MSE	0,007	0,012	0,013	0,012	0,014	0,014	0,012
RMSE	0,087	0,108	0,115	0,109	0,117	0,119	0,109
R <sup>2</sup>	0,968	0,952	0,947	0,952	0,944	0,942	0,951

Tabela 62 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Rondonópolis

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	28%	25%	15%	28%	31%	30%	28%
TPO	4%	4%	5%	4%	5%	5%	4%
UR	6%	7%	8%	7%	6%	6%	6%
P	28%	29%	37%	29%	24%	22%	27%
R inf	4%	4%	7%	4%	5%	5%	4%
R dir	6%	7%	8%	7%	7%	7%	7%
R dif	13%	11%	10%	10%	9%	10%	10%
V dir	7%	7%	7%	7%	8%	9%	7%
V vel	4%	4%	5%	4%	5%	5%	5%
MAE	0,052	0,059	0,066	0,060	0,064	0,065	0,059
MSE	0,006	0,008	0,009	0,008	0,009	0,009	0,008
RMSE	0,078	0,087	0,096	0,088	0,094	0,096	0,087
R <sup>2</sup>	0,971	0,967	0,961	0,966	0,959	0,957	0,966

Tabela 63 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Paranatinga

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	26%	28%	18%	30%	34%	33%	30%
TPO	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
UR	4%	4%	5%	4%	4%	5%	4%
P	24%	23%	35%	21%	19%	18%	22%
R inf	3%	3%	5%	3%	3%	4%	3%
R dir	11%	10%	8%	10%	10%	9%	10%
R dif	18%	16%	13%	16%	13%	13%	15%
V dir	6%	7%	7%	7%	8%	7%	7%
V vel	5%	5%	5%	5%	6%	7%	5%
MAE	0,055	0,059	0,068	0,059	0,062	0,063	0,059
MSE	0,006	0,007	0,009	0,008	0,008	0,008	0,007
RMSE	0,080	0,086	0,097	0,087	0,089	0,092	0,086
R <sup>2</sup>	0,970	0,967	0,962	0,966	0,963	0,960	0,967

Tabela 64 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Campo Grande

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	33%	38%	35%	40%	42%	40%	39%
TPO	4%	4%	5%	4%	5%	5%	5%
UR	5%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
P	20%	18%	22%	19%	19%	19%	18%
R inf	4%	4%	5%	4%	4%	4%	4%
R dir	8%	8%	8%	7%	6%	6%	7%
R dif	14%	12%	9%	11%	9%	9%	12%
V dir	7%	7%	7%	7%	7%	8%	8%
V vel	4%	5%	5%	4%	4%	5%	4%
MAE	0,063	0,064	0,067	0,062	0,064	0,069	0,065
MSE	0,008	0,009	0,009	0,008	0,008	0,010	0,009
RMSE	0,090	0,092	0,096	0,089	0,091	0,099	0,093
R <sup>2</sup>	0,966	0,966	0,963	0,968	0,967	0,961	0,966

Tabela 65 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Coxim

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	40%	42%	19%	42%	42%	39%	40%
TPO	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
UR	8%	8%	11%	8%	7%	8%	8%
P	16%	18%	35%	20%	20%	22%	19%
R inf	3%	3%	7%	3%	3%	3%	3%
R dir	6%	6%	8%	6%	7%	7%	7%
R dif	15%	11%	8%	9%	8%	8%	11%
V dir	5%	5%	6%	5%	6%	6%	5%
V vel	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
MAE	0,044	0,050	0,056	0,050	0,051	0,051	0,051
MSE	0,005	0,006	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006
RMSE	0,067	0,075	0,081	0,075	0,076	0,074	0,076
R <sup>2</sup>	0,979	0,975	0,973	0,975	0,974	0,974	0,974

Tabela 66 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Palmas

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	41%	41%	42%	42%	43%	42%	42%
TPO	4%	4%	4%	4%	5%	5%	5%
UR	3%	3%	3%	4%	5%	5%	4%
P	22%	18%	18%	17%	15%	14%	17%
R inf	4%	4%	4%	4%	4%	3%	4%
R dir	6%	6%	6%	6%	6%	7%	6%
R dif	11%	13%	13%	12%	12%	11%	12%
V dir	6%	6%	7%	7%	7%	8%	7%
V vel	3%	4%	4%	4%	4%	5%	4%
MAE	0,047	0,053	0,053	0,053	0,053	0,052	0,052
MSE	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
RMSE	0,073	0,079	0,080	0,080	0,080	0,078	0,078
R <sup>2</sup>	0,974	0,971	0,970	0,970	0,969	0,968	0,971

Tabela 67 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Dianópolis

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	37%	40%	43%	42%	43%	43%	41%
TPO	3%	3%	3%	3%	4%	4%	3%
UR	4%	4%	4%	4%	5%	4%	4%
P	22%	16%	13%	15%	15%	15%	16%
R inf	2%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
R dir	7%	8%	8%	7%	6%	7%	7%
R dif	16%	16%	15%	15%	13%	12%	16%
V dir	5%	6%	7%	6%	7%	8%	6%
V vel	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
MAE	0,049	0,058	0,062	0,061	0,063	0,063	0,060
MSE	0,005	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
RMSE	0,073	0,085	0,090	0,089	0,091	0,090	0,088
R <sup>2</sup>	0,978	0,971	0,968	0,968	0,967	0,967	0,969

Tabela 68 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Barreiras

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	48%	47%	40%	47%	45%	41%	47%
TPO	3%	4%	5%	4%	5%	6%	4%
UR	3%	4%	4%	4%	5%	5%	4%
P	14%	11%	14%	10%	11%	10%	11%
R inf	3%	3%	5%	4%	5%	5%	4%
R dir	8%	9%	9%	9%	8%	9%	9%
R dif	14%	14%	12%	13%	11%	11%	13%
V dir	4%	5%	6%	5%	7%	7%	5%
V vel	3%	3%	4%	4%	5%	6%	3%
MAE	0,042	0,052	0,066	0,053	0,059	0,061	0,054
MSE	0,004	0,006	0,009	0,006	0,008	0,008	0,007
RMSE	0,065	0,078	0,096	0,080	0,088	0,090	0,081
R <sup>2</sup>	0,981	0,973	0,962	0,972	0,964	0,961	0,970

Tabela 69 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Barbalha

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	45%	45%	45%	45%	44%	43%	45%
TPO	3%	3%	3%	3%	4%	4%	3%
UR	3%	3%	3%	3%	4%	5%	3%
P	10%	10%	10%	10%	10%	11%	10%
R inf	2%	2%	2%	2%	3%	3%	2%
R dir	9%	10%	10%	10%	10%	9%	10%
R dif	20%	18%	18%	17%	14%	14%	17%
V dir	6%	6%	6%	6%	8%	8%	6%
V vel	3%	3%	3%	3%	4%	4%	3%
MAE	0,040	0,048	0,050	0,048	0,052	0,053	0,047
MSE	0,004	0,005	0,006	0,005	0,006	0,007	0,005
RMSE	0,061	0,073	0,076	0,072	0,079	0,081	0,072
R <sup>2</sup>	0,982	0,975	0,974	0,976	0,969	0,967	0,975

Tabela 70 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Imperatriz

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	49%	50%	50%	51%	53%	52%	53%
TPO	2%	2%	2%	2%	4%	3%	3%
UR	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
P	25%	24%	25%	24%	21%	19%	23%
R inf	3%	4%	4%	4%	3%	3%	3%
R dir	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
R dif	7%	7%	6%	6%	6%	8%	5%
V dir	5%	4%	5%	5%	5%	6%	4%
V vel	3%	3%	3%	3%	2%	3%	3%
MAE	0,026	0,026	0,027	0,026	0,023	0,022	0,025
MSE	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002
RMSE	0,040	0,040	0,042	0,041	0,036	0,036	0,041
R <sup>2</sup>	0,992	0,992	0,991	0,992	0,992	0,992	0,991

Tabela 71 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Caxias

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	18%	21%	20%	23%	32%	38%	25%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
UR	32%	31%	31%	29%	19%	12%	28%
P	22%	21%	22%	21%	20%	19%	21%
R inf	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
R dir	5%	4%	5%	4%	6%	7%	5%
R dif	13%	12%	13%	13%	12%	13%	12%
V dir	5%	5%	4%	5%	5%	5%	5%
V vel	3%	2%	2%	2%	3%	3%	3%
MAE	0,024	0,024	0,025	0,025	0,023	0,022	0,023
MSE	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
RMSE	0,037	0,038	0,039	0,038	0,036	0,035	0,037
R <sup>2</sup>	0,993	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,993

Tabela 72 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Patos

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	31%	30%	29%	30%	39%	37%	36%
TPO	3%	2%	3%	3%	3%	3%	2%
UR	2%	2%	2%	2%	3%	3%	2%
P	21%	22%	25%	23%	13%	11%	17%
R inf	3%	4%	4%	3%	3%	5%	3%
R dir	18%	17%	16%	17%	18%	19%	19%
R dif	13%	13%	13%	13%	12%	11%	12%
V dir	7%	7%	7%	7%	6%	6%	6%
V vel	3%	3%	3%	2%	4%	4%	3%
MAE	0,031	0,032	0,033	0,032	0,028	0,027	0,029
MSE	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
RMSE	0,048	0,049	0,050	0,049	0,043	0,041	0,043
R <sup>2</sup>	0,988	0,987	0,987	0,987	0,989	0,989	0,989

Tabela 73 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Petrolina

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	56%	60%	61%	61%	62%	61%	61%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
UR	3%	3%	3%	2%	3%	3%	2%
P	7%	7%	7%	7%	7%	9%	7%
R inf	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
R dir	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%
R dif	13%	12%	11%	11%	8%	6%	10%
V dir	7%	6%	6%	6%	7%	7%	6%
V vel	2%	2%	2%	2%	3%	3%	3%
MAE	0,035	0,035	0,035	0,035	0,034	0,033	0,035
MSE	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
RMSE	0,054	0,053	0,055	0,054	0,053	0,053	0,055
R <sup>2</sup>	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,986

Tabela 74 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Teresina

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	44%	45%	46%	46%	46%	46%	45%
TPO	1%	1%	1%	1%	2%	2%	2%
UR	2%	2%	2%	2%	3%	2%	3%
P	11%	11%	11%	11%	10%	11%	10%
R inf	8%	9%	8%	9%	8%	8%	9%
R dir	5%	4%	4%	4%	5%	4%	5%
R dif	21%	20%	19%	19%	18%	18%	18%
V dir	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
V vel	2%	2%	2%	2%	3%	3%	3%
MAE	0,022	0,024	0,024	0,023	0,019	0,018	0,020
MSE	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
RMSE	0,035	0,037	0,038	0,037	0,030	0,029	0,033
R <sup>2</sup>	0,992	0,991	0,991	0,991	0,993	0,993	0,992

Tabela 75 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Caicó

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	33%	35%	37%	38%	40%	42%	42%
TPO	2%	2%	3%	2%	3%	2%	3%
UR	2%	2%	2%	3%	3%	2%	2%
P	27%	28%	26%	23%	19%	18%	21%
R inf	2%	2%	2%	2%	2%	4%	2%
R dir	12%	11%	10%	11%	12%	12%	10%
R dif	15%	13%	13%	14%	14%	13%	14%
V dir	5%	4%	4%	4%	4%	4%	3%
V vel	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,030	0,029	0,029	0,029	0,027	0,026	0,027
MSE	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
RMSE	0,046	0,044	0,046	0,046	0,043	0,042	0,042
R <sup>2</sup>	0,988	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,990

Tabela 76 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Mossoró

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	4%	4%	4%	4%	5%	5%	4%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	3%	3%
UR	2%	2%	3%	2%	3%	3%	3%
P	15%	16%	16%	14%	12%	10%	14%
R inf	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
R dir	19%	18%	17%	20%	21%	17%	19%
R dif	25%	24%	23%	24%	27%	28%	25%
V dir	28%	29%	29%	28%	24%	28%	28%
V vel	3%	3%	3%	3%	3%	4%	3%
MAE	0,025	0,026	0,027	0,025	0,024	0,024	0,026
MSE	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002
RMSE	0,039	0,041	0,042	0,041	0,038	0,039	0,041
R <sup>2</sup>	0,992	0,991	0,990	0,991	0,991	0,990	0,991

Tabela 77 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Monte Azul

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	52%	51%	54%	50%	29%	26%	50%
TPO	7%	6%	5%	7%	5%	5%	7%
UR	10%	10%	8%	10%	30%	32%	9%
P	5%	5%	6%	5%	7%	8%	6%
R inf	6%	5%	5%	5%	5%	6%	5%
R dir	8%	8%	8%	8%	8%	8%	9%
R dif	6%	7%	7%	7%	6%	6%	7%
V dir	4%	4%	4%	5%	6%	5%	5%
V vel	3%	3%	2%	3%	4%	5%	3%
MAE	0,037	0,039	0,044	0,041	0,038	0,038	0,042
MSE	0,003	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,004
RMSE	0,056	0,059	0,066	0,062	0,058	0,058	0,062
R <sup>2</sup>	0,987	0,986	0,982	0,984	0,986	0,986	0,984

Tabela 78 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Monte Alegre do Goiás

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	39%	42%	43%	43%	44%	40%	42%
TPO	2%	2%	2%	2%	3%	2%	2%
UR	3%	3%	2%	3%	3%	4%	3%
P	23%	19%	20%	18%	17%	18%	19%
R inf	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
R dir	7%	6%	6%	6%	8%	9%	6%
R dif	19%	19%	17%	20%	17%	18%	19%
V dir	4%	4%	5%	4%	4%	5%	4%
V vel	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
MAE	0,039	0,040	0,044	0,040	0,038	0,036	0,041
MSE	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,004
RMSE	0,059	0,061	0,066	0,062	0,058	0,056	0,063
R <sup>2</sup>	0,983	0,983	0,981	0,982	0,982	0,983	0,981

Tabela 79 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Cuiabá

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	35%	37%	36%	38%	40%	39%	36%
TPO	4%	4%	4%	4%	3%	3%	4%
UR	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
P	23%	24%	26%	24%	19%	18%	23%
R inf	3%	4%	5%	4%	4%	4%	5%
R dir	9%	8%	7%	7%	10%	11%	8%
R dif	15%	13%	12%	13%	12%	12%	13%
V dir	4%	4%	4%	4%	5%	4%	4%
V vel	3%	2%	3%	2%	2%	3%	3%
MAE	0,042	0,040	0,044	0,040	0,038	0,035	0,042
MSE	0,004	0,004	0,005	0,004	0,003	0,003	0,004
RMSE	0,067	0,061	0,067	0,060	0,058	0,056	0,064
R <sup>2</sup>	0,977	0,982	0,978	0,982	0,981	0,982	0,978

Tabela 80 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Rio Branco

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	12%	14%	14%	14%	16%	18%	13%
TPO	3%	3%	3%	2%	3%	2%	3%
UR	51%	50%	48%	51%	50%	49%	51%
P	14%	13%	13%	12%	10%	8%	12%
R inf	3%	2%	4%	2%	3%	3%	3%
R dir	4%	4%	4%	4%	4%	5%	3%
R dif	6%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
V dir	5%	5%	5%	5%	5%	6%	5%
V vel	3%	4%	4%	4%	5%	5%	4%
MAE	0,040	0,039	0,043	0,039	0,042	0,041	0,041
MSE	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004
RMSE	0,061	0,060	0,065	0,059	0,064	0,063	0,063
R <sup>2</sup>	0,984	0,985	0,983	0,986	0,983	0,983	0,983

Tabela 81 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Macapá

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	31%	34%	33%	34%	38%	40%	35%
TPO	4%	4%	4%	4%	3%	3%	4%
UR	7%	7%	8%	8%	7%	6%	7%
P	27%	26%	26%	25%	22%	22%	25%
R inf	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
R dir	8%	8%	7%	8%	8%	7%	7%
R dif	11%	10%	10%	10%	11%	11%	10%
V dir	6%	6%	6%	6%	7%	7%	6%
V vel	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,047	0,050	0,050	0,050	0,044	0,042	0,047
MSE	0,005	0,006	0,006	0,006	0,005	0,004	0,005
RMSE	0,071	0,076	0,076	0,076	0,067	0,065	0,072
R <sup>2</sup>	0,976	0,974	0,974	0,974	0,978	0,979	0,976

Tabela 82 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Oiapoque

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	11%	12%	12%	13%	23%	24%	14%
TPO	2%	3%	3%	3%	3%	2%	3%
UR	28%	33%	34%	34%	28%	29%	33%
P	22%	19%	18%	17%	15%	14%	18%
R inf	2%	2%	2%	1%	2%	2%	2%
R dir	9%	7%	7%	6%	6%	6%	7%
R dif	15%	15%	15%	14%	13%	12%	14%
V dir	5%	5%	4%	5%	5%	6%	5%
V vel	6%	5%	5%	6%	6%	5%	5%
MAE	0,045	0,046	0,048	0,047	0,044	0,042	0,046
MSE	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,005
RMSE	0,070	0,071	0,073	0,072	0,068	0,066	0,072
R <sup>2</sup>	0,978	0,977	0,977	0,977	0,978	0,979	0,977

Tabela 83 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Manaus

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	39%	41%	41%	41%	41%	39%	41%
TPO	3%	3%	3%	3%	4%	4%	3%
UR	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
P	28%	25%	25%	25%	23%	24%	24%
R inf	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
R dir	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
R dif	12%	12%	11%	11%	11%	12%	11%
V dir	4%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
V vel	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
MAE	0,034	0,036	0,036	0,035	0,032	0,030	0,034
MSE	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003
RMSE	0,055	0,058	0,058	0,057	0,052	0,050	0,056
R <sup>2</sup>	0,982	0,979	0,980	0,980	0,982	0,982	0,979

Tabela 84 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Barcelos

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	37%	40%	40%	39%	43%	45%	39%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
UR	2%	2%	2%	2%	3%	3%	3%
P	25%	24%	24%	23%	21%	19%	23%
R inf	10%	11%	11%	12%	7%	5%	11%
R dir	5%	5%	5%	5%	6%	6%	5%
R dif	11%	10%	9%	9%	9%	10%	9%
V dir	4%	4%	4%	4%	6%	6%	5%
V vel	3%	3%	3%	3%	3%	4%	4%
MAE	0,038	0,040	0,040	0,040	0,037	0,037	0,041
MSE	0,003	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004
RMSE	0,059	0,061	0,061	0,062	0,059	0,060	0,063
R <sup>2</sup>	0,983	0,982	0,982	0,982	0,982	0,980	0,980

Tabela 85 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Parintins

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	33%	37%	38%	38%	40%	37%	39%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	3%	2%
UR	6%	5%	5%	4%	4%	5%	5%
P	25%	23%	23%	23%	21%	21%	22%
R inf	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%
R dir	11%	9%	9%	9%	8%	9%	8%
R dif	11%	10%	10%	10%	10%	10%	11%
V dir	5%	6%	6%	6%	7%	7%	6%
V vel	4%	4%	5%	5%	5%	5%	5%
MAE	0,037	0,037	0,038	0,038	0,034	0,034	0,036
MSE	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003
RMSE	0,058	0,059	0,060	0,059	0,056	0,054	0,057
R <sup>2</sup>	0,979	0,979	0,978	0,978	0,978	0,978	0,977

Tabela 86 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Belém

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	29%	28%	26%	22%	21%	26%	26%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	3%	2%
UR	2%	3%	5%	3%	3%	11%	4%
P	33%	32%	32%	30%	30%	21%	32%
R inf	4%	6%	9%	13%	15%	4%	8%
R dir	4%	4%	4%	5%	5%	5%	4%
R dif	15%	14%	12%	13%	12%	14%	14%
V dir	9%	9%	8%	9%	9%	11%	8%
V vel	2%	2%	3%	3%	3%	4%	2%
MAE	0,033	0,035	0,033	0,036	0,039	0,047	0,035
MSE	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,003
RMSE	0,052	0,056	0,054	0,059	0,062	0,073	0,056
R <sup>2</sup>	0,985	0,983	0,983	0,980	0,977	0,968	0,982

Tabela 87 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Marabá

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	62%	63%	62%	64%	66%	65%	63%
TPO	1%	1%	1%	1%	2%	1%	2%
UR	2%	2%	2%	1%	2%	2%	2%
P	17%	14%	13%	13%	12%	14%	13%
R inf	1%	1%	1%	1%	1%	2%	2%
R dir	4%	4%	4%	4%	4%	3%	4%
R dif	11%	11%	12%	11%	10%	9%	11%
V dir	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
V vel	1%	1%	1%	1%	2%	1%	1%
MAE	0,020	0,020	0,021	0,020	0,020	0,019	0,022
MSE	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
RMSE	0,031	0,034	0,034	0,034	0,034	0,031	0,036
R <sup>2</sup>	0,995	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994

Tabela 88 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Parauapebas

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	33%	19%	21%	18%	20%	21%	16%
TPO	2%	4%	3%	4%	4%	4%	4%
UR	5%	8%	9%	8%	8%	8%	9%
P	3%	12%	10%	12%	8%	5%	12%
R inf	10%	10%	10%	10%	10%	10%	11%
R dir	18%	17%	18%	18%	18%	19%	17%
R dif	18%	17%	17%	17%	18%	18%	18%
V dir	7%	9%	9%	10%	11%	11%	9%
V vel	3%	4%	3%	4%	4%	3%	4%
MAE	0,083	0,097	0,100	0,099	0,101	0,098	0,097
MSE	0,015	0,019	0,021	0,020	0,020	0,019	0,019
RMSE	0,123	0,139	0,144	0,142	0,143	0,139	0,139
R <sup>2</sup>	0,939	0,923	0,917	0,920	0,918	0,921	0,922

Tabela 89 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Castanhal

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	27%	29%	29%	30%	35%	35%	30%
TPO	2%	2%	2%	2%	3%	3%	3%
UR	5%	8%	7%	7%	7%	9%	8%
P	24%	22%	21%	20%	16%	14%	18%
R inf	1%	2%	1%	2%	2%	2%	2%
R dir	9%	8%	8%	8%	8%	8%	8%
R dif	19%	17%	18%	18%	17%	15%	19%
V dir	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%
V vel	5%	6%	6%	5%	5%	6%	5%
MAE	0,042	0,045	0,047	0,046	0,044	0,042	0,046
MSE	0,004	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004	0,005
RMSE	0,063	0,069	0,071	0,069	0,067	0,065	0,069
R <sup>2</sup>	0,979	0,976	0,975	0,976	0,976	0,976	0,976

Tabela 90 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Santana do Araguaia

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	50%	54%	54%	54%	57%	54%	55%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
UR	3%	2%	2%	3%	2%	5%	3%
P	24%	22%	21%	21%	19%	18%	21%
R inf	2%	2%	1%	2%	1%	2%	1%
R dir	5%	5%	5%	5%	4%	5%	5%
R dif	7%	6%	7%	6%	7%	6%	6%
V dir	3%	3%	3%	3%	3%	4%	3%
V vel	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
MAE	0,031	0,031	0,032	0,032	0,027	0,027	0,030
MSE	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
RMSE	0,048	0,048	0,049	0,049	0,044	0,043	0,048
R <sup>2</sup>	0,989	0,989	0,989	0,989	0,990	0,990	0,989

Tabela 91 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Porto Velho

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	44%	46%	45%	47%	51%	52%	48%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
UR	3%	3%	3%	3%	4%	5%	3%
P	26%	24%	24%	24%	20%	19%	23%
R inf	3%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
R dir	5%	5%	5%	4%	4%	5%	4%
R dif	11%	11%	11%	11%	9%	9%	10%
V dir	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
V vel	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,042	0,043	0,044	0,042	0,042	0,038	0,041
MSE	0,004	0,004	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004
RMSE	0,065	0,067	0,067	0,065	0,065	0,060	0,065
R <sup>2</sup>	0,981	0,980	0,980	0,981	0,980	0,982	0,980

Tabela 92 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Boa Vista

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	38%	39%	39%	39%	39%	40%	38%
TPO	5%	5%	5%	5%	4%	3%	5%
UR	3%	3%	3%	3%	3%	4%	3%
P	12%	11%	12%	12%	10%	10%	12%
R inf	4%	5%	5%	4%	7%	6%	5%
R dir	11%	11%	11%	11%	12%	12%	12%
R dif	14%	12%	12%	13%	12%	12%	12%
V dir	6%	7%	7%	7%	7%	7%	7%
V vel	6%	5%	5%	5%	5%	6%	6%
MAE	0,041	0,044	0,043	0,044	0,038	0,035	0,042
MSE	0,004	0,005	0,005	0,005	0,004	0,003	0,004
RMSE	0,064	0,068	0,068	0,068	0,059	0,056	0,066
R <sup>2</sup>	0,978	0,975	0,975	0,976	0,979	0,980	0,976

Tabela 93 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Maceió

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	9%	9%	8%	9%	11%	18%	9%
TPO	4%	4%	3%	3%	3%	3%	3%
UR	7%	10%	11%	10%	13%	11%	10%
P	25%	26%	27%	26%	25%	23%	27%
R inf	2%	3%	2%	2%	2%	2%	2%
R dir	13%	12%	12%	12%	11%	11%	12%
R dif	11%	12%	11%	12%	11%	10%	12%
V dir	23%	20%	19%	19%	17%	17%	19%
V vel	6%	6%	6%	5%	6%	5%	5%
MAE	0,047	0,051	0,052	0,051	0,051	0,049	0,051
MSE	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006	0,005	0,006
RMSE	0,071	0,077	0,077	0,078	0,077	0,074	0,077
R <sup>2</sup>	0,975	0,973	0,973	0,972	0,972	0,973	0,972

Tabela 94 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Arapiraca

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	12%	13%	13%	14%	18%	23%	13%
TPO	4%	4%	3%	3%	3%	3%	4%
UR	8%	6%	7%	8%	8%	7%	6%
P	30%	34%	36%	35%	31%	27%	35%
R inf	2%	2%	2%	3%	2%	2%	2%
R dir	11%	10%	9%	10%	10%	10%	11%
R dif	13%	12%	12%	11%	10%	11%	10%
V dir	16%	14%	13%	14%	14%	15%	14%
V vel	4%	4%	3%	4%	3%	3%	4%
MAE	0,052	0,055	0,057	0,057	0,056	0,055	0,057
MSE	0,006	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
RMSE	0,077	0,081	0,084	0,084	0,083	0,082	0,084
R <sup>2</sup>	0,973	0,972	0,971	0,970	0,970	0,971	0,969

Tabela 95 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Salvador

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	8%	9%	9%	9%	9%	9%	9%
TPO	3%	2%	2%	3%	3%	3%	3%
UR	3%	5%	5%	5%	5%	4%	5%
P	20%	21%	21%	20%	19%	21%	20%
R inf	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
R dir	18%	17%	16%	17%	17%	16%	17%
R dif	19%	19%	20%	19%	21%	20%	19%
V dir	18%	17%	18%	17%	16%	16%	17%
V vel	7%	7%	6%	7%	7%	8%	7%
MAE	0,048	0,047	0,048	0,047	0,041	0,038	0,046
MSE	0,005	0,005	0,006	0,006	0,004	0,004	0,005
RMSE	0,074	0,074	0,075	0,075	0,065	0,062	0,073
R <sup>2</sup>	0,967	0,967	0,967	0,966	0,969	0,969	0,966

Tabela 96 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Feira de Santana

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	43%	57%	66%	63%	69%	68%	60%
TPO	2%	2%	2%	2%	1%	2%	2%
UR	14%	5%	1%	3%	2%	2%	4%
P	6%	5%	5%	5%	4%	4%	5%
R inf	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
R dir	5%	4%	4%	3%	3%	4%	4%
R dif	19%	17%	13%	16%	11%	10%	16%
V dir	7%	5%	5%	5%	6%	6%	5%
V vel	4%	3%	3%	3%	2%	3%	3%
MAE	0,044	0,042	0,035	0,041	0,038	0,039	0,043
MSE	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
RMSE	0,066	0,065	0,054	0,063	0,060	0,060	0,066
R <sup>2</sup>	0,982	0,983	0,988	0,984	0,986	0,985	0,982

Tabela 97 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Ilhéus

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	6%	6%	11%	8%	11%	12%	6%
TPO	4%	4%	3%	4%	3%	4%	4%
UR	6%	7%	4%	6%	7%	7%	6%
P	18%	29%	44%	31%	30%	28%	30%
R inf	3%	3%	3%	3%	4%	3%	3%
R dir	8%	8%	7%	8%	8%	8%	9%
R dif	20%	19%	13%	17%	13%	15%	19%
V dir	31%	20%	12%	19%	21%	20%	19%
V vel	5%	4%	4%	4%	4%	4%	5%
MAE	0,059	0,066	0,064	0,067	0,065	0,064	0,065
MSE	0,007	0,009	0,009	0,009	0,008	0,008	0,009
RMSE	0,086	0,095	0,093	0,097	0,092	0,092	0,094
R <sup>2</sup>	0,969	0,964	0,965	0,963	0,966	0,966	0,965

Tabela 98 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Fortaleza

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	9%	14%	13%	13%	11%	9%	14%
TPO	3%	3%	3%	3%	2%	2%	2%
UR	11%	12%	12%	13%	20%	20%	14%
P	19%	19%	20%	20%	17%	16%	20%
R inf	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
R dir	17%	15%	17%	15%	20%	23%	16%
R dif	18%	17%	15%	16%	13%	14%	15%
V dir	18%	16%	15%	15%	10%	9%	13%
V vel	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,038	0,038	0,040	0,038	0,034	0,033	0,037
MSE	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003
RMSE	0,059	0,059	0,061	0,060	0,053	0,053	0,058
R <sup>2</sup>	0,980	0,981	0,979	0,980	0,982	0,980	0,980

Tabela 99 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: São Luís

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	24%	24%	25%	24%	25%	23%	24%
TPO	2%	3%	2%	3%	2%	2%	3%
UR	2%	3%	3%	3%	4%	4%	3%
P	21%	18%	19%	19%	19%	19%	19%
R inf	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
R dir	11%	9%	9%	9%	9%	11%	10%
R dif	26%	27%	26%	25%	24%	24%	25%
V dir	8%	9%	9%	9%	9%	9%	9%
V vel	4%	4%	4%	5%	4%	4%	5%
MAE	0,040	0,041	0,042	0,042	0,041	0,039	0,044
MSE	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
RMSE	0,060	0,062	0,064	0,063	0,064	0,061	0,067
R <sup>2</sup>	0,978	0,977	0,976	0,976	0,970	0,969	0,971

Tabela 100 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: João Pessoa

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	6%	7%	7%	7%	9%	7%	8%
TPO	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%
UR	8%	8%	9%	10%	8%	8%	9%
P	25%	26%	28%	26%	22%	22%	27%
R inf	2%	2%	2%	2%	3%	2%	3%
R dir	19%	19%	18%	19%	19%	20%	18%
R dif	17%	14%	14%	13%	15%	16%	14%
V dir	14%	13%	12%	13%	17%	17%	13%
V vel	7%	7%	7%	6%	5%	6%	6%
MAE	0,050	0,052	0,054	0,053	0,044	0,042	0,051
MSE	0,006	0,007	0,007	0,007	0,005	0,004	0,006
RMSE	0,077	0,082	0,083	0,083	0,070	0,067	0,079
R <sup>2</sup>	0,967	0,964	0,963	0,963	0,969	0,970	0,964

Tabela 101 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Campina Grande

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	17%	15%	16%	17%	28%	32%	16%
TPO	2%	2%	2%	2%	3%	3%	2%
UR	5%	6%	3%	5%	3%	3%	6%
P	36%	37%	42%	36%	31%	27%	37%
R inf	3%	3%	3%	3%	4%	4%	3%
R dir	10%	11%	10%	10%	9%	10%	11%
R dif	18%	19%	16%	17%	13%	12%	18%
V dir	5%	5%	4%	5%	5%	5%	5%
V vel	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
MAE	0,065	0,063	0,053	0,062	0,063	0,065	0,063
MSE	0,009	0,008	0,006	0,008	0,009	0,009	0,009
RMSE	0,095	0,091	0,080	0,090	0,092	0,095	0,092
R <sup>2</sup>	0,963	0,967	0,974	0,967	0,966	0,964	0,966

Tabela 102 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Recife

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	5%	6%	6%	6%	5%	5%	6%
TPO	6%	5%	5%	4%	5%	4%	5%
UR	10%	13%	12%	12%	11%	10%	9%
P	20%	21%	20%	21%	17%	16%	22%
R inf	2%	2%	2%	2%	3%	3%	2%
R dir	26%	23%	23%	25%	24%	26%	23%
R dif	14%	13%	14%	13%	19%	19%	16%
V dir	6%	6%	6%	6%	6%	5%	6%
V vel	11%	10%	11%	11%	10%	12%	10%
MAE	0,050	0,050	0,050	0,049	0,042	0,038	0,047
MSE	0,006	0,006	0,006	0,005	0,004	0,003	0,005
RMSE	0,076	0,076	0,076	0,074	0,066	0,059	0,072
R <sup>2</sup>	0,965	0,965	0,965	0,966	0,968	0,971	0,966

Tabela 103 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Caruaru

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	8%	10%	12%	14%	15%	16%	11%
TPO	3%	3%	3%	4%	3%	3%	4%
UR	6%	6%	3%	6%	5%	5%	6%
P	35%	38%	47%	38%	38%	37%	37%
R inf	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
R dir	14%	13%	12%	12%	11%	11%	13%
R dif	17%	13%	10%	11%	12%	12%	12%
V dir	9%	9%	7%	9%	9%	8%	9%
V vel	4%	5%	4%	4%	5%	5%	5%
MAE	0,064	0,069	0,061	0,068	0,067	0,067	0,069
MSE	0,009	0,010	0,008	0,010	0,009	0,009	0,010
RMSE	0,093	0,099	0,091	0,098	0,096	0,097	0,099
R <sup>2</sup>	0,963	0,960	0,966	0,961	0,963	0,963	0,961

Tabela 104 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Parnaíba

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	21%	24%	25%	25%	29%	29%	28%
TPO	3%	3%	2%	2%	2%	2%	2%
UR	3%	3%	3%	3%	5%	4%	4%
P	8%	8%	8%	9%	8%	8%	9%
R inf	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
R dir	19%	10%	10%	10%	8%	10%	7%
R dif	21%	24%	24%	24%	25%	25%	28%
V dir	21%	23%	23%	22%	17%	16%	16%
V vel	3%	3%	3%	4%	5%	5%	4%
MAE	0,023	0,025	0,025	0,025	0,022	0,021	0,023
MSE	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001
RMSE	0,036	0,041	0,041	0,040	0,035	0,033	0,037
R <sup>2</sup>	0,992	0,989	0,989	0,990	0,991	0,991	0,991

Tabela 105 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Natal

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	19%	21%	21%	24%	25%	28%	25%
TPO	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
UR	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
P	20%	22%	22%	17%	17%	12%	15%
R inf	6%	7%	6%	7%	7%	6%	7%
R dir	13%	13%	12%	14%	14%	14%	15%
R dif	14%	13%	12%	12%	12%	13%	12%
V dir	16%	12%	12%	13%	13%	15%	14%
V vel	5%	6%	7%	6%	6%	7%	6%
MAE	0,040	0,045	0,046	0,045	0,045	0,042	0,044
MSE	0,004	0,005	0,005	0,004	0,005	0,004	0,004
RMSE	0,061	0,068	0,069	0,066	0,068	0,064	0,066
R <sup>2</sup>	0,980	0,977	0,976	0,977	0,976	0,976	0,977

Tabela 106 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Aracaju

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	8%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
TPO	3%	3%	3%	3%	3%	4%	3%
UR	2%	3%	3%	3%	3%	2%	3%
P	24%	28%	27%	27%	26%	25%	28%
R inf	3%	3%	3%	3%	3%	4%	3%
R dir	26%	20%	21%	21%	24%	23%	20%
R dif	18%	16%	15%	15%	16%	17%	16%
V dir	12%	13%	13%	13%	12%	11%	12%
V vel	4%	4%	4%	4%	5%	4%	4%
MAE	0,047	0,055	0,057	0,056	0,051	0,047	0,056
MSE	0,005	0,006	0,007	0,007	0,006	0,005	0,007
RMSE	0,070	0,080	0,083	0,081	0,075	0,071	0,081
R <sup>2</sup>	0,975	0,970	0,967	0,968	0,970	0,973	0,967

Tabela 107 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Carira

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	10%	12%	16%	13%	14%	18%	12%
TPO	8%	4%	2%	3%	2%	2%	4%
UR	7%	10%	6%	11%	14%	12%	10%
P	35%	40%	53%	43%	43%	40%	41%
R inf	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
R dir	7%	6%	5%	5%	5%	5%	5%
R dif	11%	11%	7%	9%	6%	7%	11%
V dir	15%	12%	8%	11%	11%	11%	11%
V vel	4%	3%	2%	3%	3%	3%	4%
MAE	0,058	0,058	0,046	0,053	0,048	0,049	0,055
MSE	0,007	0,007	0,005	0,006	0,005	0,005	0,007
RMSE	0,085	0,085	0,070	0,078	0,072	0,074	0,082
R <sup>2</sup>	0,970	0,971	0,980	0,976	0,979	0,978	0,973

Tabela 108 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Vitoria

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	20%	28%	29%	35%	40%	42%	31%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
UR	8%	6%	4%	5%	4%	4%	5%
P	10%	14%	26%	12%	10%	8%	13%
R inf	2%	2%	4%	3%	3%	2%	2%
R dir	6%	5%	5%	6%	5%	5%	6%
R dif	14%	13%	10%	12%	12%	11%	12%
V dir	31%	23%	16%	20%	19%	20%	22%
V vel	7%	7%	4%	6%	5%	4%	6%
MAE	0,045	0,051	0,050	0,050	0,051	0,048	0,051
MSE	0,004	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006
RMSE	0,067	0,074	0,074	0,073	0,073	0,070	0,075
R <sup>2</sup>	0,980	0,977	0,978	0,978	0,978	0,980	0,977

Tabela 109 Percentual de influência dos parâm. clim. para o CB e os casos com PCM: Rio de Janeiro

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	45%	50%	40%	52%	59%	56%	48%
TPO	3%	2%	3%	2%	3%	3%	3%
UR	8%	3%	2%	2%	3%	3%	3%
P	4%	5%	6%	5%	4%	4%	5%
R inf	3%	7%	20%	10%	3%	5%	9%
R dir	4%	5%	5%	4%	4%	5%	5%
R dif	18%	17%	13%	14%	13%	13%	17%
V dir	8%	6%	6%	6%	6%	5%	6%
V vel	7%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
MAE	0,053	0,049	0,042	0,046	0,045	0,045	0,050
MSE	0,006	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005
RMSE	0,078	0,071	0,065	0,069	0,068	0,068	0,073
R <sup>2</sup>	0,976	0,979	0,981	0,981	0,981	0,980	0,979

Tabela 110 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Juína

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	38%	39%	36%	40%	44%	44%	40%
TPO	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
UR	2%	2%	2%	2%	2%	3%	2%
P	32%	31%	33%	29%	27%	26%	30%
R inf	2%	2%	3%	3%	2%	2%	2%
R dir	6%	5%	5%	5%	6%	6%	5%
R dif	12%	12%	12%	12%	10%	11%	12%
V dir	4%	4%	4%	4%	5%	5%	4%
V vel	2%	2%	3%	3%	2%	2%	2%
MAE	0,040	0,042	0,046	0,042	0,041	0,040	0,041
MSE	0,003	0,004	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004
RMSE	0,058	0,063	0,069	0,062	0,062	0,060	0,062
R <sup>2</sup>	0,985	0,983	0,980	0,983	0,982	0,983	0,983

Tabela 111 Percentual de influência dos parâmetros climáticos para o CB e os casos com PCM: Corumbá

Parâmetro	CB	PCM18	PCM21	PCM22	PCM25	PCM28	PCM35
TBS	57%	62%	60%	63%	64%	63%	60%
TPO	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
UR	4%	4%	3%	4%	3%	4%	4%
P	7%	8%	10%	9%	7%	6%	7%
R inf	3%	4%	7%	4%	5%	5%	7%
R dir	4%	3%	4%	4%	4%	4%	4%
R dif	14%	10%	7%	8%	9%	11%	9%
V dir	4%	3%	3%	3%	3%	3%	4%
V vel	4%	4%	3%	3%	3%	2%	3%
MAE	0,039	0,035	0,037	0,035	0,033	0,035	0,035
MSE	0,004	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003
RMSE	0,061	0,057	0,061	0,054	0,055	0,058	0,059
R <sup>2</sup>	0,983	0,985	0,984	0,987	0,986	0,984	0,984

APÊNDICE E

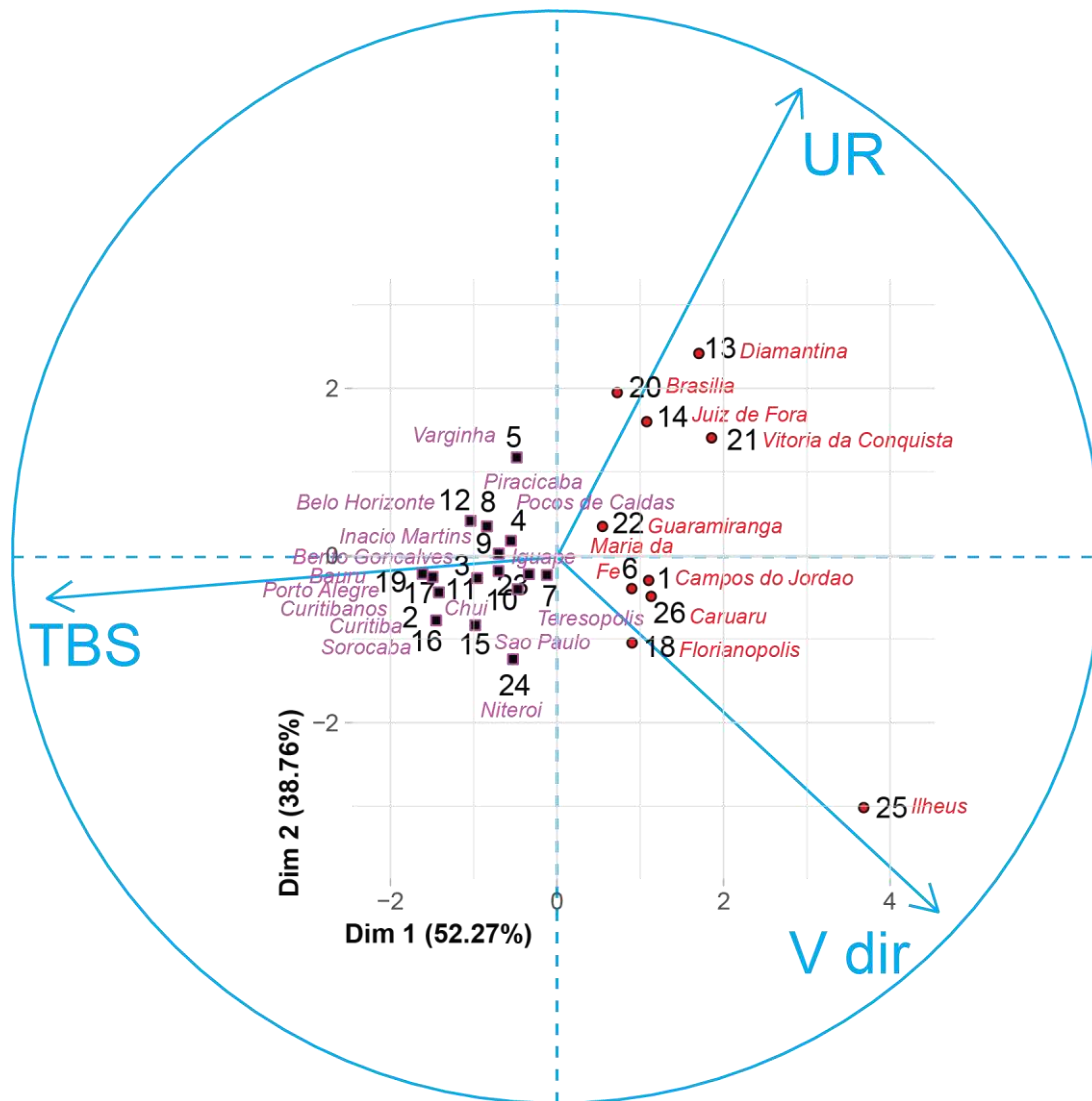


Figura 35 (Equivalente a Figura 24) Biplot – Clusters das cidades com os CB sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

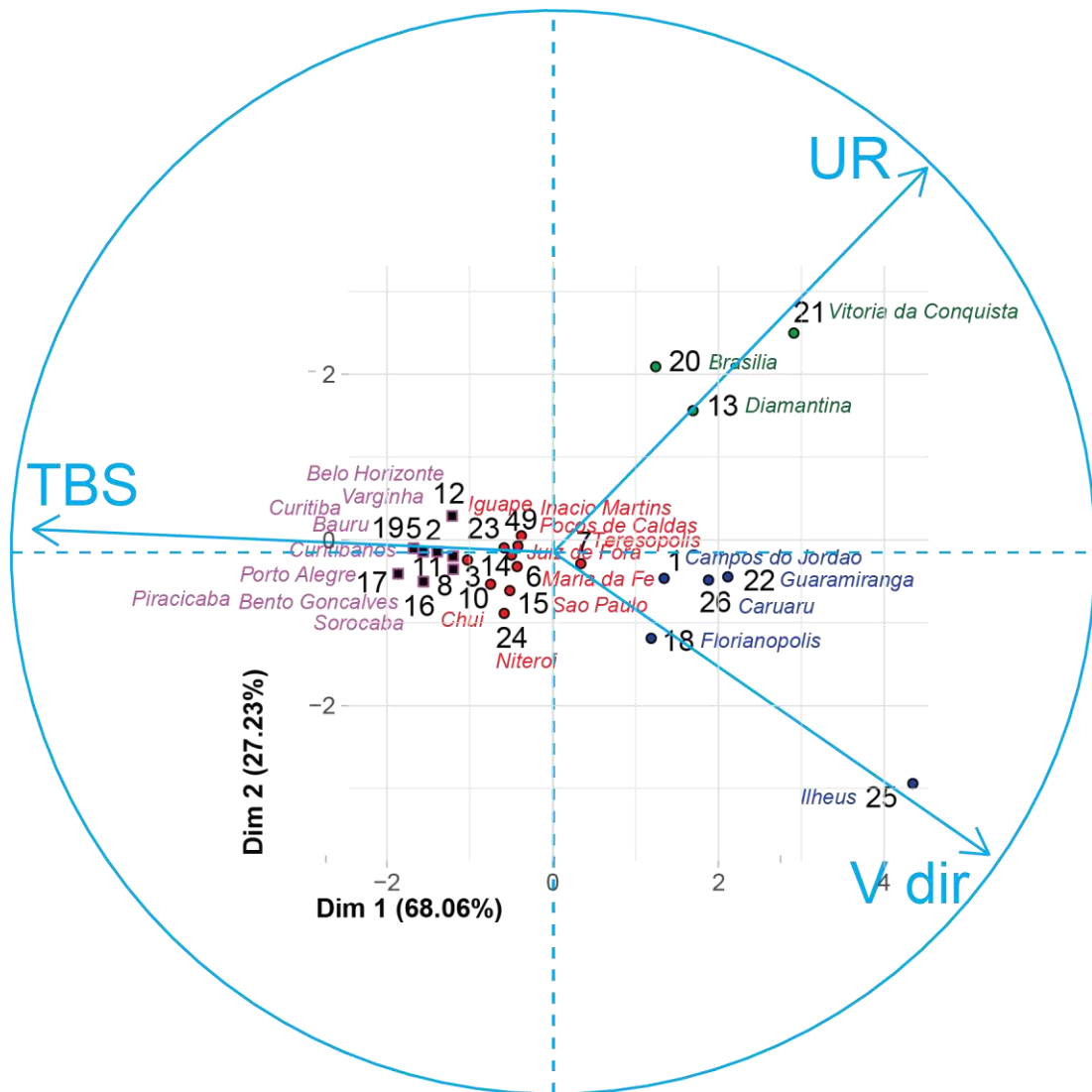


Figura 36 (Equivalente a Figura 25) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 18 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

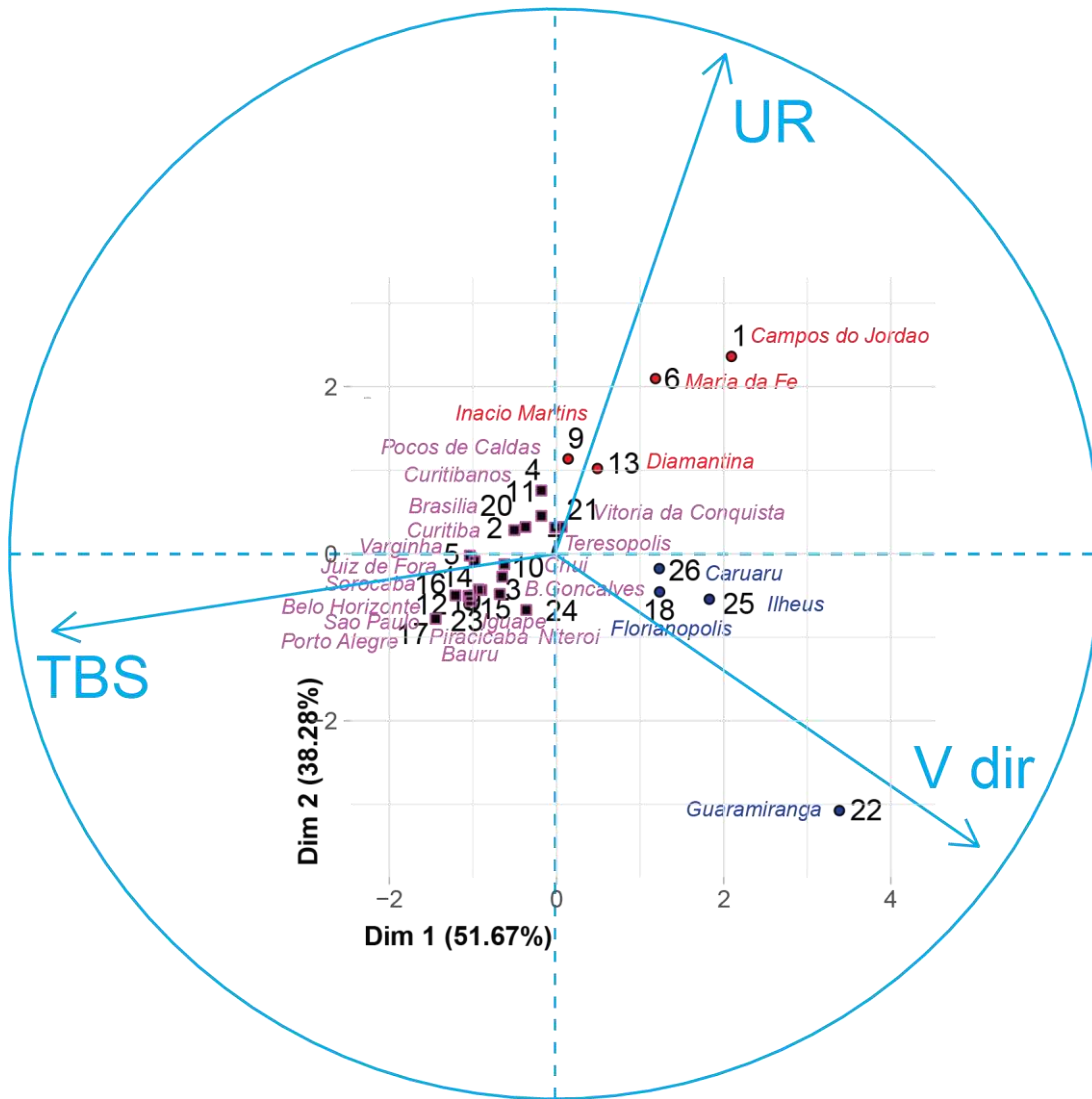


Figura 37 (Equivalente a Figura 26) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 21 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

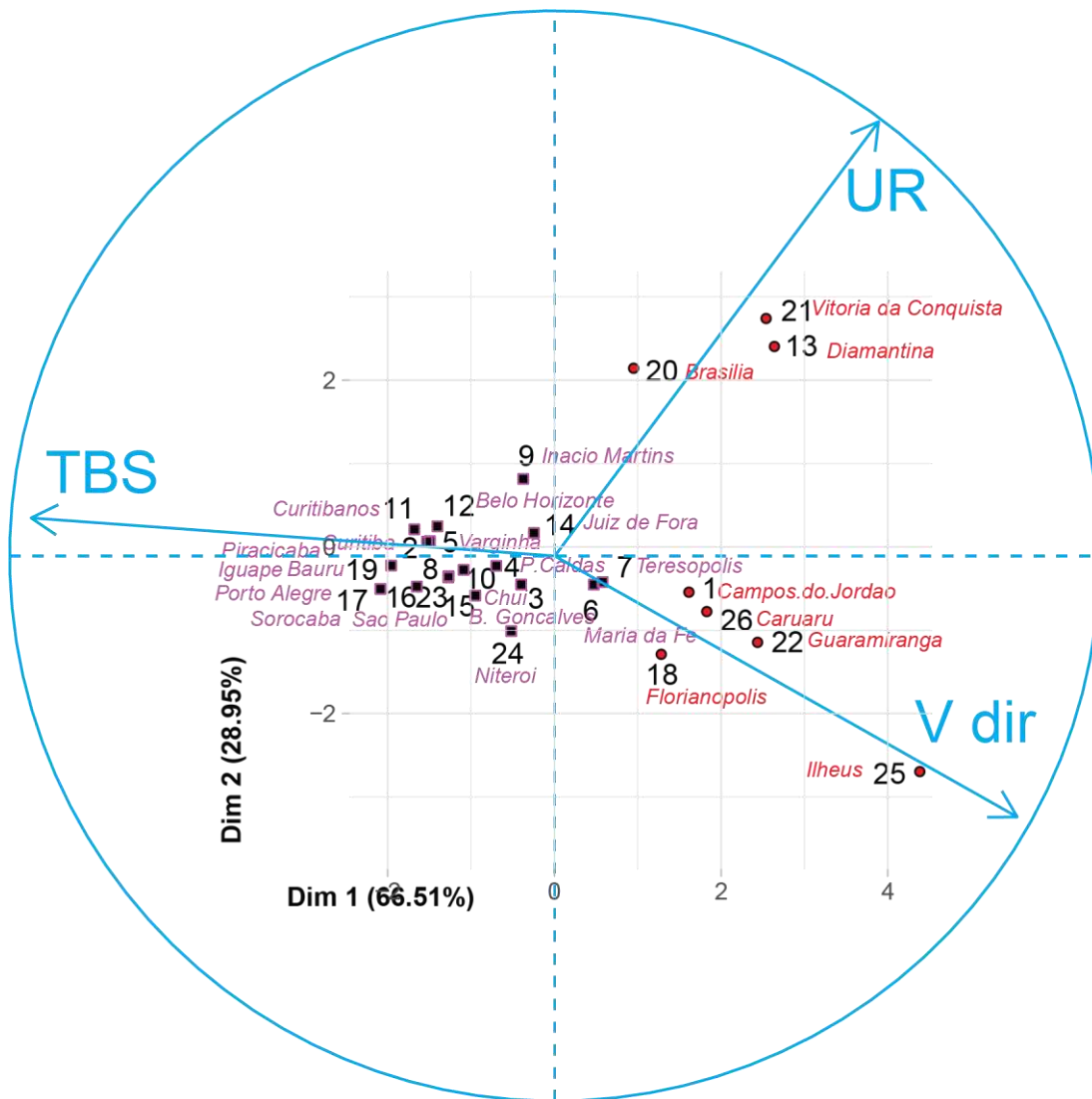


Figura 38 (Equivalente a Figura 27) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 22 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

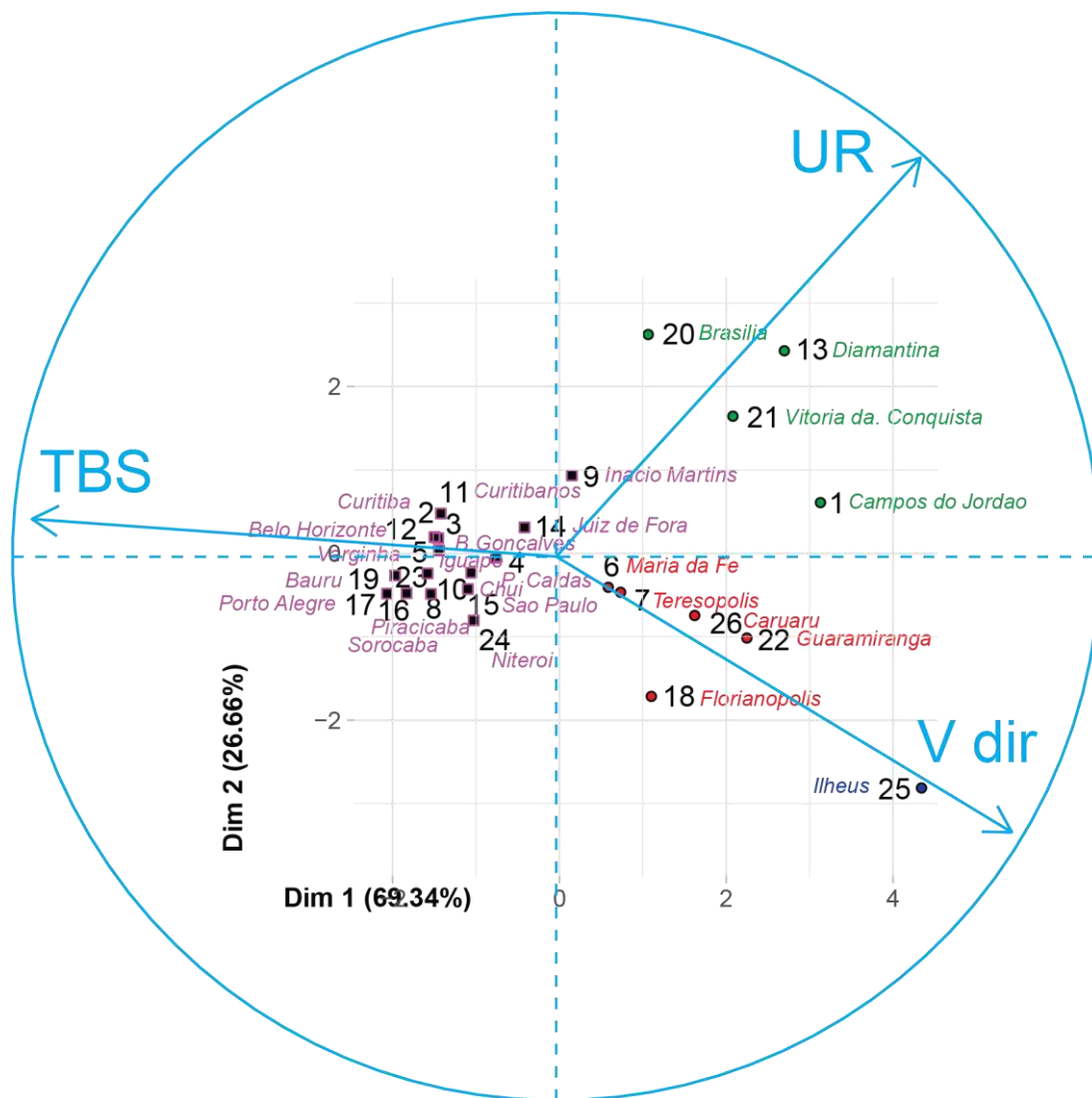


Figura 39 (Equivalente a Figura 28) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 25 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

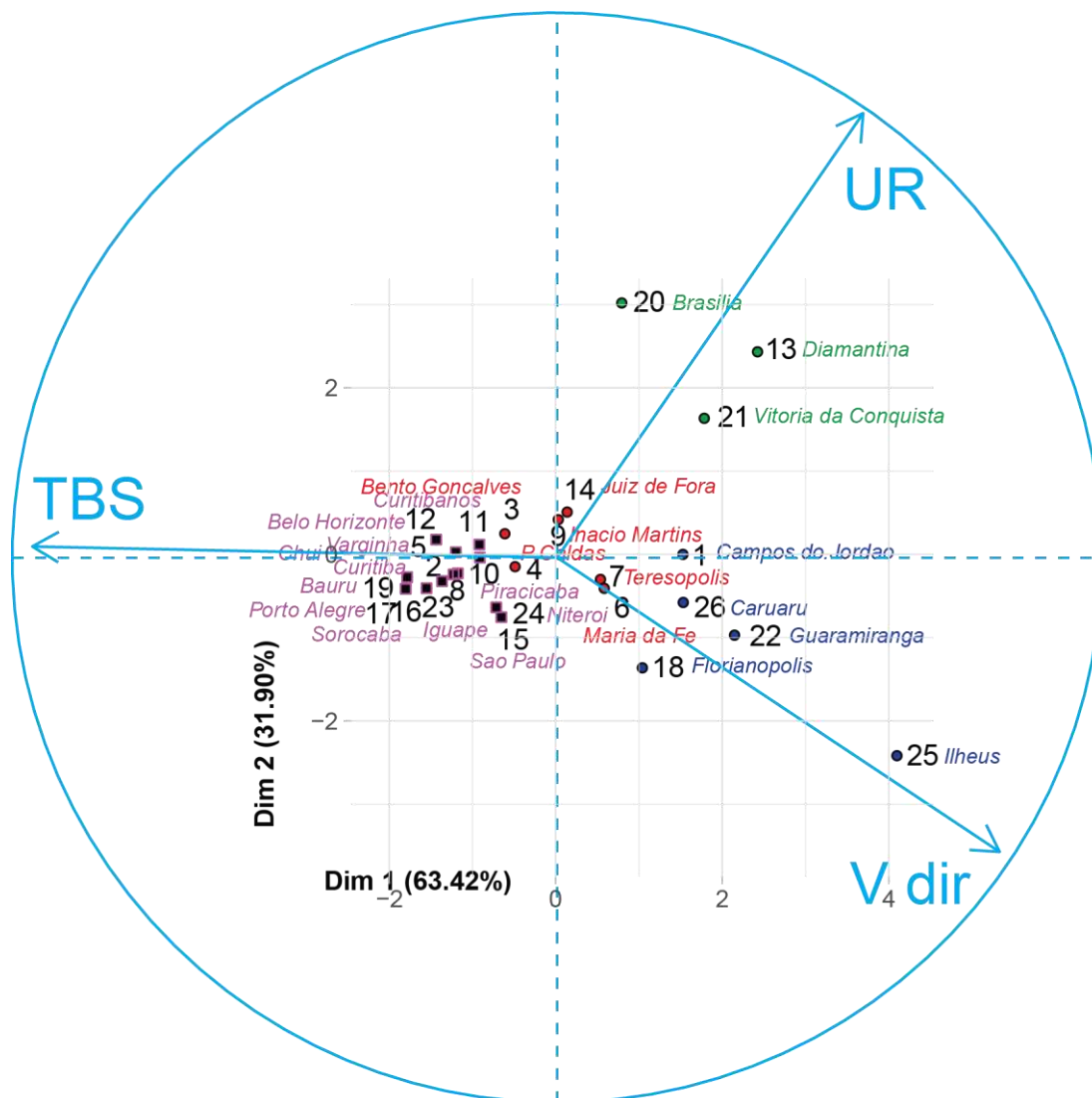


Figura 40 (Equivalente a Figura 29) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 28 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância

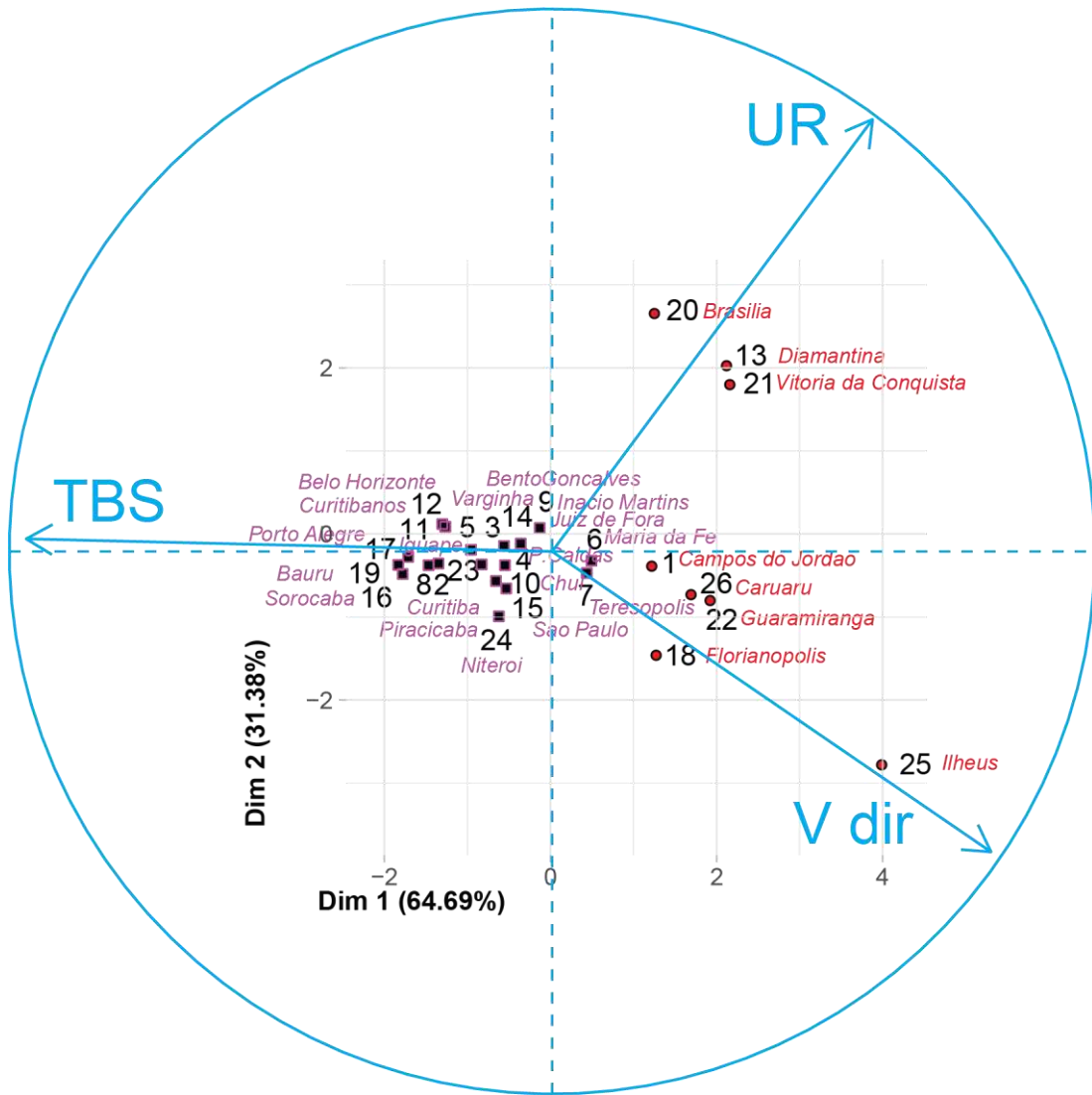


Figura 41 (Equivalente a Figura 30) Biplot - Clusters das cidades com casos com PCM 35 sobrepostos aos parâmetros climáticos de maior importância