



**MARGARIDA FERREIRA GRILO**

Licenciada em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de  
Computadores

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE  
MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM)  
NA ESTABILIZAÇÃO DE TEMPERATURA EM  
PARQUES DE ESTACIONAMENTO**

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Universidade NOVA de Lisboa  
março, 2023



# AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM) NA ESTABILIZAÇÃO DE TEMPERATURA EM PARQUES DE ESTACIONAMENTO

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA  
ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

**MARGARIDA FERREIRA GRILO**

Licenciada em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Orientador:** João Murta Pina  
*Full Professor, NOVA University of Lisbon*

**Coorientador:** Jorge Maçãs  
*Chief Operation Office, Placegar - Gestão e Exploração de Estacionamentos*

## **Avaliação da Utilização de Materiais de Mudança de Fase (PCM) na Estabilização de Temperatura em Parques de Estacionamento**

Copyright © Margarida Ferreira Grilo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*Aos meus pais e irmãos.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, o professor João Murta Pina, pela sua orientação, partilha de conhecimentos, apoio e confiança no meu trabalho.

Ao meu co-orientador, Dr. Jorge Maças, obrigada pela disponibilidade e confiança.

Agradeço também ao Dr. Carlos Simão, por toda a ajuda providenciada para que o estudo fosse possível.

A todos os trabalhadores da *Placegar*, que mostraram curiosidade pelo que estava a ser instalado nos parques, um grande obrigada. A vossa ajuda facilitou todo o processo de montagem dos PCM's.

Quero agradecer a todos os meus colegas de curso com os quais cresci ao longo destes anos. Gostaria de agradecer particularmente à Ana Godinho, à Rafaela Pinheiro, à Mariana Martins, ao Alexandre Costa e ao Moisés Tereso. Recordo com carinho todos os momentos partilhados. Aprendi muito com vocês.

Um agradecimento especial ao Moisés, o meu colega de tese, mas acima de tudo meu amigo. A dissertação foi um desafio longo e foste tu quem me deu a motivação para continuar.

Finalmente, o agradecimento mais importante, é dirigido à minha família, que sempre me apoiou e incentivou a alcançar os meus objetivos.

Especialmente aos meus pais e irmãos. Proporcionaram-me a melhor educação e acreditaram sempre em mim.

*“Out of clutter, find Simplicity. From discord, find Harmony.  
In the middle of difficulty lies Opportunity.” (Albert Einstein)*

## RESUMO

A transição energética é apontada como uma das medidas apresentadas para o combate às alterações climáticas, sendo necessário a procura por soluções energéticas mais "limpas", acessíveis e eficientes. Soluções estas, tanto no lado da procura como no armazenamento de energia.

O armazenamento de energia térmica, poderá ser uma solução. Os *Phase Change Materials*, (PCM's) são capazes de absorver energia sob a forma de calor durante o processo de mudança de fase.

Esta dissertação procura determinar a viabilidade da utilização de PCM para estabilização de temperatura em parques de estacionamento. Para tal foram considerados quatro casos de estudo, todos com características distintas, um parque subterrâneo fechado, um parque semi-aberto, um parque fechado não subterrâneo e a garagem de uma moradia. Os diferentes perfis de cada cenário permitiram identificar algumas das condições ideais para a utilização dos PCM. Os resultados obtidos permitiram determinar novos pontos a ter em consideração para futuras aplicações de PCM. Entre estes, podemos distinguir que a primeira etapa a considerar para a instalação de PCM será o estudo do comportamento térmico do espaço, não só para definir a temperatura de mudança de fase ideal, mas para garantir que os PCM's serão capazes de realizar o processo de mudança de fase. Será ainda necessário assegurar que a quantidade de PCM instalada é suficiente para assegurar a estabilização de temperatura de todo o espaço.

**Palavras-chave:** PCM, Sustentabilidade, Armazenamento de Energia, Energia Térmica

## ABSTRACT

The energy transition is pointed as one of the measures presented to combat climate change, being necessary necessary to search for "cleaner", more accessible and efficient solutions. These solutions, both on the demand side and on the energy storage.

The storage of thermal energy could be one of these solutions. The Phase Change Materials, (PCM) are capable of absorbing energy in the form of heat during the phase change process.

This dissertation seeks to determine the viability of using PCM for temperature stabilization in parking spaces. For this, four case studies were considered, all with different characteristics, one closed underground car park, a semi-open car park, a non-underground closed car park and the garage of a house. The different profiles of each scenario allowed us to identify some of the ideal conditions for the use of PCM's. The results obtained allowed to determine new points to be taken into account for future PCM applications. Among these, we can distinguish that the first step to consider for the installation of PCM's will be the study of the thermal behavior of the installation space, not only to define the ideal temperature for the phase change, but also to ensure that the PCM's will be able to carry out this phase change process. It will also be necessary to ensure that the quantity of installed PCM is enough for the temperature stabilization of the entire space.

**Keywords:** PCM, Sustainability, Energy Storage, Thermal Energy

# ÍNDICE

<b>Índice de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Siglas</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Estrutura . . . . .	3
<b>2 Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1 Armazenamento de Energia Térmica . . . . .	5
2.1.1 Armazenamento de Energia Térmica por Calor Sensível . . . . .	6
2.1.2 Armazenamento de Energia Térmica por Calor Latente . . . . .	7
2.1.3 Armazenamento Termoquímico de Energia . . . . .	9
2.2 Materiais de Mudança de Fase . . . . .	9
2.2.1 Critérios de Seleção de PCM . . . . .	9
2.2.2 Classificação dos PCM . . . . .	11
2.2.3 Métodos de Integração dos PCM . . . . .	15
2.2.4 Principais Problemas Associados aos PCM . . . . .	20
2.2.5 Exemplos de Aplicações de PCM . . . . .	24
2.2.6 PCM no Mercado . . . . .	28
<b>3 Metodologia</b>	<b>31</b>
<b>4 Cenários de Estudo, Implementação e Expectativas</b>	<b>33</b>
4.1 Cenários de Estudo . . . . .	33
4.1.1 Cenário 1 . . . . .	33
4.1.2 Cenário 2 . . . . .	37

4.1.3	Cenário 3 . . . . .	40
4.1.4	Cenário 4 . . . . .	43
4.2	Implementação . . . . .	45
4.2.1	Seleção dos PCM . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Análise de Resultados</b>	<b>49</b>
5.1	Seleção da Temperatura de Mudança de Fase dos PCM . . . . .	49
5.1.1	Cenário 1 . . . . .	49
5.1.2	Cenário 2 . . . . .	52
5.2	Funcionamento de PCM na Estabilização de Temperatura . . . . .	55
5.2.1	Cenário 2 . . . . .	55
5.2.2	Cenário 3 . . . . .	62
5.2.3	Cenário 4 . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>82</b>
6.1	Conclusões Gerais . . . . .	82
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	84
	<b>Bibliografia</b>	<b>85</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Processo de mudança de fase num PCM, Adaptado de: <i>Frigione, Lettieri e Sarcinella 2019</i> . . . . .	2
2.1	Métodos de armazenamento de energia térmica, Adaptado de: <i>Mehling e Cabeza 2008</i> . . . . .	6
2.2	Armazenamento de energia térmica por calor sensível, Adaptado de: <i>Mehling e Cabeza 2008</i> . . . . .	7
2.3	Armazenamento de energia térmica por calor latente, Adaptado de: <i>Mehling e Cabeza 2008</i> . . . . .	8
2.4	Funcionamento de um PCM, Adaptado de: <i>Harris et al. 2019</i> . . . . .	8
2.5	Classes de materiais utilizados como PCM, Fonte: Zae Bayern ( <i>Cabeza et al. 2011</i> ) . . . . .	10
2.6	Tipos de PCM, Adaptado de: <i>Memon 2014</i> . . . . .	11
2.7	Encapsulamento de PCM, <i>Martins 2017</i> . . . . .	17
2.8	PCM macroencapsulado em recipiente de alumínio, produto fornecido por: Rubitherm GmbH <i>s.d.</i> . . . . .	18
2.9	Macroencapsulamento de PCM em bolsas, produto fornecido por: Rubitherm GmbH <i>s.d.</i> . . . . .	18
2.10	Morfologia do microencapsulamento, <i>Martins 2017</i> . . . . .	19
2.11	Funcionamento de um PCM com identificação do fenómeno de superfusão, Adaptado de: <i>Mehling e Cabeza 2008</i> . . . . .	22
2.12	Utilização de PCM em edifícios, Adaptado de: <i>Rao, Wang e Z. Zhang 2012</i> . . . . .	25
2.13	Pratos preenchidos com bolsas de PCM a colocar no telhado, <i>Chung e Park 2017</i> . . . . .	26
2.14	Esquemático da sistema implementado no estudo da aplicação de PCM para aquecimento do chão, Adaptado de: <i>Lin et al. 2005</i> . . . . .	26

2.15	Representação de Sistema PV com PCM instalados: (a) Módulo PV e módulo PV com PCM e sistema de água instalados; (b) Estrutura do módulo PV com PCM e sistema de água instalados; (c) Dimensões. Adaptado de: <i>Y.Cui et al. 2022</i> . . . . .	27
2.16	Tabuleiros com PCM, fornecido por: <i>Rubitherm GmbH s.d.</i> . . . . .	28
2.17	PCM macroencapsulado em saquetas, fornecido por: <i>PureTemp s.d.</i> . . . . .	29
2.18	PCM em tecidos, fornecido por: <i>PureTemp s.d.</i> . . . . .	29
2.19	PCM microencapsulado, fornecido por: <i>PureTemp s.d.</i> . . . . .	30
2.20	Produtos disponibilizados por <i>Ltd s.d.</i> . . . . .	30
3.1	Instalação dos PCM . . . . .	32
4.1	Planta do cenário 1, cedida pela <i>Placegar</i> . . . . .	34
4.2	Ventiladores de impulso identificados no cenário 1 . . . . .	34
4.3	Características do cenário 1 . . . . .	35
4.4	Cenário 1 - Identificação do local de instalação dos sensores (a azul) e PCM (a vermelho) . . . . .	36
4.5	Medidas do espaço onde serão colocados os PCM . . . . .	36
4.6	Sensor instalado no cenário 1 . . . . .	37
4.7	Planta do cenário 2, cedida pela <i>Placegar</i> . . . . .	38
4.8	Características do cenário 2 . . . . .	38
4.9	Cenário 2 - Localização dos sensores para monitorização de temperatura . . . . .	39
4.10	Cenário 2 - Sensor 1 . . . . .	39
4.11	Cenário 2 - Zona escolhida para instalação dos PCM . . . . .	40
4.12	Planta do cenário 3, cedida pela <i>Placegar</i> . . . . .	41
4.13	Características do cenário 3 . . . . .	41
4.14	Cenário 3 - Localização dos PCM . . . . .	42
4.15	Planta do cenário 4 . . . . .	43
4.16	Cenário 4 - Zona escolhida para a instalação dos PCM . . . . .	44
4.17	Características do cenário 4 . . . . .	44
4.18	Sistema de monitorização de temperatura e humidade . . . . .	46
4.19	Estrutura do PCM adquirido . . . . .	47
4.20	Planeamento da disposição dos PCM nos cenários . . . . .	48
5.1	Cenário 1 - Identificação dos sensores . . . . .	49
5.2	Cenário 1 - Temperaturas registadas pelo sensor 1 . . . . .	50
5.3	Cenário 1 - Temperaturas registadas pelo sensor 2 . . . . .	51
5.4	Cenário 1 - Temperaturas registadas a 13 de maio de 2021 . . . . .	51
5.5	Cenário 2 - Identificação dos sensores . . . . .	52
5.6	Cenário 2 - Temperaturas registadas pelo sensor 1 no 1º período . . . . .	53
5.7	Cenário 2 - Temperaturas registadas pelo sensor 2 no 1º período . . . . .	54
5.8	Cenário 2 - Temperaturas registadas a 4 de agosto de 2021 . . . . .	54

5.9	Cenário 2 - Temperaturas registadas pelo sensor 1 no 2º período . . . . .	55
5.10	Instalação cenário 2 . . . . .	56
5.11	Temperatura do cenário 2 . . . . .	57
5.12	Cenário 2 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 12 °C . . . . .	58
5.13	Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 12 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	59
5.14	Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 12 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	59
5.15	Cenário 2 - Comportamento PCM com mudança de fase a 12 °C . . . . .	60
5.16	Cenário 2 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 15 °C . . . . .	60
5.17	Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 15 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	61
5.18	Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 15 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	61
5.19	Cenário 2 - Comportamento PCM com mudança de fase a 15 °C . . . . .	62
5.20	Cenário 2 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 18 °C . . . . .	62
5.21	Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 18 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	63
5.22	Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 18 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	64
5.23	Cenário 2 - Comportamento PCM com mudança de fase a 18 °C . . . . .	64
5.24	Cenário 3 - Localização do sensor de zona . . . . .	65
5.25	Instalação do cenário 3 . . . . .	65
5.26	Temperatura do cenário 3 . . . . .	66
5.27	Cenário 3 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 12 °C . . . . .	66
5.28	Cenário 3 - Comportamento térmico da zona de 12 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	67
5.29	Cenário 3 - Comportamento PCM com mudança de fase a 12 °C . . . . .	68
5.30	Cenário 3 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 15 °C . . . . .	68
5.31	Cenário 3 - Comportamento térmico da zona de 15 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	69
5.32	Cenário 3 - Comportamento PCM com mudança de fase a 15 °C . . . . .	69
5.33	Cenário 3 - Comportamento térmico da zona de 18 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	70
5.34	Cenário 3 - Comportamento PCM com mudança de fase a 18 °C . . . . .	71
5.35	Cenário 4 - Distribuição de PCM . . . . .	72
5.36	Cenário 4 - Sensor responsável pela medição de temperaturas de zona . . . . .	73
5.37	Temperatura do cenário 4 . . . . .	73
5.38	Temperatura do cenário 4 . . . . .	74
5.39	Cenário 4 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 12 °C . . . . .	74

5.40	Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 12 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	75
5.41	Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 12 °C comparativamente com a temperatura do parque entre o período de 29 a 30 de abril . . . . .	75
5.42	Cenário 4 - Comportamento do PCM com mudança de fase a 12 °C . . . . .	76
5.43	Cenário 4 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 15 °C . . . . .	76
5.44	Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 15 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	77
5.45	Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 15 °C comparativamente com a temperatura do parque no período de 29 a 30 de abril . . . . .	78
5.46	Cenário 4 - Comportamento PCM com mudança de fase a 15 °C . . . . .	79
5.47	Cenário 4 - Comportamento PCM com mudança de fase a 15 °C entre o período de 29 a 30 de abril . . . . .	79
5.48	Cenário 4 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 18 °C . . . . .	80
5.49	Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 18 °C comparativamente com a temperatura do parque . . . . .	80
5.50	Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 18 °C comparativamente com a temperatura do parque entre o período de 29 a 30 de abril . . . . .	81
5.51	Cenário 4 - Comportamento PCM com mudança de fase a 18 °C . . . . .	81

## ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Comparação dos vários tipos de armazenamento de energia térmica, Adaptado de: <i>Kousksou et al. 2014</i> . . . . .	7
2.2	Critérios para a seleção de um PCM . . . . .	10
2.3	Vantagens e desvantagens dos PCM orgânicos, Adaptado de: <i>Memon 2014</i> . . . . .	12
2.4	Vantagens e desvantagens dos PCM inorgânicos, Adaptado de: <i>Frigione, Lettieri e Sarcinella 2019</i> . . . . .	12
2.5	Vantagens e desvantagens das misturas eutéticas, Adaptado de: <i>Memon 2014</i> . . . . .	13
2.6	Vantagens e desvantagens dos métodos de incorporação de PCM, <i>Frigione, Lettieri e Sarcinella 2019</i> . . . . .	20
4.1	Características dos PCM adquiridos . . . . .	47
5.1	Cenário 1 - Resultados sensor 1 . . . . .	50
5.2	Cenário 1 - Resultados sensor 2 . . . . .	50
5.3	Cenário 2 - Resultados do sensor 1 . . . . .	52
5.4	Cenário 2 - Resultados do sensor 2 . . . . .	53
5.5	Cenário 2 - Temperatura do parque . . . . .	56
5.6	Cenário 2 - Temperatura da zona de 12 °C . . . . .	56
5.7	Cenário 2 - Temperatura da zona de 15 °C . . . . .	58
5.8	Cenário 2 - Temperatura da zona de 18 °C . . . . .	63
5.9	Temperatura do cenário 3 . . . . .	66
5.10	Cenário 3 - Temperatura de zona de 12 °C . . . . .	67
5.11	Cenário 3 - Temperatura de zona de 15 °C . . . . .	67
5.12	Cenário 3 - Temperatura de zona de 18 °C . . . . .	70
5.13	Temperatura do cenário 4 . . . . .	71
5.14	Cenário 4 - Temperatura da zona de 12 °C . . . . .	72
5.15	Cenário 4 - Temperatura da zona de 15 °C . . . . .	77
5.16	Cenário 4 - Temperatura da zona de 18 °C . . . . .	77

## SIGLAS

<b>HTTES</b>	Armazenamento de Energia Térmica a Altas Temperaturas	5
<b>LHTES</b>	Armazenamento de Energia por Calor Latente	6
<b>LTTES</b>	Armazenamento de Energia Térmica a Baixas Temperaturas	5
<b>PCM</b>	Material de Mudança de Fase	vii, 9
<b>SHTES</b>	Armazenamento de Energia por Calor Sensível	6, 9
<b>TES</b>	Armazenamento de Energia Térmica	1

# INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

O aumento da procura de energia, a escassez de combustíveis fósseis e as preocupações com o impacto ambiental no planeta impulsionaram a pesquisa e desenvolvimento de soluções que utilizem energias renováveis, *Regin, Solanki e Saini 2008*. Atualmente, procura-se recorrer a novas fontes de energia, renováveis, entre as quais, energia solar, energia eólica e energia das marés, *Shenhu e Xuelai 2023*. No entanto, considerando que estes recursos energéticos são diretamente afetados pelo clima, pela sua intermitência e aleatoriedade, o armazenamento de energia torna-se fundamental na procura de soluções para a crise energética que estamos a vivenciar, *Gao et al. 2021*.

No ano de 2015 as Nações Unidas definiram dezassete objetivos de desenvolvimento sustentável (Agenda 2030). A Agenda 2030 refere-se a diversas áreas de desenvolvimento sustentável, promovendo a paz, justiça e instituições sustentáveis. Entre estes objetivos podemos distinguir a integração de medidas relacionadas com alterações climáticas. A Agenda 2030 e os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável representam uma visão comum para a Humanidade, um acordo realizado entre os líderes mundiais e os povos e “uma lista das coisas a fazer em nome dos povos e do planeta”, *Unidas 2018*. Tendo em conta esta agenda, os governos oferecem não só incentivos a produtores de energia que utilizem tecnologias substituíveis, como a quem encontre soluções de resposta à procura e armazenamento de energia, *Serviços Energéticos - ERSE 2018*.

O Armazenamento de Energia Térmica (TES), permite acomodar energia térmica, de modo a que esta seja utilizada mais tarde, no entanto, é necessário que o método de armazenamento seja reversível. Os Materiais de Mudança de Fase, (?? - *Phase Change Materials*) representam um método de armazenamento de energia térmica, mais especificamente por calor latente. Nos últimos anos tem-se verificado um crescimento de interesse no que diz respeito à utilização de PCM em aplicações energéticas devido às suas propriedades únicas, *Tan e X. Zhang 2023*.

O armazenamento de energia térmica com recurso a PCM poderá apresentar-se como uma solução à distribuição desigual de energia no espaço e tempo, *Gao et al. 2021*. A

grande atração relativa a este tipo de materiais pode ser explicada pela sua estabilidade térmica e pela sua elevada capacidade de armazenamento de energia térmica, podendo ser aplicados a diversas áreas, *Gao et al. 2021*.

Um PCM é uma substância que sofre uma mudança de fase a uma temperatura específica, ou dentro de um intervalo de temperatura, *Hoang et al. 2014*. Esta substância poderá ter uma entalpia<sup>1</sup> muito elevada durante a mudança de fase, sendo capaz de armazenar e libertar grandes quantidades de energia, Figura 1.1.

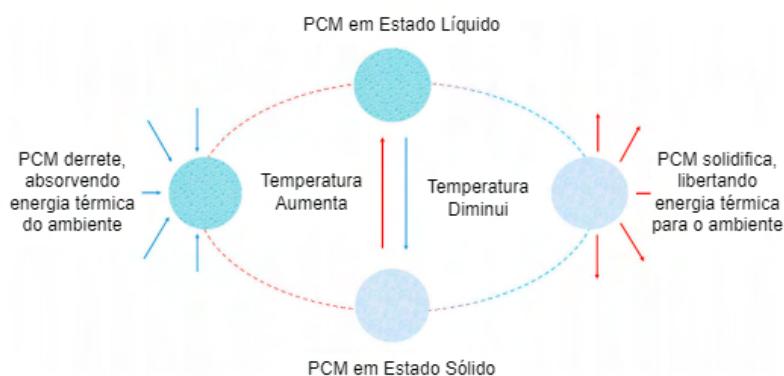


Figura 1.1: Processo de mudança de fase num PCM, Adaptado de: *Frigione, Lettieri e Sarcinella 2019*

De acordo com estudos realizados, *Regin, Solanki e Saini 2008*, idealmente, um sistema de armazenamento de energia térmica por calor latente deve ser constituído por um PCM adequado à escala de temperaturas, um recipiente para o PCM e uma superfície para a troca de calor.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação passa pela avaliação da viabilidade, resultante da utilização de PCM, para a estabilização de temperatura em parques de estacionamento.

Apesar das claras vantagens associadas à utilização dos PCM e da sua adequação aos fins pretendidos, com este projeto pretende-se avaliar a viabilidade da sua aplicação num caso prático.

É importante não esquecer que, segundo o estudo conduzido em *Farid et al. 2004*, as dificuldades práticas associadas ao armazenamento de energia térmica através de PCM passam pela baixa condutividade térmica, pela ocorrência de fenómenos de segregação por mudança de fase, ocorrendo ainda por vezes, perdas do material no estado líquido. Deste modo, é fundamental o estudo das possibilidades de integração dos PCM, assim como a definição do melhor material para o fim a que se destina.

De forma a definir as condições necessárias ao correto funcionamento de um PCM e as características do espaço a ter em consideração, serão considerados quatro cenários de

<sup>1</sup>Energia térmica da reação física

estudo: um parque subterrâneo fechado, um parque semi-aberto, um parque fechado não subterrâneo e a garagem de uma moradia. Serão analisadas as condições de cada espaço, assim como os resultados obtidos em cada um.

### 1.3 Estrutura

Numa primeira fase começou-se por investigar exemplos práticos de aplicações de PCM. Procurou-se analisar os vários tipos de PCM disponíveis no mercado de modo a selecionar o mais adequado ao casos de estudo. O estudo deste material foi essencial para definir o melhor produto para a aplicação proposta e determinar o método ideal para a sua integração nos edifícios.

A dissertação organiza-se de acordo com a seguinte estrutura:

- Estado da Arte

A primeira fase da dissertação passou pela pesquisa por trabalhos e estudos que envolvem PCM. Os principais pontos encontram-se relatados no Capítulo 2.

Este capítulo encontra-se dividido em dois sub-capítulos gerais. Inicialmente, foca-se na distinção dos vários métodos de armazenamento de energia térmica (Capítulo 2.1), de seguida, apresenta-se uma análise dos PCM (Capítulo 2.2), apontando-se os critérios para a seleção dos materiais para o mesmo e as respetivas características dos vários materiais. São discutidas ainda diferentes abordagens para a montagem e integração de PCM, assim como os problemas identificados noutros estudos. Por fim é dado exemplos de aplicações de PCM e um breve estudo dos PCM disponíveis no mercado.

Para este estudo foram revistos inúmeros artigos relativos aos PCM, à sua integração em construções e ainda a sua aplicação em outras áreas como no retalho.

- Metodologia

O Capítulo 3 descreve de forma conceptual o método utilizado nos quatro cenários considerados para a avaliação da utilização de PCM na estabilização de temperatura em parques de estacionamento.

- Cenários de Estudo, Implementação e Expectativas

O Capítulo 4 procede à caracterização dos quatro cenários considerados, detalhando todo o processo adotado, desde a escolha da temperatura de mudança de fase dos PCM a adquirir, a sua instalação, até à análise de dados obtidos. Serão ainda apresentadas as expectativas face a cada cenário.

Este capítulo focar-se-á nos seguintes pontos:

1. Os Cenários;
2. Seleção dos PCM;

### 3. Metodologia Adotada para a Recolha de Dados

- Análise de Resultados

O Capítulo 5 analisa os resultados obtidos através do sistema de monitorização instalado em todos os cenários.

Apresenta os resultados que levaram à seleção das temperaturas de mudança de fase dos PCM adquiridos e os resultados obtidos em cada um dos cenários após instalação dos PCM.

- Conclusões

Por fim, são apontados os resultados gerais obtidos para cada um dos cenários, pontos a considerar para próximos trabalhos. Termina-se com propostas de projetos futuros na área.

## ESTADO DA ARTE

### 2.1 Armazenamento de Energia Térmica

O armazenamento de energia térmica, permite “guardar” calor, de forma a que este seja usado mais tarde, *Mehling e Cabeza 2008*. Para ser possível recuperar o frio ou calor, é necessário que o método de armazenamento seja reversível. Deste modo, o armazenamento de energia térmica pode ser alcançado através dos processos de solidificação, condensação, fusão, sublimação, cristalização e vaporização de um material, onde a energia fica disponível como calor quando o processo é revertido, *Pielichowska e Pielichowski 2014*.

O armazenamento de energia térmica tem verificado um crescente interesse no que diz respeito a aplicações desta energia. O armazenamento de energia é fundamental para a manutenção do equilíbrio entre o fornecimento e o consumo de energia, *Regin, Solanki e Saini 2008*.

Os sistemas de armazenamento de energia funcionam segundo o seguinte princípio: a energia é fornecida ao sistema de armazenamento (carregamento), é armazenada (armazenamento), e mais tarde é removida do sistema para uso (descarregamento). Na prática, alguns passos deste ciclo podem ocorrer em simultâneo, podendo ainda repetir-se no mesmo ciclo, *Kousksou et al. 2014*.

*Kousksou et al. 2014* apresenta diferentes critérios que levam a diferentes categorias relativas ao armazenamento de energia térmica.

Se forem baseados no nível de temperatura do armazenamento, então as soluções de energia térmica podem ser divididas em Armazenamento de Energia Térmica a Baixas Temperaturas (LTTES) e Armazenamento de Energia Térmica a Altas Temperaturas (HTTES).

O armazenamento de energia térmica a baixas temperaturas opera para temperaturas abaixo dos 200 °C. Aplicações do mesmo podem ser encontradas em soluções de aquecimento e arrefecimento de edifícios, em estufas solares, sistemas de aquecimento de água via sol, entre outras. Já o armazenamento de energia térmica a altas temperaturas é extremamente importante na indústria das energias renováveis e da recuperação de calor desperdiçado.

Se o critério for baseado no tempo de armazenamento do calor térmico, este pode ser dividido em armazenamento a curto prazo e armazenamento a longo prazo.

Se baseados no processo de armazenamento de energia, o armazenamento de energia térmica pode ser realizado através de processos físicos, como pelo Armazenamento de Energia por Calor Sensível (SHTES), ou pelo Armazenamento de Energia por Calor Latente (LHTES); ou por processos químicos, pelo armazenamento de energia térmica por energia termo-química, como se observa na Figura 2.1.

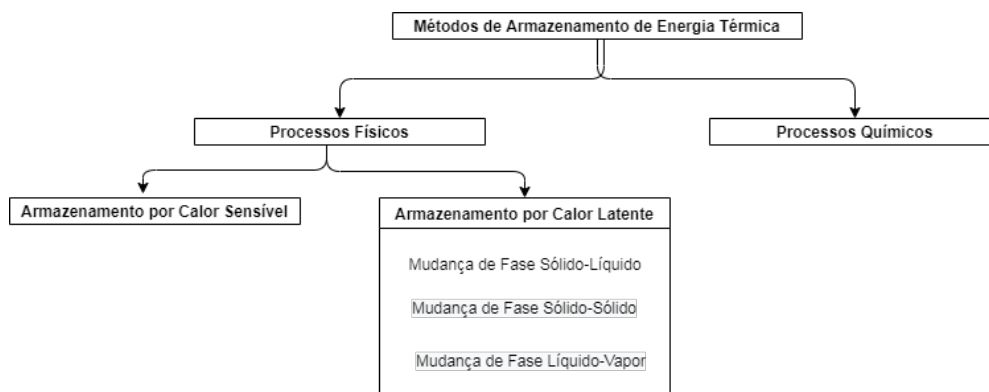


Figura 2.1: Métodos de armazenamento de energia térmica, Adaptado de: *Mehling e Cabeza 2008*

Os métodos de armazenamento de energia por processos físicos oferecem vantagens perante os métodos de processos químicos, principalmente pela pequena diferença de temperatura entre os ciclos de armazenamento e recuperação.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo comparativo dos vários tipos de armazenamento de energia térmica.

### 2.1.1 Armazenamento de Energia Térmica por Calor Sensível

O armazenamento por calor sensível ocorre quando um material é levado a aumentar ou diminuir a sua temperatura, devido à transferência de calor, ou seja, a energia é armazenada por alteração da temperatura do meio de armazenamento, Figura 2.2.

É o método mais comum de armazenamento de energia térmica. A eficiência desta técnica depende da capacidade de calor específico de cada material, assim como a densidade do mesmo. Tipicamente utilizado com sólidos por exemplo, a pedra ou tijolo, ou então com líquidos. Uma vez que os gases, comparativamente aos sólidos e líquidos, apresentam uma capacidade de calor volumétrico muito baixa, não sendo eficiente utilizá-los como materiais para o armazenamento por calor sensível. Este armazenamento é assim feito através de meios líquidos ou por meios sólidos.

A principal desvantagem associada a este tipo de armazenamento é a constante variação de temperatura pelo armazenamento e libertação de energia.

## 2.1. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA

Tabela 2.1: Comparação dos vários tipos de armazenamento de energia térmica, Adaptado de: *Kousksou et al. 2014*

	Tipo de Armazenamento de Energia Térmica		
	Calor Sensível	Calor Latente	Termo-Química
Densidade de Armazenamento	Baixa	Moderada	Normalmente Alta
Tempo de Vida Útil	Longo	Limitado	Dependente das Reações
Tecnologia no Mercado	Disponível	Disponível para algumas temperaturas e Materiais	Pouco Disponível
Vantagens	Baixo Custo; Confiável; Simples Aplicação com Materiais Existentes;	Densidade de Armazenamento Média; Pequenos Volumes; Possibilidade de Transporte para Pequenas Distâncias;	Elevada Densidade de Armazenamento; Baixas Perdas de Calor; Aguenta Longos Períodos de Armazenamento; Possibilidade de Transporte para Longas Distâncias; Armazenamento de Energia Compacta;
Desvantagens	Perdas de Calor Significantes com o Tempo; Necessidade de Grande Volume;	Baixa Condutividade Térmica; Materiais Corrosivos; Perdas de Calor Significativas;	Elevados Custos; Técnica Complexa

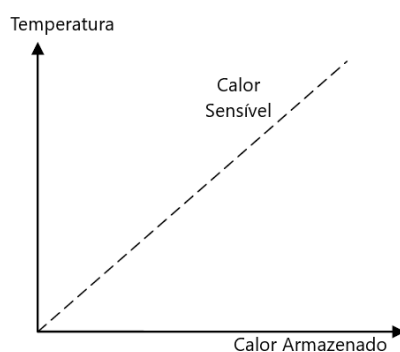


Figura 2.2: Armazenamento de energia térmica por calor sensível, Adaptado de: *Mehling e Cabeza 2008*

### 2.1.2 Armazenamento de Energia Térmica por Calor Latente

O armazenamento por calor latente é o método mais eficaz no armazenamento de energia térmica. Durante este processo, o meio de energia térmica muda de fase, Figura 2.3.

O armazenamento por calor latente depende da capacidade do material de acumular diferentes densidades de energia a condições praticamente isotérmicas e com um baixo intervalo de temperaturas.

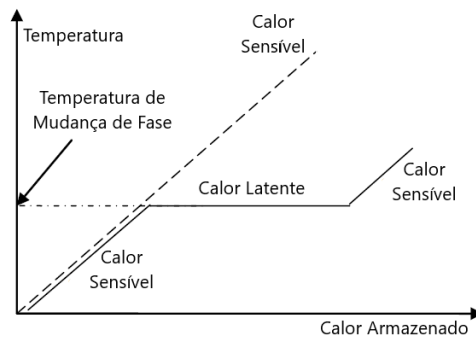


Figura 2.3: Armazenamento de energia térmica por calor latente, Adaptado de: *Mehling e Cabeza 2008*

Os PCM representam um exemplo de armazenamento por calor latente, sendo capazes de absorver energia durante o processo de mudança de fase, armazenando-a durante o processo de “aquecimento” e libertando-a no processo de “arrefecimento”, Figura 2.4.

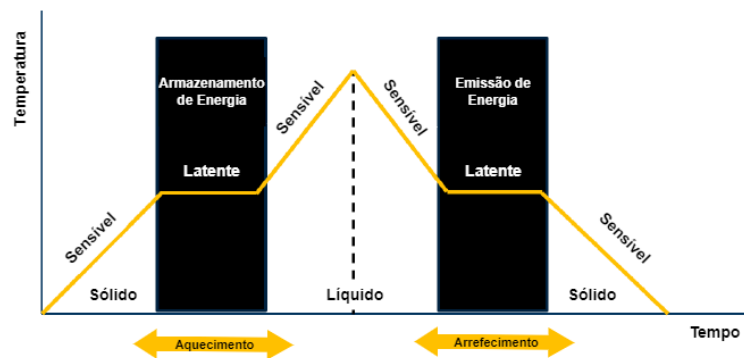


Figura 2.4: Funcionamento de um PCM, Adaptado de: *Harris et al. 2019*

Qualquer sistema de armazenamento por calor latente, é constituído, segundo *A. Sharma et al. 2009*, no mínimo por três componentes:

1. Um PCM adequado, cujo ponto de fusão se encontre na faixa de temperatura desejada;
2. Uma superfície adequada às trocas de calor;
3. Um invólucro compatível com o PCM escolhido.

Os problemas associados a esta técnica são causados pela variação de densidade durante a mudança de fase, a estabilidade das propriedades dos materiais durante ciclos longos, a segregação por mudança de fase e a ocorrência de superfusão dos materiais. Este tipo de armazenamento pode ainda ser limitado pela baixa condutividade térmica de alguns materiais, que acabam por diminuir a capacidade de extração de energia do sistema.

### 2.1.3 Armazenamento Termoquímico de Energia

Sempre que uma reação química ocorre, verifica-se uma variação da entalpia das substâncias entre o início e fim da reação. Esta variação de entalpia é chamada de calor da reação.

Se a reação for endotérmica, este calor é absorvido, caso seja exotérmica este calor é libertado.

Qualquer reação química com um elevado calor de reação pode ser utilizada para armazenamento de energia, desde que os produtos da reação possam ser armazenados e que o calor de reação possa ser libertado na reação inversa, *Mehling e Cabeza 2008*.

O armazenamento de energia térmica por reações químicas pode ser caracterizado por uma elevada densidade de energia, isto é, a quantidade de energia armazenada por unidade de massa. De referir ainda que, através desta técnica, a energia térmica pode ser armazenada por maiores períodos de tempo à temperatura ambiente. Pode ainda ser transportada sem ocorrer risco de perdas. Apesar disto, o armazenamento por reações termo-químicas ainda não é completamente viável devido à sua complexidade e custos elevados, estando ainda em processo de desenvolvimento.

## 2.2 Materiais de Mudança de Fase

Uma substância pode existir em vários estados, sólido, líquido ou gasoso, dependendo das condições de temperatura e pressão de armazenamento. As três fases podem existir em equilíbrio, *Products 2011*.

As substâncias utilizadas para armazenamento do calor latente são chamadas de Materiais de Mudança de Fase, PCM's.

Ao contrário dos materiais utilizados para armazenamento por calor sensível, os PCM absorvem e libertam calor a uma temperatura praticamente constante, retendo 5-14 vezes mais calor por unidade de volume, *A. Sharma et al. 2009*. Ou seja, os PCM apresentam um maior capacidade térmica, comparativamente aos materiais utilizados no SHTES.

Existe uma grande variedade destes materiais, que se diferenciam pelas suas temperaturas de mudança de fase. Este facto torna-os mais atractivos a diversas aplicações. A Figura 2.5 identifica vários exemplos de materiais de mudança de fase do tipo sólido-líquido, assim como a faixa de temperaturas de fusão de cada um.

### 2.2.1 Critérios de Seleção de PCM

Segundo *Harris et al. 2019*, os principais parâmetros a considerar na escolha de um PCM são a temperatura de fusão e a capacidade de armazenamento de calor latente. No entanto, é fundamental conhecer as possíveis desvantagens de cada material tendo em conta as condições de operação previstas.

Na seleção do PCM é importante ter em consideração as características citadas na Tabela 2.2. Esta resulta da compilação das características consideradas importantes por

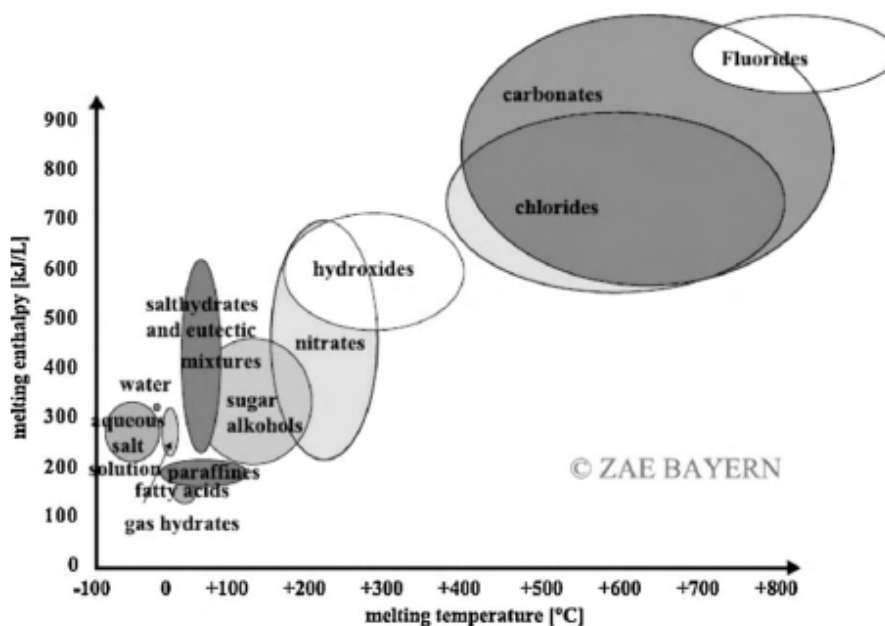


Figura 2.5: Classes de materiais utilizados como PCM, Fonte: Zae Bayern (Cabeza et al. 2011)

vários autores, entre os quais *Regin, Solanki e Saini 2008, A. Sharma et al. 2009, Cabeza et al. 2011, Frigione, Lettieri e Sarcinella 2019, Pasupathy, Velraj e Seeniraj 2008, R. Sharma et al. 2015* e ainda *S. Sharma e Sagara 2005*.

Tabela 2.2: Critérios para a seleção de um PCM

Propriedades Térmicas e Físicas	Propriedades Cinéticas	Propriedades Químicas	Fatores Económicos
Elevado calor latente por unidade de massa;	Elevado rácio de nucleação;	Quimicamente estável;	Abundante;
Elevado calor específico;	Elevada taxa de crescimento de cristais;	Compatível com o recipiente;	Disponível;
Elevada condutividade térmica em ambas a fases;	Resistente a efeitos de super-fusão;	Não tóxico;	Economicamente acessível;
Temperatura de fusão adequada à faixa de operação;		Não inflamável;	
Elevada densidade;		Não explosivo;	
Pequena variação de densidade durante a mudança de fase;		Não corrosivo;	
Fusão congruente do material;		Ciclo reversível de solidificação/fusão completo;	
		Resistência à sedimentação após grande número de ciclos;	

De uma forma geral, *Cabeza et al. 2011* resume que, os materiais utilizados para armazenamento de energia térmica devem ter um elevado calor latente e condutividade térmica. Devem ter uma temperatura de fusão dentro do intervalo das temperaturas de operação, devem fundir de forma congruente e com a mínima probabilidade de ocorrência de superfusão. O material deve ser quimicamente estável, de baixo custo, não tóxico e não corrosivo.

Do ponto de vista ambiental, como apontado por *Frigione, Lettieri e Sarcinella 2019*, pode-se ainda considerar o impacto ambiental do material, o potencial que este tem de ser reciclável, assim como o facto de este não ser poluente durante a sua vida útil.

Há ainda mais fatores a considerar na aplicação de PCM, entre os quais, o tipo de clima, a orientação da construção, o método de integração.

### 2.2.2 Classificação dos PCM

Os PCM são possíveis de encontrar em várias fases, tendo cada uma as suas vantagens. A forma mais comum de PCM são aqueles que realizam uma transição entre o estado sólido e líquido, no entanto, as variações sólido-sólido e líquido-gasoso também podem ser usadas, *Products 2011*.

Os PCM que passam por uma transição de fase sólido-sólido modificam a sua estrutura cristalina de uma configuração de lattice para outra a uma temperatura fixa e bem definida.

Os PCM do tipo sólido-sólido podem ser bastante úteis uma vez que, não necessitam de núcleo para prevenir a superfusão. É ainda importante referir que não será visível nenhuma mudança de aparência no PCM, apenas uma ligeira expansão ou contração do volume do mesmo, e não existem problemas associados a fugas de líquido.

Os PCM sólido-líquido são principalmente distinguidos em três categorias, orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas, como observável na Figura 2.6. Cada um destes grupos apresenta vantagens e desvantagens, todas importantes e para ter em conta na seleção do PCM.

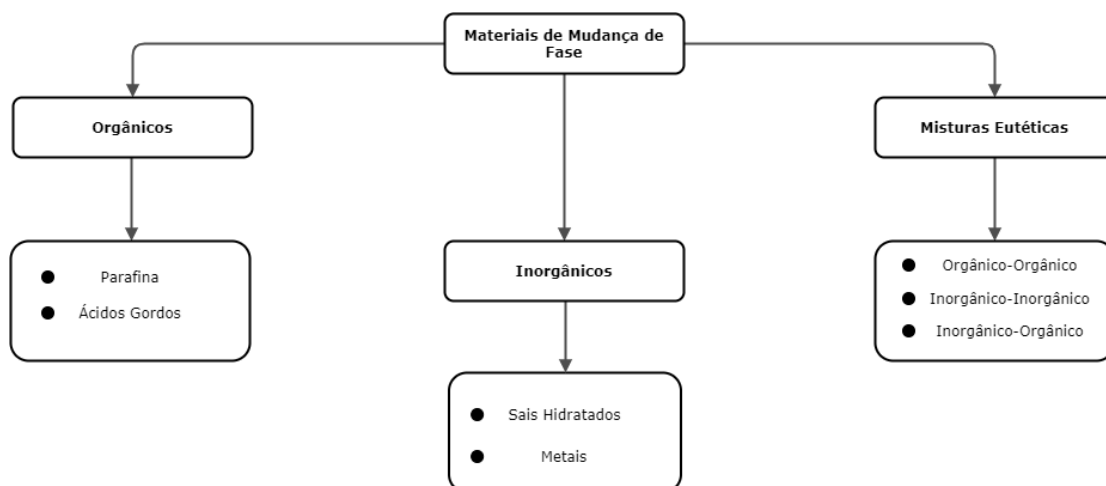


Figura 2.6: Tipos de PCM, Adaptado de: *Memon 2014*

A Tabela 2.3 apresenta um resumo das vantagens e desvantagens dos PCM orgânicos apontados por *Memon 2014*. A este grupo de PCM, como se observa na Figura 2.6 pertencem as parafinas e ácidos gordos, abordados em maior detalhe mais à frente.

Na categoria dos PCM inorgânicos estão incluídos os sais hidratados e os metais.

Tabela 2.3: Vantagens e desvantagens dos PCM orgânicos, Adaptado de: *Memon 2014*

PCM Orgânico	
Vantagens	Desvantagens
Disponível para largos intervalos de temperatura;	
Quimicamente inerte;	
Não sofre segregação por mudança de fase;	
Termicamente confiável a longo prazo;	
Calor latente de fusão razoável;	
Não corrosivo com exceção dos ácidos gordos;	Baixa condutividade térmica;
Relativamente baratos;	Moderadamente inflamável;
Compatível com materiais de construção;	Não compatível com os recipientes plásticos;
Pequena variação de volume durante mudança de fase;	
Efeitos de superfusão raros;	
Não tóxicos, com exceção da parafina;	
Reciclável;	

Os PCM inorgânicos, comparativamente aos orgânicos, apresentam uma melhor condutividade térmica, são mais baratos e menos inflamáveis. No entanto, têm uma baixa estabilidade térmica, são de fácil corrosão e geralmente apresentam sedimentação por mudança de fase.

A Tabela 2.4 resume as vantagens e desvantagens associadas aos PCM do tipo inorgânico.

Tabela 2.4: Vantagens e desvantagens dos PCM inorgânicos, Adaptado de: *Frigione, Lettieri e Sarcinella 2019*

PCM Inorgânico	
Vantagens	Desvantagens
Elevado volume para armazenamento de calor;	
Elevado calor de fusão;	Segregação durante mudança de fase;
Elevada condutividade térmica;	Ocorrência de superfusão;
Barato e abundante;	Corrosivo para metais;
Não inflamável;	Pequeno tempo de vida útil;
Compatível com recipientes plásticos;	Estabilidade química moderada;
Baixo impacto ambiental;	Elevadas mudanças de volume;
Com potencial reciclável;	

Por fim, temos ainda os PCM compostos por misturas eutéticas, ou seja, resultantes da combinação de pelo menos dois tipos de PCM, podendo ser uma ligação do tipo orgânico-orgânico, inorgânico-inorgânico, ou orgânico-inorgânico. Esta ligação ocorre durante o processo de solidificação, onde se forma um cristal da mistura.

Segundo *Harris et al. 2019*, a utilização de misturas eutéticas de PCM tem vantagens no sentido em que permite o ajustamento do seu ponto de fusão pela combinação de diferentes percentagens dos seus constituintes, sem que ocorra sedimentação por mudança de fase.

Os componentes das misturas eutéticas fundem-se e solidificam de maneira congruente e simultânea. Deste modo, não ocorre sedimentação por mudança de fase.

Estes materiais apresentam uma elevada condutividade e densidade térmica. Apesar disto, têm uma baixa capacidade de armazenamento de calor latente.

A Tabela 2.5 refere as vantagens e desvantagens associadas à utilização de misturas eutéticas como PCM.

Tabela 2.5: Vantagens e desvantagens das misturas eutéticas, Adaptado de: *Memon 2014*

Misturas Eutéticas	
Vantagens	Desvantagens
Temperatura de fusão precisa; Elevada densidade volumétrica para armazenamento de energia;	Propriedades termo-físicas pouco estudadas;

Os materiais utilizados para o armazenamento de temperatura por mudança de fase devem possuir um grande calor latente e uma elevada condutividade térmica. Devem ter uma temperatura de fusão dentro da escala de operação, derreter de forma conveniente à temperatura de solidificação mínima, ser quimicamente estáveis, de baixo custo, não tóxicos e não corrosivos. Os PCM devem ser selecionados tendo em conta a sua temperatura de fusão.

Os materiais normalmente mais utilizados em aplicações com PCM são os sais hidratados, a cera de parafina, os ácidos gordos e as misturas eutéticas de compostos orgânicos e inorgânicos.

### 2.2.2.1 Sais Hidratados

Os sais hidratados são bons candidatos para serem utilizados como PCM na medida em que possuem uma grande densidade de armazenamento volumétrico e apresentam uma alta condutividade térmica.

A transformação sólido-líquido dos sais hidratados é na verdade uma desidratação do sal hidratado, *Kousksou et al. 2014*.

A conveniência do uso destes materiais como PCM pode ser explicado pelo:

- Elevado calor latente de fusão por unidade de volume durante a mudança de fase;
- Pequenas variações de volume durante a mudança de fase;
- Elevada condutividade térmica (praticamente o dobro das parafinas);
- É um recurso barato;
- Fraca corrosão;
- Compatibilidade com recipientes plásticos;
- Baixa toxicidade;

É importante referir que podem ser identificados três tipos de comportamento na fusão dos sais: fusão congruente, fusão incongruente e a fusão semi-incongruente, *A. Sharma et al. 2009*.

A fusão congruente ocorre quando o sal hidratado é completamente solúvel na água à temperatura de fusão. A fusão incongruente ocorre quando o sal não é completamente solúvel no ponto de fusão. Por fim, a fusão semi-incongruente ocorre quando durante a transição de fase o material se encontra em equilíbrio no estado líquido e sólido, mas apresenta diferentes composições devido à transformação do sal hidratado num sal hidratado com menor concentração de água.

O maior problema associado aos sais hidratados passa pela ocorrência de sedimentação durante a mudança de fase. Este fenómeno ocorre uma vez que, a maioria dos sais considerados aceitáveis para o armazenamento de energia térmica, fundem incongruentemente. Assim, devido às diferentes densidades dos materiais em diferentes fases, o sal sólido acumula-se na base do recipiente de armazenamento. Por não ser possível a recombinação destes sais durante o processo inverso, a solidificação, a capacidade de armazenamento de energia da solução é alterada, diminuindo, *Products 2011*. Este problema será analisado com mais pormenor na Secção 2.2.4.1.

Para além da segregação por mudança de fase, é possível ainda identificar outros aspetos menos positivos resultantes da utilização de sais hidratados, entre os quais, a superfusão e a fraca estabilidade térmica do mesmo.

#### 2.2.2.2 Cera de Parafina

*Kousksou et al. 2014* apresenta a parafina como um PCM de propriedades bastante atrativas à sua utilização. Para além de ser quimicamente inerte e estável abaixo dos 500 °C, é não corrosivo, não tóxico e apresenta pequenas variações no volume durante o processo de fusão.

É ainda um material abundante e disponível para largas faixas de temperatura, sendo relativamente barato.

Por estas razões, a parafina é capaz de suportar um grande número de ciclos de mudança de fase.

No entanto, *A. Sharma et al. 2009* aponta algumas das características indesejadas deste material como a baixa condutividade, a não compatibilidade com recipientes de plástico e pela facto de ser moderadamente inflamável. As desvantagens associadas às parafinas podem ser parcialmente eliminadas através de uma modificação ligeira da cera e da unidade de armazenamento.

Segundo *Farid et al. 2004* as ceras de parafina comerciais são baratas, apresentando uma densidade de armazenamento térmico moderada e uma faixa de temperaturas de fusão bastante ampla. São quimicamente inertes e estáveis, sem segregação por mudança de fase, no entanto têm uma baixa condutividade térmica, o que acaba por ser uma limitação.

Por outro lado, *Farid et al. 2004* afirma ainda que as ceras de parafina puras são muito caras, pelo que, desta forma, as ceras comerciais são as mais utilizadas e estudadas.

P-116 é a cera de parafina mais frequentemente utilizada, apresentando uma temperatura de fusão de 47 °C e um calor latente de fusão de aproximadamente 210 kJ.

### 2.2.2.3 Ácidos Gordos

Os ácidos gordos, por serem principalmente derivados de recursos vegetais e animais, podem ser considerados uma fonte não poluente, *R. Sharma et al. 2015*. Suportam ainda um elevado número de ciclos de mudança de fase sem qualquer degradação das suas propriedades térmicas.

A maior desvantagem associada aos ácidos gordos é o seu preço, que acaba por ser 2-2,5 vezes superior ao das parafinas, *Memon 2014*. Os ácidos gordos são também ligeiramente corrosivos.

Os estudos realizados por *Yuan et al. 2014* demonstraram que os ácidos gordos têm uma boa fiabilidade térmica, no entanto, o facto de estes não serem puros, afeta o calor latente e a temperatura de mudança de fase dos mesmos.

Os ácidos gordos como PCM têm sido usados em diversas aplicações relacionadas com o armazenamento de energia, calor solar e sistemas fotovoltaicos, recuperação de calor condensado dos sistemas de ar condicionado. Podem também ser aplicados para adaptação de temperatura em estufas.

### 2.2.3 Métodos de Integração dos PCM

De acordo com *Memon 2014*, os PCM podem ser integrados nos materiais e elementos de construção por incorporação direta, imersão, encapsulamento, estabilização de forma ou um composto de PCM estável.

#### 2.2.3.1 Incorporação Direta

Neste caso, o PCM (líquido ou em solução pulverizada) é misturado diretamente com os materiais de construção como o gesso, a pasta de cimento, a argamassa ou o betão. Os materiais de construção absorvem o PCM por capilaridade.

A incorporação direta é o método mais simples, prático e económico, por não ser necessário nenhum equipamento extra.

Apesar disto, para que seja possível o armazenamento de energia é necessário que:

- Não ocorra interferência com o processo de hidratação ou com a hidratação dos produtos;
- Não sejam afetadas as propriedades mecânicas dos materiais;
- Não sejam afetadas as características de durabilidade dos materiais.

Com este procedimento poderão ocorrer fugas de PCM, o que irá afetar as propriedades mecânicas e de durabilidade do sistema assim como a possibilidade de ocorrer incompatibilidade do PCM com os materiais de construção. Este processo torna ainda os materiais mais inflamáveis.

### 2.2.3.2 Imersão

Pela técnica de imersão, os materiais de construção (geralmente porosos) são mergulhados diretamente num PCM líquido, absorvendo o PCM por capilaridade. Os materiais normalmente utilizados são o betão, tijolos ou os painéis de revestimento de paredes.

Desta imersão resulta um material de construção, com as suas respetivas características mecânicas, mas com uma maior capacidade de retenção de calor.

Estudos já realizados apontam que as propriedades mecânicas e de durabilidade dos elementos de construção podem ser afetados por fugas de PCM ou pela incompatibilidade entre materiais.

De referir que, uma fuga de PCM quando em contacto com o cimento, pode ainda provocar a corrosão do reforço de aço da construção, afetando a durabilidade da estrutura. O cimento Portland CEM I foi considerado o cimento mais apropriado para utilizar com PCM.

### 2.2.3.3 Encapsulamento

As técnicas de incorporação de PCM mencionadas anteriormente apontam um problema comum associado às mesmas, as fugas de PCM no estado líquido. Deste modo, para uma utilização bem sucedida do mesmo, e para uma boa transferência de calor, é necessário que o PCM esteja de alguma forma contido.

A técnica de encapsulamento, corresponde à contenção do PCM numa cápsula antes da sua utilização em qualquer elemento de construção. Esta cápsula poderá apresentar várias formas e tamanhos, assim como ser formada por diferentes materiais, *Khudhair e Farid 2004*.

O encapsulamento irá desta forma, ao impedir o contacto direto entre o PCM e o material de construção, evitar as possíveis ocorrências de incompatibilidade entre materiais. *Frigione, Lettieri e Sarcinella 2019* aponta que, independentemente do método de encapsulamento, o PCM e o seu recipiente não devem demonstrar qualquer interação química.

Uma vez que a cápsula que reveste o PCM age como barreira entre o mesmo e o material de construção, protegendo e isolando o PCM, é necessário garantir que esta mantém as propriedades do produto. A Figura 2.7, descreve o funcionamento de um PCM encapsulado.

Segundo *Farid et al. 2004*, as principais vantagens associadas à utilização de PCM encapsulados comparativamente às outras técnicas de integração focam-se no facto de estes fornecerem uma vasta área de transferência de calor, apresentarem uma reduzida reatividade perante o ambiente exterior e serem capazes de controlar as mudanças de volume dos materiais armazenados enquanto as mudanças de fase ocorrem.

Deste modo, o recipiente que contém o PCM deve, de acordo com *Regin, Solanki e Saini 2008*:



Figura 2.7: Encapsulamento de PCM, *Martins 2017*

- Estar de acordo com os requerimentos de força, flexibilidade, resistência à corrosão e estabilidade térmica pretendidos;
- Agir como uma barreira, protegendo o PCM de qualquer interação que o prejudique;
- Providenciar a superfície necessária à transferência de calor;
- Providenciar estabilidade estrutural;
- Ser de fácil manuseamento.

O tipo de recipientes normalmente utilizados para conter os PCM passam pelo armazenamento em tanques que possibilitam a troca de calor, pelo microencapsulamento e macroencapsulamento. Para macroencapsulamento e microencapsulamento, esta cápsula é geralmente feita à base de polímeros.

**Armazenamento em Tanques** Os tanques utilizados para armazenamento de PCM são bastante semelhantes aos já utilizados para armazenamento de energia. No entanto, estes tanques estarão expostos a uma transferência de calor mais intensa. Apesar da área de transferência de calor ser menor, esta implica uma maior taxa de liberação de calor.

O maior desafio no que diz respeito à utilização de tanques para armazenamento de PCM é tentar melhorar a taxa de transferência de calor. Esta é limitada pela formação de um composto sólido, proveniente do PCM, que se acumula em torno das superfícies, prejudicando a transferência de calor.

**Macroencapsulamento** Macroencapsulamento é o modo mais comum de depósito de PCM. Neste caso, o PCM, em quantidades significativas, é contido num recipiente como tubos, esferas, painéis (Figura 2.8) ou bolsas (Figura 2.9). Estes recipientes podem ser usados diretamente para as trocas de calor, ou posterior utilizados em elementos de construção, *Khudhair e Farid 2004*.

Este tipo de encapsulamento é fundamentalmente para guardar o líquido, evitando qualquer alteração à sua composição resultante do contacto com o ambiente externo, *Mehling e Cabeza 2008*. Pode ainda oferecer estabilidade mecânica ao edifício em que está inserido, isto, caso seja rígido o suficiente.



Figura 2.8: PCM macroencapsulado em recipiente de alumínio, produto fornecido por: Rubitherm GmbH *s.d.*

Para além da prevenção de fugas de PCM, o macroencapsulamento facilita a compatibilidade do material com o exterior, por funcionar como uma barreira, simplifica o manuseamento do PCM na construção, podendo ser adaptado ao tipo de aplicação pretendida. Por fim, diminui as variações de volume por mudança de fase no edifício em que está inserido, *Cabeza et al. 2011*.

No entanto, destaca-se a sua fraca condutividade térmica, devido à tendência de sedimentação nas extremidades e cantos do recipiente, prejudicando a transferência de calor. Verifica-se ainda, a necessidade de o recipiente estar protegido.



Figura 2.9: Macroencapsulamento de PCM em bolsas, produto fornecido por: Rubitherm GmbH *s.d.*

**Microencapsulamento** Microencapsulamento refere-se à técnica em que um elevado número de pequenas partículas de PCM, entre 1 $\mu$ m e 1000 $\mu$ m, são contidas num recipiente contínuo e selado geralmente feito de polímeros sintéticos ou naturais, *Frigione, Lettieri e Sarcinella 2019*. Estes polímeros podem ser mononucleares, polinucleares ou de matriz (solução que contem uma mistura de PCM e polímeros), Figura 2.10.

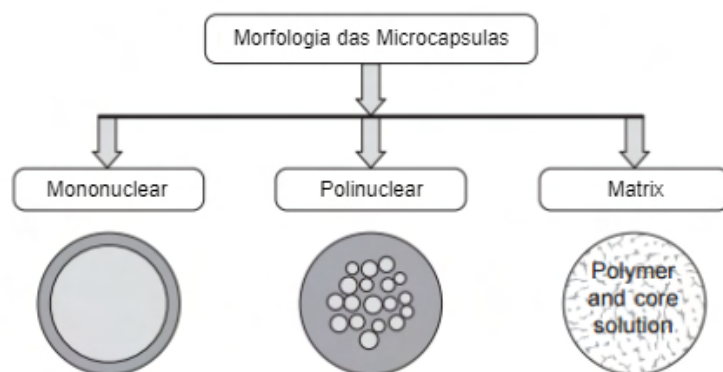


Figura 2.10: Morfologia do microencapsulamento, *Martins 2017*

O principal propósito do microencapsulamento é semelhante ao macroencapsulamento, passando pela prevenção de qualquer tipo de fugas durante a transição de fase. Esta técnica apresenta ainda, vantagens como uma elevada resistência a variações de volume durante a transição de fase, uma estabilidade química melhorada e um ciclo também este mais estável, uma vez que a sedimentação se encontra limitada a distâncias microscópicas. Por esta razão, e contrariamente ao macroencapsulamento, não se verifica solidificação do PCM nas extremidades do recipiente, concedendo uma elevada taxa de transferência de calor, *Khudhair e Farid 2004*.

Apesar disto, são apontados alguns problemas ao microencapsulamento. A rigidez do recipiente poderá diminuir a taxa de transferência de calor, ao impedir a ocorrência de correntes de convecção, forçando a que a transferência ocorra por condução. O microencapsulamento pode afetar as propriedades mecânicas dos materiais de construção. É ainda uma técnica que apresenta altos custos, *Frigione, Lettieri e Sarcinella 2019*.

Esta técnica apresenta ainda uma forte probabilidade de ocorrência de problemas resultantes de fenómenos de superfusão, (Capítulo 2.2.4.2).

#### 2.2.3.4 PCM de Forma Estabilizada

Nesta técnica o PCM e material de suporte são derretidos e misturados um com o outro a elevadas temperaturas. A este processo segue-se o arrefecimento do material de suporte até que este solidifique.

Os materiais de suporte usualmente utilizados são polietileno de elevada densidade, estireno e butadieno.

As características associadas a este tipo de método de integração de PCM são:

- Elevado calor específico aparente;
- Condutividade térmica apropriada;
- Capacidade de estabilização de forma durante a mudança de fase;
- Elevada confiabilidade térmica, ou seja, capaz de realizar muitos ciclos de fusão/solidificação;

- Não necessita de recipiente;
- A massa de PCM em relação ao material de suporte pode ir, em proporção, até aos 80%.

### 2.2.3.5 Composto de Forma Estável

Muita literatura considera que a técnica de incorporação de PCM de forma estabilizada é semelhante ao método do composto de forma estável, no entanto, *Memon 2014*, apresenta esta forma de categorização.

Um composto de forma estável, irá reter uma percentagem ótima, ou máxima de PCM, no entanto, não será necessário derreter o material de suporte de modo a misturá-lo com o PCM. Com este procedimento não se verifica qualquer fuga de PCM quando a temperatura do composto está acima da temperatura de fusão do mesmo.

Na Tabela 2.6 é possível observar, de uma forma resumida, as vantagens e desvantagens associadas a cada tipo de método incorporação de PCM já mencionados.

Tabela 2.6: Vantagens e desvantagens dos métodos de incorporação de PCM, *Frigione, Lettieri e Sarcinella 2019*

Métodos de Incorporação	Vantagens	Desvantagens
Incorporação Direta	Simples; Barata;	Possíveis fugas do PCM no estado líquido; Material de construção suscetível a inflamação; Possível incompatibilidade entre materiais;
Imersão	Simples; Prática; Barata;	Possibilidade de fugas; Possível incompatibilidade entre os materiais; Poderá afetar as propriedades mecânicas dos materiais de construção; Poderá afetar a durabilidade dos materiais de construção;
Microencapsulamento	Reduz fugas durante mudança de fase; Elevada taxa de transferência de calor; Melhorada estabilidade química;	Custos elevados; Menor taxa de transferência de calor; Poderá afetar as propriedades mecânicas dos materiais de construção;
Macroencapsulamento	Facilmente adaptável a uma aplicação específica;	Fraca condutividade térmica; Tende a solidificar nas extremidades;
PCM de Forma Estabilizada	Elevado calor aparente específico; Condutividade térmica aceitável; Capacidade de manutenção da forma do PCM durante a mudança de fase; Raras perdas de PCM;	Equipamento complexo para a sua preparação; Necessidade de aditivos para melhor condutividade térmica;
Composto de Forma Estável	Barato; Capaz de armazenar grandes quantidades de PCM sem fugas do mesmo;	Equipamento complexo para a sua preparação;

### 2.2.4 Principais Problemas Associados aos PCM

Anteriormente foram especificadas as características a ter em conta na seleção do material do PCM. No entanto, esta escolha é bastante difícil, uma vez que, é impossível encontrar um material que satisfaça todos os critérios.

Os maiores problemas associados à utilização de PCM passam pelos efeitos de superfusão, sedimentação por mudança de fase, corrosão e a fraca estabilidade térmica associada aos mesmos, *Kousksou et al. 2014*.

*Mehling e Cabeza 2008*, tendo presente estas dificuldades, apresentou algumas estratégias de modo a solucionar ou evitar alguns dos problemas associados à utilização de PCM.

### 2.2.4.1 Segregação por Mudança de Fase

O fenómeno de segregação, ou separação por mudança de fase ocorre quando, numa solução formada por dois ou mais componentes diferentes, após mudanças de fase, e devido à gravidade, o elemento de maior densidade se concentra no fundo do depósito, enquanto que, o de menor densidade, fica à superfície. Deste modo, a composição da mistura original é alterada.

O maior problema associado à separação de fase é que, uma vez que as concentrações de cada um dos componentes da mistura sofreram alterações, o PCM, não irá solidificar completamente. Assim, o calor latente resultante da solidificação não é libertado na sua totalidade, diminuindo a eficiência do armazenamento. Para que seja possível recuperar a capacidade de armazenamento de calor latente inicialmente instalada, é necessária a concentração inicial dos seus componentes.

Dependendo da severidade da segregação por mudança de fase e da dificuldade de contornar este problema, *Mehling e Cabeza 2008* caracteriza a fusão de um PCM que apresenta separação de fase como semi-congruente ou incongruente. O grau de congruência na fusão do PCM irá variar tendo em conta as taxas de aquecimento e arrefecimento. Deste modo, materiais iguais poderão apresentar comportamentos distintos.

Existem várias técnicas para evitar a sedimentação por mudança de fase. As mais utilizadas são o recurso a agentes de aumento de espessura ou pela rotação dos meios de armazenamento, *Kousksou et al. 2014*. Caso tenha ocorrido este fenómeno, podemos ainda recorrer à técnica de mistura artificial.

Aplicando este último método ao PCM, este passa a estar capaz de se separar apenas em distâncias macroscópicas, no entanto, em vez de esperar pela sua difusão para que ocorra a homogeneização do mesmo, recorre antes ao processo de mistura, *Mehling e Cabeza 2008*. Esta técnica provou ser vantajosa com sais hidratados, no entanto, a nível material, pelo equipamento necessário, apresenta algumas dificuldades.

Uma outra maneira que procura reduzir os problemas de sedimentação do PCM foca-se na utilização de um processo de difusão para homogeneização, *Mehling e Cabeza 2008*. O aspeto negativo desta técnica encontra-se no facto de ser funcional apenas em pequenas distâncias.

Podemos ainda abordar algumas das técnicas utilizadas de modo a limitar a distância que a mudança de fase pode provocar. Uma destas passa pelo uso de recipientes rasos, porém não é suficiente. A gelificação pode ser, no entanto uma das soluções, reduzindo esta distância para uma escala microscópica.

Esta técnica passa pela adição de um material, por exemplo um polímero, criando uma rede tri-dimensional que mantém o PCM unido, *Cabeza et al. 2011*.

Um outro método para reduzir a distância resultante da mudança de fase é pelo aumento da espessura do PCM. Isto é, pela adição de um material ao PCM que aumente a sua viscosidade, *Mehling e Cabeza 2008*. A elevada viscosidade faz com que, fases diferentes não se possam separar muito até que todo o PCM se encontre todo no estado sólido.

#### 2.2.4.2 Superfusão

O fenómeno de superfusão ocorre quando um líquido é arrefecido abaixo do seu ponto de fusão, mas sem que este passe para o estado sólido, começando a solidificação a uma temperatura muito abaixo da suposta, Figura 2.11.

A ocorrência da superfusão no PCM é indiferente durante o fornecimento de calor. No entanto, durante o armazenamento do mesmo, o calor latente não será libertado quando se atinge o ponto de fusão, *Mehling e Cabeza 2008*.

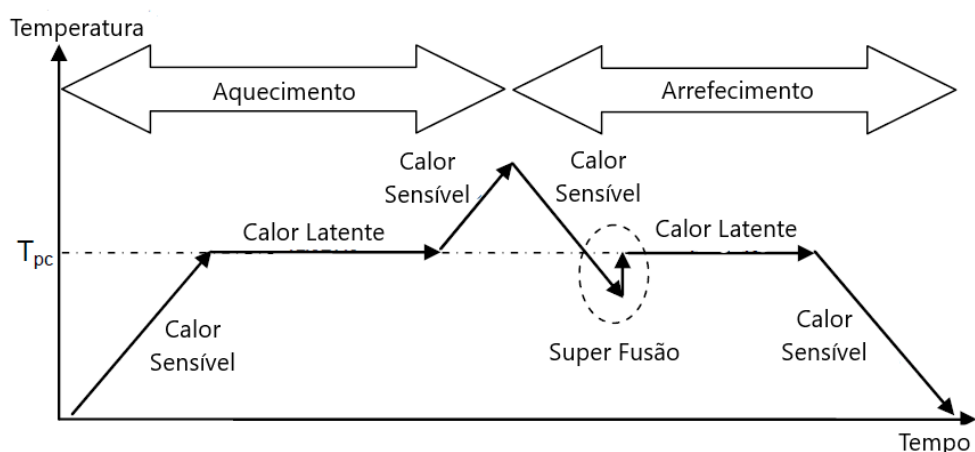


Figura 2.11: Funcionamento de um PCM com identificação do fenómeno de superfusão, Adaptado de: *Mehling e Cabeza 2008*

Devido à superfusão é necessário reduzir a temperatura, a uma inferior à temperatura de mudança de fase do material, de modo a que este comece a cristalização e liberte o calor latente armazenado. Caso não ocorra nucleação, o calor latente não é libertado e o material apenas guarda calor sensível, *Mehling e Cabeza 2008*.

Para compreender esta ocorrência é importante compreender o processo de solidificação. Por solidificação entende-se que, a quantidade de matéria na fase sólida aumenta uma vez que, a matéria em estado líquido solidifica, *Mehling e Cabeza 2008*. No entanto, este processo avança a partir de um ponto inicial, onde existe apenas uma quantidade muito pequena de partículas no estado sólido, chamada de núcleo. Pode ainda acontecer não existir qualquer núcleo. Para que este núcleo aumente, é necessário que a matéria na fase líquida solidifique. Assim, o sistema tem de libertar calor para chegar ao seu ponto energético mínimo.

É assim identificável uma barreira energética. Deste modo, apenas quando o núcleo tem um raio suficientemente grande, a solidificação se inicia.

Este efeito pode ser evitado, principalmente em sais hidratados, pela adição de agentes de nucleação, ou pela promoção da nucleação através das paredes rugosas do recipiente de armazenamento ou ainda, com recuso à técnica do “dedo frio”.

Estes agentes de nucleação possuem geralmente uma estrutura cristalina idêntica à do PCM no estado sólido, permitindo que a matéria neste estado aumente, mas a uma temperatura de fusão superior para que não sejam detetados quando o PCM se encontra no estado líquido.

Os aspetos negativos associados a esta técnica estão no facto de a estrutura cristalina implicar um ponto de fusão muito próximo do do material. Assim, muitos destes agentes são apenas estáveis a temperaturas entre 10 K a 20 K acima do ponto de fusão do PCM.

É no entanto, muito difícil encontrar o correto agente de nucleação para cada aplicação de PCM. Todavia, esta dificuldade pode ser ultrapassada se o PCM for arrefecido localmente a uma temperatura suficientemente baixa para que exista sempre uma partícula de PCM no estado sólido para atuar como núcleo. Esta temperatura pode ser encontrada através da técnica do “dedo frio”. Esta técnica consiste na utilização de um ponto frio no recipiente de armazenamento para que este tenha sempre alguma partícula no estado sólido. De referir que esta técnica é útil apenas quando a temperatura de fusão é superior à temperatura ambiente.

### 2.2.4.3 Perdas de Líquido

A ocorrência de fugas de líquido do PCM poderá afetar o ambiente em que está inserido o PCM, ou alterar a composição do mesmo.

O método de prevenção deste acontecimento, como já foi mencionado no sub-capítulo 2.2.3.3, passa pelo encapsulamento do PCM. Esta técnica, para além de poder funcionar como um elemento de construção, adicionando estabilidade mecânica à mesma, funciona ainda como superfície para a transferência de calor.

### 2.2.4.4 Estabilidade das Propriedades Térmicas

Uma limitação na procura do PCM adequado à aplicação a que se destina passa também pela vida útil associada ao mesmo e ao seu recipiente, isto é, o número de ciclos que suporta sem qualquer degradação das suas propriedades.

A fraca estabilidade a longo prazo associada aos recipientes de contenção de PCM está principalmente associada a dois fatores. A fraca estabilidade das propriedades dos materiais, ou a corrosão resultante do contacto entre o PCM e o seu recipiente, *Cabeza et al. 2011, Zalba et al. 2003.*

#### 2.2.4.5 Condutividade Térmica

A maioria dos PCM, como já foi apresentado acima, (Capítulo 2.2.2), apresenta uma fraca condutividade térmica, o que implica uma baixa taxa de transferência de calor, *Farid et al. 2004*.

Alguns dos métodos propostos para melhorar a esta taxa de transferência passam pela adição de estruturas metálicas ao recipiente do PCM, *Farid et al. 2004*.

#### 2.2.5 Exemplos de Aplicações de PCM

Os vários estudos existentes na matéria comprovam que a utilização de PCM não se limita a aplicações para armazenamento de energia solar. Nas próximas secções serão apresentados alguns dos avanços realizadas nas mais variadas áreas relativas ao uso de PCM.

##### 2.2.5.1 Construção de Edifícios

A procura por energia que garanta um ambiente confortável em edifícios tem aumentado globalmente, especialmente no que se refere ao uso de electricidade para ar-condicionado ou sistemas de arrefecimento. No entanto, o recurso a este sistemas causa picos na procura de electricidade principalmente durante a tarde, altura em que esta apresenta os preços mais altos.

As pessoas em geral querem evitar grandes variações de temperatura nos espaços interiores, mantendo a temperatura praticamente constante. Deste modo, os PCM são uma boa solução para a regulação da temperatura. A utilização ativa ou passiva de PCM diminui a quantidade de energia necessária para manter espaços com condições confortáveis, *Ahangari e Maerefat 2018*.

*A. Sharma et al. 2009* resume que a utilização de PCM para armazenamento de energia térmica em edifícios pode ser feita de três formas:

- Inclusão de PCM nas paredes;
- Inclusão de PCM em componentes da construção;
- Unidades de armazenamento de energia que contenham PCM.

Deste modo, encontramos PCM idealmente em paredes, através de placas de encapsulamento, tetos, chão e por vezes persianas, Figura 2.12.

*Rao, Wang e Z. Zhang 2012* aponta que, a eficiência de uma construção com PCM no interior depende de muitas fatores, especialmente o método de encapsulamento escolhido, a localização do PCM, as condições climáticas exteriores, o design e orientação do edifício, a quantidade e tipo de PCM e ainda, as propriedades térmicas dos materiais no interior do edifício.

Uma das tentativas de inserção de PCM na construção foi estudada por *Alawadhi e Alqallaf 2011*. Este avaliou a viabilidade da colocação de aberturas cónicas que contêm

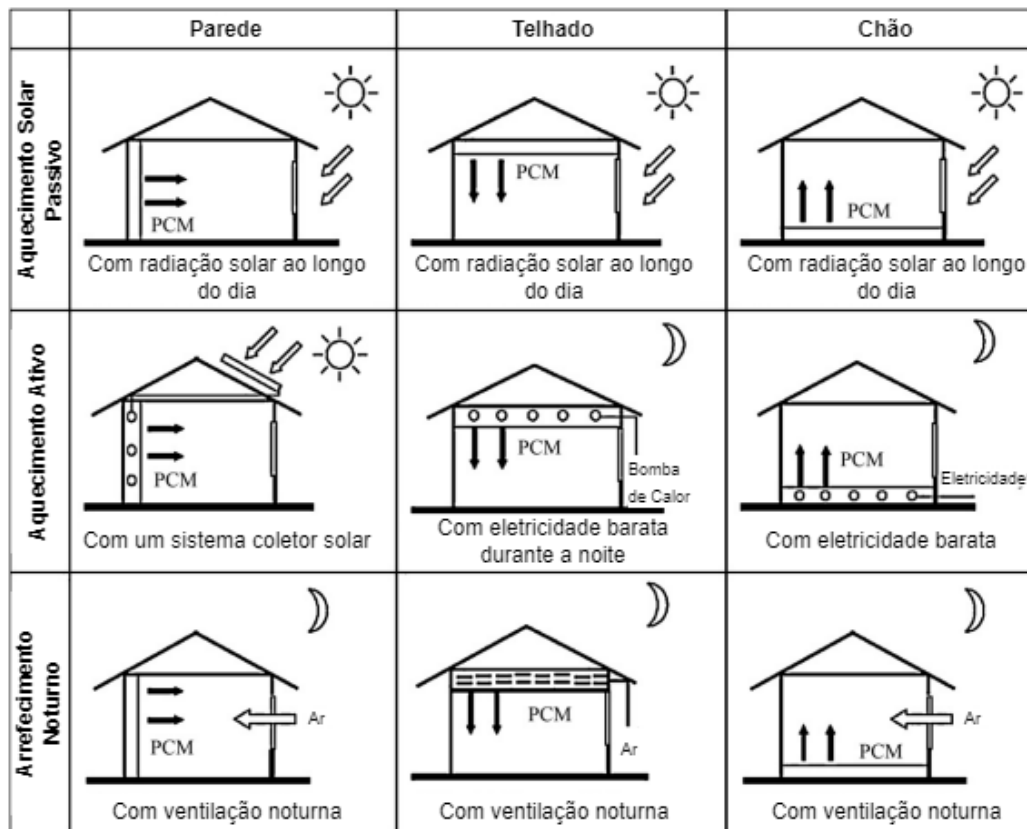


Figura 2.12: Utilização de PCM em edifícios, Adaptado de: *Rao, Wang e Z. Zhang 2012*

PCM no telhado de um edifício, com o objetivo de utilizar o calor latente resultante da fusão. Neste caso, durante o dia o PCM fundia, absorvendo calor, e durante a noite solidificava e libertava o calor armazenado.

Desta pesquisa verificou-se que a colocação de PCM no telhado provocou uma redução de cerca de 39% no fluxo de calor verificado no interior do edifício.

Ainda na área da aplicação de PCM nos telhados de edifícios encontramos a pesquisa de *Chung e Park 2017*. Este estudo passa pela colocação de bolsas de *nylon* plástico que contêm PCM em zonas ocas de pratos cuja constituição é essencialmente madeira e plástico, Figura 2.13. Estes pratos foram posteriormente colocados no telhado de um edifício.

O estudo foi conduzido durante os meses de verão e, dos resultados obtidos com a experiência verificou-se a viabilidade da utilização de PCM no telhado para redução de temperatura.

*A. Sharma et al. 2009* apresentou outros tantos exemplos de aplicações de PCM em edifícios, entre os quais, o seu uso em persianas. Durante o dia estas são abertas para o exterior, sendo expostas à radiação solar, absorvendo calor enquanto o PCM funde. Durante a noite, quando as persianas se encontram fechadas, o calor armazenado pelo PCM é libertado para o quarto.



Figura 2.13: Pratos preenchidos com bolsas de PCM a colocar no telhado, *Chung e Park 2017*

*Lin et al. 2005* por sua vez, expôs a possibilidade de utilização de PCM no chão. Neste estudo desenvolvido pela Universidade de Tsinghua na China, uma casa experimental, foi equipada com um sistema elétrico de aquecimento debaixo do chão, juntamente com placas de PCM de forma estabilizada, Figura 2.14.

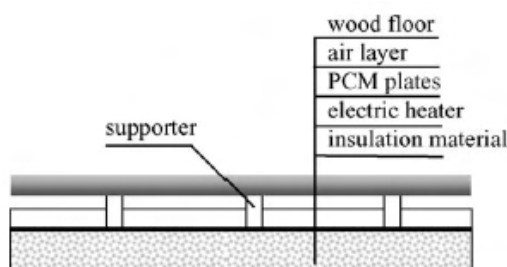


Figura 2.14: Esquemático da sistema implementado no estudo da aplicação de PCM para aquecimento do chão, Adaptado de: *Lin et al. 2005*

Os resultados obtidos verificaram a viabilidade do sistema de aquecimento, onde se identificou um aumento da temperatura interior, sem aumentar a diferença de temperatura. Neste caso de estudo, a temperatura dos PCM manteve-se no seu ponto de mudança de fase durante largos períodos de tempo, mesmo quando o sistema de aquecimento elétrico já se encontrava desligado. Aferiu-se ainda sobre a viabilidade económica da instalação, onde se apontou um notável benefício económico devido às diferentes tarifas durante o dia e a noite. O estudo da utilização de PCM no chão também é apresentado em *Ansuini et al. 2011*.

**PCM na Energia Fotovoltaica** Um sistema Fotovoltaico (PV) com uma solução de PCM incluída foi analisado por *Y.Cui et al. 2022*. Neste estudo a parafina foi utilizada como PCM tendo sido adicionado à parte traseira do módulo PV através de um invólucro de alumínio. A esta montagem foi ainda adicionado um sistema de água, Figura 2.15. O sistema instalado registou um aumento da eficiência total na ordem dos 40,59% e eficiência térmica na ordem dos 26,87%, em comparação com um sistema PV convencional, *Upadhyay e Singhal 2023*. Foi ainda concluído que o sistema PV com o PCM e sistema

de água integrados aumentou a taxa de produção de energia elétrica cerca de 17,33% comparativamente ao sistema convencional.

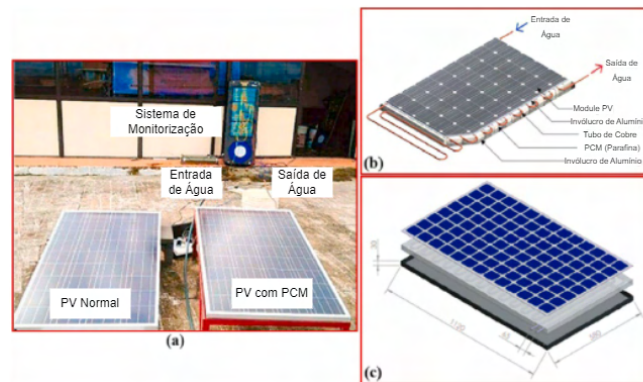


Figura 2.15: Representação de Sistema PV com PCM instalados: (a) Módulo PV e módulo PV com PCM e sistema de água instalados; (b) Estrutura do módulo PV com PCM e sistema de água instalados; (c) Dimensões. Adaptado de: *Y.Cui et al. 2022*

### 2.2.5.2 Outras Indústrias

*Hoang et al. 2014* estudou a possibilidade de utilização de PCM nas embalagens de comida. Esta pesquisa foi feita tendo em conta que a temperatura a que a comida está exposta pode levar à deterioração da qualidade e segurança dos alimentos.

Deste modo, a utilização de PCM para armazenamento de energia latente é uma hipótese a considerar para a manutenção do produto à temperatura desejada. Os resultados obtidos desta experiência mostraram que a utilização de PCM, neste caso RT5-PCL, apresentou uma melhor capacidade térmica entre os  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  e os  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  comparativamente aos pacotes tradicionais.

Na área da medicina é também possível encontrar exemplos da aplicação de PCM, mais especificamente, no transporte de produtos médicos, visto que, a qualidade destes depende da temperatura a que estão expostos.

Em *Mehling e Cabeza 2008* são apresentados dois exemplos de uma empresa que testou o uso de PCM no transporte de produtos médicos, a *The Swedish Company AB Aircontainer A.C.*. Num primeiro teste, um produto foi colocado numa caixa composta por PCM e transportado da Suécia até Montreal, no Canadá de avião. Este produto, de modo a manter a sua qualidade, deve manter temperaturas entre os  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ao fim de 105 horas de viagem encontrava-se a uma temperatura de  $+5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O segundo teste da viabilidade de PCM no transporte de produtos médicos foi feito, mais uma vez, numa viagem de avião, desta vez entre a Suécia e o México. O produto, que se deveria manter nos  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou abaixo desta temperatura, chegou, ao fim de 56 horas, a uma temperatura de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

É possível encontrar também exemplos de aplicações de PCM na indústria do têxtil e do calçado, tendo sido desenvolvidos por exemplo, coletes e outros tipos de vestuário

com o intuito de arrefecer o corpo da pessoa que o uso enquanto trabalha em ambientes quentes ou que se encontre a fazer exercício físico; ou ainda em palmilhas para os sapatos para regulação da temperatura.

Outros exemplos de aplicações de PCM nas mais variadas indústrias podem ser encontrados em *Mehling e Cabeza 2008*.

### 2.2.6 PCM no Mercado

Os PCM são por muitos apontados como um material com bastante potencial para a sustentabilidade energética de edifícios.

Deste modo, é necessário estudar os produtos disponíveis para a construção e restantes indústrias que possuem PCM. Estes materiais encontram-se disponíveis no mercado diretamente na forma de PCM ou na forma de produtos integrados com PCM.

A *Rubitherm Technologies GmbH* é uma empresa alemã especializada em PCM. Disponibiliza PCM para serem integrados nas mais variadas indústrias, desde a alimentação à saúde, assim como para a construção, área mais explorada pela empresa, para a qual apresentam um maior catálogo de produtos.

O seu produto encontra-se disponível na sua forma pura, ou macroencapsulado e microencapsulado. Para além de PCM do tipo sólido-líquido, oferece ainda PCM do tipo sólido-sólido. Entre os seus produtos encontra-se o PCM macroencapsulado através de um recipiente em alumínio (Figura 2.8), macroencapsulamento através de bolsas (Figura 2.9), PCM encapsulado em recipientes plásticos ou ainda, uma inovação que passa por tabuleiros que contêm PCM, uma boa solução para o transporte de comida, mantendo a sua temperatura (Figura 2.16). Quanto a PCM microencapsulados, esta empresa apenas os dispõe em soluções aquosas.

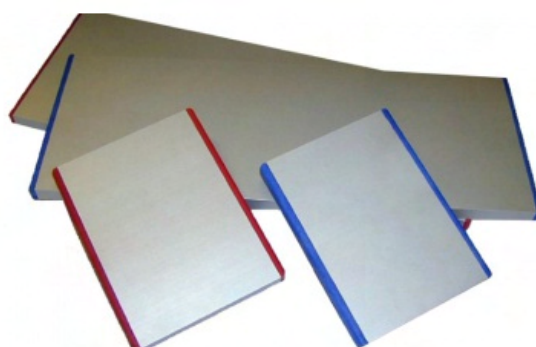


Figura 2.16: Tabuleiros com PCM, fornecido por: *Rubitherm GmbH s.d.*

A *PureTemp LLC*, inicialmente conhecida como *Entropy Solutions*, é uma empresa sediada nos Estados Unidos da América que contém uma enorme variedade de produtos em diferentes formas, apresentando soluções para diversos fins. As suas soluções são

constituídos por um PCM denominado de *Puretemp*, sendo este disponibilizado em várias formas.

A sua substância pura pode ser encontrada sob a forma de solução líquida ou pulverizada. Para além da variedade de formas que os seus produtos podem apresentar, estes são ainda possíveis de encontrar para mais de vinte temperaturas de fusão diferentes, *Martins 2017*.

A *PureTemp LLC* orgulha-se do seu material por este ser 100% biodegradável e não apresentar problemas de toxicidade.

Para além do material na sua forma pura, encontram-se entre os seus produtos saquetas de PCM macroencapsulado, Figura 2.17.



Figura 2.17: PCM macroencapsulado em saquetas, fornecido por: *PureTemp s.d.*

Como já referido, a empresa apresenta produtos para várias áreas de aplicação. Entre estes existem tecidos que contêm PCM (Figura 2.18).



Figura 2.18: PCM em tecidos, fornecido por: *PureTemp s.d.*

Quanto a produtos microencapsulados, a *PureTemp LLC* oferece três formas para o mesmo. A solução pulverizada, uma solução em forma de pasta, onde cerca de 30% da sua composição é água e os restantes 70% PCM, ou ainda, sobre a forma de uma outra pasta, mas desta vez composta por 60% de água e a restante percentagem PCM.

O recipiente de microencapsulamento é polímero, protegendo o produto e prevenindo fugas, Figura 2.19.



Figura 2.19: PCM microencapsulado, fornecido por: *PureTemp s.d.*

No mercado dos PCM podemos ainda encontrar a *PCM Products Ltd*, empresa com sede no Reino Unido. Tal como as empresas já referidas apresenta PCM em várias formas, no entanto, disponibiliza ainda PCM do tipo sólido-sólido. Comercializa ainda diversos tipos de PCM, desde sais hidratados, a vários tipos de compostos orgânicos, todos disponíveis para várias temperaturas de fusão. A Figura 2.20 apresenta alguns dos produtos disponibilizados pela *PCM Products Ltd*.



Figura 2.20: Produtos disponibilizados por *Ltd s.d.*

Para mais informações sobre o mercado de PCM, o trabalho de *Martins 2017*, apresenta um pesquisa mais pormenorizada destes produtos, assim como uma maior lista de empresas nesta área. Para saber mais sobre qualquer um dos produtos acima mencionados, o site de qualquer uma das empresas pode ser consultado.

## METODOLOGIA

O objetivo da dissertação passa pela avaliação da utilização de PCM na estabilização de temperatura em parques de estacionamento. Para o efeito foram considerados quatro cenários de estudo, cada um destes com características que os diferenciam entre si. O Capítulo 3 descreve conceptualmente a metodologia adotada nos vários cenários.

A primeira etapa passa pelo conhecimento do cenário de estudo de forma a identificar as características do espaço, distinguir possíveis locais para a instalação dos PCM e definir os passos seguintes neste estudo.

De modo geral, a realização da visita ao cenário de estudo permitiu depreender que a instalação de sensores de temperatura e humidade no local seria essencial para a continuidade do projeto.

Estes sensores, numa primeira instância permitiram averiguar se o comportamento térmico do cenário seria o necessário para o correto funcionamento dos PCM. Como referido, o cenário ideal deveria registar variações de temperatura na ordem dos 6 °C para que o processo de mudança de fase do PCM se realize. Estes sensores, ao serem colocados em diferentes zonas do cenário, facilitaram ainda a determinação do melhor local para a instalação dos PCM. Por fim, pela análise dos dados adquiridos, este sistema de monitorização permitiu definir a temperatura de mudança de fase dos PCM a adquirir.

Após a obtenção das especificações do cenário foi contactado o fornecedor de PCM escolhido para este estudo. Foram partilhadas as curvas de temperatura do espaço, e em conjunto determinadas as melhores temperaturas de mudança de fase para o cenário em questão. Esta temperatura de mudança de fase, aproxima-se da temperatura média registada no cenário.

Adquiridos os PCM, procedeu-se à sua instalação no local selecionado através da análise do comportamento térmico já realizada ao espaço.

Os PCM foram instalados horizontalmente, no teto de cada parque, com o auxílio de quatro ganchos por PCM (Figura 3.1) e prego líquido. A instalação foi dividida em três fases:

1. Instalação dos Ganchos Principais;

2. Colocação dos PCM;
3. Instalação do Sistema de Monitorização.

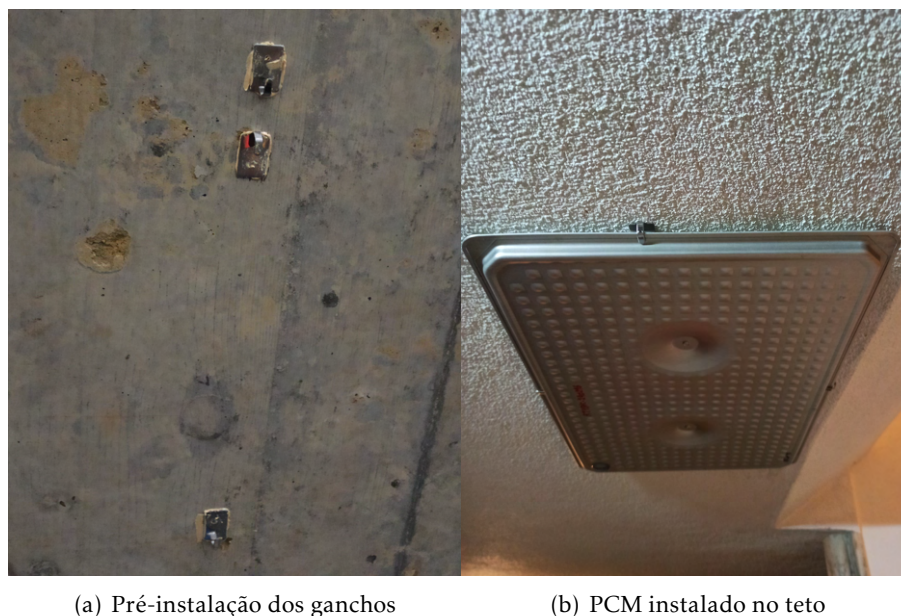


Figura 3.1: Instalação dos PCM

Numa primeira fase, foi definida a disposição dos PCM. Através do prego líquido foram fixados dois ganchos principais por PCM, no teto.

A segunda fase, geralmente realizada ao fim de 24 horas da primeira etapa, para assegurar a secagem completa do prego líquido, de modo a garantir que os ganchos suportariam o peso do PCM, passou pela colocação dos PCM nos espaços já definidos, e à colagem dos restantes ganchos, que garantiam uma maior segurança à instalação.

Instalados todos os PCM procedeu-se à montagem dos sensores.

Este sistema de monitorização possuía um número variado de sensores, registando a temperatura ambiente do grupo de PCM, a temperatura de um PCM na extremidade e a temperatura de um PCM na sua zona central. Esta alocação de sensores ao PCM, teve por objetivo tentar identificar o comportamento do material de mudança de fase na cápsula. Para termo de comparação foi ainda colocado um último sensor, afastado da zona de instalação dos PCM, que registava a temperatura ambiente do cenário em questão.

O tempo de aquisição de dados de temperatura e humidade variou de acordo com o cenário, tendo sido ajustado para cada cenários tendo em conta as necessidades verificadas através dos resultados obtidos no cenário anterior.

Os dados recolhidos permitiram formar as conclusões expostas no Capítulo 6.

# CENÁRIOS DE ESTUDO, IMPLEMENTAÇÃO E EXPECTATIVAS

## 4.1 Cenários de Estudo

O estudo foi realizado em quatro cenários, cada um com características bastante distintas. Seguidamente serão apresentados cada um dos cenários utilizados, sendo enumeradas as características de cada um destes e os locais escolhidos para a instalação dos PCM.

### 4.1.1 Cenário 1

#### 4.1.1.1 O Espaço e as suas Características

O primeiro espaço escolhido para a realização do estudo da viabilidade dos PCM na estabilização de temperatura foi um parque subterrâneo privativo.

O parque em questão tem capacidade para 112 automóveis, 3 lugares de mobilidade reduzida, 26 lugares para motos e ainda três lugares reservados ao espaço de lavagem automática, Figura 4.1.

O parque atribuído para o estudo tem como principal modo de utilização, um sistema de avenças. Ou seja, o utilizador "aluga" um espaço no parque, tendo-o sempre reservado. Este é um sistema muito utilizado por moradores ou trabalhadores em grandes cidades.

Foi identificado que a ventilação deste espaço é realizada unicamente por ventiladores de impulso (Figura 4.2), que são ligados de forma manual, três vezes ao dia, por períodos de trinta minutos.

Com o objetivo de proteger a saúde humana, é necessário que a poluição resultante dos gases libertos pelo tubo de escape dos veículos circulantes nos parques seja removida de forma eficaz. O sistema de ventilação de um parque de estacionamento coberto é composto por ventiladores de impulso de modo a promover a admissão de ar novo e por vezes, a exaustão de fumo para o exterior.

Deste modo, estes ventiladores poderão ser utilizados para o controlo de poluentes emitidos pelos veículos que usam o parque, assim como para o controlo e escoamento de fumo em situação de incêndio.



Figura 4.1: Planta do cenário 1, cedida pela Placegar



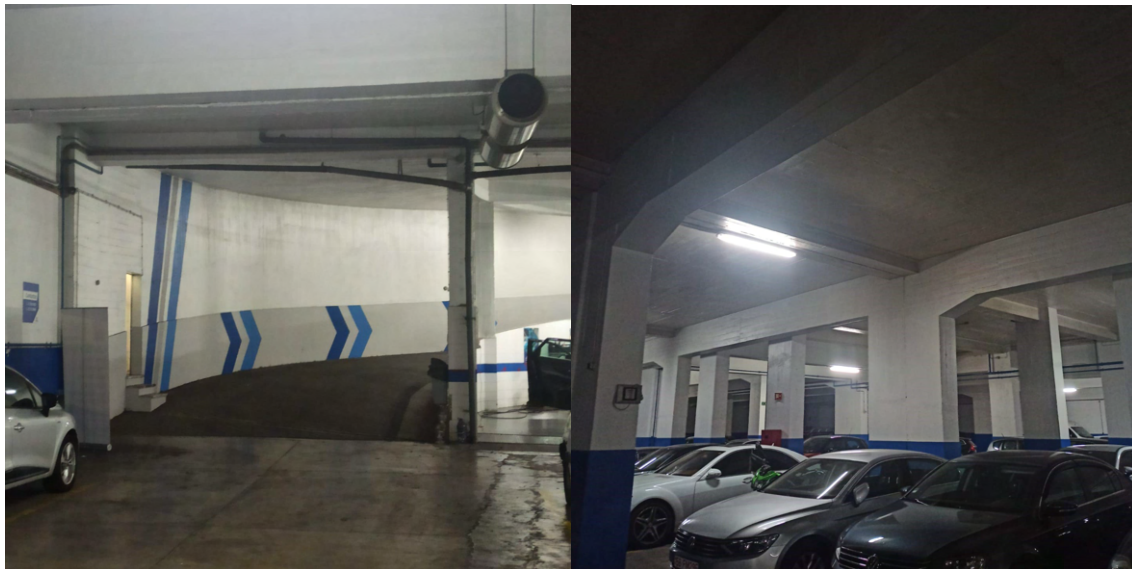
Figura 4.2: Ventiladores de impulso identificados no cenário 1

Concluindo, durante o período de funcionamento do sistema de ventilação, é admitido no parque ar novo, de modo a realizar uma limpeza dos poluentes emitidos pelos veículos.

#### 4.1.1.2 Procedimentos

A primeira etapa para o desenvolvimento deste projeto, foi a definição das principais características do parque. Neste primeiro cenário, da visita realizada, aferiu-se que este parque subterrâneo possui apenas uma entrada e saída, sendo estas comuns. Foi ainda identificado que não existe qualquer absorção de radiação solar no espaço e que este

possui paredes bastante espessas. Foi também possível perceber que era um parque relativamente pouco movimentado. A Figura 4.3 permite identificar algumas destas características.



(a) Entrada e Saída Únicas

(b) Parque sem qualquer absorção de Radiação Solar

Figura 4.3: Características do cenário 1

De seguida, foi necessário realizar uma aferição em relação às variações de temperatura registadas no parque, de modo a perceber se estas iriam permitir o correto funcionamento dos PCM. Procedeu-se então à instalação de sensores que fossem capazes de fazer a monitorização da temperatura e humidade no parque.

Planeou-se assim a colocação de um primeiro sensor na zona onde se iriam instalar os PCM, e outro na zona central do parque, para futuras comparações de temperatura, Figura 4.4.

O espaço escolhido para hospedar os PCM corresponde a uma pequena área do parque. A Figura 4.5 identifica as dimensões deste espaço.

Instalados os primeiros sensores no parque (Figura 4.6), foi feito o registo da temperatura e humidade do espaço, a cada 30 minutos durante cerca de 4 semanas. Os resultados obtidos, apresentados no Capítulo 5 permitirão aferir sobre as condições do parque, a fim de perceber se as variações de temperaturas necessárias à mudança de fase no PCM são verificadas. Este assunto será tratado de forma mais pormenorizada, à frente.

#### 4.1.1.3 Expetativas

Neste primeiro cenário espera-se que, por ser um espaço relativamente pequeno e fechado, a entrada e saída de carros durante o dia seja o fator proeminente nas flutuações de temperatura verificadas no espaço. Os gases de escape dos carros, o calor libertado

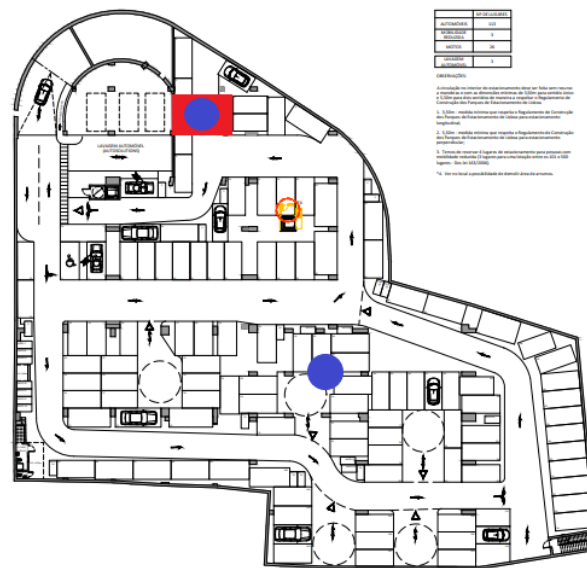


Figura 4.4: Cenário 1 - Identificação do local de instalação dos sensores (a azul) e PCM (a vermelho)

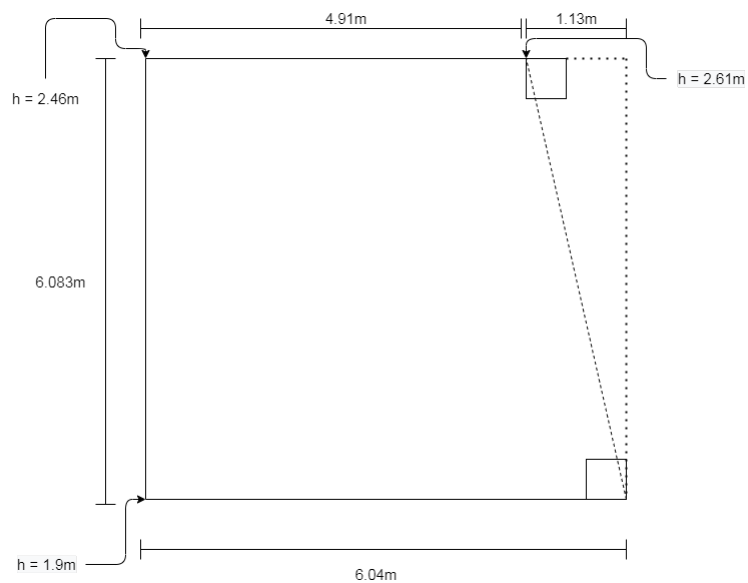


Figura 4.5: Medidas do espaço onde serão colocados os PCM

sob forma de radiação através dos motores dos mesmos quando estacionados, serão as principais razões destas variações.

Prevê-se ainda que se verifiquem flutuações durante a ventilação do espaço. A admissão de ar novo, à temperatura exterior, deverá fazer variar a temperatura interior do parque. Espera-se que as alterações de temperatura do parque sejam as necessárias ao correto funcionamento dos PCM.



Figura 4.6: Sensor instalado no cenário 1

#### 4.1.2 Cenário 2

O segundo cenário atribuído para o estudo da viabilidade de utilização de PCM na estabilização de temperatura foi um parque semi-aberto.

Da mesma forma que no primeiro cenário, foi realizada uma visita de reconhecimento ao parque de forma a definir as características do mesmo e identificar possíveis espaços para a colocação de PCM.

##### 4.1.2.1 O Espaço e as suas Características

Este segundo espaço é um parque público, que funciona em vários regimes. Está aberto ao público 24 horas por dia, 365 dias por ano e opera ainda num regime de avenças, tendo estacionamento reservado para as empresas do edifício.

Comparativamente ao primeiro espaço, verificou-se que este segundo cenário é de dimensões muito superiores, cerca de o dobro em relação ao cenário 1. Tem capacidade para 296 veículos, 80 lugares reservados para as empresas do edifício e ainda 5 lugares designados para a lavagem automóvel. A Figura 4.7 apresenta a planta deste parque, cedida pela empresa, *Placegar*, onde se podem identificar as diferentes zonas de estacionamento, assim como as várias entradas e saídas de ar.

Contrariamente ao primeiro parque, não existe qualquer sistema de ventilação, uma vez que, sendo o espaço semi-aberto, não existe a necessidade de administração de ar novo através de máquinas.

Neste segundo parque, foram identificadas as seguintes características principais, Figura 4.8:

- Parque semi-aberto;
- Vários pontos de entrada e saída de ar, no entanto, existe uma única zona de entrada e saída de veículos;

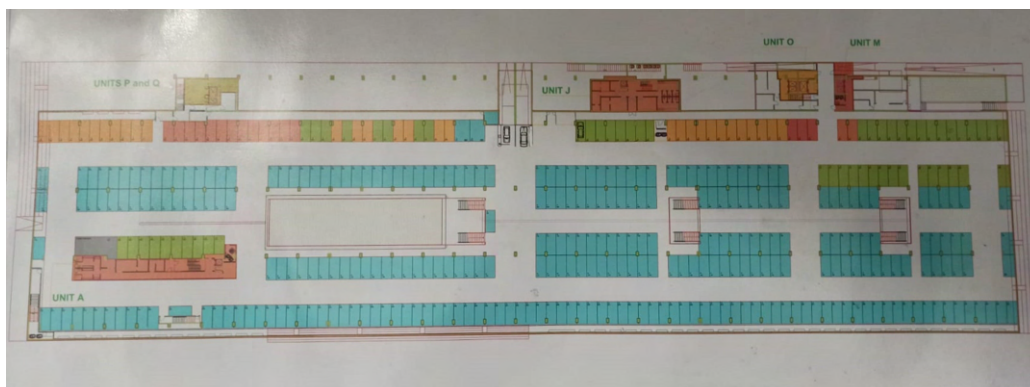


Figura 4.7: Planta do cenário 2, cedida pela *Placegar*



(a) Entrada e saída do parque

(b) Abertura para movimentação de peões

Figura 4.8: Características do cenário 2

- Absorção de radiação solar;
- Paredes bastante espessas;
- Sem sistema de ventilação forçada;
- Parque muito movimentado.

#### 4.1.2.2 Procedimentos

Da mesma forma que para o primeiro cenário, a primeira visita ao cenário, foi realizada tendo em vista a identificação de possíveis locais para a instalação de PCM. Por ser um espaço de grandes dimensões e com muitas aberturas ao exterior, foi necessário analisar

as temperaturas de várias zonas do parque, de modo a verificar se as variações de temperatura seriam constantes em todo o espaço. Desta forma, foram colocados dois sensores no parque, um primeiro próximo da entrada, e um segundo numa zona mais resguardada do parque (uma sala de arrumos com abertura ao espaço), Figura 4.9. A instalação do sistema de recolha de dados permitiu ainda a seleção do melhor local para a instalação dos PCM.



Figura 4.9: Cenário 2 - Localização dos sensores para monitorização de temperatura

Após a recolha e análise dos dados obtidos através dos sensores instalados ( Figura 4.10), foi definida a zona para a instalação dos PCM (Figura 4.11), assim como as temperaturas de mudança de fase dos PCM a adquirir.

Esta análise poderá ser encontrada no Capítulo 5.1.

Após instalação dos PCM foram recolhidos dados durante cerca de dez dias a cada hora. Os dados recolhidos foram utilizados para concluir quanto à viabilidade de utilização de PCM para estabilizar a temperatura.

O método utilizado para a instalação de PCM e recolha de dados será abordado mais extensivamente no Capítulo 4.2.



Figura 4.10: Cenário 2 - Sensor 1

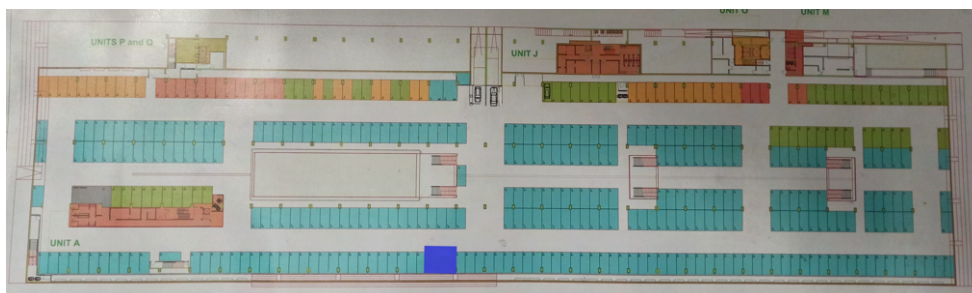


Figura 4.11: Cenário 2 - Zona escolhida para instalação dos PCM

#### 4.1.2.3 Expectativas

Por ser um espaço de grandes dimensões e com muitos pontos de abertura para o exterior, espera-se que o segundo cenário registre grandes flutuações de temperatura ao longo do dia, possivelmente acompanhado o comportamento térmico do exterior.

É expectável que as alterações de temperatura do parque sejam as necessárias ao correto funcionamento dos PCM, isto é, de modo a que se realize o processo de mudança de fase.

#### 4.1.3 Cenário 3

O terceiro cenário considerado foi um parque fechado, não subterrâneo.

A visita de reconhecimento ao parque permitiu identificar as características do mesmo e definir possíveis espaços para a colocação de PCM.

##### 4.1.3.1 O Espaço e as suas Características

O parque escolhido como terceiro caso de estudo, é um parque fechado, localizado no piso zero de um edifício. Este parque está aberto ao público 24 horas por dia, 365 dias por ano.

À semelhança dos outros parques, também este possui um centro de lavagem manual e personalizada de automóveis.

O cenário tem uma capacidade para 241 veículos, tendo quatro lugares reservados a deficientes e cerca de 12 reservados a atendimento urgente. Tal como nos parques anteriores, apenas existe uma entrada e saída de veículos, sendo que neste espaço, contrariamente ao segundo cenário, existe uma única entrada e saída de ar no espaço. Por esta razão, o parque está equipado com um sistema de ventilação. A Figura 4.12 apresenta a planta deste espaço, cedida pela empresa, *Placegar*, onde se podem identificar as diferentes zonas de estacionamento, assim como a entrada e saída de veículos única.

As principais características identificadas no parque foram:

- Parque fechado, não subterrâneo;
- Ponto de entrada e saída único;

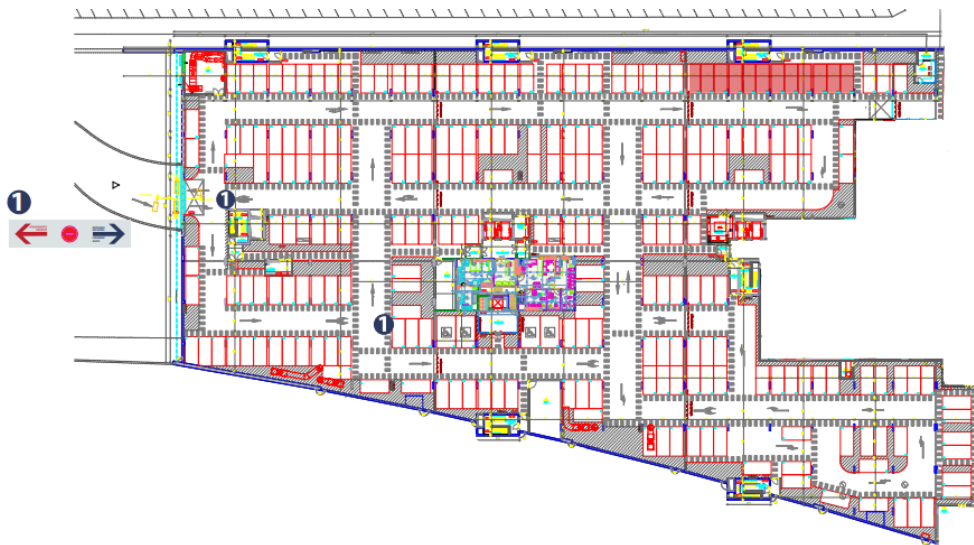
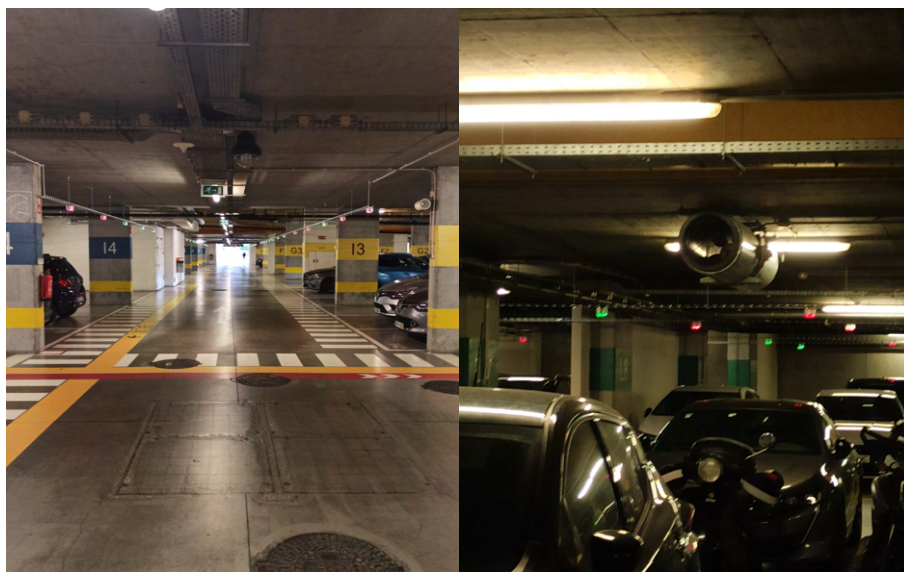


Figura 4.12: Planta do cenário 3, cedida pela *Placegar*

- Pouca absorção de radiação solar;
- Paredes bastante espessas;
- Possui sistema de ventilação forçada;
- Parque muito movimentado.

A Figura 4.13 identifica algumas destas características.



(a) Entrada e saída única

(b) Sistema de ventilação forçada

Figura 4.13: Características do cenário 3

#### 4.1.3.2 Procedimentos

Comum a todos os cenários, a primeira etapa passou por uma visita ao parque com vista a identificar os possíveis locais para a instalação de PCM.

Ao contrário dos dois outros espaços, não foi realizada uma primeira análise às temperaturas do mesmo, de forma a determinar a temperatura média do parque, uma vez os PCM já tinham sido adquiridos aquando do desenvolvimento do projeto neste cenário. Desta forma, após definido o local para o estudo, procedeu-se à instalação dos PCM e dos sensores para monitorização da temperatura nos PCM e no parque. A Figura 4.14 identifica a zona onde foram colocados os PCM.



Figura 4.14: Cenário 3 - Localização dos PCM

O comportamento térmico do espaço, com os PCM instalados, foi controlado durante três dias, sendo recolhidos dados a cada dez minutos. Os dados recolhidos foram analisados e dos mesmos retiradas conclusões que serão apresentadas no Capítulo 5.2.2.

#### 4.1.3.3 Expectativas

Neste cenário, espera-se que a entrada e saída de carros durante o dia, seja o fator preponderante na explicação das flutuações de temperatura verificadas no espaço. Prevê-se, tal como no primeiro cenário, que hajam flutuações na temperatura durante a ventilação do espaço.

Espera-se que as alterações de temperatura do parque sejam as necessárias ao correto funcionamento dos PCM. No entanto, o facto de as temperaturas de mudança de fase dos PCM instalados não terem sido escolhidas em função das temperaturas do espaço, poderá fazer com que os resultados obtidos não sejam os desejados.

#### 4.1.4 Cenário 4

O quarto e último cenário de estudo considerado foi a garagem de uma moradia. De forma idêntica aos cenários anteriores, inicialmente foram identificadas as características da garagem e definido o espaço para instalação dos PCM.

##### 4.1.4.1 O Espaço e as suas Características

Este quarto e último cenário diferencia-se dos restantes, não só em termos de dimensões, mas também pelo tipo de espaço. Enquanto que os três primeiros espaços já apresentados são todos parques de estacionamento para um elevado número de utilizadores, o quarto cenário corresponde a uma garagem numa moradia familiar com capacidade para dois veículos.

A Figura 4.15 identifica a zona da moradia considerada para o estudo. Este espaço tem cerca de  $55,71m^2$ .

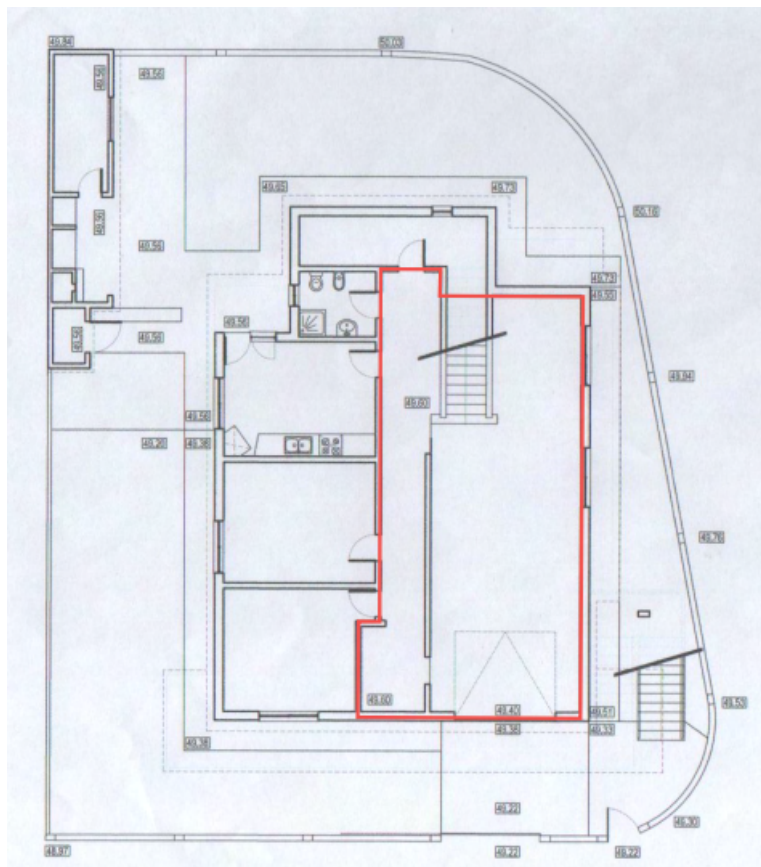


Figura 4.15: Planta do cenário 4

Apesar de toda esta zona considerada, a zona para a instalação dos PCM escolhida corresponde ao corredor paralelo à zona de estacionamento dos carros, Figura 4.16.

É um espaço aberto, com acesso a outras divisões da moradia, mas a principal entrada de ar do mesmo é o portão, aberto em média duas vezes por dia.

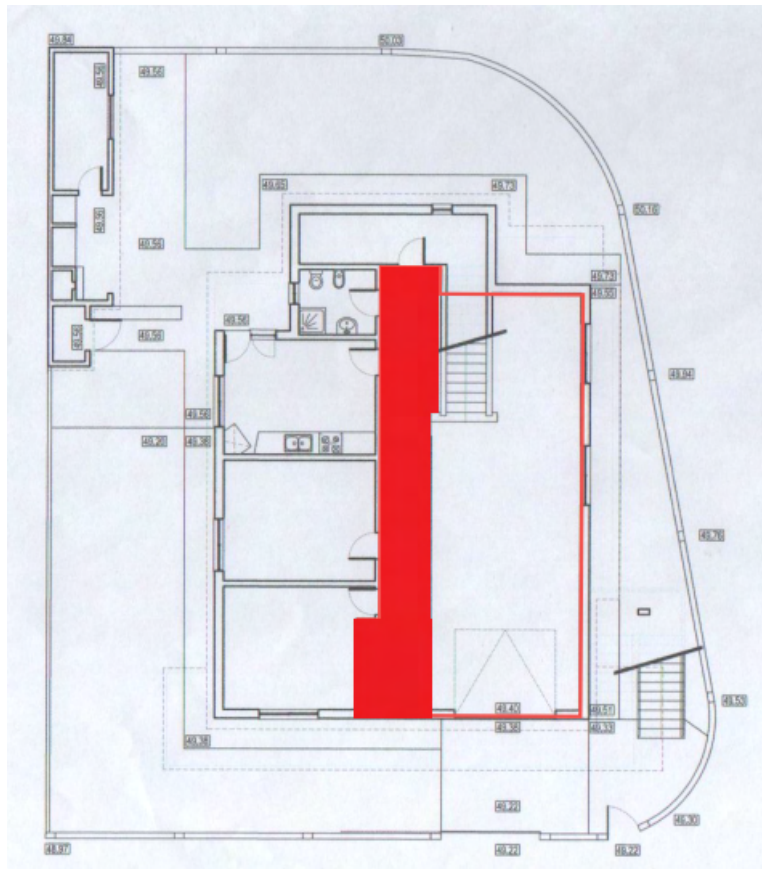


Figura 4.16: Cenário 4 - Zona escolhida para a instalação dos PCM

As principais características identificadas neste espaço passam pelas dimensões do mesmo, muito menor em comparação com os cenários anteriores. O espaço, apesar de apenas possuir uma entrada e saída para veículos, possui outras entradas de ar, desde janelas, a portas. Absorve radiação solar e as suas paredes não são tão espessas, quando comparadas com os parques anteriores, que eram de betão.

A Figura 4.17 identifica algumas destas características.



(a) Absorção de radiação solar

(b) Espaço para instalação dos PCM

Figura 4.17: Características do cenário 4

#### 4.1.4.2 Procedimentos

Tal como para o terceiro cenário, não foi feita qualquer recolha de dados anterior à escolha das temperaturas de mudança de fase dos PCM. Desta forma, após definido o local para colocação do material, procedeu-se à instalação dos mesmos.

O comportamento térmico do espaço, com os PCM instalados, foi controlado durante uma semana, sendo recolhidos dados de minuto a minuto. Os dados recolhidos foram posteriormente analisados para a redação de conclusões, que poderão ser encontradas em 5.2.3.

#### 4.1.4.3 Expectativas

Por ser um espaço de dimensões muito menores quando comparado com os restantes cenários, espera-se a influência dos PCM seja mais facilmente notada neste espaço que nos anteriores. No entanto, o facto de as temperaturas de mudança de fase dos PCM instalados não terem sido adaptadas ao cenário em questão, poderá resultar em dados que não se aproximam do objetivo.

## 4.2 Implementação

Como já referido anteriormente, a escolha da temperatura de mudança de fase dos PCM a instalar foi feita tendo em consideração o comportamento térmico nos dois primeiros cenários.

Esta análise foi feita através de um sistema de monitorização e recolha de dados, Figura 4.18. O sistema desenvolvido foi utilizado durante todo o projeto, possibilitando, numa primeira instância, analisar as condições de temperatura e humidade dos parques, determinando se as flutuações de temperaturas verificadas permitiriam o correto funcionamento dos PCM.

Esta fase do projeto foi fundamental, uma vez que, a análise das condições do parque através destes sensores, permitiu determinar se se verificavam as variações de temperaturas necessárias ao correto funcionamento dos PCM no espaço em questão. Ou seja, se era identificada uma diferença de temperatura na ordem dos 3-5 °C em relação à temperatura de mudança de fase. Por exemplo, para um material cuja temperatura de mudança de fase é 21 °C, durante a noite deveria registar-se uma temperatura de pelo menos 18 °C e durante o dia, na ordem dos 24 °C.

Numa segunda instância, auxiliaram na escolha da temperatura de mudança de fase dos PCM a adquirir.

E, numa instância final, recolheram os novos dados de temperatura e humidade, já com os PCM colocados, de forma a averiguar a viabilidade da utilização dos mesmos para estabilização de temperatura em parques de estacionamento.

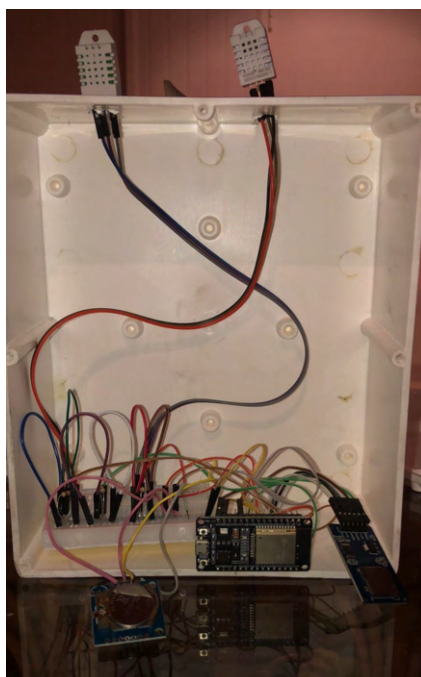


Figura 4.18: Sistema de monitorização de temperatura e humidade

Desta forma, no primeiro cenário, os sensores foram instalados no dia 23 de abril de 2021, nos pontos identificados pela Figura 4.4, registando temperaturas a cada trinta minutos. Os sensores foram retirados no dia 8 de junho de 2021 e os dados analisados.

No segundo cenário considerado, a recolha de dados, após a instalação dos dois sensores (Figura 4.9), foi feita a cada hora. Todos os dados obtidos foram analisados, e em conjunto com a *Rubitherm*, os PCM mais adequados ao espaço foram escolhidos. Os resultados obtidos serão apresentados no Capítulo 5.

#### 4.2.1 Seleção dos PCM

O primeiro contacto com a *Rubitherm* foi estabelecido a 3 de junho de 2021. Já tinha sido realizada uma pesquisa prévia sobre o tipo de produtos que disponibilizavam e procurou-se agora encontrar o ideal para o projeto.

O tipo de PCM recomendado foi um PCM macroencapsulado, uma vez que o facto de o material de mudança de fase estar "contido", fez com que este estivesse pronto a usar, sendo aplicável a vários tipos de situações. O material de encapsulamento escolhido foi o alumínio. Esta cápsula é formada por dois pratos de alumínio, unidos em dois pontos centrais e colados na moldura exterior dos mesmos. A escolha do alumínio como material de encapsulamento deveu-se ao facto de:

- Garantir uma elevada transferência de calor;
- Pouco corrosivo;

- Possibilidade de o material de mudança de fase ser orgânico ou inorgânico, o que aumentava a gama de temperatura disponíveis.

A Figura 4.19 mostra o PCM utilizado.



Figura 4.19: Estrutura do PCM adquirido

A placa de PCM possui dimensões na ordem dos 450 x 300 mm, sendo que a sua espessura depende do volume do material de mudança de fase no seu interior, ou seja, na sua capacidade de armazenamento térmico.

A *Rubitherm* oferece uma vasta gama de temperaturas desde os 0 °C aos 45 °C. Entre a sua oferta e os resultados obtidos em 5.1, foram escolhidas as seguintes temperaturas de mudança de fase:

- Mudança de Fase a 12 °C;
- Mudança de Fase a 15 °C;
- Mudança de Fase a 18 °C.

Os PCM escolhidos são todos compostos por um material de mudança de fase orgânico.

As características da placa de PCM e do seu composto encontram-se descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características dos PCM adquiridos

Características	Temperatura de Mudança de Fase		
	12 °C	15 °C	18 °C
Peso	1 Kg	1 Kg	1 Kg
Espessura	15 mm	15 mm	15 mm
Material	Orgânico	Orgânico	Orgânico
Capacidade de Armazenamento de Calor	155 KJ/Kg	155 KJ/Kg	260 KJ/Kg

Relembro que materiais orgânicos distinguem-se pela sua elevada capacidade de armazenamento de energia térmica, são quimicamente inertes e raramente registam o efeito de super fusão.

Ao serem escolhidas três temperaturas de mudança de fase distintas foi necessário, durante a instalação, diferenciar estas zonas de modo a identificar também qual a temperatura de mudança de fase ideal para cada parque.

Cada sistema de monitorização, alocado a um grupo de PCM, possuía um número variado de sensores. Este sistema registou a temperatura ambiente de cada grupo, a temperatura de um PCM na extremidade e a temperatura de um PCM na sua zona central. Esta alocação de sensores ao PCM, teve por objetivo tentar identificar o comportamento do material de mudança de fase na cápsula. Para termo de comparação foi ainda colocado um último sensor, afastado dos grupos de PCM, que registava as temperaturas do cenário em questão.

A Figura 4.20 representa a organização base considerada para todos os cenários. O quarto sensor, aquele que mede a temperatura do cenário, ficou alocado a diferentes grupos, dependendo do cenário considerado.

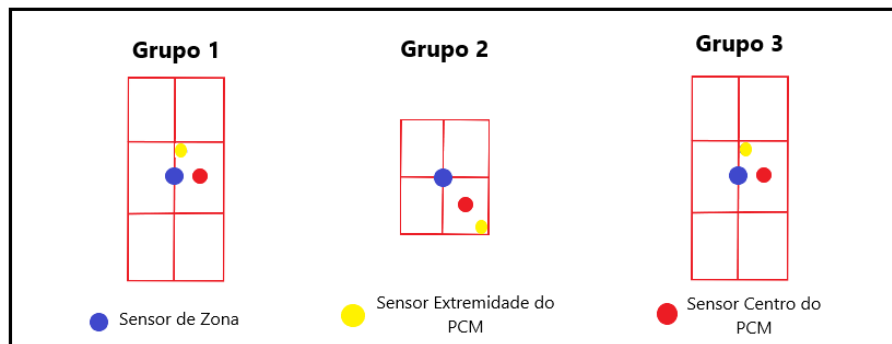


Figura 4.20: Planeamento da disposição dos PCM nos cenários

## ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1 Seleção da Temperatura de Mudança de Fase dos PCM

Como mencionado no Capítulo 4, as temperaturas de mudança de fase dos PCM foram escolhidas com base nas temperaturas dos cenários piloto um e dois. Em cada cenário, foram colocados sensores espalhados pelo espaço de forma a identificar se o comportamento térmico do parque alterava em diferentes zonas do mesmo. Os resultados obtidos foram analisados de forma a aferir quanto à viabilidade de utilização do espaço para o estudo, uma vez que, como já referido, para o correto funcionamento do PCM, o cenário ideal deveria registar variações de temperatura na ordem dos 6 °C.

#### 5.1.1 Cenário 1

No primeiro cenário foram inicialmente instalados dois sensores (Figura 5.1), que registaram as temperaturas do espaço, a cada meia hora, durante cerca de 21 dias.

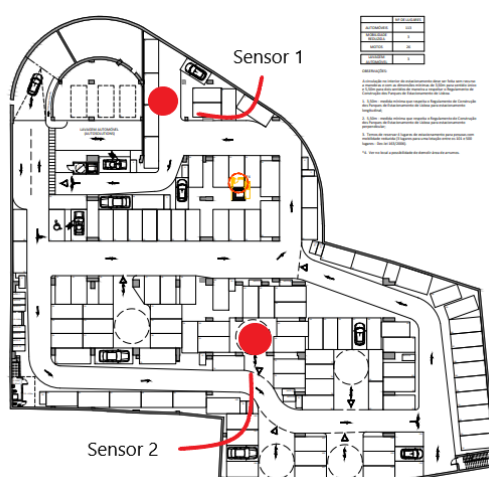


Figura 5.1: Cenário 1 - Identificação dos sensores

O Sensor 1 registou, ao fim de 21 dias, uma temperatura máxima de 21,50 °C e uma mínima de 18,2 °C (dados obtidos em dias distintos). A Tabela 5.1 resume alguns dos

resultados obtidos durante a recolha de dados.

Tabela 5.1: Cenário 1 - Resultados sensor 1

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
24-04-2020	19,60	19,50
27-04-2020	19,60	18,20
08-05-2020	21,50	19,80

Dos resultados obtidos pelo sensor 1, a maior variação de temperatura diária registada foi de 2,6 °C, enquanto que a menor foi de 0,1 °C.

Os resultados obtidos mostram que o espaço regista uma temperatura praticamente constante, não registando variações de temperatura significativas. O gráfico representado na Figura 5.2 permite identificar que as temperaturas registadas pelo sensor 1 estão muito próximas dos 20 °C.

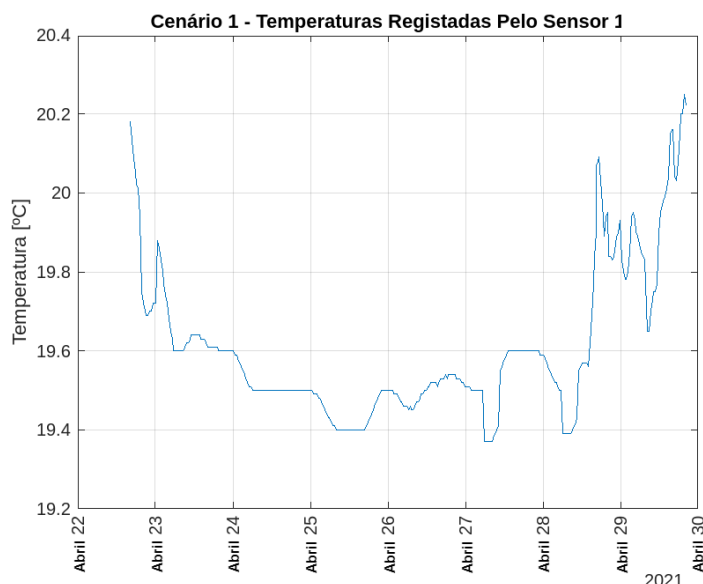


Figura 5.2: Cenário 1 - Temperaturas registadas pelo sensor 1

O sensor 2, colocado numa zona mais central do parque, registou uma temperatura máxima de 21,20 °C e mínima de 19,50 °C ao longo do período de recolha de dados. A Tabela 5.2 apresenta alguns dos resultados obtidos.

Tabela 5.2: Cenário 1 - Resultados sensor 2

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
02-05-2020	19,60	19,50
10-05-2020	21,20	20,40
15-05-2020	20,40	20,30

A maior variação de temperatura registada por este sensor foi de 0,9 °C, uma variação

## 5.1. SELEÇÃO DA TEMPERATURA DE MUDANÇA DE FASE DOS PCM

menor que a registada no sensor 1. Semelhante ao registado pelo sensor 1, as temperaturas rondam os 20 °C, como pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 5.3.

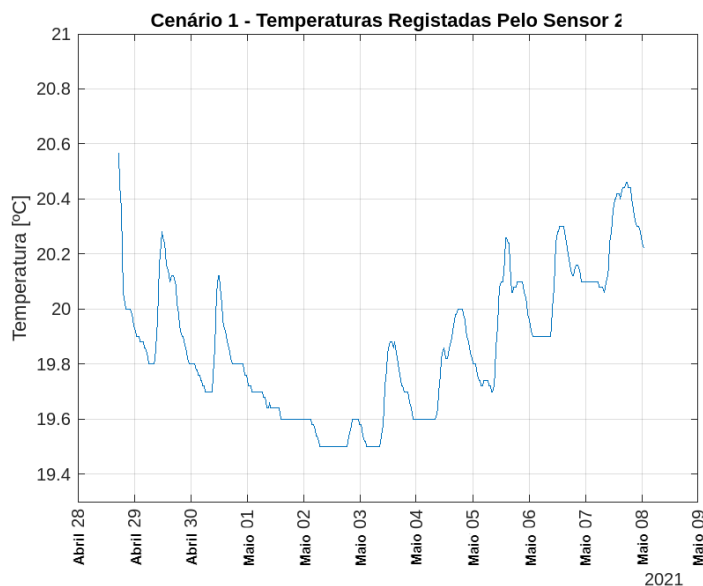


Figura 5.3: Cenário 1 - Temperaturas registadas pelo sensor 2

Dos resultados obtidos é possível ainda assim afirmar que, a zona onde se encontra localizado o sensor 1 verifica variações de temperatura superiores. O gráfico representado pela Figura 5.4 compara a temperatura registada nas duas zonas ao longo do dia 13 de maio de 2021.

Os resultados obtidos para o cenário 1 permitem concluir que, o espaço escolhido para a instalação dos PCM é o que regista variações de temperatura superiores. No entanto,

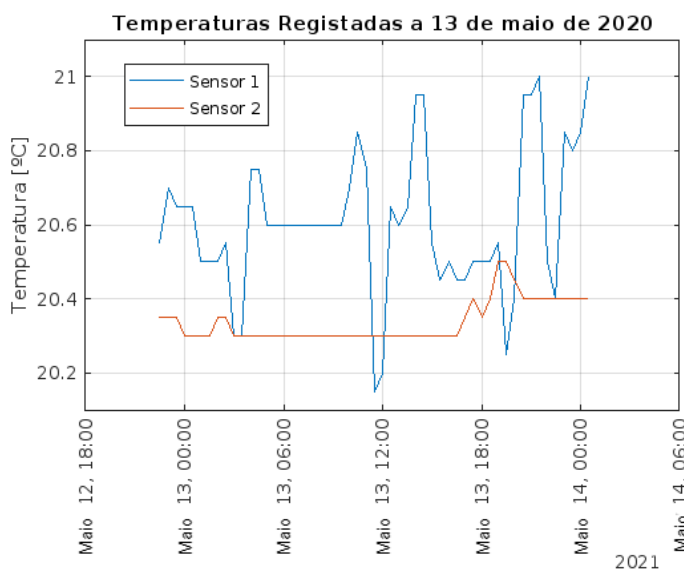


Figura 5.4: Cenário 1 - Temperaturas registadas a 13 de maio de 2021

não se verificam as condições necessárias ao correto funcionamento dos PCM, uma vez que não são registadas as variações de temperatura necessárias para que ocorra o processo de mudança de fase. Estas conclusões foram confirmadas com a *Rubitherm*, que afirmou não considerar este cenário o indicado para o propósito da dissertação.

Por esta razão, o cenário 1 foi descartado e o projeto avançou para o Cenário 2, onde iniciou o registo de dados térmicos do espaço.

### 5.1.2 Cenário 2

De forma semelhante ao primeiro cenário, foi necessário analisar o comportamento térmico do segundo cenário.

Para tal, foram colocados dois sensores no parque, localizados nos pontos identificados pela Figura 5.5.

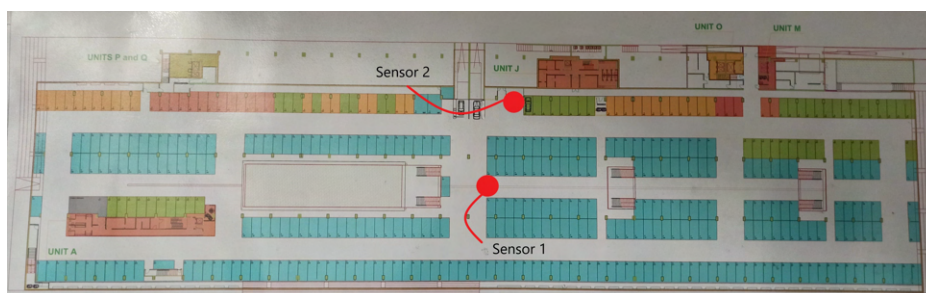


Figura 5.5: Cenário 2 - Identificação dos sensores

O sensor 1 registou, durante um primeiro período de recolha de dados, uma temperatura máxima de 29,00 °C e mínima de 21,60 °C (em dias distintos), apresentando uma variação de temperatura média na ordem dos 3,5 °C.

Os valores observados encontram-se, de uma forma resumida, apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Cenário 2 - Resultados do sensor 1

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
09/07/2021	27,80	21,60
05/08/2021	27,40	23,20
13/08/2021	29,00	24,20

O gráfico das variações registadas durante este período podem ser identificadas na Figura 5.6.

Durante o mesmo período, o sensor dois registou uma temperatura máxima de 26,10 °C e mínima de 21°C (em dias distintos). A média de variações registadas está na ordem dos 3,38 °C.

A Tabela 5.4 resume alguns dos valores obtidos.

A Figura 5.7 representa o Gráfico da evolução térmica registada pelo sensor 2.

## 5.1. SELEÇÃO DA TEMPERATURA DE MUDANÇA DE FASE DOS PCM

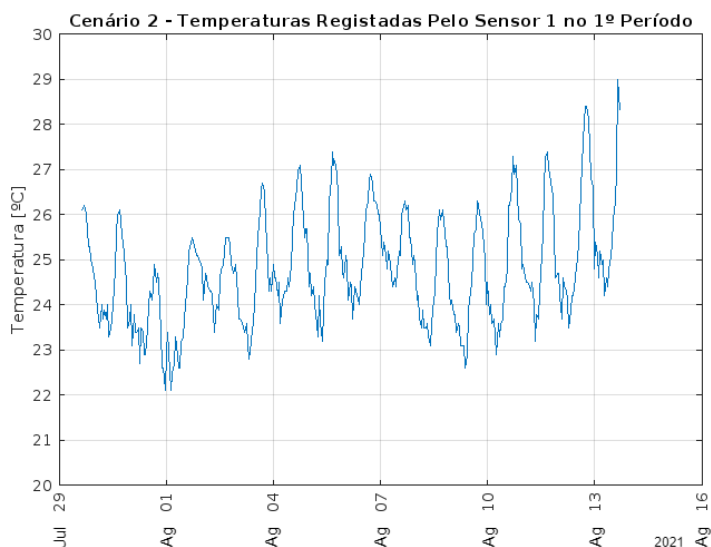


Figura 5.6: Cenário 2 - Temperaturas registadas pelo sensor 1 no 1º período

Tabela 5.4: Cenário 2 - Resultados do sensor 2

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
31/07/2021	24,30	21,00
04/08/2021	26,10	21,90
09/08/2021	25,90	21,60

Analisando os resultados e comparando os gráficos percebemos que a localização 1 regista variações de temperatura superiores. Por esta razão foi determinado que um local menos resguardado seria o melhor para a instalação dos PCM.

A Figura 5.8 apresenta o gráfico comparativo de temperaturas registadas pelos dois sensores, a 4 de agosto de 2021.

Comparativamente ao primeiro cenário, registaram-se variações térmicas muito significativas, próximas das necessárias ao correto funcionamento dos PCM. Com os resultados procurou-se a opinião da *Rubitherm* em relação ao cenário.

Após aprovação do mesmo, foi iniciado um segundo período de registo de dados para que os PCM adquiridos tivessem as temperaturas de mudança de fase adequadas ao momento de instalação.

Neste segundo período de recolha de dados, apenas foi considerado o sensor 1, por se encontrar no melhor local para a instalação dos PCM. O segundo período de monitorização de dados registou uma temperatura máxima de 19,90 °C e uma mínima de 12,50 °C, tendo sido identificadas variações de temperatura na ordem dos 3 °C.

O gráfico representado pela Figura 5.9 identifica o comportamento térmico registado neste período.

Apesar de as temperaturas registadas neste pequeno período não apresentarem as

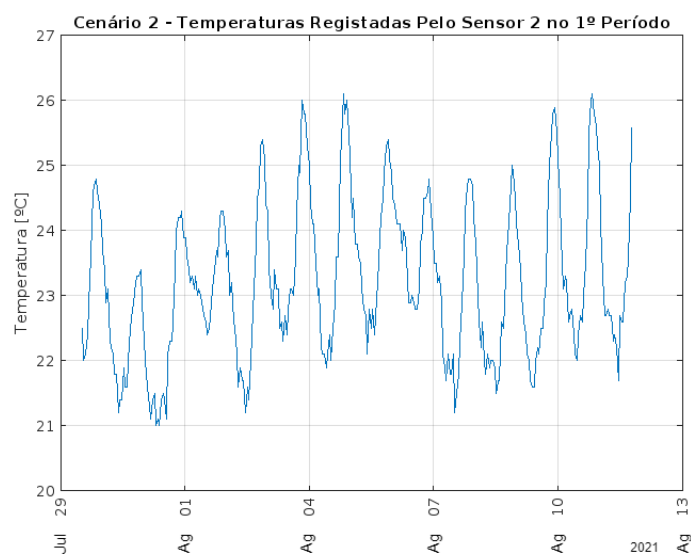


Figura 5.7: Cenário 2 - Temperaturas registadas pelo sensor 2 no 1º período

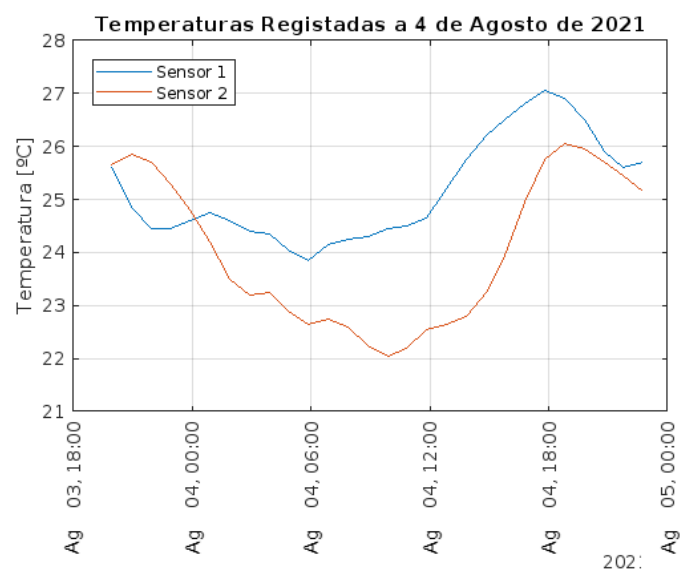


Figura 5.8: Cenário 2 - Temperaturas registadas a 4 de agosto de 2021

mesmas variações anteriormente registadas, permitiram, com o auxílio da *Rubitherm*, definir as temperaturas de mudança de fase dos PCM a adquirir.

Como verificado, as temperaturas do cenário estiveram maioritariamente entre os valores de 20 °C e 12 °C. Desta forma, foram seleccionadas temperaturas de mudança de fase dentro deste intervalo mas, tendo em consideração a temperatura média normalmente registada em Lisboa, aquando da chegada dos PCM.

Procedeu-se assim à encomenda de três temperaturas de mudança de fase distintas, 9 placas de 15 °C, 9 placas de 18 °C e 4 placas de 12 °C. Para cada um dos cenários estas placas foram dispostas por grupos consoante a sua temperatura de mudança de fase. O

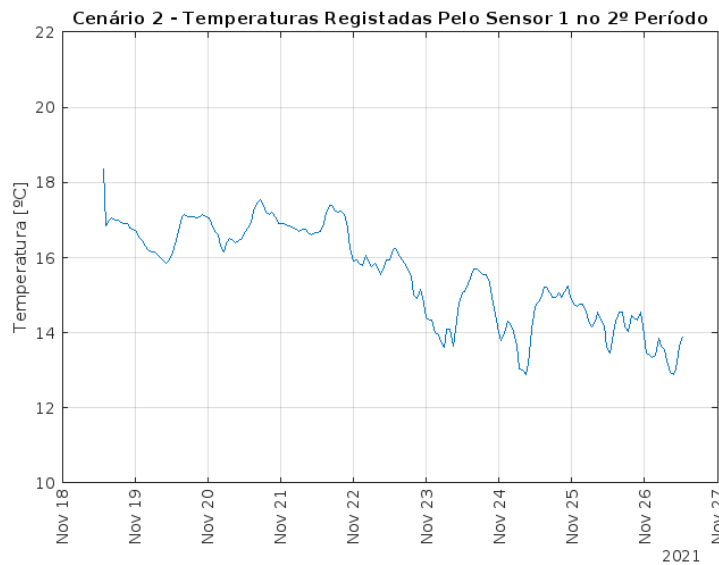


Figura 5.9: Cenário 2 - Temperaturas registadas pelo sensor 1 no 2º período

modo de instalação e monitorização de dados foi explicado anteriormente no Capítulo 4.2.

Com a chegada dos PCM, procedeu-se à instalação dos mesmos. Os resultados obtidos serão apresentados seguidamente.

## 5.2 Funcionamento de PCM na Estabilização de Temperatura

### 5.2.1 Cenário 2

A instalação dos PCM no segundo cenário foi realizada de 14 a 17 de fevereiro de 2022.

Como já explicado, começou-se pela aplicação dos ganchos, seguida da instalação dos PCM, e por fim, pela montagem do sistema de monitorização de temperatura.

Seguindo o planeamento apresentado na Figura 4.20, os PCM com temperatura de mudança de fase a 18 °C foram associados ao grupo um. Ao grupo dois, corresponde a temperatura de 12 °C e por fim, o terceiro grupo, possui uma temperatura de mudança de fase de 15 °C. Esta instalação foi realizada na zona identificada pela Figura 4.11.

A cada grupo foi associado um grupo de monitorização de dados. Neste caso, um quarto sensor responsável pela medição da temperatura do parque, foi associado ao segundo grupo. A instalação realizada pode ser observada na Figura 5.10.

A monitorização de dados foi feita ao longo de onze dias, a cada hora. Durante este período a temperatura do parque registada rondou os 16 °C. A máxima observada foi de 17,80 °C e a mínima de 14,40 °C. A Tabela 5.5 resume os valores obtidos pelo sensor que registava a temperatura do cenário 2.

O gráfico da Figura 5.11 permite analisar o comportamento térmico do cenário 2.

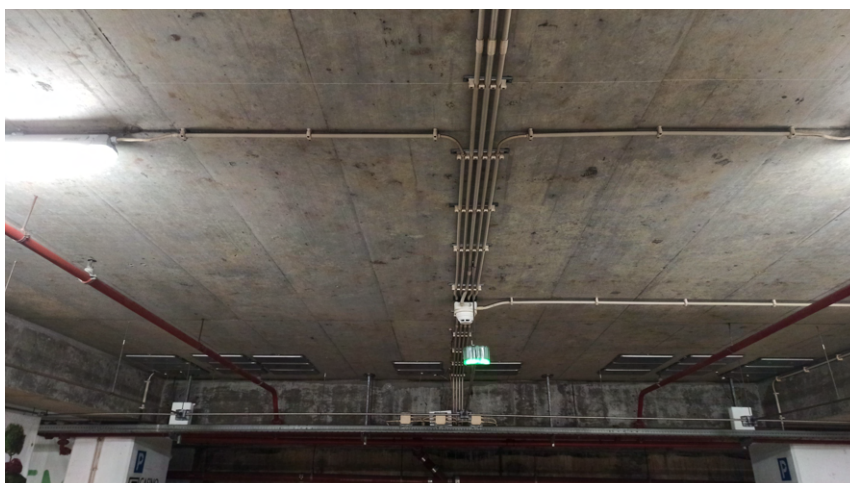


Figura 5.10: Instalação cenário 2

Tabela 5.5: Cenário 2 - Temperatura do parque

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
22/02/2022	16,50	14,40
25/02/2022	16,60	14,50
01/03/2022	17,80	16,20

### 5.2.1.1 Mudança de Fase a 12 °C

Os PCM com mudança de fase a 12 °C correspondem ao grupo dois da zona de instalação. Como já referido foram associados três sensores ao grupo de PCM sendo que, neste caso, existia ainda um quarto sensor, que registava a temperatura do cenário.

A Figura 5.12 mostra a instalação do grupo assim como do sistema de monitorização, permitindo ainda identificar o sensor responsável pela medição de temperaturas do cenário.

**Sensor 1 - Zona 12 °C** A zona de 12 °C registou, durante o período de monitorização de dados, uma temperatura máxima de 17,90 °C e uma mínima de 14,20 °C.

A Tabela 5.6 resume alguns dos resultados obtidos.

Tabela 5.6: Cenário 2 - Temperatura da zona de 12 °C

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
22/02/2022	16,70	14,20
25/02/2022	16,90	14,30
28/02/2022	17,90	14,80

A Figura 5.13 permite identificar que a temperatura registada na zona de PCM com mudança de fase a 12 °C, acompanha o comportamento térmico do cenário.

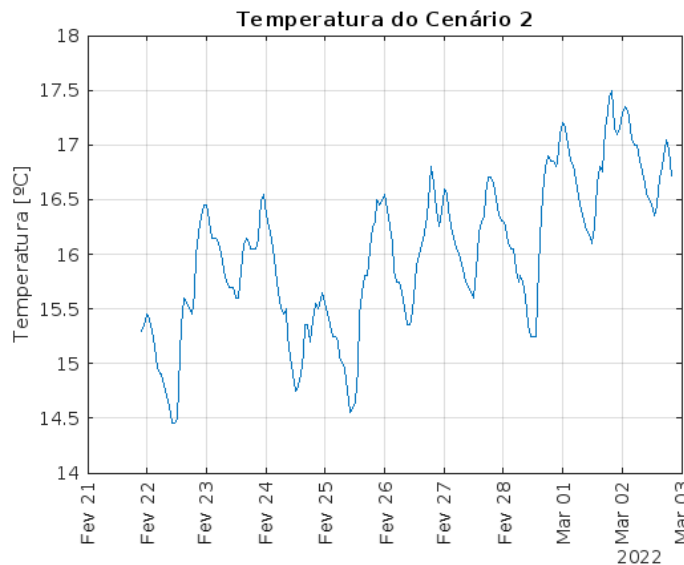


Figura 5.11: Temperatura do cenário 2

Analisando este efeito com mais detalhe, a Figura 5.14 permite identificar que a diferença máxima identificada entre ambas as zonas está na ordem de 1 °C.

**Sensor 2 e 3 - Comportamento do PCM** O segundo e terceiro sensores, colocados no centro e extremidade de um PCM, tinham por objetivo tentar compreender o funcionamento do PCM, ou seja, de que modo se realiza o processo de mudança de fase na cápsula.

Os resultados obtidos demonstram que, ao longo do período de monitorização, a temperatura do extremo do PCM medida é, de forma geral, superior à do centro do PCM. O gráfico da Figura 5.15 permite identificar este comportamento.

Não foi identificado, durante a recolha de dados, o processo de mudança de fase do PCM. O facto de o parque não ter registado temperaturas na ordem dos 12 °C, temperatura de mudança de fase, durante o período considerado, poderá justificar este facto. De acrescentar que existe sempre um fator de erro associado aos sensores.

#### 5.2.1.2 Mudança de Fase a 15 °C

O terceiro grupo de instalação foi associado aos PCM com mudança de fase a 15 °C. A este grupo foi combinado um sistema de recolha de dados com três sensores.

A instalação do grupo assim como do sistema de monitorização, pode ser observada na Figura 5.16.

**Sensor 1 - Zona 15 °C** A zona de 15 °C registou, uma temperatura máxima de 20,00 °C e uma mínima de 13,60 °C, durante o período de monitorização de dados.

A Tabela 5.7 resume alguns dos resultados obtidos.



Figura 5.12: Cenário 2 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 12 °C

Tabela 5.7: Cenário 2 - Temperatura da zona de 15 °C

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
22/02/2022	17,10	13,60
28/02/2022	20,00	14,10
01/03/2022	18,30	14,30

A zona de 15 °C continua a acompanhar o comportamento térmico do parque, no entanto, identificam-se diferenças entre ambas as curvas, superiores às identificadas na zona de 12 °C. A Figura 5.17 permite identificar este comportamento.

Analisando a Figura 5.18 ao detalhe, detetamos uma diferença máxima identificada entre as duas curvas, na ordem de 4 °C.

**Sensor 2 e 3 - Comportamento do PCM** O gráfico da Figura 5.19 permite identificar o comportamento registado pelos sensores 2 e 3, que mediam a temperatura no centro e extremidade de um PCM.

No espaço de tempo considerado foi identificada uma temperatura no centro do PCM, superior à do extremo durante períodos de arrefecimento. Durante o aumento de temperatura, o comportamento das duas zonas foi semelhante.

Apesar de a temperatura média da zona rondar os 15 °C, não se identifica qualquer momento em que tenha ocorrido absorção ou emissão de energia sob a forma de calor. Isto

## 5.2. FUNCIONAMENTO DE PCM NA ESTABILIZAÇÃO DE TEMPERATURA

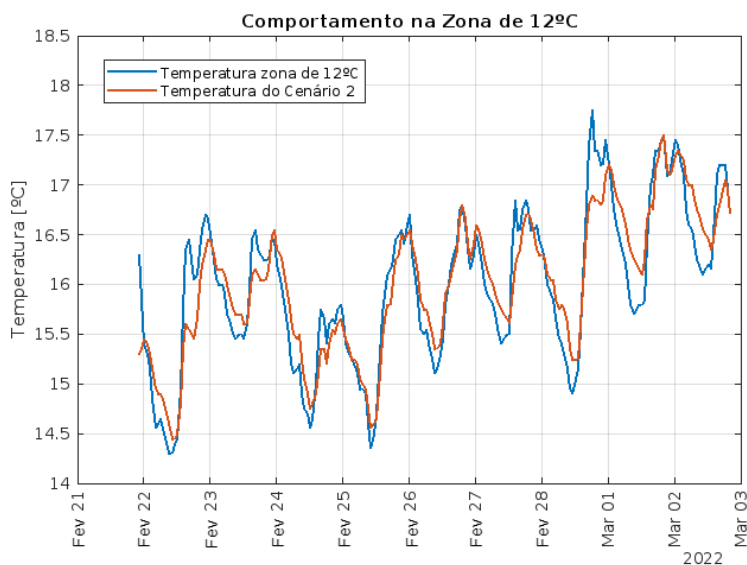


Figura 5.13: Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 12 °C comparativamente com a temperatura do parque

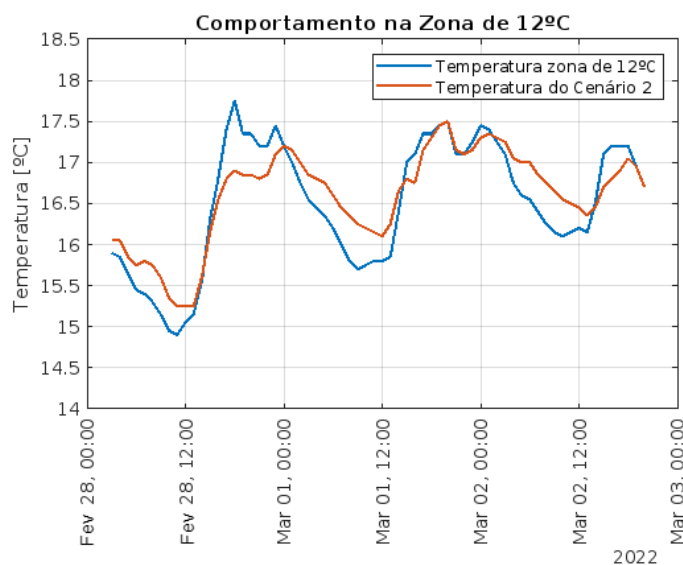


Figura 5.14: Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 12 °C comparativamente com a temperatura do parque

poderá ser, pelo longo espaço de tempo entre leituras de dados (uma hora). Poderá ainda ser explicado pelas dimensões do espaço e as suas aberturas ao exterior, não permitindo detetar o efeito de um grupo tão pequeno de PCM.

### 5.2.1.3 Mudança de Fase a 18 °C

O grupo 1 da zona de instalação, foi o local onde se colocaram os PCM com mudança de fase a 18 °C. Como já referido foram associados três sensores ao grupo de PCM.

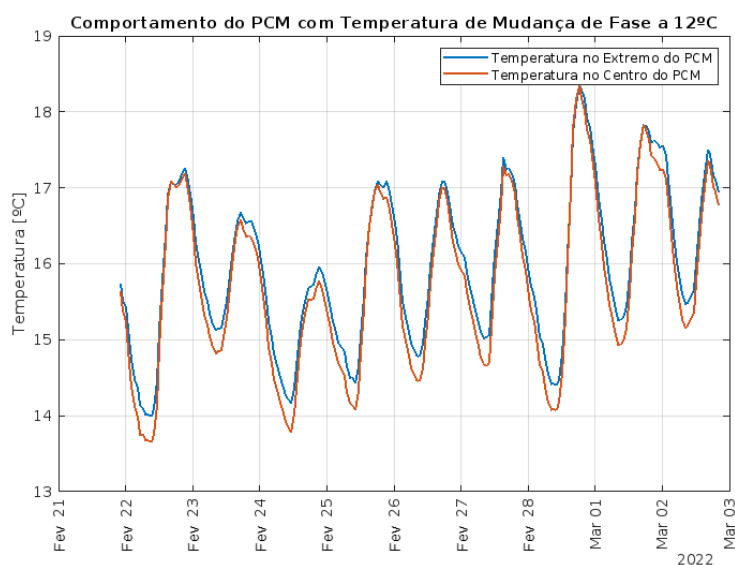


Figura 5.15: Cenário 2 - Comportamento PCM com mudança de fase a 12 °C



Figura 5.16: Cenário 2 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 15 °C

A Figura 5.20 mostra a instalação do grupo assim como do sistema de monitorização.

**Sensor 1 - Zona 18 °C** A zona de 18 °C registou, uma temperatura máxima de 16,90 °C e uma mínima de 14,00 °C, durante o período de recolha de dados.

A Tabela 5.8 resume alguns dos resultados obtidos.

Nesta zona, não foram verificadas variações de temperatura superiores a 3 °C. Continua ainda a verificar-se que a temperatura da zona, acompanha o comportamento térmico do parque. A Figura 5.21 permite identificar este comportamento.

Analisando estes os resultados com mais detalhe, a Figura 5.22 mostra que a diferença máxima identificada está na ordem de 0,5 °C.

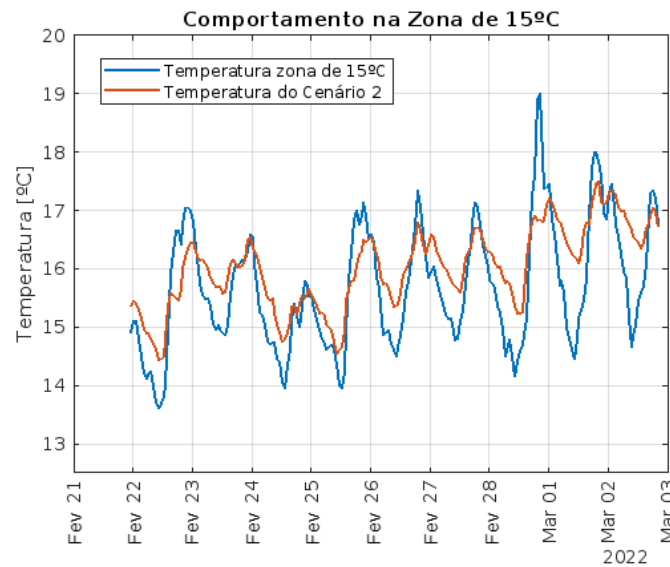


Figura 5.17: Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 15 °C comparativamente com a temperatura do parque

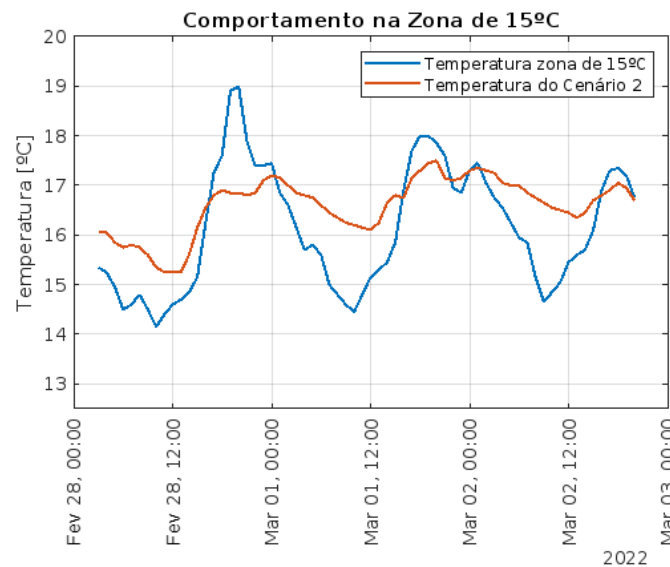


Figura 5.18: Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 15 °C comparativamente com a temperatura do parque

**Sensor 2 e 3 - Comportamento do PCM** O segundo e terceiro sensor, colocados no centro e extremidade de um PCM, demonstram que a temperatura do centro do PCM é quase sempre superior à do extremo do PCM. O gráfico da Figura 5.23 permite identificar este comportamento.

A zona com mudança de fase a 18 °C não identificou o processo de mudança de fase nos resultados obtidos. Este facto poderá ser explicado pelo facto de a temperatura de mudança de fase não ter sido atingida no espaço, o que faz com que o processo físico não

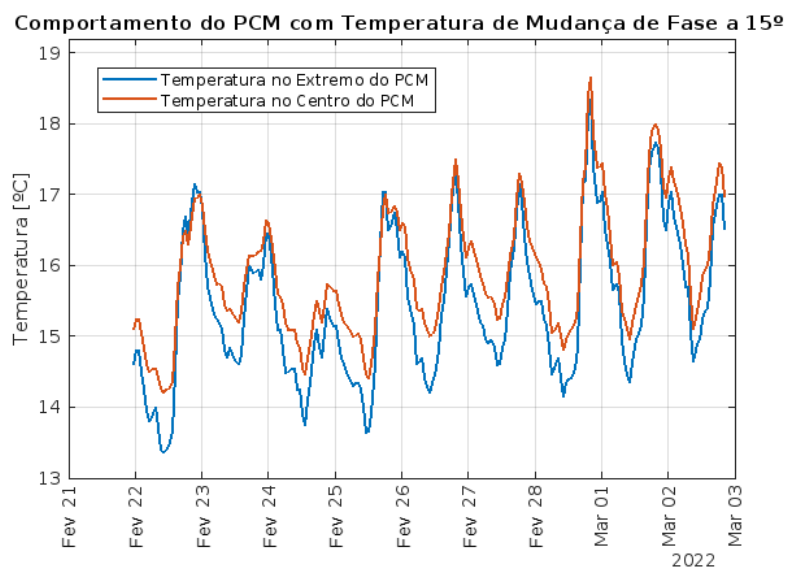


Figura 5.19: Cenário 2 - Comportamento PCM com mudança de fase a 15 °C



Figura 5.20: Cenário 2 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 18 °C

pudesse ocorrer.

### 5.2.2 Cenário 3

A instalação dos PCM no terceiro cenário foi realizada entre o período de 9 a 10 de abril de 2022.

Tal como no cenário anterior começou-se pela aplicação dos ganchos, seguida da instalação dos PCM, e por fim, pela montagem do sistema de monitorização de temperatura.

Tabela 5.8: Cenário 2 - Temperatura da zona de 18 °C

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
22/02/2022	16,90	14,00
23/02/2022	16,40	15,10
25/02/2022	16,50	14,20

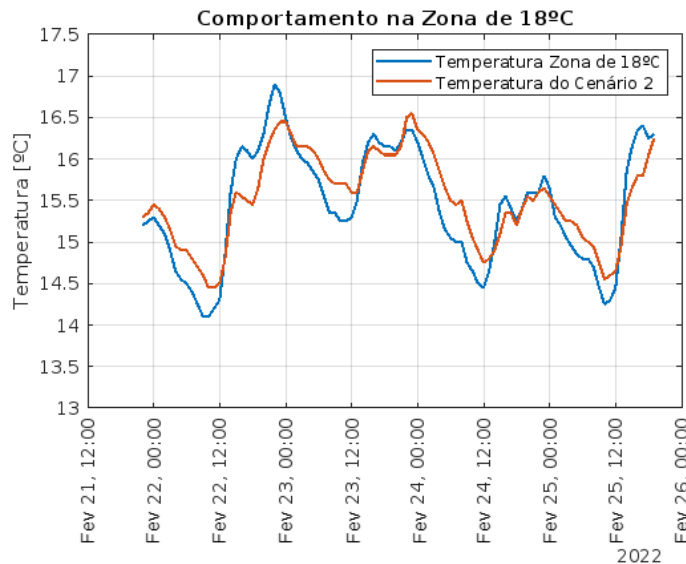


Figura 5.21: Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 18 °C comparativamente com a temperatura do parque

Guiando-nos pelo planeamento apresentado na Figura 4.20, os PCM com temperatura de mudança de fase a 15 °C foram instaladas na zona identificada como grupo um. O grupo dois, foi associado à temperatura de 12 °C e por fim, o terceiro grupo, à temperatura de mudança de fase de 18 °C. Esta instalação foi realizada na zona identificada pela Figura 4.14.

Neste cenário, o quarto sensor, que regista a temperatura do parque, foi associado ao primeiro grupo de monitorização, Figura 5.24. Os restantes dois grupos têm, cada um, três sensores associados.

A instalação realizada pode ser observada na Figura 5.25.

O comportamento térmico do espaço foi controlado durante três dias, tendo sido registada uma temperatura média de 21,70 °C. Registou-se uma máxima de 22,10 °C e um mínimo de 21,20 °C.

As variações de temperatura registadas neste período não foram significativas, não se tendo identificado alterações superiores a 0,7 °C.

A Tabela 5.9 resume os valores obtidos pelo sensor que registava a temperatura do cenário 3.

O gráfico da Figura 5.26 analisa o comportamento térmico do cenário 3.

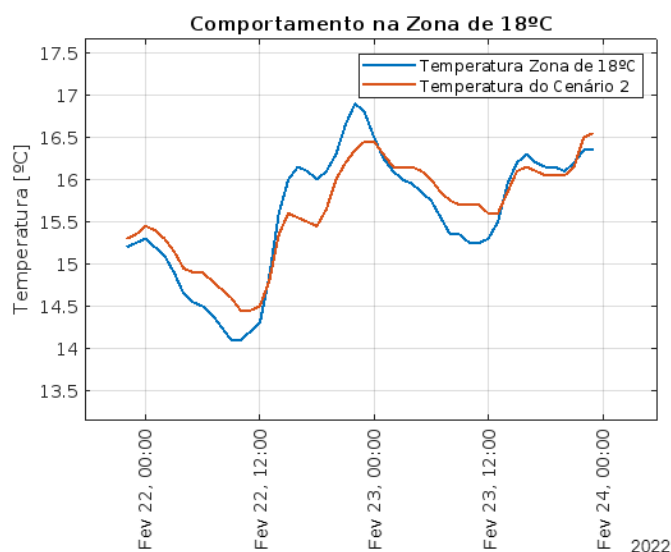


Figura 5.22: Cenário 2 - Comportamento térmico da zona de 18 °C comparativamente com a temperatura do parque

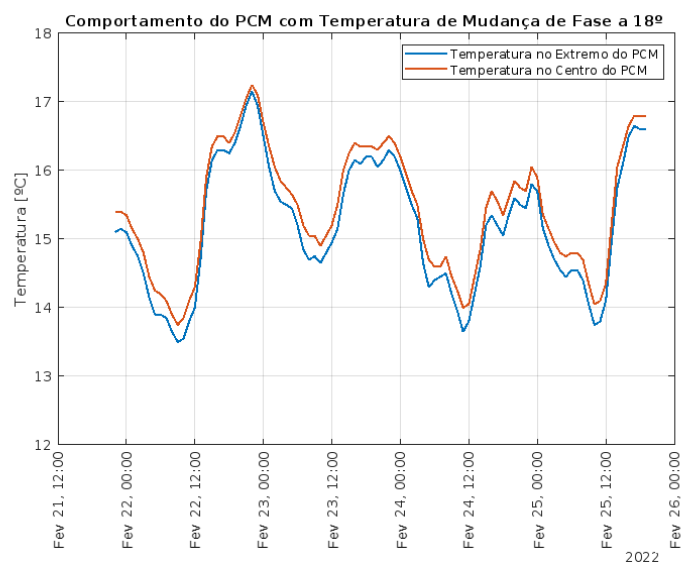


Figura 5.23: Cenário 2 - Comportamento PCM com mudança de fase a 18 °C

### 5.2.2.1 Mudança de Fase a 12 °C

Ao grupo dois da instalação, com temperatura de mudança de fase de 12 °C, foram associados três sensores.

A Figura 5.27 apresenta a instalação do grupo assim como do sistema de monitorização.

**Sensor 1 - Zona 12 °C** A zona de 12 °C registou, durante o período de monitorização de dados, uma temperatura máxima de 21 °C e uma mínima de 20,20 °C.



Figura 5.24: Cenário 3 - Localização do sensor de zona



Figura 5.25: Instalação do cenário 3

A Tabela 5.10 resume alguns dos resultados obtidos.

Os resultados obtidos neste grupo, demonstram que a temperatura de zona de 12 °C acompanhou o comportamento térmico do parque, apesar de se registrar uma diferença na ordem de 0,8 °C entre ambos. A Figura 5.28 permite identificar este comportamento.

**Sensor 2 e 3 - Comportamento do PCM** O segundo e terceiro sensores, colocados no centro e extremidade de um PCM, registaram ao longo do período de monitorização, temperaturas semelhantes. Ainda assim, a temperatura do centro do PCM é quase sempre superior à do extremo do mesmo.

Tabela 5.9: Temperatura do cenário 3

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
19/04/2022	21,70	21,40
20/04/2022	21,90	21,20
21/04/2022	22,10	21,50

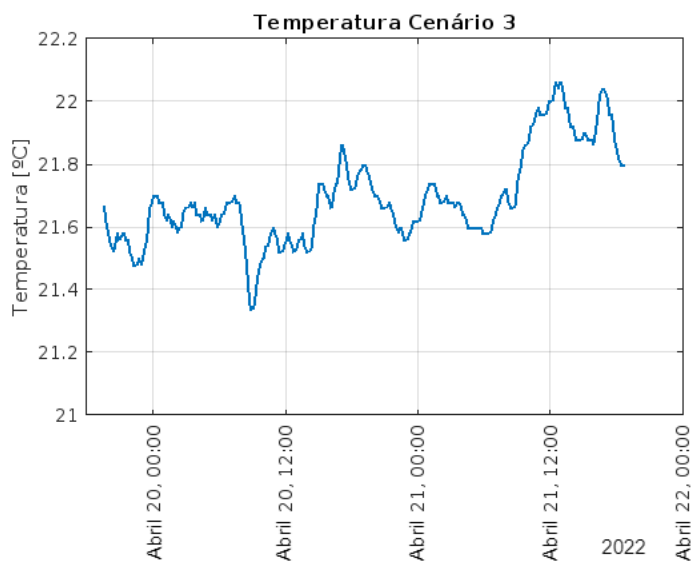


Figura 5.26: Temperatura do cenário 3



Figura 5.27: Cenário 3 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 12 °C

O gráfico da Figura 5.29 permite identificar este comportamento.

Dos resultados obtidos, não foi identificado o processo de mudança de fase nos PCM deste grupo. Isto pode ser explicado pelo facto de a temperatura do espaço não se ter aproximado dos 12 °C (temperatura de mudança de fase) de modo sofrer este processo físico.

Tabela 5.10: Cenário 3 - Temperatura de zona de 12 °C

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
19/04/2022	20,50	20,40
20/04/2022	21,00	20,20
21/04/2022	20,90	20,40

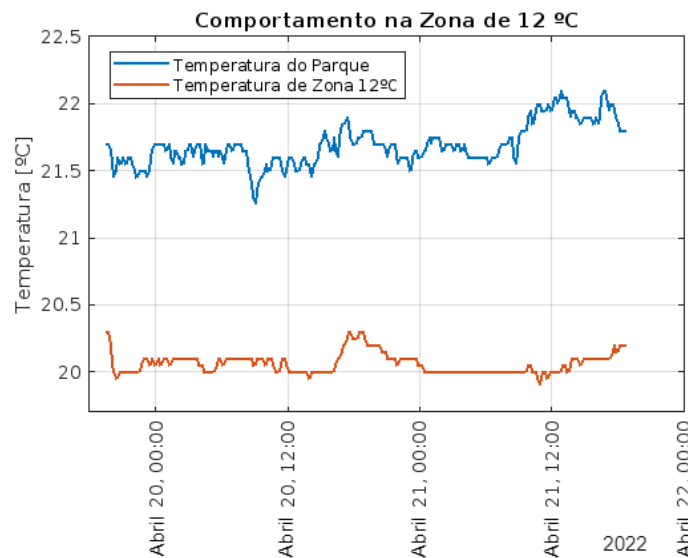


Figura 5.28: Cenário 3 - Comportamento térmico da zona de 12 °C comparativamente com a temperatura do parque

### 5.2.2.2 Mudança de Fase a 15 °C

Associados ao grupo um, estão os PCM com mudança de fase a 15 °C. Neste cenário, como já referido, o sistema de monitorização tem associado quatro sensores.

A Figura 5.30 mostra esta instalação.

**Sensor 1 - Zona 15 °C** A zona de 15 °C registou, uma temperatura máxima de 21,20 °C e uma mínima de 20,30 °C, durante o período de monitorização de dados.

A Tabela 5.11 resume alguns dos resultados obtidos.

Tabela 5.11: Cenário 3 - Temperatura de zona de 15 °C

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
19/04/2022	20,80	20,50
20/04/2022	21,10	20,30
21/04/2022	21,20	20,50

Dos resultados obtidos, identifica-se que a temperatura da zona acompanha a verificada no parque, distinguindo-se uma diferença na ordem de 0,8 °C, onde a temperatura

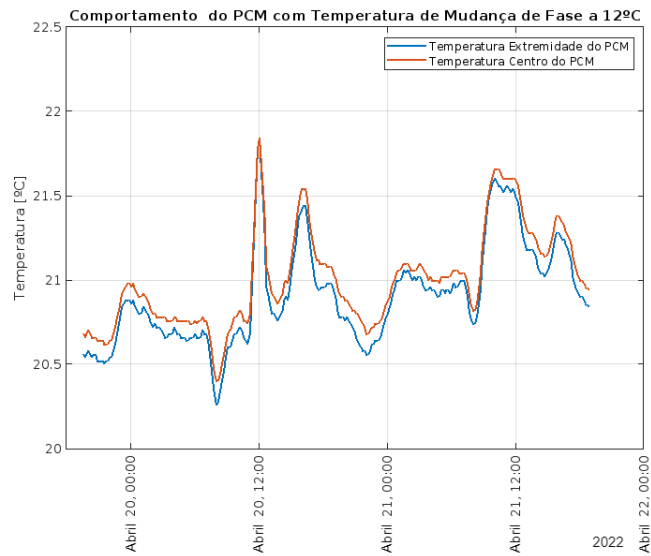


Figura 5.29: Cenário 3 - Comportamento PCM com mudança de fase a 12 °C



(a) Sensor de zona e grupo 1

(b) Instalação zona de 15°C

Figura 5.30: Cenário 3 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 15 °C

do parque é superior. A Figura 5.31 permite identificar este comportamento.

**Sensor 2 e 3 - Comportamento do PCM** Os restantes dois sensores, colocados no centro e extremidade de um PCM, registaram temperaturas semelhantes entre os dois. No entanto, a temperatura do centro do PCM é quase sempre superior à do extremo do PCM. O gráfico da Figura 5.32 permite identificar este comportamento.

## 5.2. FUNCIONAMENTO DE PCM NA ESTABILIZAÇÃO DE TEMPERATURA

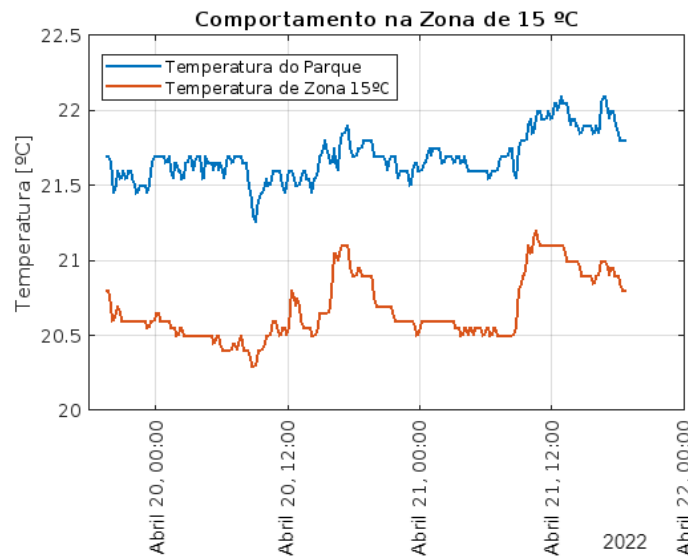


Figura 5.31: Cenário 3 - Comportamento térmico da zona de 15 °C comparativamente com a temperatura do parque

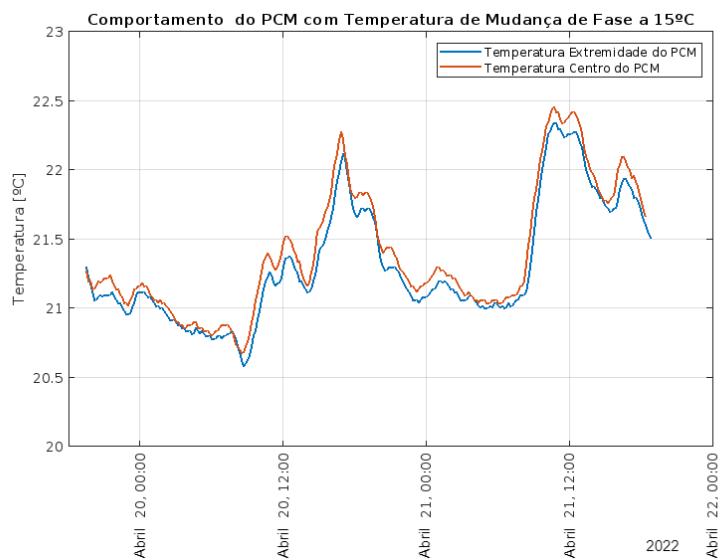


Figura 5.32: Cenário 3 - Comportamento PCM com mudança de fase a 15 °C

Os resultados demonstram que os PCM com mudança de fase a 15 °C, não sofreram o processo de mudança de fase. Isto poderá ser explicado pelo facto de a temperatura de mudança de fase não ser atingida.

### 5.2.2.3 Mudança de Fase a 18 °C

Por fim, o terceiro grupo de instalação foi associado aos PCM com mudança de fase a 18 °C. A este grupo foram ligados três sensores.

**Sensor 1 - Zona 18 °C** A zona de 18 °C registou, uma temperatura máxima de 22,00 °C e uma mínima de 20,60 °C, durante o período de recolha de dados.

A Tabela 5.12 resume alguns dos resultados obtidos.

Tabela 5.12: Cenário 3 - Temperatura de zona de 18 °C

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
19/04/2022	21,30	20,70
20/04/2022	22,00	20,60
21/04/2022	21,60	21,00

Nesta zona, as variações de temperatura registadas não foram superiores a 1,4 °C. Verifica-se que a temperatura da zona acompanha o comportamento térmico do parque, sendo a temperatura do parque, geralmente maior. A Figura 5.33 permite identificar este comportamento.

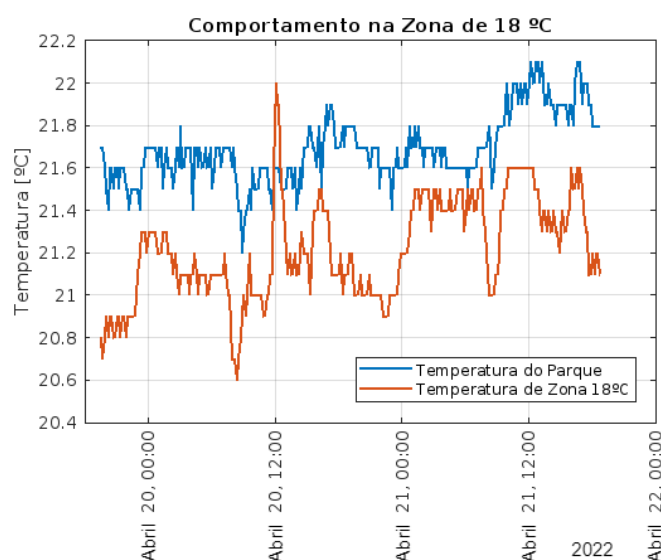


Figura 5.33: Cenário 3 - Comportamento térmico da zona de 18 °C comparativamente com a temperatura do parque

**Sensor 2 e 3 - Comportamento do PCM** Por fim, os sensores colocados no centro e extremo do PCM, tal como nos grupos anteriores apresentam uma temperatura no centro superior à da extremidade. O gráfico da Figura 5.34 permite identificar este comportamento.

Da mesma forma que para as zonas anteriores, não foi registado o processo de mudança de fase. As temperaturas registadas no parque não abrangiam as temperaturas de mudança de fase dos PCM selecionados. Verificou-se que a temperatura de zona segue o comportamento do parque. Detetando-se uma diferença entre as duas curvas, comportamento de zona e do parque, superior às já registadas até então. Esta diferença entre as

## 5.2. FUNCIONAMENTO DE PCM NA ESTABILIZAÇÃO DE TEMPERATURA

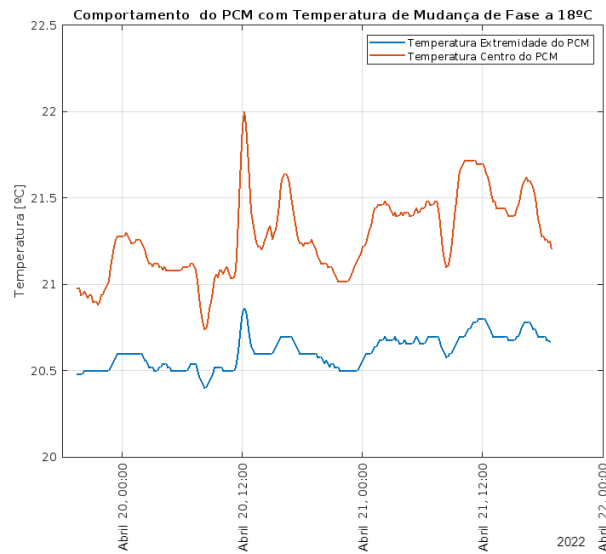


Figura 5.34: Cenário 3 - Comportamento PCM com mudança de fase a 18 °C

duas curvas poderá ser explicada pelo erro associado aos sensores. Uma outra hipótese será que o parque não apresente temperaturas constantes em todo o seu espaço.

### 5.2.3 Cenário 4

A instalação dos PCM no último cenário foi iniciada a 25 de abril de 2022.

O método de instalação seguido foi o mesmo que nos restantes cenários, no entanto a organização dos grupos foi alterada, visto que o espaço em muito se diferenciava dos restantes. A distribuição realizada neste cenário pode ser observada na Figura 5.35.

Da Figura 5.35 podemos entender que o sensor responsável pelas medições de temperatura do espaço (Figura 5.36), ficou associado ao sistema de monitorização dos PCM com mudança de fase a 12 °C.

O sistema de monitorização do comportamento térmico, registou, minuto a minuto, durante cinco dias, a evolução da temperatura no espaço. Identificando que a média do cenário rondou os 16,87 °C, uma máxima de 18,20 °C e a mínima de 15,40 °C.

A Tabela 5.13 resume os valores obtidos pelo sensor que registava a temperatura do cenário 4.

Tabela 5.13: Temperatura do cenário 4

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
28/04/2022	16,30	15,40
29/04/2022	17,10	16,00
30/04/2022	18,20	16,90

No gráfico da Figura 5.37 poderá ser analisado o comportamento térmico do cenário

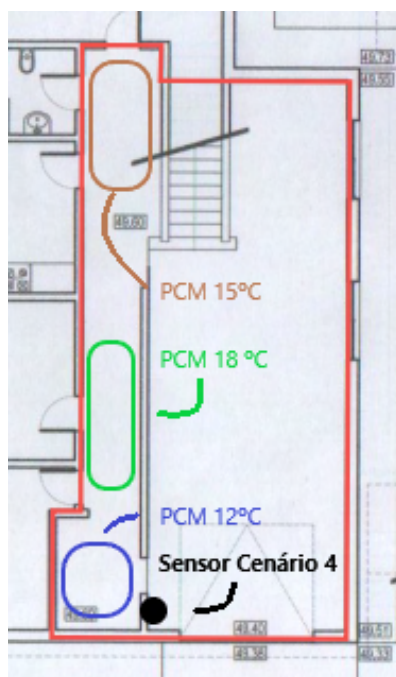


Figura 5.35: Cenário 4 - Distribuição de PCM

4.

Analisando com mais detalhe, Figura 5.38, identifica-se que as variações diárias de temperatura, não ultrapassam 1,5 °C.

### 5.2.3.1 Mudança de Fase a 12 °C

A instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 12°C, foi realizada, na zona do corredor paralelo à garagem mais próximo do portão, Figura 5.39.

**Sensor 1 - Zona 12 °C** A zona de 12 °C registou um máxima de 18,70 °C e um mínima de 16,20 °C, durante o período de controlo de dados.

A Tabela 5.14 resume alguns dos resultados obtidos.

Tabela 5.14: Cenário 4 - Temperatura da zona de 12 °C

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
28/04/2022	16,80	16,20
29/04/2022	17,60	16,60
30/04/2022	18,70	17,50

Dos resultados obtidos, identifica-se que a temperatura de zona de 12 °C acompanhou o comportamento térmico do parque, registando uma diferença na ordem de 0,5 °C entre ambos. Neste caso, a temperatura da zona onde estão instalados os PCM é superior. A Figura 5.40 permite identificar este comportamento.

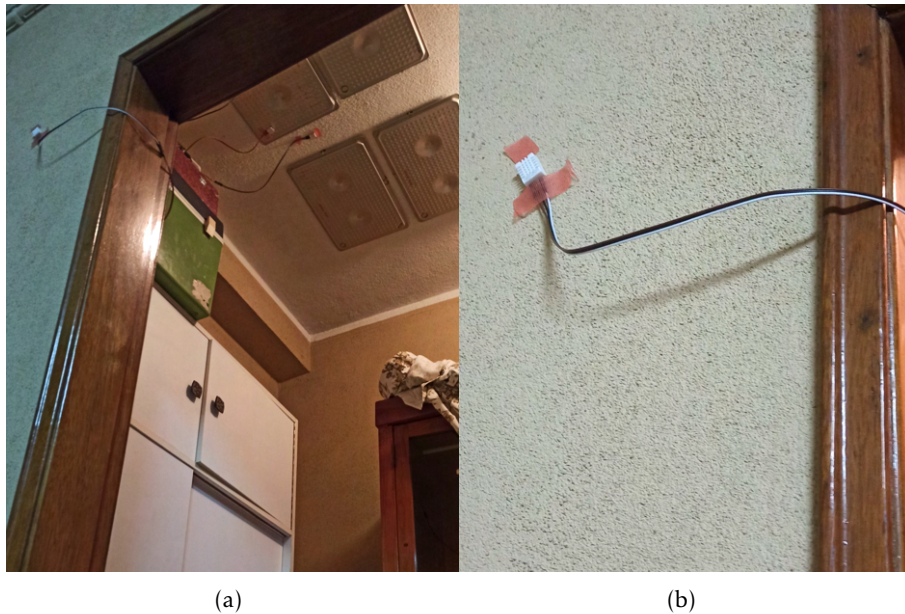


Figura 5.36: Cenário 4 - Sensor responsável pela medição de temperaturas de zona

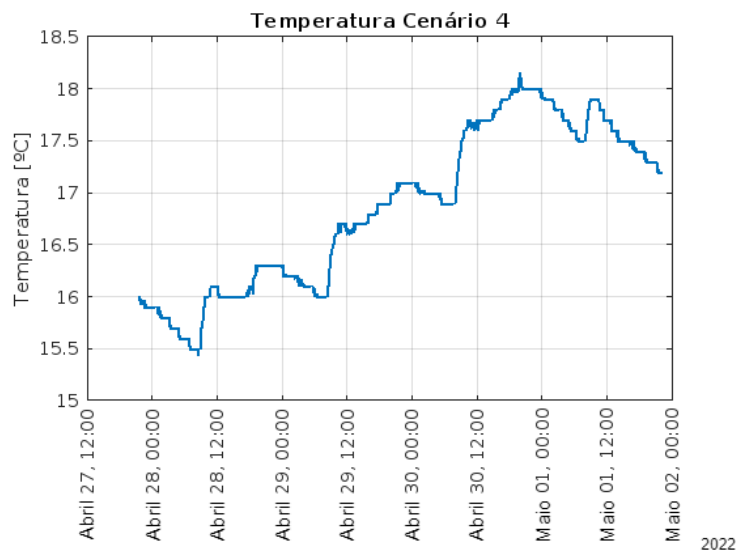


Figura 5.37: Temperatura do cenário 4

Analisando o comportamento registado entre os dias 29 e 30 de abril, Figura 5.41, detetamos pontos, onde as temperaturas destas duas zonas são iguais.

**Sensor 2 e 3 - Comportamento do PCM** O segundo e terceiro sensores, colocados no centro e extremidade de um PCM, registaram um comportamento semelhante. O gráfico da Figura 5.42 permite identificar este comportamento.

O processo de mudança de fase não foi identificado neste grupo. Isto poderá ser

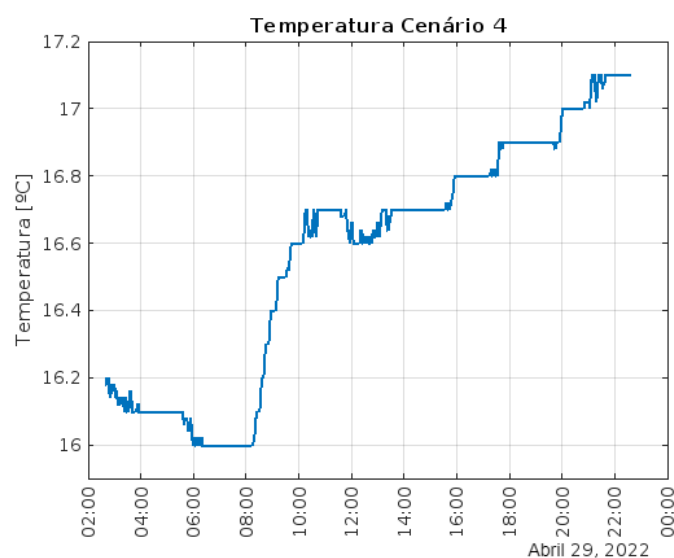


Figura 5.38: Temperatura do cenário 4



Figura 5.39: Cenário 4 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 12 °C

explicado pelo facto de a temperatura de mudança de fase não ser registada no espaço.

### 5.2.3.2 Mudança de Fase a 15 °C

A Figura 5.43 identifica a instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 15 °C, à qual estão associados três sensores.

**Sensor 1 - Zona 15 °C** O sensor associado ao grupo com mudança de fase a 15 °C registou uma temperatura máxima de 17,80 °C e uma mínima de 15,70 °C, durante o período de monitorização de dados.

A Tabela 5.15 resume alguns dos resultados obtidos.

Os dados obtidos estão resumidos no gráfico representado pela Figura 5.44.

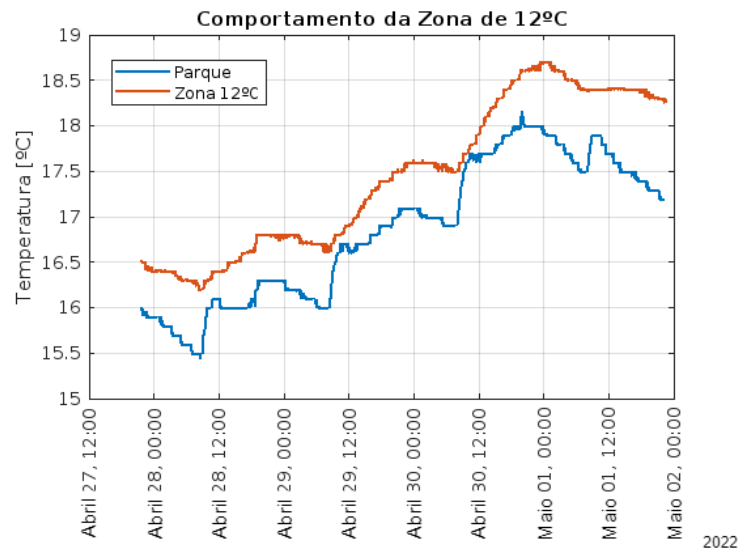


Figura 5.40: Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 12 °C comparativamente com a temperatura do parque

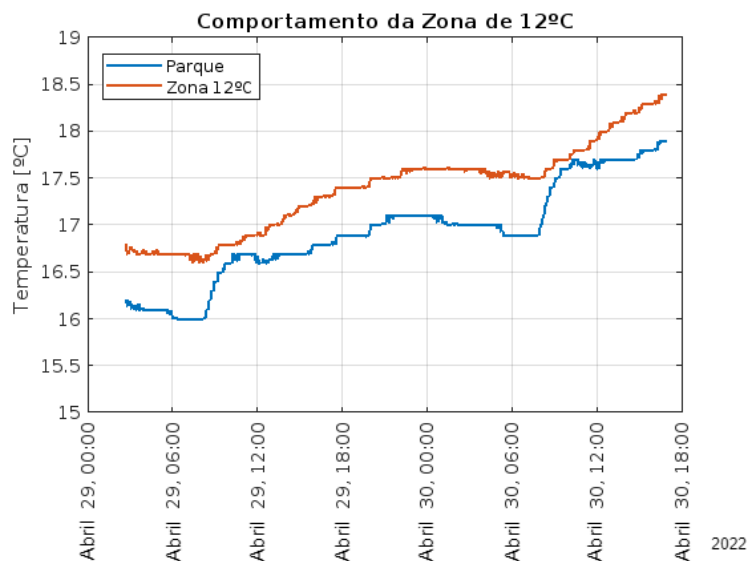


Figura 5.41: Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 12 °C comparativamente com a temperatura do parque entre o período de 29 a 30 de abril

É possível identificar que o grupo de PCM acompanha o comportamento térmico da garagem. A Figura 5.45 permite analisar este comportamento com mais detalhe.

**Sensor 2 e 3 - Comportamento do PCM** O comportamento registado pelos restantes dois sensores, pode ser analisado na 5.46.

Comparativamente aos resultados já analisados, identificamos um comportamento diferente neste PCM. É possível identificar as fases do processo de mudança de fase do

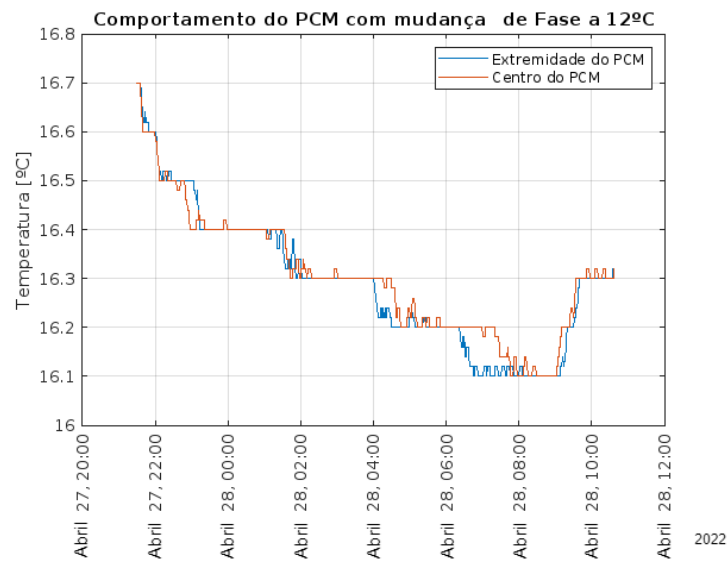


Figura 5.42: Cenário 4 - Comportamento do PCM com mudança de fase a 12 °C



Figura 5.43: Cenário 4 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 15 °C

PCM, desde a absorção à emissão de calor, entre as 12h00 do dia 29 de abril e as 12h00 do dia 30 de abril. Mais, pela Figura 5.47, identifica-se que a emissão de calor ocorreu a partir da meia noite de dia 30 de abril, altura em que a temperatura de zona foi constante.

### 5.2.3.3 Mudança de Fase a 18 °C

A Figura 5.48 apresenta a instalação, com três sensores associados.

Tabela 5.15: Cenário 4 - Temperatura da zona de 15 °C

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
28/04/2022	16,10	15,70
29/04/2022	16,70	16,10
30/04/2022	17,50	16,70

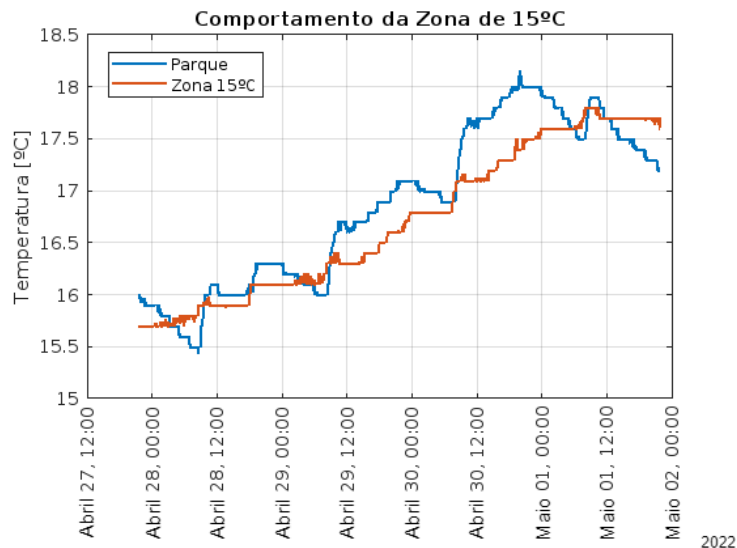


Figura 5.44: Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 15 °C comparativamente com a temperatura do parque

**Sensor 1 - Zona 18 °C** O grupo de PCM com uma temperatura de mudança de fase a 18 °C, registou uma máxima de 18,00 °C e uma mínima de 16,20 °C, durante o período de recolha de dados.

A Tabela 5.16 resume alguns dos resultados obtidos.

Tabela 5.16: Cenário 4 - Temperatura da zona de 18 °C

Dia	Temperatura [°C]	
	Máxima	Mínima
28/04/2022	16,70	16,30
29/04/2022	17,10	16,50
30/04/2022	18,00	17,10

As variações registadas não foram superiores a 1 °C, verificando-se no entanto, pela Figura 5.49, que a temperatura de zona é quase sempre superior à do parque.

Analisando este comportamento durante o período de 29 a 30 de abril, Figura 5.50, identificamos zonas onde a temperatura da zona foi constante.

**Sensor 2 e 3 - Comportamento do PCM** Os sensores colocados no PCM, de modo a tentar aferir quanto ao seu comportamento, tiveram, durante o período de registo de

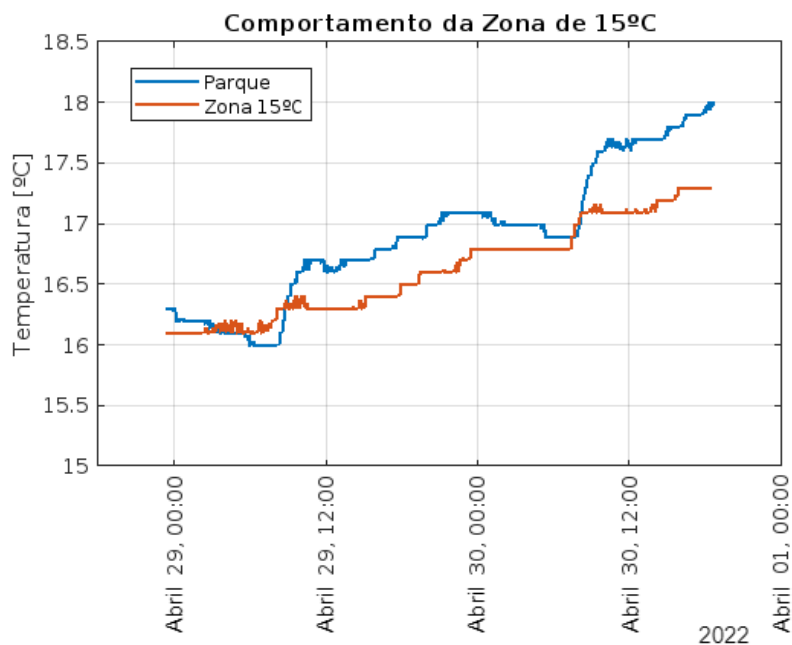


Figura 5.45: Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 15 °C comparativamente com a temperatura do parque no período de 29 a 30 de abril

dados, um comportamento semelhante ao do parque. De maneira geral, a temperatura do centro do PCM foi superior à da extremidade, Figura 5.51.

Apesar de a temperatura de 18 °C ser registada no espaço, esta não foi suficiente para se verificar o processo de mudança de fase. No entanto, parece identificar-se o armazenamento de energia térmica quando a temperatura do PCM se aproxima dos 18 °C.

## 5.2. FUNCIONAMENTO DE PCM NA ESTABILIZAÇÃO DE TEMPERATURA

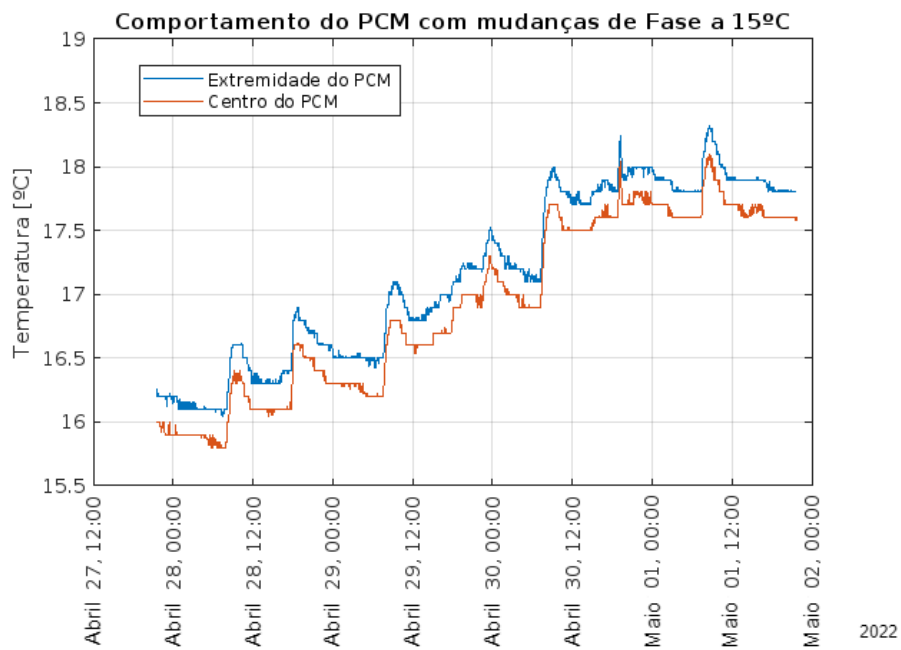


Figura 5.46: Cenário 4 - Comportamento PCM com mudança de fase a 15 °C

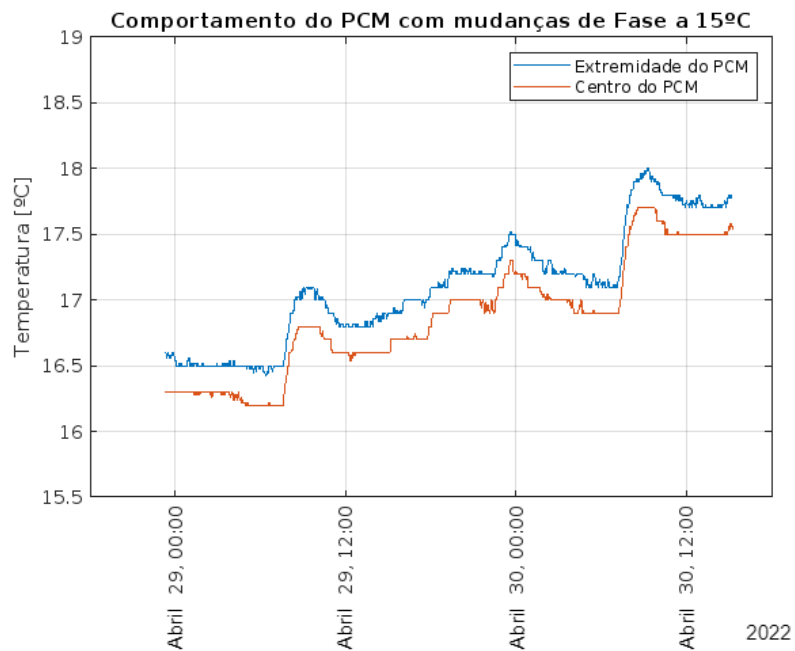


Figura 5.47: Cenário 4 - Comportamento PCM com mudança de fase a 15 °C entre o período de 29 a 30 de abril



Figura 5.48: Cenário 4 - Instalação do grupo de PCM com mudança de fase a 18 °C

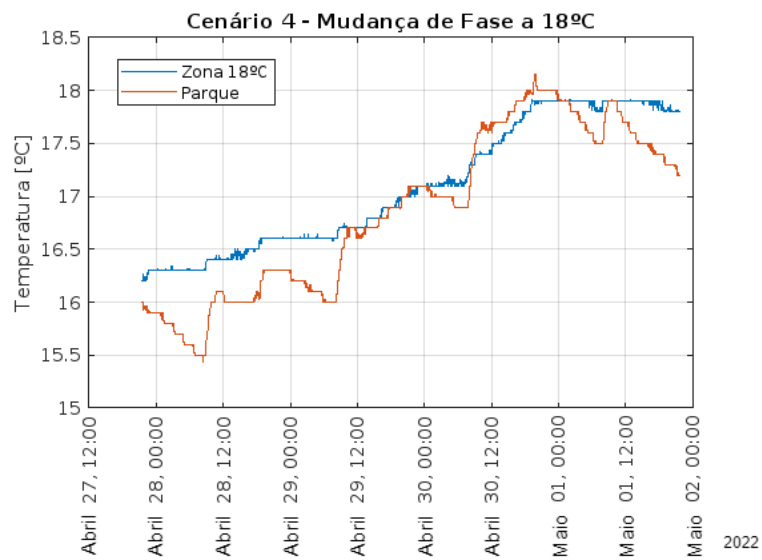


Figura 5.49: Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 18 °C comparativamente com a temperatura do parque

## 5.2. FUNCIONAMENTO DE PCM NA ESTABILIZAÇÃO DE TEMPERATURA

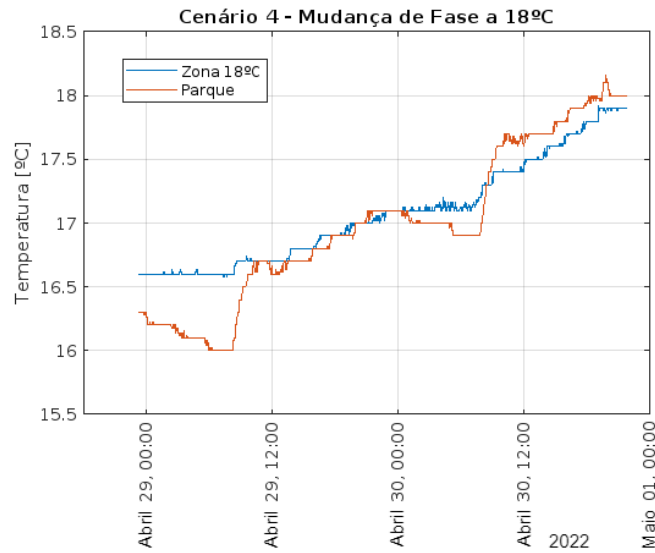


Figura 5.50: Cenário 4 - Comportamento térmico da zona de 18 °C comparativamente com a temperatura do parque entre o período de 29 a 30 de abril

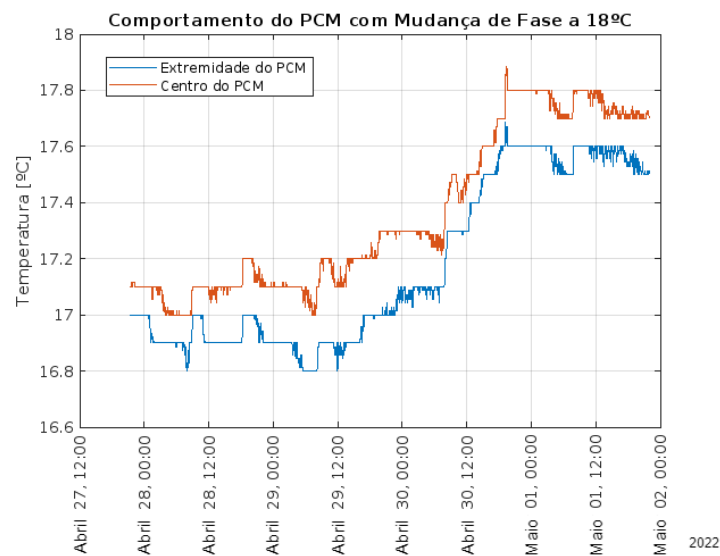


Figura 5.51: Cenário 4 - Comportamento PCM com mudança de fase a 18 °C

## CONCLUSÕES

### 6.1 Conclusões Gerais

O principal objetivo desta dissertação passou pela aferição da viabilidade de utilização de PCM na estabilização de temperatura em parques de estacionamento. Para tal foram considerados quatro cenários com características distintas entre si. Desta forma, foi possível analisar, não só a viabilidade dos espaços, assim como as principais características a ter em conta na aplicação prática de PCM.

Os resultados obtidos para o primeiro cenário, um parque fechado subterrâneo, alertaram para a importância da realização de uma análise prévio às condições do cenário a considerar. Neste espaço verificaram-se temperaturas constantes ao longo do dia, rondando os 20 °C. Determinou-se que o espaço não beneficiaria da instalação de PCM. As temperaturas constantes do cenário poderão ser explicadas pelas espessas paredes de betão e pelo facto de o espaço não estar exposto a radiação solar.

O segundo cenário considerado, um parque semi-aberto de grandes dimensões, registou as variações térmicas necessárias para se avançar com a instalação dos PCM. No entanto, como foi destacado no Capítulo 5, em nenhum dos grupos foi detetado o processo de mudança de fase dos PCM, pelo que o objetivo não foi atingido. Os resultados deste cenário poderão talvez ser explicados pelas dimensões do espaço. A energia absorvida/libertada pelos PCM não será suficiente para colmatar as variações de temperatura de um parque semi-aberto. A massa térmica do mesmo faz com que para que esta aplicação seja viável a quantidade de PCM instalado necessite de ser muito superior à disponível para a realização deste estudo. O grupo de PCM com mudança de fase a 12 °C não teve qualquer relevância neste espaço, nunca se tendo verificado o processo de mudança de fase. Este aquando da sua instalação já se encontrava no estado líquido, uma vez que a temperatura ambiente registada é superior a 12 °C. O mesmo acontece para o PCM de 18 °C mas no sentido inverso. Este PCM nunca chegou a absorver a energia térmica do espaço, por nunca se terem verificado temperaturas superiores a 18 °C. O grupo de PCM com mudança de fase a 15 °C é o adequado a este cenário para estabilização de temperatura. A falta de resultados pode por um lado ser atribuída à baixa frequência de aquisição

de dados, embora as variações de temperatura seja um processo lento, adquirir a temperatura a cada minuto seria possível, tendo em conta a capacidade do sistema de recolha de dados e evitaria a possível perda de dados. Uma outra razão deve-se à baixa capacidade térmica do sistema de PCM instalados face ao volume de ar do cenário considerado.

No cenário três, não se verificou um comportamento térmico que permitisse o funcionamento de qualquer um dos PCM instalados. Um risco que foi corrido, uma vez que não foi feita uma análise antecedente à instalação para aferir este comportamento, nem os PCM foram adquiridos em função das temperaturas deste espaço.

Em relação a estes dois últimos cenários considerados, pressupõem-se que, para que fosse possível identificar o processo de mudança de fase no PCM ou qualquer momento onde se verifica-se estabilização térmica por parte dos PCM, estes teriam de cobrir toda a área do parque.

Este facto, tornou a realização do estudo no quarto cenário fundamental. Por ser um espaço de dimensões muito inferiores, a probabilidade de identificar o processo de mudança de fase e conseguir aferir quanto à sua viabilidade para a estabilização de temperatura era muito mais provável.

Apesar de não ter sido possível estabilizar a temperatura do espaço através dos PCM, foi identificado, para os PCM com mudança de fase a 15 °C um período de armazenamento e posterior emissão de energia. Nesta altura, a temperatura de zona estabilizou. Também para os PCM com mudança de fase a 18 °C, é possível distinguir o início do armazenamento de energia, quando a temperatura de zona se aproxima da temperatura de mudança de fase.

Os resultados obtidos, quanto ao comportamento dos PCM, não foram comuns a todas as situações. Em alguns casos verificou-se que o aumento de temperatura levou a que o processo de mudança de fase se inicia-se no centro do PCM e só depois nas extremidades, enquanto que em outros casos se identificou o contrário. Desta forma não foi possível chegar a uma conclusão acerca do comportamento do PCM.

A existência de um erro associado ao sistema de monitorização de dados de temperaturas, cerca de  $\pm 0,5$  °C, poderá ter influenciado os resultados obtidos no sentido em que as diferentes zonas associadas a cada grupo de PCM poderiam possuir comportamentos térmicos diferentes.

Considerando os resultados observados em cada um dos cenários, é possível apontar os seguintes pontos no que diz respeito às características do local de instalação dos PCM, a ter em consideração para trabalhos futuros. É fundamental fazer uma análise prévia do comportamento térmico do espaço a considerar, não só para determinar se este possui as condições necessárias à instalação, mas também de forma a definir a temperatura de mudança de fase. Idealmente esta análise deveria ser feita considerando um grande espaço temporal de forma a que a instalação seja adaptada e preparada para todas as alterações térmicas que o espaço pode sofrer ao longo do ano. Num trabalho futuro será ainda necessário assegurar que a quantidade de PCM instalada é a suficiente para assegurar a estabilização de temperatura de todo o espaço, podendo este estudo começar

por tentar uma abordagem em cenários semelhantes ao quatro e ir escalando para cenários de dimensões maiores.

Os cenários considerados apresentaram desafios distintos. A dificuldade mais comum, observada de forma geral em todos os cenários passou pela definição de uma única temperatura de mudança de fase para o espaço. A extensão prática desta dissertação acabou por permitir analisar, embora em espaços distintos com diferentes características, as temperaturas no espaço temporal de um ano. Num dos cenários considerados, durante todo o período de análise, foi possível registar uma temperatura máxima de 29°C e uma mínima de 13,6°C. Com estas flutuações, torna-se difícil assegurar o funcionamento do PCM durante todo o ano. Para que tal fosse possível, considerando que temos apenas PCM com uma temperatura de mudança de fase instalados, seria necessário, por exemplo, a instalação de um sistema de ventilação, que obrigue o PCM a solidificar (arrefecer) durante a noite, de forma a que, durante o dia este estivesse preparado a absorver calor, *Martins 2017*.

Apesar de os resultados adquiridos ao longo da dissertação não terem sido os esperados, estes foram essenciais para considerações futuras.

## 6.2 Trabalhos Futuros

O aquecimento do ambiente representa, segundo os últimos estudos, *Estatística - Direção Geral de Energia e Geologia s.d.* cerca de 23,2% do consumo energético no setor residencial, enquanto que, para o arrefecimento, o consumo registado foi muito menor, estando na ordem do 1%.

Seria desta forma interessante avaliar a viabilidade económica de utilização de PCM para estabilização de temperatura.

É possível encontrar inúmeros artigos que se focam em PCM e no seu comportamento, assim como simulações de aplicações dos mesmos. No entanto, como já denotado em outros trabalhos, *Martins 2017*, existe um pequeno número de trabalhos realizados, com o objetivo de analisar o seu comportamento em casos práticos. Por essa razão, sugere-se a realização de mais estudos práticos da instalação de PCM em edifícios.

Os dados obtidos por casos práticos poderão ainda auxiliar os estudos técnicos relativos aos PCM, melhorando a precisão das simulações numéricas do seu comportamento.

No sentido de dar continuidade ao trabalho aqui desenvolvido poderia realizar-se a simulação do desempenho dos PCM nos cenários considerados nesta dissertação, de forma a comparar resultados e averiguar as potencialidades da sua utilização em parques de estacionamento.

## BIBLIOGRAFIA

- Ahangari, M. e M. Maerefat (2018). “An innovate PCM system for thermal comfort improvement and energy demand reduction in building under different climate conditions”. Em: *Sustainable Cities and Society* 44.
- Alawadhi, E. M. e H. J. Alqallaf (2011). “Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study”. Em: *Energy Conversion and Management* 52.8, pp. 2958–2964. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.004>.
- Ansuini, R. et al. (2011). “Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control”. Em: *Energy and Buildings* 43.11, pp. 3019–3026. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.018>.
- Cabeza, L. et al. (2011). “Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.3, pp. 1675–1695. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>.
- Chung, M. H. e J. C. Park (2017). “An Experimental Study on the Thermal Performance of Phase-Change Material and Wood-Plastic Composites for Building Roofs”. Em: *Energies* 10.2. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en10020195.
- Estatística - Direção Geral de Energia e Geologia, I. N. de (s.d.). *Inquérito ao Consumo de Energia no Consumo Térmico de 2020*. URL: <https://www.ine.pt/xurl/pub/48433981>.
- Farid, M. M. et al. (2004). “A review on phase change energy storage: materials and applications”. Em: *Energy Conversion and Management* 45.9, pp. 1597–1615. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>.
- Frigione, M., M. Lettieri e A. Sarcinella (2019). “Phase Change Materials for Energy Efficiency in Buildings and Their Use in Mortars”. Em: *Materials* 12.8. ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/ma12081260.
- Gao, Y. X. et al. (2021). “Application and research progress of phase change energy storage in new energy utilization”. Em: *Journal of Molecular Liquids* 343.
- Harris, I. et al. (2019). “Introduction to the Application of Phase Change Materials under Tropical Climate of Panama”. Em: *2019 7th International Engineering, Sciences and*

- Technology Conference (IESTEC)*, pp. 177–182. DOI: 10.1109/IESTEC46403.2019.00-80.
- Hoang, H. et al. (jun. de 2014). “Heat transfer modelling of encapsulated phase change materials for food packaging”. Em: *3rd IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain, ICCO 2014*. 3rd IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain. Proceedings : London, UK, June 23-25, 2014. 3rd IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain, ICCO 2014, London, , 23-/06/2014 - 25/06/2014. London, France: International Institute of Refrigeration, pp. 405–411. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01469093>.
- Khudhair, A. M. e M. M. Farid (2004). “A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials”. Em: *Energy Conversion and Management* 45.2, pp. 263–275. ISSN: 0196-8904. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00131-6).
- Kousksou, T. et al. (2014). “Energy storage: Applications and challenges”. Em: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 120, pp. 59–80. ISSN: 0927-0248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.015>.
- Lin, K. et al. (2005). “Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates”. Em: *Energy and Buildings* 37.3, pp. 215–220. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.017>.
- Ltd, P. P. (s.d.). *Our standard range of Encapsulated PCM Products*. URL: [https://www.pcmproducts.net/Encapsulated\\_PCMS.htm](https://www.pcmproducts.net/Encapsulated_PCMS.htm).
- Martins, B. F. M. (2017). “Materiais de Mudança de Fase (PCM) para Melhoria do Desempenho Térmico de Edifícios”. Tese de mestrado. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia.
- Mehling, H. e L. Cabeza (2008). *Heat and cold storage with PCM*. Vol. 1. Heat and Mass Transfer. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Memon, S. A. (2014). “Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31, pp. 870–906. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.042>.
- Pasupathy, A., R. Velraj e R. Seeniraj (2008). “Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12.1, pp. 39–64. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.010>.
- Pielichowska, K. e K. Pielichowski (2014). “Phase change materials for thermal energy storage”. Em: *Progress in Materials Science* 65, pp. 67–123. ISSN: 0079-6425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>.
- Products, P. C. M. (2011). *Plus-Ice Tm Phase Change Materials (PCM) Thermal Energy Storage (TES) Design Guide*.
- PureTemp (s.d.). *GLOBAL AUTHORITY ON PHASE CHANGE MATERIAL®*. URL: <http://www.puretemp.com/>.

- Rao, Z., S. Wang e Z. Zhang (2012). “Energy saving latent heat storage and environmental friendly humidity-controlled materials for indoor climate”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.5, pp. 3136–3145. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.053>.
- Regin, A. F., S. Solanki e J. Saini (2008). “Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12.9, pp. 2438–2458. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009>.
- Rubitherm GmbH (s.d.). URL: <https://www.rubitherm.eu/en/>.
- Serviços Energéticos - ERSE, E. R. dos (2018). “Instrumentos para a Participação da Oferta e da Procura na Gestão do Sistema Elétrico Nacional”. Em:
- Sharma, A. et al. (2009). “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13.2, pp. 318–345. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- Sharma, R. et al. (2015). “Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage”. Em: *Energy Conversion and Management* 95, pp. 193–228. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.084>.
- Sharma, S. e K. Sagara (2005). “Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review”. Em: *International Journal of Green Energy* 2.1, pp. 1–56. DOI: 10.1081/GE-200051299. eprint: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1081/GE-200051299>.
- Shenhu, T. e Z. Xuelai (2023). “Progress of research on phase change energy storage materials in their thermal conductivity”. Em: *Journal of Energy Storage* 61.
- Tan, S. e X. Zhang (2023). “Progress of research on phase change energy storage materials in their thermal conductivity”. Em: *Journal of Energy Storage* 61.
- Unidas, N. (2018). “Guia sobre Desenvolvimento Sustentável, 17 Objetivos para Transformar o Nosso Mundo”. Em:
- Upadhyay, V. V. e S. Singhal (2023). “A review of current developments in the use of materials with latent heat phase changes for the storage of thermal energy”. Em: *Materials Today: Proceedings*.
- Y.Cui et al. (2022). “Current status and future development of hybrid PV/T system with PCM module: 4E (energy, exergy, economic and environmental) assessments”. Em: *Renew. Sustain. Energy Rev* 158.
- Yuan, Y. et al. (2014). “Fatty acids as phase change materials: A review”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, pp. 482–498. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.107>.
- Zalba, B. et al. (2003). “Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications”. Em: *Applied Thermal Engineering* 23.3, pp. 251–283. ISSN: 1359-4311. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431102001928>.



