

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu



Aos Meus Pais,
à minha irmã
e à minha namorada Ana

“O impossível existe até que algum duvide dele e prove o contrário”
Albert Einstein

RESUMO

Na Europa, o setor dos edifícios é responsável por 40% de toda a energia primária consumida, no entanto, possui um potencial de poupança muito significativo. A diretiva 2010/31/EU lança o desafio dos edifícios de balanço energético quase nulo e sugere prazos de implementação muito ambiciosos, nomeadamente para os edifícios públicos.

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o potencial dos materiais de mudança de fase, enquanto solução construtiva em edifícios escolares, com vista à melhoria do desempenho energético e do conforto dos utilizadores.

Atendendo às preocupações contemporâneas pelo aumento da eficiência energética dos edifícios, a correta escolha de materiais e a constituição dos elementos construtivos é crucial para alcançar bons resultados. A introdução de materiais de mudança de fase surge como um meio de melhorar efetivamente o conforto térmico e reduzir os consumos de energia, atuando de forma passiva.

A metodologia adotada para o trabalho incluiu, inicialmente, uma cuidada revisão bibliográfica sobre materiais de mudança de fase com aplicação em edifícios, sobre conforto térmico e respetivos indicadores, especialmente os relacionados com a quantificação do sobreaquecimento, e sobre métodos de análise técnico-económica de soluções construtivas.

Depois de selecionado um conjunto de soluções construtivas com recurso a materiais de mudança de fase com diferentes temperaturas de fusão e capacidade entálpica, foi criado um modelo de simulação no programa DesignBuilder. O caso de estudo escolhido foi um bloco do edifício principal da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. Para a validação do modelo, foi criado um ficheiro climático real e os resultados da respetiva simulação foram comparados com as medições da temperatura do ar ao longo de um período de três semanas. A comparação dos dois registos, medição e simulação, conduziu a um CVRMSE de 5,57%, validando-se, assim, o modelo de simulação.

A avaliação das soluções construtivas incluiu dois cenários de simulação: 1) análise com sistema de AVAC; 2) análise sem sistema de arrefecimento. Foram analisados os resultados em duas salas de aula, uma no piso térreo e outra no 1º piso, com igual orientação e condições fronteira. De cada um dos cenários, foram selecionadas para uma análise mais detalhada as cinco soluções que apresentaram melhores resultados. O objetivo desta análise incidiu sobre o estudo do efeito dos PCM's quer na redução do pico de consumo e respetivo deslocamento temporal, quer na eficiência dos ciclos de carga e descarga, quando não existe arrefecimento mecânico. A análise económica foi realizada através da determinação do período de retorno atualizado, para três cenários económicos distintos.

Os resultados mostraram que a seleção de uma única solução não é uma tarefa fácil. Desde logo, observaram-se diferenças muito relevantes entre a sala do piso térreo e a do 1º piso, implicando a escolha de soluções distintas. Adicionalmente, a performance das soluções também varia de acordo com o critério/indicador adotado para a sua avaliação.

Palavras-chave: Materiais de mudança de fase, Conforto, Sobreaquecimento, Eficiência de carga e descarga, Análise económica.

ABSTRACT

In Europe, the buildings sector is responsible for 40% of the primary energy demand. However, it is known that the savings potential is very significant. The directive 2010/31/EU launches a great challenge, to implement nearly zero energy buildings and suggesting very ambitious deadlines, particularly to public buildings.

Given contemporary concerns about increasing energy efficiency in buildings, proper choice of materials and the constitution of building elements is crucial to achieving good results. The introduction of phase change materials emerges as a path of effectively improve thermal comfort and reduce energy consumption passively.

This study aims to evaluate the potential of phase change materials, as an alternative to improve both buildings' energy performance and users' comfort, especially in school buildings.

The methodology adopted for this work begin with a careful literature review of: phase change materials applications on buildings; thermal comfort quantification through performance indicators, especially those related to the overheating quantification; and the economic analysis methods to evaluate different constructive alternatives.

After selecting a set of constructive alternatives using phase change materials, with different melting temperatures and enthalpy capacity, a simulation model was created with DesignBuilder. A block of the main building of the School of Technology & Management of Viseu was chosen as case study. To validate the model, a real weather file was created and the corresponding simulation results were compared with measurements of air temperature over a period of three weeks. The comparison of the two datasets, measurement and simulation, led to a CVRMSE of 5.57%, thus, validating the model.

The evaluation of the constructive alternatives included two simulation scenarios: 1) analysis with HVAC system; 2) analysis without cooling system. Two classrooms, one on the ground floor and another on the 1st floor, with the same orientation and boundary conditions, were included in the analysis. In each scenario, the five alternatives that showed better results were selected for further analysis. The objective of this new detailed analysis was studying the effect of PCM on both the reduction of the peak demand and the corresponding time shift, and on the efficiency of the charge and discharge cycles, when no mechanical cooling was used. The economic analysis was carried out and the payback period for three different economic scenarios was computed.

The results showed that the selection of a single solution is not an easy task. In fact, there were very significant differences in performance between the ground floor and the 1st floor

classrooms, indicating the choice of different alternatives. Additionally, the alternatives performance of the also varied according to the criteria/indicator adopted for the evaluation.

Keywords: Phase change materials, Comfort, Overheating, Charge and discharge efficiency, Economic analysis.

AGRADECIMENTOS

Gostava de agradecer a todos os que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho, no entanto gostaria de agradecer em particular:

Ao meu orientador Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, pela sua disponibilidade, motivação e sentido de humor. Ao meu coorientador Professor Doutor Romeu da Silva Vicente pela sua disponibilidade e conteúdos fornecidos.

Ao Professor Pedro Rodrigues pela disponibilização dos dados climáticos da estação meteorológica da Escola Superior Agrária de Viseu.

Aos meus pais, verdadeiros engenheiros do homem que me tornei.

À minha irmã, sempre com um sorriso no rosto e com abraços que enchem a alma.

À minha namorada, Ana Raquel, principal apoio a todos os níveis, tornando todas as dificuldades mais fáceis de ultrapassar.

A todos, **MUITO OBRIGADO.**

ÍNDICE GERAL

Resumo	v
ABSTRACT	vii
AGRADECIMENTOS	ix
ÍNDICE GERAL	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE Tabelas	xvii
ABREVIATURAS	xix
SÍMBOLOS	xxi
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos e Estratégia	2
1.3 Organização e estrutura do texto	2
2. Estado da arte.....	5
2.1 Enquadramento	5
2.1.1 Caracterização do parque edificado europeu	5
2.1.2 Caracterização do parque edificado português	6
2.2 Regulamentação energética de edifícios	10
2.3 Conforto térmico.....	14
2.3.1 Equilíbrio térmico.....	15
2.3.2 Sobreaquecimento	16
2.4 Método de análise de viabilidade económica – Período de retorno	19
3. Materiais de mudança de fase: propriedades, tipo e métodos de incorporação.....	23
3.1 Introdução	23
3.2 Processo de mudança de fase.....	23
3.2.1 Calor sensível	24
3.2.2 Calor latente.....	25
3.3 Propriedades dos materiais de mudança de fase	26
3.4 Tipos de materiais de mudança de fase	28
3.4.1 Materiais de mudança de fase orgânicos	28

3.4.2	Materiais de mudança de fase inorgânicos	29
3.4.3	Misturas eutécticas	30
3.4.4	Comparação	30
3.5	Métodos de incorporação de materiais de mudança de fase	31
3.5.1	PCM incorporado diretamente	31
3.5.2	PCM por imersão	31
3.5.3	PCM encapsulado	31
3.5.4	PCM de forma estabilizada	33
3.6	Materiais de mudança de fase aplicados à construção	34
3.6.1	Armazenamento gratuito	34
3.6.2	Desvio da carga de pico	34
3.6.3	Sistemas ativos	35
3.6.4	Controlo /regulação térmica: sistemas passivos.....	35
3.7	Trabalhos já realizados	37
4.	Metodologia	41
4.1	Enquadramento.....	41
4.2	Simulação térmica e energética.....	41
4.2.1	EnergyPlus	41
4.2.2	DesignBuilder	43
4.2.3	Algoritmo de cálculo CondFD	43
4.3	Caso de estudo.....	46
4.3.1	Metodologia	46
4.3.2	Caracterização do edifício.....	50
4.3.3	Validação do modelo de simulação	59
5.	Apresentação e discussão dos resultados	63
5.1	Enquadramento.....	63
5.2	Considerações.....	63
5.3	Análise Geral.....	65
5.3.1	Enquadramento	65
5.3.2	Análise com sistema de AVAC	66
5.3.3	Análise sem sistema de arrefecimento	75

5.4	Análise detalhada.....	85
5.4.1	Enquadramento.....	85
5.4.2	Análise detalhada com sistema de AVAC.....	85
5.4.3	Análise detalhada sem sistema de arrefecimento	93
5.5	Análise económica e de sensibilidade.....	105
6.	Conclusões e trabalhos futuros	109
6.1	Conclusões	109
6.1.1	Necessidades de aquecimento e arrefecimento	110
6.1.2	Estudo do risco de sobreaquecimento	110
6.1.3	Redução do consumo de pico	111
6.1.4	Eficiência das soluções de PCM (carga e descarga).....	112
6.1.5	Análise económica e de sensibilidade	112
6.1.6	Síntese final	112
6.2	Trabalhos futuros	113
	Referências	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Distribuição espacial do parque edificado por tipo de edifício (BPIE, 2011)	5
Figura 2-2 Consumos médios para aquecimento (kWh/(m ² .ano)) em edifícios unifamiliares por ano de construção (BPIE, 2011)	6
Figura 2-3 Distribuição dos edifícios não residenciais por tipo de utilização (DGEG, 2014) ...	7
Figura 2-4 Consumo de energia final em 2014 por setor (DGEG, 2016)	7
Figura 2-5 Consumo por fonte de energia em edifícios familiares (DGEG, 2016).....	8
Figura 2-6 Distribuição dos consumos de energia em edifícios residenciais (ADENE, 2012)..	8
Figura 2-7 Consumos totais de energia no ano 2005, por setor, ao nível da administração central (IBM Corporation, 2010).....	10
Figura 2-8 Compilação das estratégias rumo aos nZEB, (Figueiredo et al., 2016).....	14
Figura 3-1 Métodos de Armazenamento de calor (Mehling & Cabeza, 2008).	24
Figura 3-2 Evolução da temperatura durante armazenamento de calor sensível (Mehling & Cabeza, 2008).	25
Figura 3-3 Armazenamento de calor durante a mudança de fase sólido-líquido (Mehling & Cabeza, 2008)	26
Figura 3-4 Categorização geral dos PCM's (Kalnæs & Jelle, 2015).....	28
Figura 3-5 Variação da temperatura durante o arrefecimento e aquecimento de um PCM com sobrearrefecimento (Carvalho, 2013).	29
Figura 3-6 Processos de microencapsulação (Silva, 2009).	32
Figura 3-7 PCM macro-encapsulado (Produto da empresa Phase Change energy solutions)..	33
Figura 3-8 Exemplo de PCM de forma estabilizada (Zhou, Zhao, & Tian, 2012).....	34
Figura 3-9 Redução e deslocação da carga de pico (Kalnæs & Jelle, 2015).	35
Figura 3-10 Exemplos de aplicação de PCM em sistemas passivos	36
Figura 4-1 Estrutura programática do EnergyPlus	42
Figura 4-2 Ambiente de trabalho do DesignBuilder	43
Figura 4-3 Colocação de PCM	48
Figura 4-4 Metodologia de trabalho	49
Figura 4-5 Localização do edifício em estudo.....	50
Figura 4-6 Fachadas Sul e Este do bloco de aulas.....	50
Figura 4-7 Piso térreo, Departamento de Gestão de Empresas da ESTGV	51
Figura 4-8 Piso 1, Departamento de Gestão de Empresas da ESTGV	51
Figura 4-9 Pormenor da constituição do pavimento térreo	52
Figura 4-10 Pormenor da constituição das paredes interiores	52
Figura 4-11 Pormenor da constituição das paredes exteriores	53
Figura 4-12 Pormenor da constituição da laje de piso.....	53
Figura 4-13 Pormenor da constituição cobertura plana.....	54
Figura 4-14 Proteção interior dos vãos envidraçados.....	54
Figura 4-15 Perfil de iluminação, Decreto lei 79/2006	57
Figura 4-16 Perfil utilizado na simulação	58

Figura 4-17 Renovações horárias de ar de segunda a sexta-feira	59
Figura 4-18 Renovações horárias de ar ao fim-de-semana	59
Figura 4-19 Sensor de medição HOBO	60
Figura 4-20 Variação da temperatura medida e simulada na Sala 6	60
Figura 5-1 Configuração dos setpoints no modelo de simulação	64
Figura 5-2 Redução das necessidades de aquecimento na Sala 6 (Piso térreo)	66
Figura 5-3 Redução do número de horas de funcionamento do sistema de AVAC na Sala 6	67
Figura 5-4 Redução das necessidades de arrefecimento na Sala 6	68
Figura 5-5 Redução do número de horas de funcionamento do sistema de AVAC na Sala 6	69
Figura 5-6 Redução das necessidades de aquecimento na Sala 18	71
Figura 5-7 Redução o número de horas de funcionamento de sistema de AVAC na Sala 18	72
Figura 5-8 Redução das necessidades de arrefecimento na Sala 18	73
Figura 5-9 Redução do número de horas de funcionamento do sistema de AVAC na Sala 18	74
Figura 5-10 Amplitude máxima de sobreaquecimento na Sala 6	76
Figura 5-11 Exemplo explicativo da temperatura média do sobreaquecimento	77
Figura 5-12 Amplitude média de sobreaquecimento na Sala 6	77
Figura 5-13 Graus-hora acumulados de sobreaquecimento na Sala 6	78
Figura 5-14 Número de ocorrências de sobreaquecimento na Sala 6	79
Figura 5-15 Amplitude máxima de sobreaquecimento na Sala 18	81
Figura 5-16 Amplitude média de sobreaquecimento na Sala 18	82
Figura 5-17 Graus-hora acumulados de sobreaquecimento na Sala 18	83
Figura 5-18 Número de ocorrência de sobreaquecimento por ano na Sala 18	84
Figura 5-19 Redução da necessidade de pico de arrefecimento na Sala 6	86
Figura 5-20 Redução do número de minutos com necessidade de arrefecimento na Sala 6	88
Figura 5-21 Redução da necessidade de pico de arrefecimento na Sala 18	90
Figura 5-22 Redução do número de minutos com necessidade de arrefecimento na Sala 18	92
Figura 5-23 Exemplo das equações utilizadas para os PCM's com temperatura de mudança de fase 25 °C	96
Figura 5-24 Distribuição dos períodos de funcionamento dos PCM's para a Sala 6	97
Figura 5-25 Fatores de eficiência T_C e T_{DC} para a Sala 6	98
Figura 5-26 Fatores de eficiência L_C e L_{DC} para a Sala 6	99
Figura 5-27 Coeficientes de eficiência HE e CE	100
Figura 5-28 Distribuição dos períodos de funcionamento dos PCM's, Sala 18	101
Figura 5-29 Fatores de eficiência T_C e T_{DC} para a Sala 18	102
Figura 5-30 Fatores de eficiência L_C e T_{DC} para Sala 18	103
Figura 5-31 Coeficientes de eficiência dia 25 para a Sala 18	104
Figura 5-32 Período de retorno do investimento, Sala 6	106
Figura 5-33 Período de retorno do investimento para a Sala 18	107
Figura 6-1 Esquema síntese das melhores soluções por análise e por sala	113

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 Desagregação dos consumos em edifícios de serviços	9
Tabela 2-2 Compilação dos indicadores propostos por Sulaiman & Olsina, 2014	18
Tabela 2-3 Categorização dos edifícios (TM52, 2014)	19
Tabela 3-1 Vantagens e desvantagens dos diversos tipos de PCM (Kalnæs & Jelle, 2015). ...	30
Tabela 4-1 Tipos de PCM.....	47
Tabela 4-2 Propriedades dos PCM's utilizados	47
Tabela 4-3 Resumo das propriedades/constituição dos elementos construtivos	55
Tabela 4-4 Ocupação e equipamentos nas diferentes zonas.....	56
Tabela 5-1 Soluções com melhor desempenho na Sala 6.....	70
Tabela 5-2 Soluções com melhor desempenho na Sala 18.....	75
Tabela 5-3 Soluções de PCM com melhor desempenho na análise sem sistema de arrefecimento na Sala 6	80
Tabela 5-4 Soluções PCM com melhor desempenho na análise sem sistema de arrefecimento na Sala 18	85
Tabela 5-5 Deslocamento do pico de necessidade de arrefecimento, Sala 6	87
Tabela 5-6 Número de minutos com necessidade de arrefecimento da simulação de referência na Sala 6	88
Tabela 5-7 Necessidades diárias arrefecimento na Sala 6.....	89
Tabela 5-8 Deslocamento do pico de necessidade de arrefecimento na Sala 18.....	91
Tabela 5-9 Número de minutos com necessidade de arrefecimento para a simulação de referência	92
Tabela 5-10 Necessidades diárias arrefecimento, Sala 18.....	93
Tabela 5-11 Propriedades dos tipos de PCM	95
Tabela 5-12 Cenários da análise económica e de sensibilidade	105
Tabela 5-13 Preços por m ² das soluções de PCM utilizadas.....	105

ABREVIATURAS

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BLAST	Building Loads Analysis and System Thermodynamics
BPIE	Buildings Performance Institute Europe
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
CondFD	Conduction Finite Difference
CTF	Conduction Transfer Function
CVRMSE	Coefficient of variation of the root mean square error
DOE-2	Department of Energy, USA
ESTGV	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu
HBM	Heat Balance Method
IPMVP	International Performance Measurement & Verification Protocol
ITeCons	Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade
PCM	Phase Change Materials
PVC	Policloreto de vinilo
XPS	Poliestireno extrudido

SÍMBOLOS

Variável	Descrição	Unidades
T	Temperatura no nó	[K]
i	Nó modelado	[-]
$i+1$	Nó adjacente à construção interior	[-]
$i-1$	Nó adjacente à construção exterior	[-]
$j+1$	Novo intervalo de tempo	[-]
j	Intervalo de tempo anterior	[-]
Δt	Intervalo de tempo	[s]
Δx	Espessura da camada usada para cálculo das diferenças finitas	[m]
c_p	Calor específico do material	[J/(kg.K)]
k_W	Condutibilidade térmica da interface entre o nó i e o nó $i+1$	[W/(m ² .K)]
k_E	Condutibilidade térmica da interface entre o nó i e o nó $i-1$	[W/(m ² .K)]
ρ	Massa Volúmica do material	[kg/m ³]
$h_{i,new}$	Valor da entalpia da nova iteração	[J/kg]
$h_{i,old}$	Valor da entalpia da iteração anterior	[J/kg]
$T_{i,new}$	Valor da temperatura da nova iteração	[K]
$T_{i,old}$	Valor da temperatura da iteração anterior	[K]
α	Difusibilidade térmica do material	[m ² /s]
C	Constante de discretização	[-]
FO	Número de Fourier	[-]
k_0	Condutibilidade do material a 20°C	[W/(m.K)]
k_1	Valor que representa a mudança da condutibilidade térmica por grau de diferença em relação a k_0	[W/(m.K)]
T_{medida}	Temperatura medida	[°C]
$T_{simulada}$	Temperatura simulada	[°C]
$\overline{T_{medida}}$	Média da temperatura medida	[°C]
n	Número de medições	[-]
T_{max}	Temperatura máxima aceitável	[°C]
T_{rm}	Média diária da temperatura exterior exponencialmente calculada	[°C]
ΔT	Banda de aceitabilidade	[°C]
D_h	Graus-hora	[°C]
T_j	Temperatura ambiente interior	[°C]
T_{refe}	Temperatura de referência	[°C]
S	Acumulação de calor no corpo	[W/m ²]
M	Taxa de metabolismo	[W/m ²]
W	Energia correspondente ao trabalho mecânico realizado	[W/m ²]
E	Perdas de calor por evaporação	[W/m ²]

<i>R</i>	Trocas de calor por radiação	[W/m ²]
<i>C</i>	Trocas de calor por convecção	[W/m ²]
<i>HCR</i>	Índice de confiabilidade higrotérmico	[%]
<i>HDR</i>	Índice de risco de desconforto	[%]
<i>EDD</i>	Duração esperada para ocorrências de desconforto	[h/a]
<i>EOvH</i>	Sobreaquecimento médio esperado	[°C]
<i>EUnH</i>	Sub-arrefecimento médio esperado	[°C]
<i>ELCF</i>	Frequência de perda de conforto	[1/a]
<i>EDDE</i>	Duração dos eventos desconfortáveis	[h]
<i>PV</i>	Valor atual	[€]
<i>F_t</i>	Valor futuro	[€]
<i>d</i>	Taxa de atualização	[%]
<i>t</i>	Ano em que se dá o custo	[anos]
<i>A_o</i>	Despesa periódica anual	[€]
<i>e</i>	Taxa real de variação do custo do produto	[%]
<i>PRI</i>	Período de retorno do investimento	[ano]
<i>I</i>	Investimento	[€]
<i>FCL</i>	Fluxos de caixa líquidos	[€]
<i>r</i>	Taxa de atualização que mede o retorno do capital investido	[%]
ΔQ	Armazenamento de calor	[J/kg]
ΔT	Variação de temperatura	[°C]
<i>m</i>	Massa	[kg]
<i>C</i>	Capacidade calorífica	[J/°C]
<i>c</i>	Calor específico	[J/(kg.°C)]
ΔH	Variação da entalpia;	[J]
Δh	Variação da entalpia específica	[J/kg]
<i>I_{rn}</i>	Indicador de redução de necessidades	%
<i>N_e</i>	Necessidades de energia	[kWh/(m ² .ano)]

1. Introdução

1.1 Enquadramento

O rápido crescimento da população mundial e o desenvolvimento tecnológico conduziram a um aumento brusco dos consumos de energia. Mundialmente os combustíveis fósseis representam mais de 80% da energia primária total e mais de 90% das emissões de CO₂ resultantes da sua combustão (International Energy Agency, 2015).

A Agência Internacional de Energia estima que em 2013, 67,4% da energia elétrica foi produzida a partir de combustíveis fósseis, enquanto apenas 16,3%, 10,6%, 5,7% foi produzida através de energia hídrica, nuclear e energias renováveis, respetivamente. A forte dependência dos combustíveis fósseis contribui fortemente para o aquecimento global, aumentando assim os consumos para arrefecimento e, por consequência, o aumento das necessidades de energia elétrica.

As instalações de arrefecimento, incluindo os sistemas de ar condicionado, contribuem para o aquecimento global, quer pela emissão direta de gases fluorados, quer pela energia elétrica necessária para o seu funcionamento. A refrigeração tornou-se indispensável à existência humana, contribuindo para conservação de alimentos, o armazenamento de vacinas para o tratamento de doenças, ou até o aumento de produtividade alcançado pela manutenção de uma temperatura que se adeque à atividade desenvolvida (International Institute of Refrigeration, 2007).

Tendo em conta a necessidade da refrigeração, torna-se necessário adotar estratégias que reduzam as necessidades de arrefecimento revertendo o ciclo de aumento da temperatura

global-aumento das necessidades de arrefecimento. A Engenharia Civil pode contribuir diretamente para esse objetivo, intervindo no setor dos edifícios com a adoção de soluções passivas que minimizem os consumos de energia, melhorando, por esta via, o desempenho energético dos edifícios.

Assim, um dos problemas mais importantes para um engenheiro/arquiteto depara-se na escolha dos materiais ou tecnologias a utilizar para garantir a compatibilização da eficiência energética, a qualidade do ar interior, o nível de conforto e os custos associados a essa escolha (Almeida R. M. S. F., 2011).

1.2 Objetivos e Estratégia

O objetivo deste trabalho consiste no estudo da aplicação de materiais de mudança de fase como estratégia de melhoria das condições de conforto térmico e redução de necessidades de aquecimento e arrefecimento em espaços de um edifício escolar.

Utilizando-se o edifício da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu como caso de estudo, foi estabelecida a seguinte estratégia:

- Compilar informações relacionadas com os materiais de mudança de fase;
- Estudo dos modelos numéricos de simulação energética e térmica em elementos construtivos que incorporem materiais de mudança de fase;
- Criação de um modelo de simulação válido, que permita estudar o efeito da introdução de materiais de mudança de fase;
- Modelação do caso de estudo e execução de simulações de vários cenários de intervenção;
- Tratamento dos resultados do trabalho de simulação;
- Estudo detalhado do rendimento e do impacto das soluções de intervenção;
- Análise económica das soluções escolhidas, recorrendo ao cálculo do período de retorno.

1.3 Organização e estrutura do texto

A dissertação está organizada em 6 capítulos distintos:

- No capítulo 1 é apresentado um o enquadramento geral e os objetivos a atingir;
- No capítulo 2 é apresentada uma compilação bibliográfica dos conhecimentos necessários ao tratamento de questões de eficiência energética, conforto e reabilitação térmica e conceitos subjacentes à análise de viabilidade económica.
- No capítulo 3 é realizado um estudo dos materiais de mudança de fase, onde são expostas as suas principais características, formas e aplicações.

- No capítulo 4 é apresentado o software de simulação utilizado, com ênfase na formulação necessária para tratar materiais de mudança de fase. É, ainda, exposto o edifício em estudo e os pressupostos que levaram à criação e validação do modelo de simulação. É apresentada a estratégia por detrás do trabalho de simulação e posterior tratamento dos resultados;
- No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados da análise geral e detalhada, terminando com a análise económica;
- No capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões retiradas do presente trabalho, assim como expectativas de eventuais trabalhos futuros.

2. Estado da arte

2.1 Enquadramento

2.1.1 Caracterização do parque edificado europeu

O continente europeu possui um vasto parque edificado, com cerca de 25 biliões de m² de espaço útil. Se fosse possível concentrar essa área, ocuparia o espaço equivalente à área da Bélgica (30 528 km²). Do parque edificado, 25% corresponde a edifícios não residenciais e os restantes 75% dividem-se em edifícios multifamiliares e unifamiliares (BPIE, 2011). Na Figura 2-1 apresenta-se a distribuição do parque edificado europeu, separadamente para os setores residencial (Figura 2-1 a)) e comércio e serviços (Figura 2-1 b)).

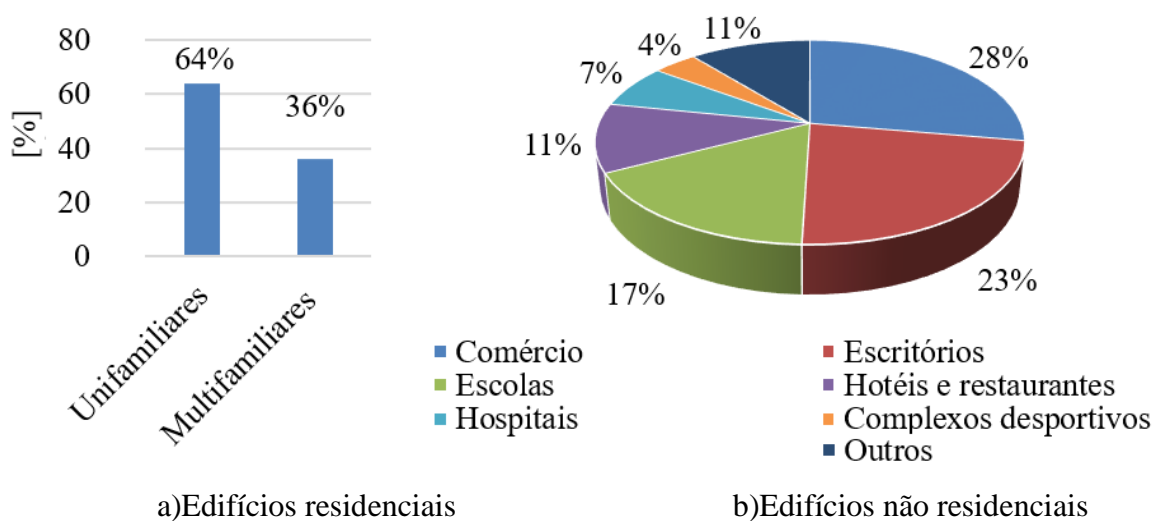


Figura 2-1 Distribuição espacial do parque edificado por tipo de edifício (BPIE, 2011)

Os edifícios de comércio representam a maior fatia do parque não residencial, seguidos pelos escritórios. O setor dos edifícios é um setor muito complexo, a grande variabilidade nos serviços que se podem prestar, origina uma grande complexidade no momento de se definir um plano de ação. Uma parte substancial dos edifícios existentes na Europa possui mais de 50 anos, mais de 40% dos edifícios residenciais foram contruídos antes de 1960, período onde a legislação no domínio da térmica era muito limitada ou inexistente (BPIE, 2011).

O setor dos edifícios é um dos maiores responsáveis pelo consumo energético na europa. Em 2009, os edifícios residenciais representavam cerca de 68% de toda a energia consumida no respetivo setor. Dos principais consumos de energia praticados em edifícios residenciais, os consumos para aquecimento são responsáveis por cerca de 70% do consumo total. Na Figura 2-2 encontram-se representados os consumos médios para aquecimento em edifícios unifamiliares por ano de construção (BPIE, 2011).

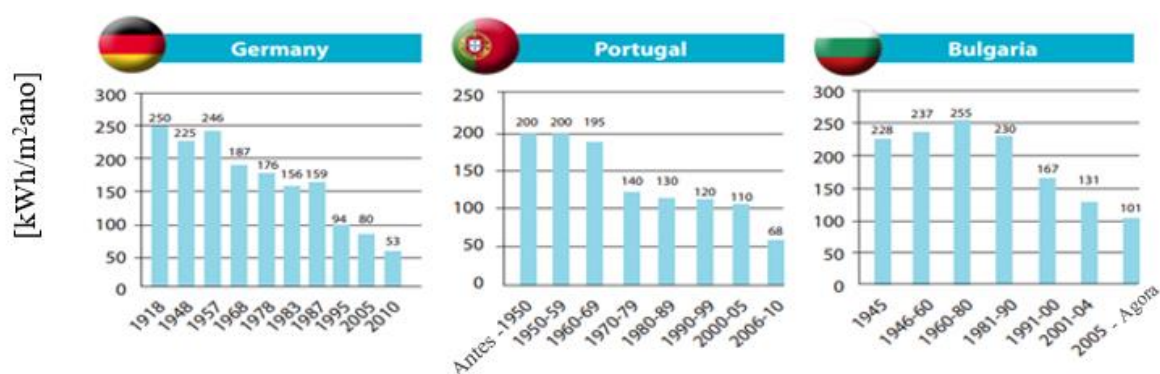


Figura 2-2 Consumos médios para aquecimento (kWh/(m².ano)) em edifícios unifamiliares por ano de construção (BPIE, 2011)

Os edifícios não residenciais possuem um consumo médio anual de energia de 280 kWh/m², valor que cobre todas as utilizações, esse consumo é cerca de 40% superior ao consumo atribuído aos edifícios residenciais. Particularmente nos edifícios não residenciais foi registado um aumento nos consumos de energia elétrica de 74% nos últimos 20 anos (BPIE, 2011).

2.1.2 Caracterização do parque edificado português

Em Portugal a área edificada corresponde a cerca de 452 000 000 m², dos quais 77% destinados a habitação. A preocupação com o desempenho térmico e energético dos edifícios é relativamente recente. Sabendo que 70% dos edifícios foram contruídos antes de 1990, ano em que foi publicado o primeiro regulamento das características de comportamento térmico de edifícios, percebe-se a importância de atuar sobre os mesmos, melhorando a sua eficiência (DGEG, 2014).

Quanto aos edifícios destinados a serviços e comércio, podem assumir diversas utilizações às quais está associada uma enorme variabilidade nos respetivos consumos energéticos.

A Figura 2-3 apresenta a distribuição dos edifícios não residenciais por tipo de utilização (DGEG, 2014).

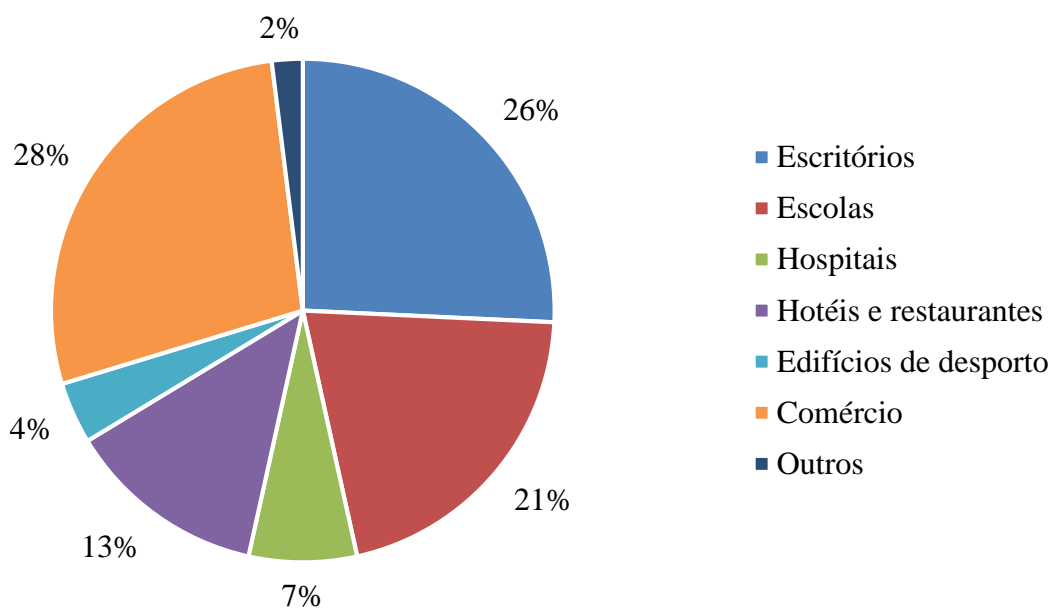


Figura 2-3 Distribuição dos edifícios não residenciais por tipo de utilização (DGEG, 2014)

Em Portugal os setores de serviços e doméstico são responsáveis pelo consumo de aproximadamente 29,43% do total da energia consumida (DGEG, 2016). A Figura 2-4 apresenta a distribuição do consumo de energia final por setor em 2014.

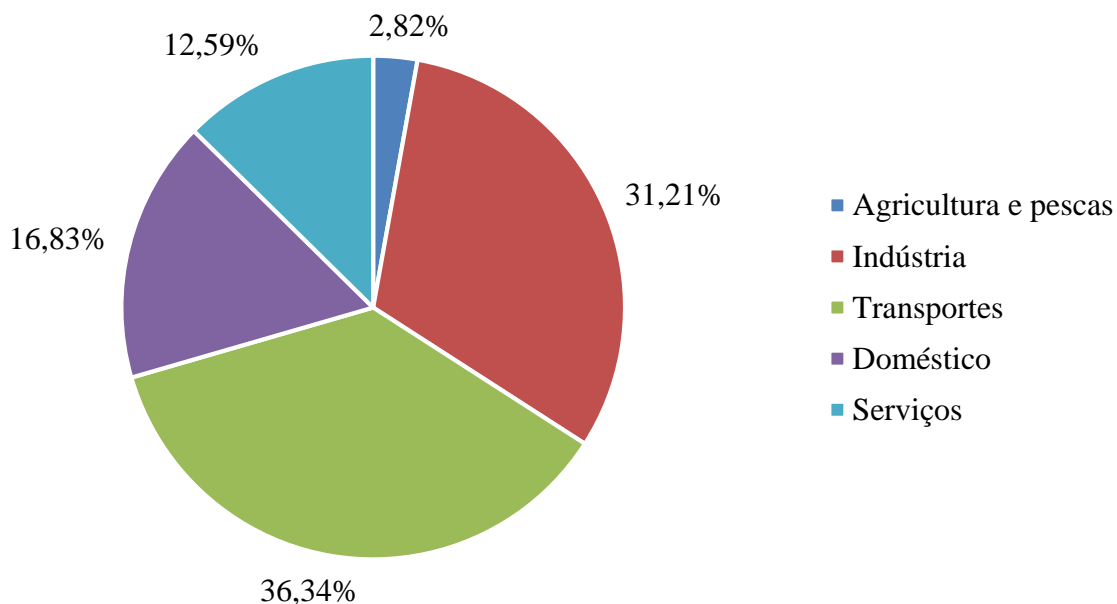


Figura 2-4 Consumo de energia final em 2014 por setor (DGEG, 2016)

No que respeita ao consumo de energia final no setor dos edifícios, a eletricidade tem um papel preponderante assumindo uma proporção de 54,92%, seguida das energias renováveis com

19,84% e por fim o petróleo e o gás natural com 14,62 e 10,63%, respetivamente (DGEG, 2016).

A Figura 2-5 apresenta o consumo por fonte de energia em edifícios familiares.

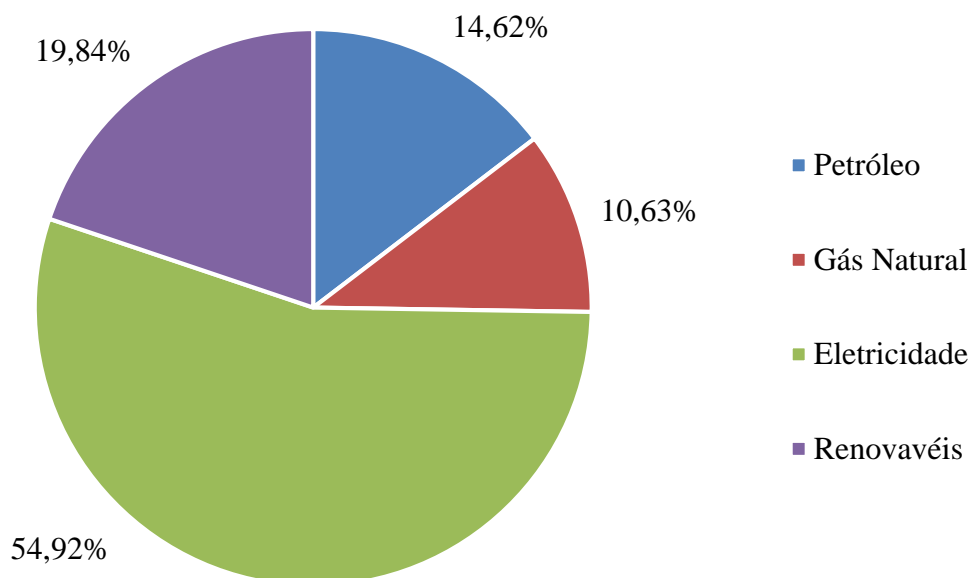


Figura 2-5 Consumo por fonte de energia em edifícios familiares (DGEG, 2016)

Segundo a ADENE, uma habitação consome em média 3 700 kWh por ano de eletricidade, podendo ser dividido em consumo para arrefecimento ambiente, aquecimento de água e ambiente, cozinha, equipamentos elétricos e iluminação (ADENE, 2012). A Figura 2-6 apresenta a distribuição dos consumos de energia em edifícios residenciais.

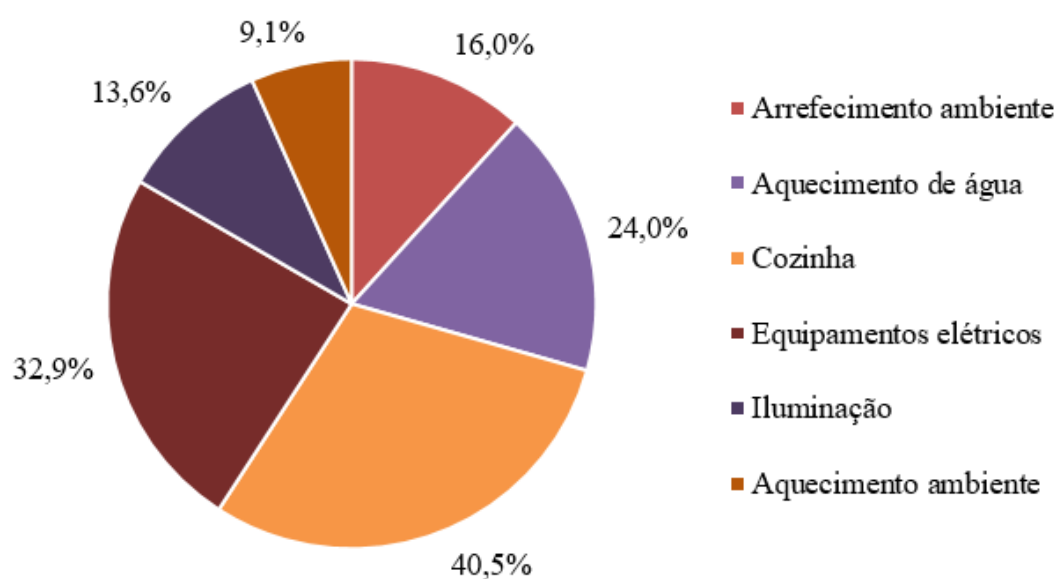


Figura 2-6 Distribuição dos consumos de energia em edifícios residenciais (ADENE, 2012)

Em relação aos edifícios de serviços, os consumos variam em função do tipo de serviço prestado. Segundo Fernandes (2013), a desagregação dos consumos oscila entre os valores apresentados na Tabela 2-1:

Tabela 2-1 Desagregação dos consumos em edifícios de serviços

Tipologia	AVAC	Iluminação	Outros
Hotéis	25 – 40%	25 – 40%	25 – 50%
Escritórios/bancos/Seguradoras	10 – 35%	30 – 50%	20 – 55%
Hospitais	20 – 35%	20 – 35%	45 – 50%
Ensino/ Bibliotecas	20 – 35%	30 – 45%	15 – 30%
Centros comerciais	50 – 60%	10 – 15%	30 – 40%
Hipermercados / Supermercados			

No âmbito desta dissertação, os edifícios de serviços, nomeadamente os edifícios escolares serão alvo de estudo, por esse motivo apresenta-se a necessidade de enquadrar essa categoria dentro do seu setor. Em 2005 foi publicado o relatório desenvolvido pela IBM Corporation, intitulado “Eficiência Energética dos Edifícios e da Iluminação Pública na Administração”, que apresenta uma análise quantitativa da eficiência energética nos edifícios públicos portugueses (IBM Corporation, 2010).

Em 2005, a administração pública foi responsável pelo consumo de 2536 GWh, deste total, 1453 GWh na administração local e 1083 na administração central (IBM Corporation, 2010). Ainda em 2005, foi possível através da ADENE, identificar os consumos de eletricidade por setor governamental, expostos na Figura 2-7:

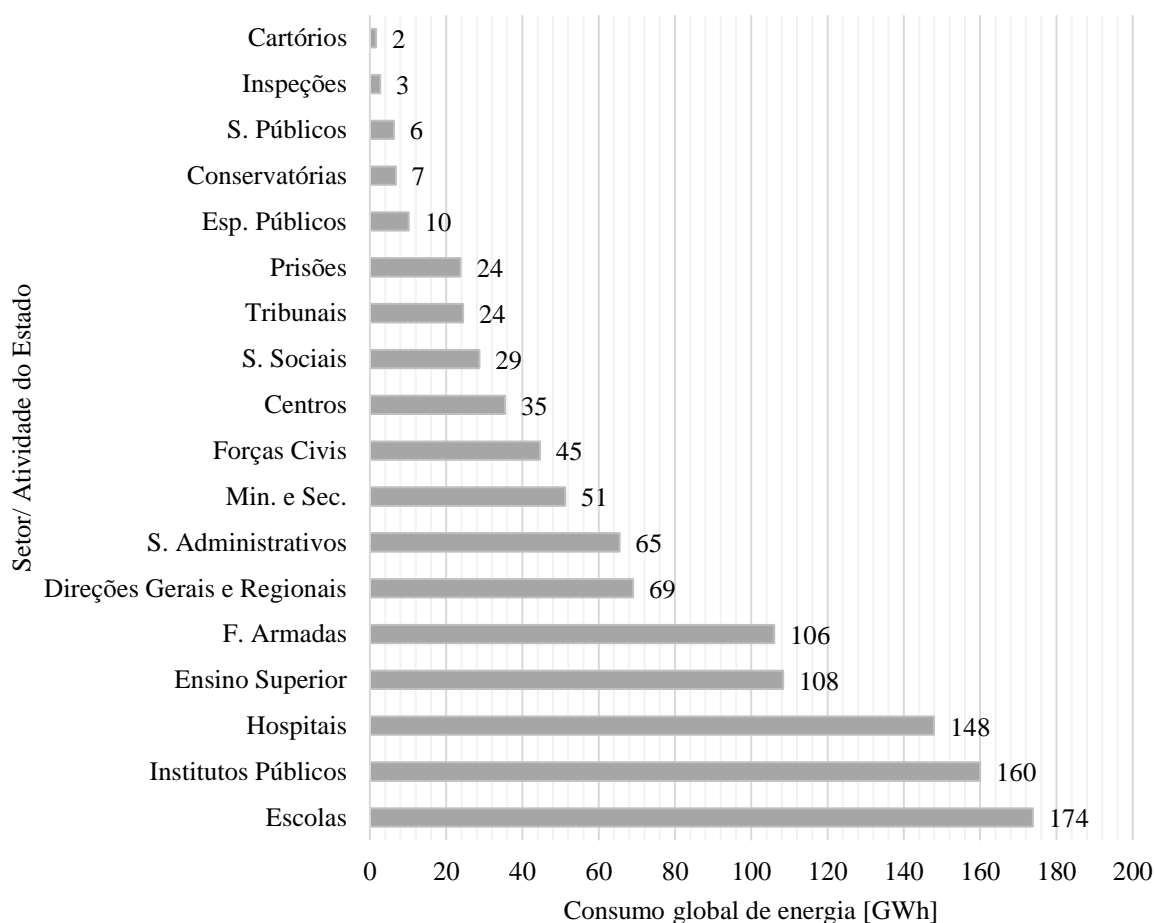


Figura 2-7 Consumos totais de energia no ano 2005, por setor, ao nível da administração central (IBM Corporation, 2010)

Analisando em detalhe os consumos sectorizados, é possível verificar que o setor da educação é o que representa maior consumo de energia eléctrica. Este setor contava com 1316 estabelecimentos e um consumo anual médio de 132 MWh (IBM Corporation, 2010).

2.2 Regulamentação energética de edifícios

A partir da revolução industrial, iniciada no Reino Unido, a alteração nos processos produtivos levou à produção em massa e conseqüente desenvolvimento económico. Contudo, esse desenvolvimento desencadeou um crescimento na utilização de recursos naturais, passíveis de utilização como fonte de energia. A forte utilização de combustíveis fósseis, contribuiu em grande escala para a emissão de gases com efeito de estufa e conseqüente aquecimento global.

Entretanto, foram surgindo preocupações sobre a atividade humana e o seu impacto no planeta. Ao recuar até 1972, em Estocolmo, a primeira iniciativa para tratar questões relacionadas com o ambiente foi tomada pelas Nações Unidas, que organizou a conferência intitulada

“Declaração de Estocolmo para o Ambiente Relacionado com o Homem”. Em 1992, de novo por intermédio das Nações Unidas, foi organizada uma conferência com o objetivo de criar uma agenda para a mudança, visando alterar a situação mundial. Foi então estabelecido um plano de ação e assinado um tratado (UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*), que pedia o comprometimento dos países assinantes para esta causa, atuando em consonância com o seu nível económico (Baiona, 2014).

Em dezembro de 1997, na cidade de Quioto, Japão, foi assinado um protocolo por 55 países, com o objetivo de limitar e monitorizar as emissões de gases com efeito de estufa, protocolo esse, que entraria em vigor no ano de 2005 (Baiona, 2014). No seguimento do Protocolo de Quioto, entrou em vigor a 26 de dezembro de 2002, uma diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios, nomeadamente a diretiva 2002/91/CE. A sua transposição para a legislação portuguesa em 2006 deu lugar aos Decretos-Lei n.º 78, 79 e 80/2006 (Baiona, 2014).

A diretiva 2010/31/EU (reformulação da 2002/91/CE) foi publicada em maio de 2010 e é a mais recente diretiva em vigor. A sua transposição para a legislação nacional gerou uma oportunidade de melhorar a sistematização e o âmbito de aplicação do sistema de certificação energética e os respetivos regulamentos. Assim, a sua transposição gerou o Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto que inclui num único diploma, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) (Decreto-lei n.º 118/2013, 2013).

A reforma da diretiva relativa ao desempenho energético de edifícios estabelece metas muito ambiciosas para a redução dos consumos energéticos, assim como para as emissões de carbono no setor dos edifícios. O setor dos edifícios na Europa é responsável por 40% de toda a energia primária consumida e por 32% das emissões de carbono (Diretiva 2010/31/EU).

O potencial de redução das emissões neste setor é relevante, uma vez que quase 80% dos custos de operação podem ser poupados se forem tomadas medidas na altura do projeto, que muitas vezes não representam custo adicional, ou então, o valor é residual quando comparado com os custos ao longo da vida do edifício (Silva, *et al.*, 2016).

O enquadramento legislativo ficou significativamente fortalecido com a diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios (2010/31/EU) e pela diretiva que promove a utilização das energias renováveis (2009/28/EC). Este fortalecimento deu assim condições para que se caminhe em direção aos edifícios com necessidades quase nulas de energia (Silva, *et al.*, 2016).

As metas definidas pela diretiva 2010/31/EU requerem que, até 31 de dezembro de 2020, todos os edifícios novos sejam edifícios com necessidade quase nulas de energia; e, após 31 de dezembro de 2018, os edifícios novos ocupados e detidos por autoridades públicas sejam edifícios de necessidades quase nulas de energia (Diretiva 2010/31/EU).

No entanto, é necessário perceber o conceito de edifício de necessidades quase nulas:

“Edifício com necessidades quase nulas de energia é um edifício com um desempenho energético muito elevado. As necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades.” (Diretiva 2010/31/EU).

De acordo com o ponto 1, do anexo 1, da diretiva 2010/31/EU, o desempenho energético de um edifício deverá ser determinado com base na energia anual calculada, ou efetivamente consumida, necessária para satisfazer as diferentes necessidades associadas a uma utilização típica (Diretiva 2010/31/EU).

Muito embora a Diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios tenha definido os objetivos e o conceito de edifícios com necessidades quase nulas, a responsabilidade última pela aplicação prática desse conceito fica incumbida aos estados membros. Em Portugal, o Decreto Lei 118/2003 já deu um primeiro passo em direção aos edifícios de necessidades quase nulas, associando esse conceito ao custo ótimo de rentabilidade (Cunha, 2015).

Para atingir as metas traçadas é necessário que cada estado membro incite à melhoria do parque edificado existente. Uma vez que a taxa de construção de edifícios novos no continente europeu se situa entre 1-2% por ano, os resultados serão manifestamente desinteressantes se apenas forem tomadas iniciativas em relação às construções novas (Silva *et al.*, 2016).

Neste enquadramento diretivo, emergiu o conceito de Casa Passiva como solução muito promissora para caminhar em direção aos edifícios de baixo consumo. O objetivo do conceito de Casa Passiva é providenciar um melhor ambiente interior, em termos de qualidade do ar e conforto térmico, com necessidades de energia e custos mínimos (Figueiredo, *et al.*, 2016).

De acordo com o conceito de Casa Passiva, para alcançar as metas da norma é essencial que o edifício respeite os seguintes requisitos (Figueiredo, *et al.*, 2016):

- As necessidades de aquecimento não podem exceder os 15kWh por metro quadrado da área líquida de habitação (tratada como área de pavimento) por ano ou 10 W por metro quadrado correspondente ao pico de procura;
- O consumo de energia primária, a energia total a ser utilizada em todas as operações desempenhadas no edifício, como aquecimento, águas quentes e eletricidade para uso doméstico, não pode exceder os 120 kWh por metro quadrado de piso por ano;
- Em termos de infiltrações, o máximo de renovações por hora não poderá ultrapassar os 0,6 h⁻¹ com um diferencial de pressão de 50 Pa, quer em pressurização, quer em despressurização;

- O conforto térmico deve ser cumprido para todas as divisões, tanto no inverno como no verão, sem que se ultrapasse o valor de 10% das horas por ano acima dos 25°C.

Este tipo de considerações, são naturalmente alvo de interesse, visto que as disposições que podem ser adotadas para estabelecer um edifício ao abrigo do conceito de Casa Passiva, podem igualmente ser introduzidos como estratégias para caminhar em direção aos edifícios de necessidade energéticas quase nulas. Em 2016, Figueiredo *et al.* compilaram um conjunto de estratégias que podem contribuir para atingir edifícios de elevado desempenho energético. A compilação apresenta-se na Figura 2-8, chamando-se a atenção para as estratégias de armazenamento de calor latente utilizando materiais de mudança de fase, que serão adotadas no decorrer deste trabalho.

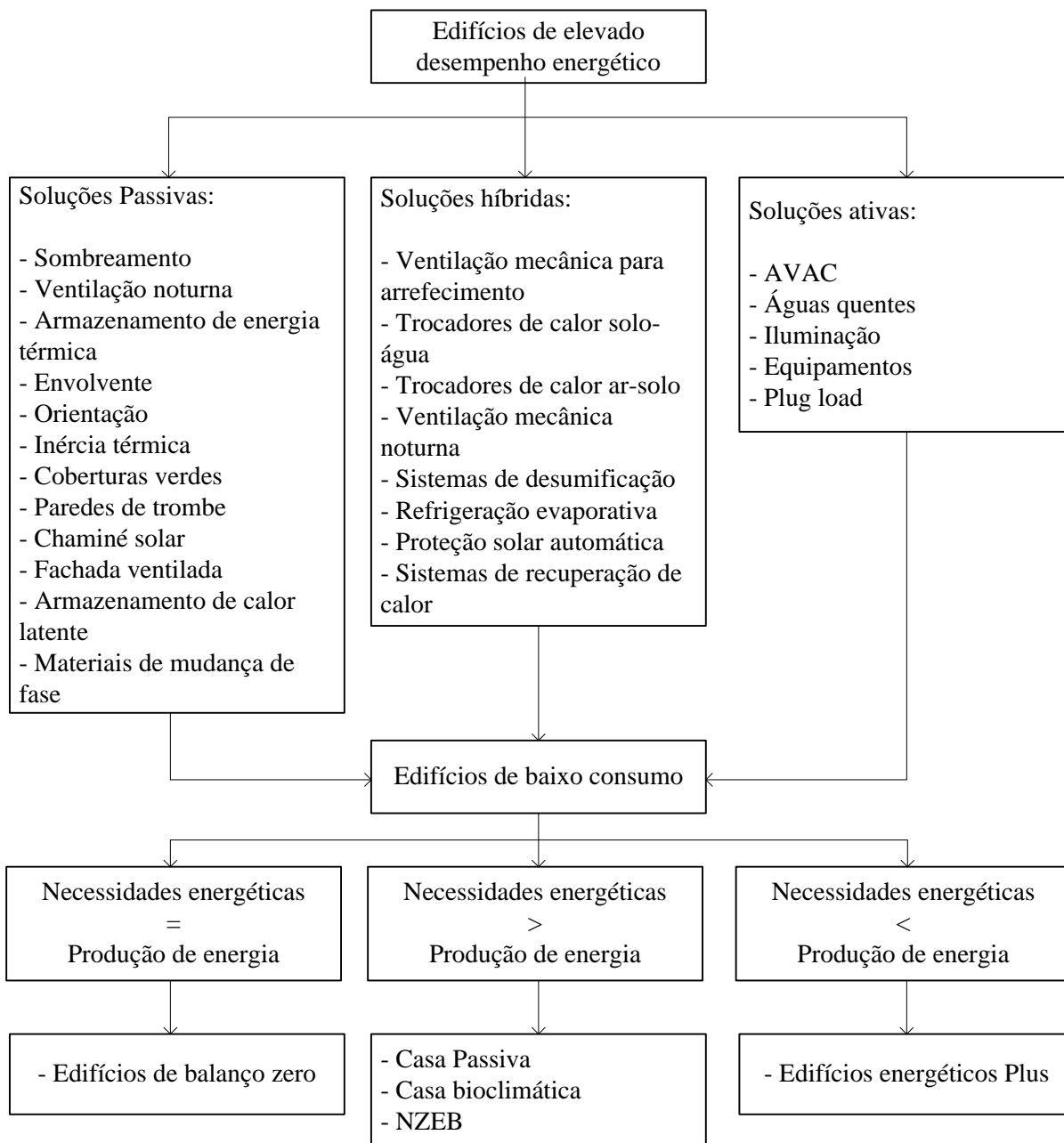


Figura 2-8 Compilação das estratégias rumo aos nZEB, (Figueiredo *et al.*, 2016)

2.3 Conforto térmico

Na sociedade contemporânea, os edifícios destinados à educação têm um papel chave na sociedade, criando condições adequadas, que permitam o desenvolvimento dos jovens. Muitos estudos internacionais foram realizados para aferir sobre o desempenho dos alunos e os fatores que o influenciam, incluindo o conforto térmico (Almeida *et al.*, 2016).

O conforto térmico é geralmente definido como uma condição psicológica que expressa satisfação quanto ao ambiente térmico (ASHRAE, 2010). Tendo em conta que este fator é de cariz psicológico, conseguir uma condição que provoque satisfação de todos os indivíduos pode ser impossível. Por isso, considera-se normal que num grupo de indivíduos sujeitos a uma avaliação de conforto térmico num mesmo ambiente, ao mesmo tempo, alguns deles possam estar insatisfeitos com as condições térmicas.

2.3.1 Equilíbrio térmico

A neutralidade térmica é um fator importante no conforto térmico. Para que essa neutralidade exista é necessário que o balanço térmico entre o ambiente e o corpo humano seja nulo. A equação definida por Fanger (1970) caracteriza a relação entre a energia produzida pelo organismo humano e as formas de dissipação da mesma:

$$S = M - W - E \pm R \pm C \quad (2-1)$$

onde:

S	[W/m ²]	Acumulação de calor no corpo
M	[W/m ²]	Taxa de metabolismo
W	[W/m ²]	Energia correspondente ao trabalho mecânico realizado
E	[W/m ²]	Perdas de calor por evaporação
R	[W/m ²]	Trocas de calor por radiação
C	[W/m ²]	Trocas de calor por convecção

O conforto térmico é traduzido pelo equilíbrio entre a energia produzida e a energia dissipada pelo corpo humano. Tanto a energia dissipada como a energia produzida, dependem de um conjunto de parâmetros que podem ser agrupados em: ambientais; individuais; subjetivos.

Os parâmetros ambientais são as variáveis utilizadas em estudos de conforto térmico, sendo enumeradas por Fanger (1970) da seguinte forma:

- Temperatura do ar;
- Temperatura média radiante;
- Velocidade do ar;
- Humidade relativa.

Parâmetros individuais como a atividade que um indivíduo desempenha, traduz-se na taxa de produção de energia do seu organismo (taxa de metabolismo). Assim a atividade física está diretamente associada à produção de energia. Normas como a ASHRAE 55 (2010) ou a ISO 7730 (2005) apresentam uma base de dados que pode ser utilizada para a caracterização da taxa de metabolismo em função da atividade. Outro parâmetro de carácter individual é o vestuário adotado. O vestuário funciona como uma camada de isolamento e controla as trocas de calor entre o corpo humano e o meio ambiente.

A resistência térmica do vestuário pode ser determinada a partir das normas ASHRAE 55, ISO 7730 que possuem o valor de resistência unitária por peça de roupa.

Parâmetros subjetivos têm em conta o facto do ser humano conseguir adaptar o seu comportamento às suas necessidades. Baker e Standeven (1996) consideram que mesmo a percepção de conforto térmico depende das “oportunidades adaptativas” existentes. Segundo Nikopoulou e Steemers (2003) as oportunidades adaptativas podem ser agrupadas nas seguintes categorias:

- Adaptação física: processo em que o ser humano toma atitudes para manter o seu conforto térmico, como a abertura ou fecho de janelas;
- Adaptação fisiológica: é representada como a capacidade de o corpo responder às mudanças térmicas ajustando-se fenotipicamente, sendo este processo designado por aclimatização;
- Adaptação psicológica: nesta categoria destaca-se o efeito da percepção e/ou expectativa de um dado ambiente térmico por parte de uma pessoa.

2.3.2 Sobreaquecimento

As alterações climáticas são já uma realidade, não só para os ativistas ambientais ou para investigadores académicos, mas para toda a comunidade. O aquecimento global é largamente aceite como um dos fatores mais significativos provocado pelas alterações climáticas. Por exemplo, para o Reino Unido, estima-se um aumento da temperatura média em 7 °C até ao final do século (Nicol, *et al.*, 2009). Esta situação poderá promover o aumento da ocorrência de situações de desconforto nos edifícios devido ao sobreaquecimento,

O sobreaquecimento possui um potencial de impacto negativo que pode ser discriminado em três principais categorias (Coelho, 2014):

- Conforto térmico: como já referido o conforto térmico traduz-se pela satisfação do indivíduo para com o ambiente térmico onde se encontra. Neste campo, o estudo não requer apenas que se identifique se está ou não confortável, mas sim a frequência dos eventos de desconforto, a sua duração e magnitude.
- Efeitos sobre a saúde: neste campo de ação, o sobreaquecimento não é responsável só pelo desconforto psicológico, podendo mesmo conduzir a problemas de saúde ou até à morte. Existem doenças relacionadas com a incapacidade do corpo humano se adaptar à excessiva exposição a temperaturas elevadas. Este problema incorre em grupos vulneráveis como pessoas idosas, bebés ou doentes crónicos (doenças respiratórias, cardiovasculares ou de foro mental).
- Produtividade: o sobreaquecimento constitui efeitos negativos também ao nível da produtividade. Um exemplo disso é o efeito adverso causado no sono. Ainda que não exista nenhuma definição para a qualidade do sono, o seu conceito geralmente incide no tempo total dormido, o excesso de calor pode contribuir para que se leve mais tempo

a adormecer e/ou que o período de descanso seja interrompido, reduzindo assim a produtividade do indivíduo durante o dia.

2.3.2.1 Indicadores de desconforto

- **Indicador Graus-hora**

O indicador graus-hora mede a flutuação da temperatura medida face à temperatura de referência. A sua aplicação adequa-se ao cálculo, quer das necessidades de aquecimento, quer das necessidades de arrefecimento (CIBSE, 2006).

A equação utilizada para o seu cálculo é a seguinte:

$$D_h = \sum_{j=1}^{24} (T_j - T_{refe})_{((T_j - T_{refe}) > 0)} \quad (2-2)$$

D_h	[°C]	Graus-hora
T_j	[°C]	Temperatura ambiente interior
T_{refe}	[°C]	Temperatura de referência

- **Indicadores de risco de sobreaquecimento**

De acordo com Sulaiman & Olsina (2014), a confiança no comportamento higrotérmico de um edifício deve ser assente em indicadores para que se comparem diferentes soluções. O comportamento de um edifício pode ser caracterizado pelo indicador higrotérmico de confiabilidade [*HCR*], que pode ser expresso em percentagem, dando a informação do número de eventos de conforto num dado período de tempo. Com definição inversa, por vezes, pode fazer sentido evidenciar o indicador de risco de desconforto higrotérmico [*HDR*], expresso em percentagem, ou de forma acumulada em unidades por período.

Os indicadores de confiabilidade e de risco de sobreaquecimento medem apenas o número de ocorrências de eventos confortáveis e desconfortáveis, mas por si só, não fornecem nenhuma informação sobre a magnitude das flutuações. Para medir a magnitude das flutuações, Sulaiman & Olsina (2014) sugerem os indicadores de sobreaquecimento [*EOvH*] e subaquecimento [*EUnH*] que demonstram em quanto foi ultrapassada a temperatura de referência. Os autores referem ainda mais dois indicadores: a frequência de perda de conforto [*ELFC*], expressa em ocorrências por ano, e a duração esperada para a duração dos eventos desconfortáveis [*EDDE*], medida em horas. A Tabela 2-2 resume esta informação.

Tabela 2-2 Compilação dos indicadores propostos por Sulaiman & Olsina, 2014

Índice de confiabilidade higrotérmico	<i>HCR</i> [%]
Índice de risco de desconforto	<i>HDR</i> [%]
Duração esperada para ocorrências de desconforto	<i>EDD</i> [h/a]
Sobreaquecimento médio esperado	<i>EOvH</i> [°C]
Sub-arrefecimento médio esperado	<i>EUnH</i> [°C]
Frequência de perda de conforto	<i>ELCF</i> [1/a]
Duração dos eventos desconfortáveis	<i>EDDE</i> [h]

- **Avaliação de sobreaquecimento segundo TM 52**

A ferramenta TM52 para a análise de conforto adaptativo compreende a averiguação sobre o sobreaquecimento, baseada em critérios estabelecidos no Memorando Técnico da CIBSE. A ferramenta utiliza três critérios, que juntos permitem averiguar o risco de sobreaquecimento. Para que um determinado compartimento de um edifício seja classificado como, compartimento com problemas de sobreaquecimento, terá que falhar em pelo menos dois dos seguintes três critérios:

- **Horas de excedência**

O número de horas em que a diferença entre a temperatura máxima aceitável e a temperatura operativa é superior ou igual a 1 grau. O somatório das diferenças durante o período de maio a setembro não deverá ser superior a 3% das horas de ocupação. A diferença entre a temperatura máxima aceitável e a temperatura operativa deve ser arredondada ao número inteiro mais próximo.

- **Ponderação diária da excedência**

Este critério traduz o somatório dos graus-hora por dia, o que pode ser tão importante como a sua frequência. Este critério estabelece um limite diário de aceitabilidade de graus-hora de sobreaquecimento. Para que se valide este critério, a excedência ponderada deve ser igual ou inferior a 6 °C por dia.

- Limite da temperatura

Este critério estabelece a diferença máxima entre a temperatura máxima aceitável e a temperatura operativa, sendo que, para aprovação deste critério a diferença não deva ser superior a 4°C.

A temperatura máxima aceitável para o cálculo destes critérios traduz-se na equação (2-3):

$$T_{max} = 0,33 \times T_{mp} + 18,8 + \Delta T \quad (2-3)$$

Onde:

T_{max} [°C]	Temperatura máxima aceitável
T_{rm} [°C]	Média diária da temperatura exterior exponencialmente calculada
ΔT [°C]	Banda de aceitabilidade

A Tabela 2-3 apresenta a banda de aceitabilidade para o cálculo da temperatura máxima aceitável.

Tabela 2-3 Categorização dos edifícios (TM52, 2014)

Categoria	Descrição	Banda de aceitabilidade [°C]
Categoria I	Elevada expectativa, definido apenas para zonas com ocupação de pessoas muito sensíveis	2
Categoria II	Expectativa normal (para edifícios novos ou reabilitados)	3
Categoria III	Expectativas moderadas (utilização em edifícios correntes)	4

2.4 Método de análise de viabilidade económica – Período de retorno

Os projetos de reabilitação energética são realizados com o objetivo de reduzir os custos de operação de um edifício e melhorar as suas condições de habitabilidade. Para perceber onde intervir, é necessário conhecer as necessidades de energia do projeto base. A partir do projeto base podem ser simuladas alterações que visem a melhoria do desempenho do edifício.

Para determinar a viabilidade económica de investimentos decorrentes da reabilitação, existem diversas ferramentas que podem auxiliar no momento da escolha. Para a análise económica efetuada neste trabalho, foi selecionado o método de cálculo do período de retorno do investimento.

O período de retorno do investimento é igual ao número de anos necessários para a recuperação do investimento original, através dos fluxos de caixa líquidos, que são gerados ao longo da vida do projeto. A expressão para o cálculo do período de retorno é apresentada na equação (2-4).

$$PRI = \frac{I}{FCL} \quad (2-4)$$

Onde:

<i>PRI</i>	[ano]	Período de retorno do investimento
<i>I</i>	[€]	Valor do investimento inicial
<i>FCL</i>	[€]	Fluxos de caixa líquidos

Este método ignora o valor temporal do dinheiro, e por isso, por vezes é utilizado o Período de retorno do investimento com os fluxos de caixa líquidos atualizados (Paiva, 2015).

Para comparar projetos de investimentos diferentes, é necessário comparar os custos que decorrem ao longo do período do projeto. No entanto, todos os custos devem ser atualizados ao ano base do período de estudo (Fuller & Petersen, 1996). A atualização dos custos ao longo de projeto podem ser divididos conforme a sua recorrência. Os custos podem ser:

- Custos unitários: surgem, por exemplo, como substituições pontuais de equipamentos (Fuller & Petersen, 1996). A atualização dos custos unitários para o ano base pode ser realizada a partir da equação (2-5).

$$PV = F_t \times \frac{1}{(1 + d)^t} \quad (2-5)$$

Onde:

<i>PV</i>	[€]	Valor atual
<i>F_t</i>	[€]	Valor futuro
<i>d</i>	[%]	Taxa de atualização
<i>t</i>	[anos]	Ano em que se dá o custo

- Custos recorrentes uniformes: como o nome indica, trata-se de um tipo de custo que ocorre todos os anos com um valor fixo. São exemplos destas despesas os custos associados à manutenção dos espaços, custos operacionais, etc., excetuando-se os custos com energia (Fuller & Petersen, 1996). A atualização dos custos recorrente uniformes é realizada a partir da equação (2-6).

$$PV = A_0 \times \frac{(1 + d)^n - 1}{d(1 + d)^n} \quad (2-6)$$

Onde:

<i>A₀</i>	[€]	Despesa periódica anual
----------------------	-----	-------------------------

- Custos recorrentes não uniformes: contrariamente aos custos anteriores, na equação (2-7) é introduzido um parâmetro que permite atualizar os custos não uniformes a uma taxa constante que retrata a evolução do custo da energia, isto porque o seu preço não acompanha a tendência dos restantes produtos (Fuller & Petersen, 1996).

$$PV = A_0 \times \left(\frac{1+e}{d-e} \right) \times \left[1 - \left(\frac{1+e}{1-d} \right)^n \right] \quad (2-7)$$

Onde:

e [%] Taxa real de variação do custo do produto

A taxa utilizada para a atualização dos custos ao ano base, é determinada pelo investidor como a taxa minimamente aceitável para outros investimentos de risco e duração equivalente. Como cada investidor tem a sua linha de pensamento, também as taxas variam de investidor para investidor (Fuller & Petersen, 1996).

A atualização dos custos decorrentes durante o período de estudo pode ser realizada de duas formas distintas: a preços correntes ou a preços constantes. A atualização dos custos a preços correntes, entra em linha de conta com os efeitos da inflação, enquanto, a atualização a preços constantes não. Atendendo que, o valor final dos custos atualizados para o ano base é igual, tanto para um método, como para o outro, na realização deste trabalho foi adotada a metodologia a preços constantes, justificado pela simplicidade que é introduzida por essa escolha.

3. Materiais de mudança de fase: propriedades, tipo e métodos de incorporação

3.1 Introdução

Atendendo às preocupações contemporâneas pelo aumento da eficiência energética dos edifícios, a correta escolha de materiais e a constituição dos elementos construtivos é crucial para alcançar bons resultados. Neste capítulo será apresentado o conceito de material de mudança de fase (PCM – *Phase Change Material*), demonstrando os fundamentos que tornam estes materiais apetecíveis para aplicações que melhoram efetivamente o conforto térmico e podem reduzir os consumos de energia, atuando de forma passiva.

3.2 Processo de mudança de fase

Existem muitos mecanismos que trabalham quando um sólido funde ou um líquido solidifica. A mudança de fase envolve transferência de calor, a possibilidade de sobreaquecimento, armazenamento ou libertação de calor latente, mudanças nas propriedades termofísicas, etc. (Mehling & Cabeza, 2008).

Tanto a fase líquida como a fase sólida são caracterizadas por forças coesivas que mantêm os átomos juntos. Na fase sólida as moléculas vibram em torno de posições fixas, enquanto no estado líquido as moléculas conseguem movimentar-se entre essas posições. Essa energia é

designada por calor ou energia térmica. A temperatura é uma unidade de medida que exprime a energia do estado (Mehling & Cabeza, 2008).

Para que uma substância no estado sólido mude para o estado líquido as forças de coesão têm de ser superadas, a energia necessária para tal é designada por calor latente, que representa a energia térmica que existe entre esses dois níveis (Alexiades & Solomon, 1993).

O armazenamento de energia térmica permite que o “calor” ou “frio” armazenado possa ser utilizado quando necessário, para isso é necessário que o processo de armazenamento de calor seja reversível. Nesse armazenamento de calor ocorrem dois tipos de processos, os físicos e os químicos. Neste documento os processos alvo de estudo são os processos físicos, com especial enfoque no armazenamento de calor latente (Figura 3-1).

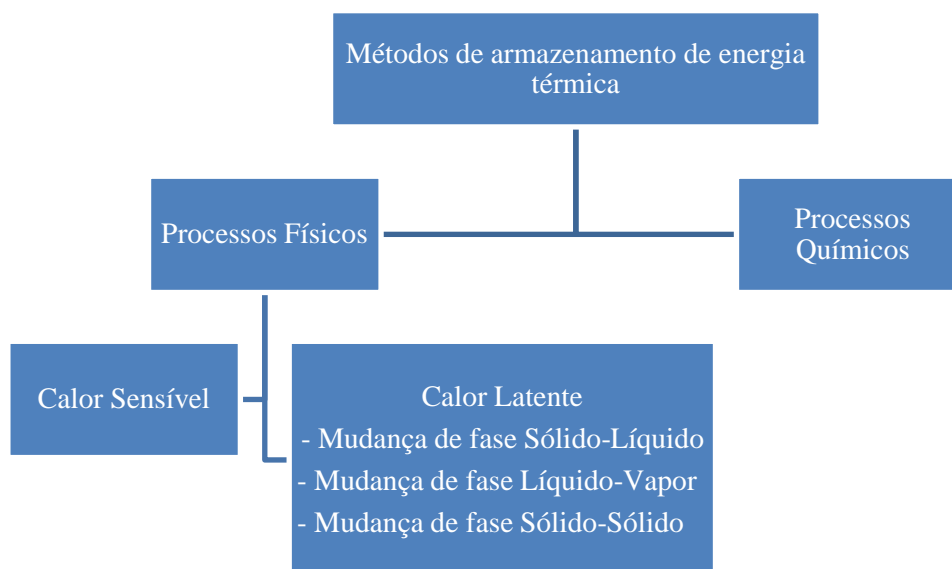


Figura 3-1 Métodos de Armazenamento de calor (Mehling & Cabeza, 2008).

3.2.1 Calor sensível

O armazenamento de energia através de calor sensível é de longe a forma mais comum. Como demonstrado na Figura 3-2, a quantidade de calor armazenado leva a um aumento da temperatura da substância que é facilmente registada por um equipamento de medição (Mehling & Cabeza, 2008).

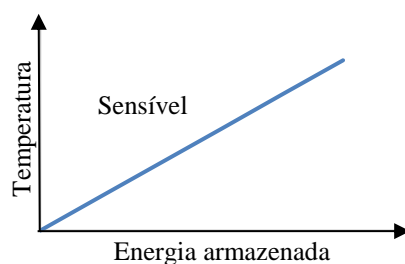


Figura 3-2 Evolução da temperatura durante armazenamento de calor sensível (Mehling & Cabeza, 2008).

A quantidade de calor possível de ser armazenada como calor sensível, ΔQ , depende da diferença de temperatura entre as temperaturas de mudança de fase. Por outro lado, a capacidade calorífica, C , é a taxa de armazenamento de calor para uma dada substância. Muitas vezes a capacidade calorífica é dada em função de uma quantidade de volume ou massa passando-se a designar por calor específico.

A equação (3-1) demonstra o cálculo da quantidade de calor sensível possível de ser armazenado.

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3-1)$$

Onde:

ΔQ	[J/kg]	Armazenamento de calor
ΔT	[°C]	Variação de temperatura
m	[kg]	Massa
C	[J/°C]	Capacidade calorífica
c	[J/(kg.°C)]	Calor específico

3.2.2 Calor latente

O armazenamento de calor latente ocorre quando uma substância muda de fase. Ao fundir ou solidificar é possível armazenar ou libertar grandes quantidades de energia a uma temperatura constante.

Na Figura 3-3 é exibido o comportamento de uma substância que apresenta a mudança de fase de sólido para líquido, podendo observar-se que existe uma evolução sensível até a uma determinada temperatura, designada de temperatura de mudança de fase, onde se inicia o processo de armazenamento de calor latente. A partir desse ponto, a temperatura é constante durante a fusão total dessa substância.

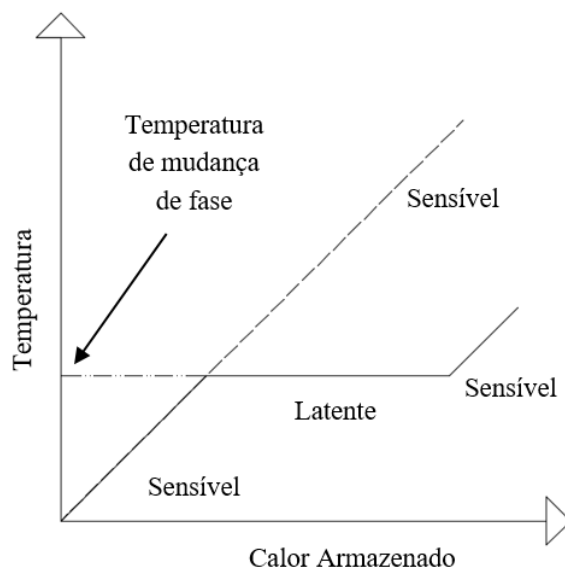


Figura 3-3 Armazenamento de calor durante a mudança de fase sólido-líquido (Mehling & Cabeza, 2008)

Na evolução latente, como a variação de volume é pequena, o calor armazenado é igual à variação da entalpia (Mehling & Cabeza, 2008). A equação (3-2) demonstra o cálculo da quantidade de calor latente possível de ser armazenado.

$$\Delta Q = \Delta H = m \cdot \Delta h \quad (3-2)$$

Onde:

ΔH [J] Variação da entalpia;
 Δh [J/kg] Variação da entalpia específica

Apesar dos PCM's se comportarem de forma idêntica, as suas composições devem ser escolhidas para adequar a sua capacidade de armazenamento e a sua temperatura de fusão à aplicação exigida.

3.3 Propriedades dos materiais de mudança de fase

A utilização de PCM recebeu bastante atenção na última década devido à sua capacidade de armazenar calor latente, absorvendo grandes quantidades de energia, quando esta existe em demasia, e libertando-a, quando esta se encontra em défice. Com esta característica, tornam-se muito apetecíveis para reduzir as necessidades de energia de arrefecimento e para o controlo dos picos de calor verificados num determinado compartimento. Quando bem dimensionado, permite gerar economias de energia, quer nos consumos, quer na compra dos equipamentos necessários para controlar ambiente térmico (Kalnæs & Jelle, 2015).

Existem diversos compostos que podem fazer parte dos PCM's, no entanto, quando aplicados em edifícios, devem possuir certas propriedades que foram enumeradas por Schröder & Gawron, 1981:

- Elevado calor de fusão por unidade de volume e unidade de massa, e elevado calor específico. Isto permite obter melhores resultados de armazenamento de calor latente com um menor volume de material;
- A temperatura de mudança de fase deve ser adequada à aplicação. Para retirar o melhor partido do PCM, a temperatura de mudança de fase deve ser adequada ao clima e localização do edifício;
- Baixa pressão de vapor na temperatura operacional. É uma propriedade necessária para evitar o custo extra ou o perigo de ocorrência de rotura nas cápsulas onde o material está retido;
- Estabilidade química e baixa taxa de corrosão. A estabilidade química permitirá que o material opere a uma determinada temperatura com o efeito desejado por maior período de tempo, reduzindo a possibilidade de reação com o material de encapsulação;
- Não pode apresentar perigo de toxicidade. Para aplicações em edifícios o material não pode emitir gases nocivos, facto que, em caso de incêndio, coloca em perigo a vida das pessoas;
- Não deve ser inflamável. Existem regras muito restritas que têm de ser atendidas pelos PCM's nos edifícios para situações de incêndio;
- Cristalização reproduzível sem degradação. Assim como a estabilidade química, a reprodutibilidade da cristalização durante a mudança de fase sem degradação do material prolongará o seu período de vida;
- Baixa temperatura de sobreaquecimento e elevada taxa de crescimento dos cristais. O sobreaquecimento irá alterar a temperatura de mudança de fase. Um material de mudança de fase atrativo deverá manter sempre a mesma temperatura de mudança de fase e esta deverá ser única para que se consiga projetar uma solução ótima;
- Pequena variação de volume durante a solidificação. Uma grande variação do volume durante a mudança de fase implicará que o material de encapsulação permita a expansão do PCM, diminuindo assim a quantidade de PCM que pode ser colocado por cápsula;
- Elevada condutibilidade térmica. A elevada condutibilidade térmica levará a que o calor se disperse mais rapidamente permitindo assim que o PCM liberte e armazene calor a uma taxa elevada;
- Utilização de materiais abundantes e de baixo custo. Para tornar esta tecnologia mais atrativa, e possível de utilizar em grande escala, é importante que os materiais sejam abundantes e de custo reduzido.

3.4 Tipos de materiais de mudança de fase

Existe uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados como PCM. A grande variedade de materiais dá lugar a uma grande variedade de propriedades que permitem dividir os PCM's em orgânicos, inorgânicos e eutéticos. Estas categorias foram desenvolvidas agrupando os materiais que possuíam propriedades mais semelhantes em termos de entalpia e temperatura de fusão.

Na Figura 3-4 encontram-se categorizados os PCM's por orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas.

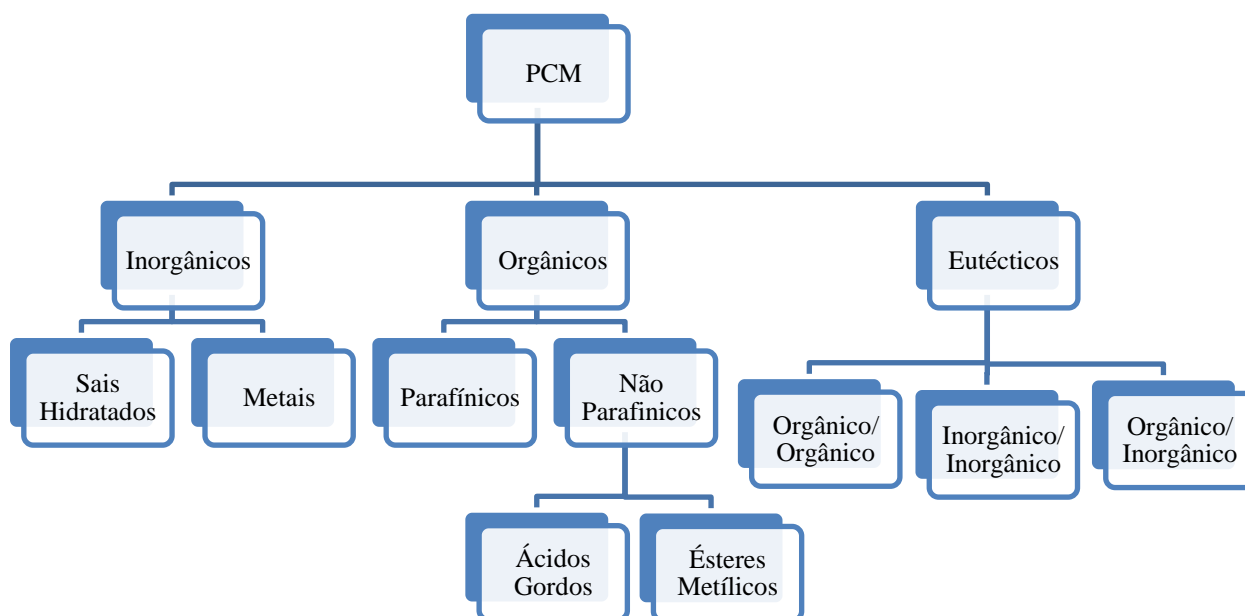


Figura 3-4 Categorização geral dos PCM's (Kalnæs & Jelle, 2015).

3.4.1 Materiais de mudança de fase orgânicos

Os PCM's orgânicos são divididos como parafínicos e não parafínicos. Dentro das principais características é-lhes reconhecida a ausência de segregação durante a mudança de fase e a cristalização com reduzido ou inexistente sobreaquecimento.

Os PCM's parafínicos existem numa grande gama de temperatura. No entanto, possuem baixa condutibilidade térmica (cerca de 0,2 W/(m.K)), não são compatíveis com encapsulamentos plásticos e demonstram-se moderadamente inflamáveis.

Os PCM's não parafínicos incluem os ácidos gordos e os ésteres. Os ácidos gordos são dos mais estudados para aplicações em edifícios. Tal como os materiais parafínicos, exibem baixa condutibilidade térmica (cerca de 0,15 a 0,17 W/(m.K)). Ainda assim, quando aplicados como

parte de sistemas construtivos a baixa condutibilidade térmica contribuirá para melhorar o isolamento.

Em suma, os materiais orgânicos revelam-se interessantes para aplicações em edifícios, no entanto, por serem inflamáveis, devem ser alvo de ponderação no estudo dos impactos em caso de incêndio (Kalnæs & Jelle, 2015).

3.4.2 Materiais de mudança de fase inorgânicos

Os materiais inorgânicos dividem-se em metálicos e sais hidratados. Os inorgânicos metálicos possuem um elevado peso e uma gama de temperaturas de fusão que não se enquadram com as necessidades impostas para aplicações em edifícios, pelo que não serão abordados em detalhe. Os sais hidratados consistem em ligas de sais inorgânicos e água. Existem numa grande variedade e podem ser obtidos a baixo custo. A mudança de fase envolve a hidratação e a desidratação desses sais. Um sal hidratado pode fundir para um sal hidratado com menos água ou para um sal anidro onde os sais e a água ficam completamente separados. As propriedades desejáveis dos sais hidratados incluem o elevado calor de fusão por unidade de volume e a elevada condutibilidade térmica quando comparados com os PCM's orgânicos. Além disso, exibem baixa variação de volume e estão disponíveis em maior quantidade, reduzindo assim o seu custo.

No entanto, os sais hidratados de utilização comercial sofrem de fusão incongruente. Este é um problema frequente que se verifica quando o sal ao libertar a água se transforma num sal anidro ou num sal diferente do que era originalmente. A densidade de um sal anidro pode ser mais elevada, podendo contribuir para que este se desloque para o fundo do seu contentor tornando-se incapaz de voltar a absorver a água. Este fenómeno provocará uma diminuição do material que está efetivamente a mudar de fase, diminuindo consequentemente a eficácia do PCM. Outro problema é o sobreaquecimento que ocorre pela fraca nucleação de muitos sais hidratados. Quando ocorre o sobreaquecimento, exibido na Figura 3-5, a fase líquida do PCM não solidifica na temperatura esperada, mas sim numa temperatura mais baixa (Kalnæs & Jelle, 2015).

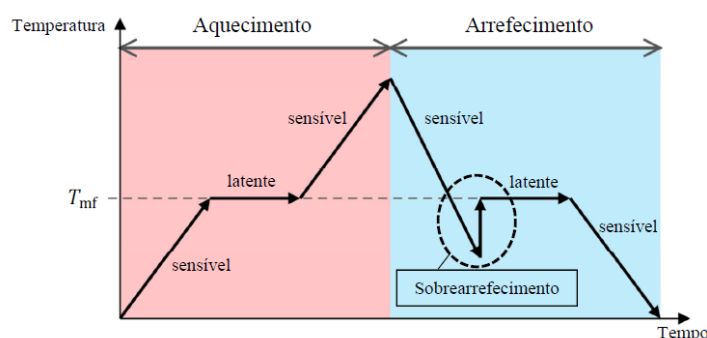


Figura 3-5 Variação da temperatura durante o arrefecimento e aquecimento de um PCM com sobreaquecimento (Carvalho, 2013).

3.4.3 Misturas eutécticas

Uma mistura eutéctica possui dois ou mais componentes que devem solidificar ou fundir congruentemente. Durante a cristalização, a mistura formada pelos componentes tem um comportamento único. Uma mistura eutéctica pode ser composta por materiais orgânicos, inorgânicos e inorgânicos-orgânicos, o que abre um variado leque de combinações.

As misturas eutécticas permitem estabelecer a temperatura de mudança de fase para cada aplicação e ainda armazenar grandes quantidades de calor latente por unidade de volume. No entanto, pela elevada variedade de combinações que se podem conceber é ainda um campo que requer trabalho de investigação para descobrir novas formulações, testá-las e validá-las (Kalnæs & Jelle, 2015).

3.4.4 Comparação

Apresenta-se na Tabela 3-1 uma síntese das principais vantagens e desvantagens associadas a cada uma das categorias descritas anteriormente.

Tabela 3-1 Vantagens e desvantagens dos diversos tipos de PCM (Kalnæs & Jelle, 2015).

	Vantagens	Desvantagens
Orgânico	<ul style="list-style-type: none"> - Sem sobrearrefecimento - Sem segregação - Baixa pressão de vapor - Grande intervalo de temperaturas - Auto nucleação - Compatibilidade com outros materiais - Estabilidade química - Reciclável - Elevado calor de fusão 	<ul style="list-style-type: none"> - Inflamável - Baixa condutibilidade térmica - Baixa variação de volume durante a mudança de fase
Inorgânico	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada variação volumétrica durante a mudança de fase - Maior condutibilidade térmica do que os PCM's orgânicos - Baixo custo - Não inflamável - Mudança de fase bem definida 	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosivo para metais - Sobrearrefecimento - Segregação - Fusão incongruente - Grande variação de volume
Eutécticos	<ul style="list-style-type: none"> - Mudança de fase bem definida - As propriedades podem ser determinadas para aplicações específicas 	<ul style="list-style-type: none"> - Pouca informação sobre as propriedades termofísicas das diversas combinações - Elevado custo

3.5 Métodos de incorporação de materiais de mudança de fase

Existem várias formas para introduzir os materiais de mudança de fase na construção, nomeadamente por incorporação direta, por imersão ou macro/microencapsulação, ou ainda, PCM de forma estabilizada (Kalnæs & Jelle, 2015).

3.5.1 PCM incorporado diretamente

É um método simples que consiste em adicionar o PCM líquido ou pulverizado diretamente nos materiais de construção, tais como, gesso, betão ou argamassas na sua fase de produção. Não é necessário nenhum equipamento próprio para este método, ainda assim, esta técnica apresenta desvantagens de incompatibilidade com outros materiais de construção e a derrame de material (Kalnæs & Jelle, 2015).

3.5.2 PCM por imersão

A imersão é uma tecnologia que consiste em mergulhar materiais de construção tais como o gesso, tijolos ou betão em PCM fundido para que este se impregne nos poros internos por capilaridade. Semelhante à incorporação direta de PCM pode apresentar problemas de derrame, que pode levar a problemas em aplicação a longo prazo (Kalnæs & Jelle, 2015).

3.5.3 PCM encapsulado

Os PCM's desenvolvidos para aplicações em edifícios são concebidos para funcionarem ciclicamente, armazenando energia quando esta existe em excesso e libertando-a quando o contrário se verifica. Durante esse processo o material tem de estar contido para que não se perca, escorrendo para outras superfícies ou, por difusão, migrando através do material.

Os PCM's ao mudarem de fase alteram quer a sua condutibilidade térmica, quer o seu volume. Desta forma, o volume de PCM encapsulado não poderá ser grande pois o aumento da pressão provocado pelo aumento volumétrico do material pode originar a rotura. É igualmente importante que o material de encapsulamento não reaja quimicamente com o PCM ou ocorrerá rapidamente a sua deterioração. Atualmente existem duas formas de encapsular PCM. Os PCM's podem ser micro-encapsulados e macro-encapsulados. Desta forma, existem diversos tamanhos e geometrias para incorporar os PCM's quer incorporando-se diretamente nos materiais, quer como parte de um sistema construtivo (Kalnæs & Jelle, 2015).

3.5.3.1 PCM micro-encapsulado

A microencapsulação é uma tecnologia que permite selar o PCM com um revestimento polimérico de elevado peso molecular mantendo a forma da cápsula, prevenindo assim que se perca o material durante a mudança de fase (Zhou, *et al.*, 2012).

Os métodos de micro encapsulamento podem ser divididos em processos químicos, físico-químicos ou mecânicos esquematizados na Figura 3-6.

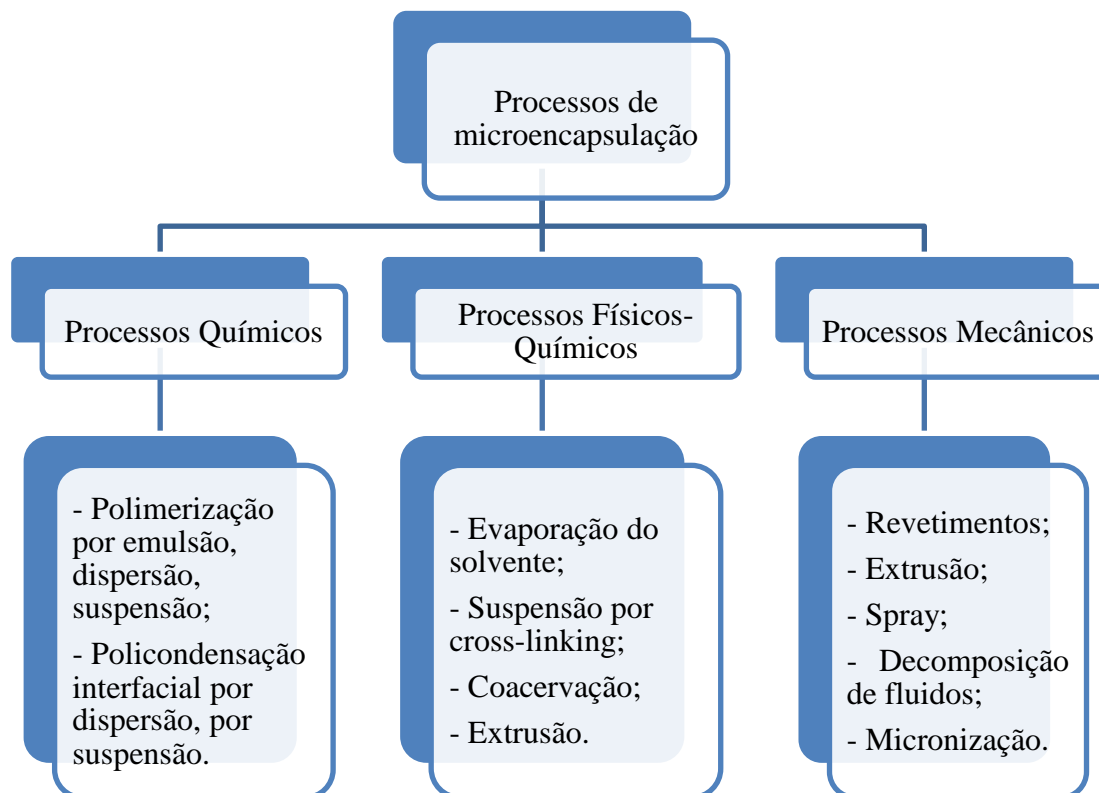


Figura 3-6 Processos de microencapsulação (Silva, 2009).

Um estudo conduzido por Hawlader *et al.*, 2002 sobre PCM parafínicos micro-encapsulados revelou que após 1000 ciclos a geometria da microcápsula se mantinha. A incorporação das microcápsulas nos materiais de construção é uma realidade, no entanto alguns investigadores põem em causa a resistência mecânica das estruturas que incorporam estes materiais. Cabeza, *et al.*, 2007 realizou um estudo onde estudou dois cubos de betão com o mesmo tamanho e geometria, um com PCM e o outro sem, com o objetivo de determinar a possibilidade da utilização de PCM microencapsulados em materiais de construção melhorando a conservação de energia sem prejuízo da resistência mecânica. O cubo de betão com PCM microencapsulado apresentou uma resistência à compressão de 25 MPa e ao corte de 6 MPa, dentro dos requisitos de resistência para betões estruturais. No entanto, outros estudos devem ser desenvolvidos para aferir questões de segurança, como por exemplo a resistência ao fogo (Zhou, *et al.*, 2012).

3.5.3.2 PCM macro-encapsulado

Os PCM's macro-encapsulado podem estar contidos em cápsulas de geometrias variáveis, tais como tubos, esferas ou painéis. O tamanho das cápsulas é geralmente superior a 1 cm (Schossig, *et al.*, 2005).

A Figura 3-7 apresenta um exemplo de PCM macro-encapsulado comercial.



Figura 3-7 PCM macro-encapsulado (Produto da empresa Phase Change energy solutions)

Devido à baixa condutibilidade térmica de alguns PCM, o material encapsulado pode revelar problemas no ciclo solidificação/fusão, isto porque as primeiras zonas a entrar em mudança de estado serão os cantos da cápsula, dificultando o processo para o restante material. (Kalnæs & Jelle, 2015)

O tamanho das macrocápsulas pode revelar-se uma desvantagem, uma vez que as cápsulas devem ser protegidas contra qualquer dano que provoque o derrame do material contido (Schlosser, *et al.*, 2005).

3.5.4 PCM de forma estabilizada

O PCM de forma estabilizada consiste em conter o PCM (como uma parafina) disperso num material de suporte, como por exemplo um polietileno de elevada densidade, para formar um material compósito de forma estável. (Zhou, *et al.*, 2012)

A Figura 3-8 apresenta um exemplo de PCM de forma estabilizada.



Figura 3-8 Exemplo de PCM de forma estabilizada (Zhou, *et al.*, 2012).

Zhang *et al.*, 2006 considera que o PCM de forma estabilizada pode fazer com que os sistemas de armazenamento de calor se tornem mais simples por não necessitarem de contentores especiais para encapsular o PCM. Baseado nas características acima referidas a utilização de PCM de forma estabilizada apresenta potencial quando colocada como material de enchimento no interior de paredes, tetos falso, etc. (Zhou, *et al.*, 2012).

3.6 Materiais de mudança de fase aplicados à construção

Segundo uma revisão feita por Zhu *et al.*, 2009, as aplicações de PCM em edifícios podem ser divididas em quatro categorias:

- Armazenamento gratuito;
- Desvio da carga de pico;
- Sistemas ativos;
- Controlo/regulação térmica: sistemas passivos.

3.6.1 Armazenamento gratuito

Os sistemas de arrefecimento gratuito funcionam armazenando o “frio” que se faz sentir durante a noite, libertando-o durante o dia. O PCM pode ainda ser utilizado dentro dos sistemas de ventilação de forma a armazenar calor quando as temperaturas são altas. Este tipo de sistema é tanto eficaz quanto a temperatura ambiente o permita, uma vez que para que o PCM funcione a temperatura ambiente em relação a temperatura de fusão deve ser superior durante o dia e inferior durante a noite (Zalba, *et al.*, 2004).

3.6.2 Desvio da carga de pico

As cargas de pico que ocorrem durante determinados períodos do dia podem implicar sobrecargas na rede. Além disso, para dar resposta às necessidades de arrefecimento ou aquecimento, resultam muitas vezes em equipamentos sobredimensionados, que aumentam

seriamamente os custos iniciais de qualquer empreendimento. A utilização de PCM permite reduzir as necessidades de energia, amortecendo o pico de consumo e diminuindo as flutuações da procura como demonstrado na Figura 3-9.

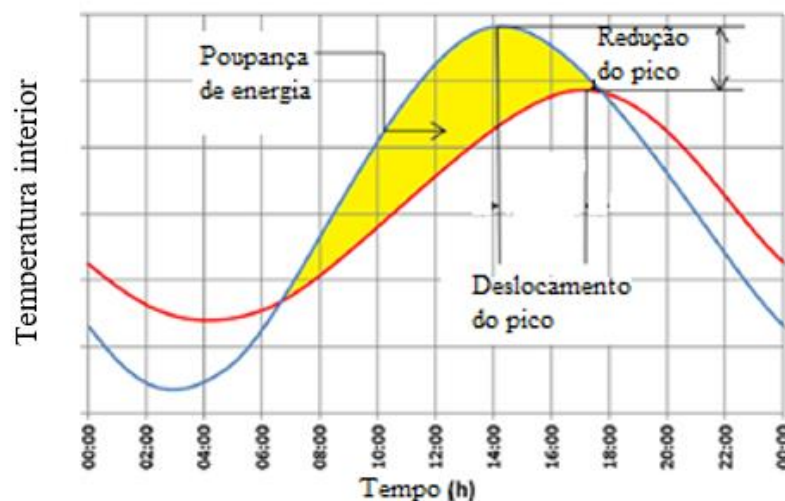


Figura 3-9 Redução e deslocação da carga de pico (Kalnæs & Jelle, 2015).

Sun *et al.*, 2013, realizaram uma revisão sobre as estratégias que podem ser utilizadas para reduzir as cargas de pico utilizando os PCM's, concluindo que essa redução pode estar entre os 10 e os 57%. Os casos em que se verificaram menores reduções foram nas estruturas de grande massa, como estruturas em betão, enquanto as maiores reduções se verificaram em estruturas leves com isolamento térmico.

3.6.3 Sistemas ativos

A capacidade de armazenamento do PCM pode ser integrada em sistemas como bombas de calor, recuperadores de calor e em pisos aquecidos. Estes sistemas podem ser combinados para, como referido anteriormente, intervirem na redução da carga de pico e assim atingir poupanças nos consumos (Kalnæs & Jelle, 2015).

3.6.4 Controlo /regulação térmica: sistemas passivos

Os sistemas passivos têm atraído mais atenção que todos os outros. A integração do PCM nas construções produz um efeito de "inércia térmica fictícia". Este facto é especialmente interessante em construções leves, que são sujeitas a grandes flutuações de temperatura durante o dia, levando, por vezes, a um sobreaquecimento excessivo.

Com o normal funcionamento dos PCM's, a mudança de fase provocada pelo excesso de carga térmica reduzirá o sobreaquecimento. A energia acumulada durante o dia, em condições favoráveis, será libertada durante a noite, reduzindo as necessidades de aquecimento. No entanto, as mais-valias dos PCM's só são aproveitadas quando os ciclos de armazenamento e

libertação de energia são realizados eficazmente, isto é, por vezes a temperatura ambiente não permite ao PCM que liberte toda a energia armazenada, levando a uma redução do seu rendimento. Quando ocorrem estas condições devem ser adotadas medidas que promovam a libertação da energia armazenada (Kalnæs & Jelle, 2015).

Apresentam-se na Figura 3-10 alguns exemplos de aplicações passivas de PCM.



a) Casa modular com aplicação de PCM macro-encapsulado;



b) Casa de campo com utilização de PCM fixo nas paredes e tetos;



c) Fresh Market com PCM preso ao teto;

Figura 3-10 Exemplos de aplicação de PCM em sistemas passivos

A utilização de PCM's é uma solução apreciada e utilizada, por exemplo na Figura 3-10 a) e b) para atingir os requisitos dos edifícios de balanço energético quase nulo. São de fácil aplicação e de colocação versátil como se pode verificar na Figura 3-10 c) com a aplicação de contentores de PCM fixos no teto de uma mercearia, retirando partido das suas características e aproveitando para realizar publicidade.

3.7 Trabalhos já realizados

Existem diversas publicações que abordam diferentes aspetos relacionados com aplicações de PCM em edifícios. Neste subcapítulo são apresentados, resumidamente, os resultados de três trabalhos de referência realizados no âmbito da melhoria do conforto térmico e redução de consumos de aquecimento e arrefecimento.

- **Temperature reduction due to the application of phase change materials (Voelker, *et al.*, 2008)**

O objetivo deste trabalho foi determinar o efeito do PCM na diminuição da temperatura interior de uma divisão. Para tal, foram estudadas duas salas similares, perto de Weimar, na Alemanha. As duas salas de teste foram analisadas para verificar a sua similaridade térmica. A sua constituição construtiva corresponde à categoria de construções leves. O tipo de PCM estudado foi uma argamassa com microcápsulas de PCM parafínico, com um diâmetro aproximado de 5 μm e com um intervalo de fusão entre 25 e 28 °C. Para garantir que o PCM era descarregado durante a noite, os quartos eram ventilados mecanicamente entre as 19 h e as 7 h, com um caudal de 80 m^3/h , equivalente a duas renovações por hora. Durante o dia, a ventilação era desligada, assumindo um valor de 0,5 renovações por hora. A utilização do PCM traduziu-se numa redução da temperatura de pico em cerca de 4 °C. No entanto, o rendimento vai diminuindo caso se verifique uma sequência de dias quentes, que inviabilizem o descarregamento do PCM.

- **Use of PCM materials for the reduction of thermal energy requirements in buildings (Reda, Mazzeo, *et al.*, 2014)**

Este estudo pretende averiguar o desempenho térmico de um edifício onde se colocou PCM nas paredes interiores e tetos. O estudo incidiu em duas localidades italianas, com climas diferentes. Os edifícios analisados eram apartamentos, destinados a habitação, localizados em Milão e Cosenza. Os resultados foram comparados com as necessidades do edifício base. A metodologia de simulação incluiu os seguintes aspetos:

- 1) Determinação das necessidades de aquecimento e arrefecimento com uma espessura de PCM fixada nos 7,5 cm e temperatura de fusão variável entre 19 e 27 °C, aplicado nas paredes interiores ou tetos;
- 2) Determinação das necessidades de aquecimento e arrefecimento com uma temperatura de mudança de fase de 25 °C e espessura com uma variação de 2,5 cm, num intervalo limitado entre os 5 e os 15 cm.

Os resultados para o primeiro cenário revelam que se conseguem maiores poupanças de energia em ambas as estações com a aplicação de PCM nas paredes interiores, para as duas localizações em estudo. A temperatura de mudança de fase que apresenta a maior poupança nas necessidades

de aquecimento corresponde a 21 °C, enquanto nas necessidades de arrefecimento a temperatura que apresenta maior poupança é 25 °C, para ambas as localizações.

Analisando os resultados do segundo cenário, no mês de junho é suficiente uma espessura reduzida (5 cm) para reduzir as necessidades de arrefecimento, verificando-se também que nesse mês, o incremento de espessura não se traduz num aumento de poupança. Já em julho a redução das necessidades para arrefecimento aumenta proporcionalmente com o aumento da espessura do material.

A principal conclusão retirada desse trabalho foi que os benefícios da incorporação de PCM são mais expressivos na estação de arrefecimento do que na estação de aquecimento. A solução construtiva que traz maiores poupanças corresponde à aplicação do PCM nas paredes interiores. Em relação à estação de arrefecimento, conseguem-se poupanças entre os 18 e 58 % para a localidade de Cosenza e entre 30 a 80 % em Milão. Estes valores referem-se às poupanças relativas à variação da espessura do PCM.

- **Analysis of energy requirements versus comfort levels for the integration of phase change materials in buildings (Vautherot *et al.*, 2015)**

Este trabalho teve como objetivos:

- 1) Estudar a influência da definição dos *setpoints* de funcionamento de um sistema de Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado (AVAC – Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado) nos consumos de energia e no conforto térmico, num edifício com PCM;
- 2) Avaliar a influência do intervalo de temperatura de mudança de fase dos PCM's nos consumos de energia e no conforto térmico;
- 3) Demonstrar que a escolha do PCM deve basear-se num balanço entre os consumos e o conforto térmico.

O edifício alvo de estudo foi uma habitação de dois pisos, localizada em Auckland, na Nova Zelândia. O modelo de simulação foi criado a partir das características geométricas, físicas e de ocupação reais e validado com medições feitas *in situ*.

A escolha do material utilizado recaiu sobre as placas de gesso impregnadas com PCM, com uma capacidade de armazenamento de calor latente de 33,5 kJ/kg. Neste trabalho, foram simuladas as seguintes configurações: sem PCM, PCM 18-23 °C, PCM 19-24 °C, PCM 20-25 °C, PCM 21-26 °C. Como se pode verificar, o intervalo de mudança de fase é sempre de 5 °C, mudando apenas a temperatura em que a fusão se inicia.

Os resultados da análise das necessidades energéticas revelaram que se o *setpoint* definido para a estação de aquecimento estiver dentro da gama de temperaturas de mudança de fase, os consumos tendem a aumentar, devido à energia extra necessária para fazer face à maior massa térmica.

A melhor solução em relação às questões energéticas foi a introdução das placas de gesso impregnadas com PCM correspondente ao intervalo de mudança de fase de 20 e 25 °C, com um *setpoint* para o sistema de AVAC de 20 °C.

Concluiu-se também que a adição de PCM por si só não constitui poupança nos consumos. O desempenho do edifício é tanto melhor, quanto maior for a sinergia entre as características dos PCM's e os *setpoints* definidos para o sistema de AVAC.

4. Metodologia

4.1 Enquadramento

Neste capítulo é apresentada a ferramenta informática utilizada nas simulações térmicas e energéticas. São evidenciadas as suas principais características e a formulação do cálculo da transferência de calor em superfícies que contenham materiais de mudança de fase. É também apresentado e descrito o edifício alvo de estudo, nomeadamente as suas características físicas, geométricas e os pressupostos associados à sua utilização. No final é apresentada a metodologia utilizada para a realização do trabalho e análise económica e de sensibilidade.

4.2 Simulação térmica e energética

4.2.1 *EnergyPlus*

Durante mais de 20 anos, o governo dos Estados Unidos financiou dois programas de simulação energética, o DOE-2¹ e o BLAST². O BLAST era financiado pelo Departamento de Defesa, enquanto o DOE-2 era financiado pelo Departamento da Energia. A principal diferença entre estes dois programas consistia no método de cálculo da carga (Crawley, *et al.*, 2000).

¹ DOE-2 – *Software* financiado pelo estado norte-americano, criado no início da década de 1990 por *James J. Hirsch & associates* (JH) em colaboração com *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL)

² BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) – *Software* financiado pelo estado norte-americano, criado no início da década de 1990.

Ao longo dos anos, muitas pessoas começaram a questionar o motivo que levava o governo a financiar dois programas diferentes, porém com capacidades semelhantes. Com o objetivo de responder a essas questões, desenvolveram-se alguns encontros para discutir a forma mais apropriada de fundir as melhores capacidades de cada programa. Sem grande desenvolvimento, o Departamento da Energia tomou iniciativa e começou a desenvolver um programa novo, designado de *EnergyPlus* (Crawley, *et al.*, 2000).

Resumidamente, o *EnergyPlus* é um programa de simulação energética e de carga térmica. Através da descrição do edifício e dos sistemas mecânicos, fornecida pelo utilizador, o *EnergyPlus* é capaz de calcular os consumos para o aquecimento e arrefecimento necessários para manter a temperatura do ar interior do edifício dentro de limites predeterminados (Crawley, *et al.*, 2000).

Pereira (2015), sintetizou algumas das funcionalidades mais relevantes do *EnergyPlus*:

- Definição dos intervalos de tempo para interação entre zonas térmicas, o ambiente e os sistemas de AVAC;
- Simulação em intervalos de tempo entre 1 minuto e 1 hora utilizando dados climáticos horários do clima local;
- Ficheiros de *input* e *output* em ASCII;
- Troca de calor por condução entre os vários elementos construtivos;
- Melhoria nas transferências de calor com o solo usando modelos tridimensionais;
- Transferência de massa combinando humidade relativa com a adsorção/desadsorção;
- Modelos de janelas e biblioteca comercial com vários tipos de janelas;
- Controlo da iluminação;
- Configuração de sistemas de AVAC.

Em suma, o *EnergyPlus* tornou-se numa coleção de diversos módulos, esquematizados na Figura 4-1, que trabalham em conjunto para calcular a energia necessária para aquecer e arrefecer um edifício.

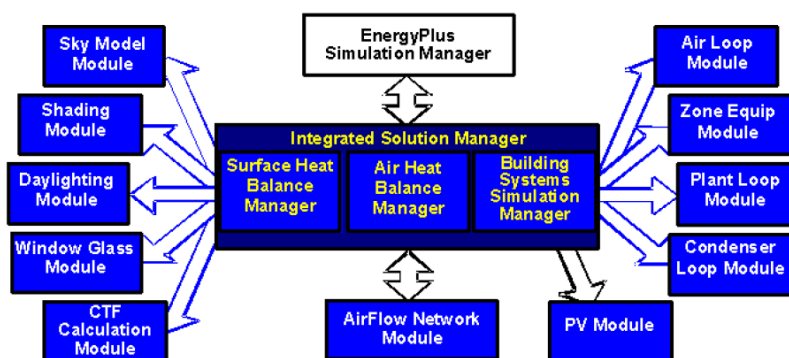


Figura 4-1 Estrutura programática do *EnergyPlus*

4.2.2 DesignBuilder

O *DesignBuilder* é uma ferramenta “*user-friendly*”, desenvolvida em torno das capacidades do *EnergyPlus*, que permite criar modelos virtuais de edifícios usufruindo de uma grande base de dados, aumentando a produtividade do utilizador. Neste trabalho utilizou-se a versão 3.4.0.041 do *DesignBuilder*, versão a partir da qual foi introduzida a possibilidade de incluir materiais de mudança de fase (Pereira, 2015).

O *DesignBuilder* é um programa que permite introduzir elementos de forma rápida e precisa, contribuindo para ganhos significativos de produtividade, destacando-se as seguintes características, enumeradas por Pereira (2015):

- Criação rápida de modelos 3D de edifícios, permitindo importar plantas e usar ferramentas de desenho;
- Divisão do edifício por zonas usando ferramentas próprias;
- Introdução de sistemas (AVAC, águas sanitárias, iluminação) com facilidade para todo o edifício ou por cada zona;
- Visualização gráfica do modelo em 3D, (Figura 4-2);
- Introdução de ganhos relacionados com a atividade de forma rápida e fácil;
- Facilidade na exportação dos resultados das simulações.

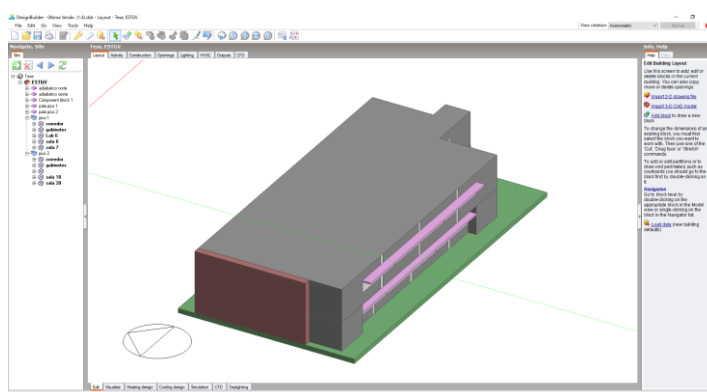


Figura 4-2 Ambiente de trabalho do *DesignBuilder*

4.2.3 Algoritmo de cálculo *CondFD*

No *EnergyPlus* as superfícies construtivas de uma zona térmica são simuladas apenas na direção que atravessa as várias camadas dessas superfícies. O algoritmo convencional utilizado para esse cálculo é designado por CTF (*Conduction Transfer Functions*). Este algoritmo possui a vantagem de apenas necessitar de uma única equação linear para determinar a transferência de calor através de um conjunto de camadas. Para o executar, é necessário calcular um conjunto de coeficientes, que são determinados uma única vez para cada superfície construtiva. Este método torna a simulação mais “leve”, no entanto, deixa de ter utilidade quando se pretende ter

em conta propriedades térmicas variáveis com a temperatura, a entalpia ou a condutibilidade térmica (*Engineering reference, EnergyPlus documentation, 2015*).

Quando foram introduzidos os materiais de mudança de fase nos modelos de simulação, foi necessário criar um algoritmo que tivesse em consideração a variabilidade das propriedades térmicas. Para isso, foi desenvolvido o algoritmo CondFD (*Conduction Finite Differences*). Este algoritmo permite duas opções para a formulação do modelo de diferenças finitas: o método de *Crank-Nicholson* e o método implícito completo (*Engineering reference, EnergyPlus documentation, 2015*).

O método de *Crank-Nicholson* é um esquema semi-implícito, baseado na solução aproximada de *Adams Moulton*. Este método é considerado de segunda ordem no tempo e utiliza um esquema implícito de diferenças finitas, complementado com uma função de entalpia-temperatura que permite a atualização das propriedades a cada iteração (*Engineering reference, EnergyPlus documentation, 2015*). A formulação para um nó interno é apresentada na equação (4-1):

$$\rho c_p \Delta x \frac{(T_i^{j+1} - T_i^j)}{\Delta t} = \left| \left(k_W \frac{(T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1})}{\Delta x} + k_E \frac{(T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1})}{\Delta x} \right) + \left(k_W \frac{(T_{i+1}^j - T_i^j)}{\Delta x} + k_E \frac{(T_{i-1}^j - T_i^j)}{\Delta x} \right) \right| \quad (4-1)$$

Onde:

T	[K]	Temperatura no nó;
I	[-]	Nó modelado;
$i+1$	[-]	Nó adjacente à construção interior;
$i-1$	[-]	Nó adjacente à construção exterior;
$j+1$	[-]	Novo intervalo de tempo;
j	[-]	Intervalo de tempo anterior;
Δt	[s]	Intervalo de tempo de cálculo;
Δx	[m]	Espessura da camada usada para cálculo das diferenças finitas (sempre menor que a espessura do elemento construtivo);
c_p	[J/(kg.K)]	Calor específico do material;
k_W	[W/(m ² .K)]	Condutibilidade térmica da interface entre o nó i e o nó $i+1$ (4-2);
k_E	[W/(m ² .K)]	Condutibilidade térmica da interface entre o nó i e o nó $i-1$ (4-3);
ρ	[kg/m ³]	Massa volúmica do material.

$$k_W = \frac{(k_{i+1}^{j+1} + k_i^{j+1})}{2} \quad (4-2)$$

$$k_E = \frac{(k_{i-1}^{j+1} + k_i^{j+1})}{2} \quad (4-3)$$

O esquema implícito completo é igualmente baseado na solução de *Adams-Moulton*, porém é considerado de primeira ordem no tempo (*Engineering reference, EnergyPlus documentation, 2015*). Este método apresenta-se na equação (4-4).

$$\rho c_p \Delta x \frac{(T_i^{j+1} - T_i^j)}{\Delta t} = \left(k_W \frac{(T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1})}{\Delta x} + k_E \frac{(T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1})}{\Delta x} \right) \quad (4-4)$$

Ambos os métodos são acompanhados por uma segunda equação que introduz a entalpia e a temperatura, equação (4-5).

$$h_i = HTF(T_i) \quad (4-5)$$

A função de entalpia-temperatura utiliza os dados relativos ao material, introduzidos pelo utilizador. Esta função permite que em todas as iterações a entalpia nos nós seja atualizada (*Engineering reference, EnergyPlus documentation, 2015*). Uma vez atualizada, em mudança de fase, essas entalpias são utilizadas para determinar o c_p variável, (4-6).

$$Cp = \frac{h_{i,new} - h_{i,old}}{T_{i,new} - T_{i,old}} \quad (4-6)$$

Onde:

$h_{i,new}$	[J/kg]	Valor da entalpia da nova iteração;
$h_{i,old}$	[J/kg]	Valor da entalpia da iteração anterior;
$T_{i,new}$	[K]	Valor da temperatura da nova iteração;
$T_{i,old}$	[K]	Valor da temperatura da iteração anterior.

Desta forma, fica assegurado que é utilizado o valor correto de entalpia para calcular o calor correto do c_p , variável para cada *timestep*.

A discretização espacial realizada com o método *CondFD* depende da difusibilidade térmica do material (α), do intervalo de tempo (Δt) e de uma constante de discretização espacial (C) que é basicamente o inverso do número de Fourier, equação (4-7), (*Engineering reference, EnergyPlus documentation, 2015*).

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad (4-7)$$

Onde:

Fo	[-]	Número de Fourier;
α	[m ² /s]	Difusibilidade térmica.

A constante de discretização espacial é baseada no critério de estabilidade que requer para o modo explícito valores superiores a 2, ou um número de *Fourier* inferior a 0,5. Contudo, os métodos implícitos não possuem os mesmos requisitos de estabilidade que os métodos explícitos. Desta forma, o *EnergyPlus* utiliza por defeito o valor 3, que é utilizado de forma algo arbitrária (*Engineering reference, EnergyPlus documentation, 2015*).

O método de discretização espacial permite ao algoritmo *CondFD* determinar diferentes espaçamentos para os nós, dependendo dos materiais presentes nas superfícies compostas por camadas, tais como as paredes e as coberturas. O número de nós é obtido pelo arredondamento resultante da divisão do comprimento da camada pelo Δx calculado na equação (4-8). De seguida o valor de Δx volta a ser calculado dividindo a espessura da camada pelo número de nós (*Engineering reference, EnergyPlus documentation, 2015*).

$$\Delta x = \sqrt{C\alpha\Delta t} \quad (4-8)$$

Onde:

C [-] Constante de discretização.

O número de nós é obtido pelo arredondamento resultante da divisão do comprimento da camada pela equação (4-8). De seguida, o valor de Δx volta a ser calculado dividindo a espessura da camada pelo número de nós (*Engineering reference, EnergyPlus documentation, 2015*).

O algoritmo *CondFD* permite ainda definir um coeficiente de temperatura que altera a condutibilidade térmica em cada iteração. Assim, a condutibilidade térmica pode ser obtida pela seguinte equação:

$$k = k_0 + k_1(T_i - 20) \quad (4-9)$$

Onde:

k_0 [W/(m.K)] Condutibilidade do material a 20°C;
 k_1 [W/(m.K)] Valor que representa a mudança da condutibilidade térmica por grau de diferença em relação a k_0 .

4.3 Caso de estudo

4.3.1 Metodologia

Este trabalho divide-se em quatro fases essenciais:

- 1) Criação e validação do modelo de simulação;
- 2) Análise geral;
- 3) Análise detalhada;
- 4) Análise económica e de sensibilidade.

A fase de criação e validação do modelo de simulação consistiu na recolha das informações relativas ao edifício da ESTGV, no que diz respeito à sua geometria, propriedades dos materiais e ocupação, entre outros *inputs* necessários para a conceção do modelo. Já com o modelo de simulação criado, é necessário validá-lo. Para o validar, recolheram-se os dados climáticos locais e a temperatura de bolbo seco no interior da Sala 6 durante o período de 29 de março a 23 de abril.

Concluída a validação, seguiu-se a realização da “Análise geral”, que consistiu na simulação de diferentes soluções construtivas com PCM aplicadas nas salas de aula do edifício para um período de um ano. Os PCM’s selecionados para este trabalho fazem parte da base de dados existente no *DesignBuilder* e agrupam-se em quatro famílias, cada uma com cinco temperaturas de mudança de fase (Tabela 4-1).

Tabela 4-1 Tipos de PCM

Tipo de PCM	Temperatura de mudança de fase				
BioPCM M27	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C
BioPCM M51	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C
BioPCM M91	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C
BioPCM M182	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C

Para os cenários de simulação, foram selecionados os três primeiros grupos de PCM (M27, M51 e M91) e as temperaturas de mudança de fase de 21, 23, 25 e 27°C. Tendo em conta as características dos PCM’s, a utilização da temperatura de mudança de fase de 29 °C foi descartada por estar claramente fora da zona de conforto. O grupo M182 não foi utilizado por ser uma solução pouco usual e de elevado custo, de acordo com informações recolhidas junto do fabricante.

As propriedades dos PCM’s M27, M51 e M91 são apresentadas na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 Propriedades dos PCM's utilizados

	Espessura	Condutividade	calor específico	Densidade
	[m]	[W/(m-K)]	[J/(kg-K)]	[kg/m ³]
M 27	0,0112	0,2	1970	235
M 51	0,0208	0,2	1970	235
M 91	0,0371	0,2	1970	235

Segundo Vautherot, *et al.*,(2015), o principal motivo para a utilização de PCM em edifícios incide na sua capacidade para reduzir as flutuações da temperatura interior, aumentando o conforto térmico e diminuindo as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Adicionalmente, é comum em Portugal encontrarmos edifícios escolares sem sistemas de

arrefecimento, pelo que uma análise sem os incluir faz todo o sentido. Assim, a análise geral foi subdividida em duas fases: 1) análise com sistema de AVAC; 2) análise sem arrefecimento.

Com o objetivo de determinar se a quantidade de PCM aplicado influenciava quer na análise com sistema de AVAC, quer na análise sem sistema de arrefecimento a colocação de PCM nas salas dividiu-se em dois cenários, apresentados na Figura 4-3.

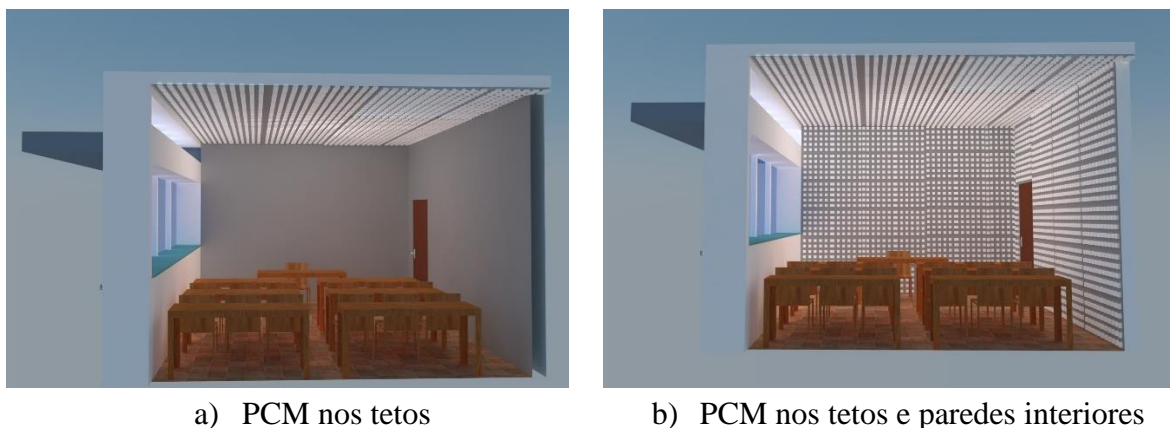


Figura 4-3 Colocação de PCM

Na análise com sistema de AVAC, é estudado o efeito dos PCM's nas necessidades energéticas, quer na estação de aquecimento, quer na estação de arrefecimento. A análise sem arrefecimento, é desenvolvida para aferir o efeito dos PCM's na melhoria do conforto térmico, através da diminuição dos períodos de sobreaquecimento. Da síntese destas análises, resulta a escolha das 5 melhores soluções de PCM, por sala e por cenário de simulação, que são utilizadas para a análise detalhada.

Na análise detalhada, os PCM's resultantes da análise com sistema de AVAC, são utilizados para perceber qual o seu efeito na redução da necessidade de pico diária e no descolamento temporal do mesmo. Já a análise sem arrefecimento consiste em averiguar sobre a eficiência do ciclo de carga e descarga dos PCM's. Esta análise foi realizada para uma semana típica de verão.

Por fim, é realizada uma análise de sensibilidade económica, utilizando o período de retorno do investimento como critério de avaliação.

A metodologia deste trabalho é apresentada esquematicamente na Figura 4-4.



Figura 4-4 Metodologia de trabalho

4.3.2 Caracterização do edifício

4.3.2.1 Localização

Este trabalho foca-se num bloco do edifício da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV), com a localização apresentada na Figura 4-5.



Figura 4-5 Localização do edifício em estudo

Este bloco foi selecionado tendo em consideração que apresenta uma taxa de ocupação mais elevada, potenciando, assim, os ganhos internos e, conseqüentemente, o risco de sobreaquecimento.

4.3.2.2 Arquitetura

O bloco alvo de estudo faz parte da infraestrutura da ESTGV implementada dentro do complexo escolar. Desta forma, não possui edifícios adjacentes que lhe proporcionam qualquer sombreamento, como se observa na Figura 4-6.



Figura 4-6 Fachadas Sul e Este do bloco de aulas

O corpo em estudo tem dois pisos e inclui os seguintes espaços:

- Piso térreo (Figura 4-7)
 - 1 Laboratório de informática;
 - 2 Salas de aula;
 - 7 Gabinetes;
 - 1 Instalação sanitária;
 - Arrumos.

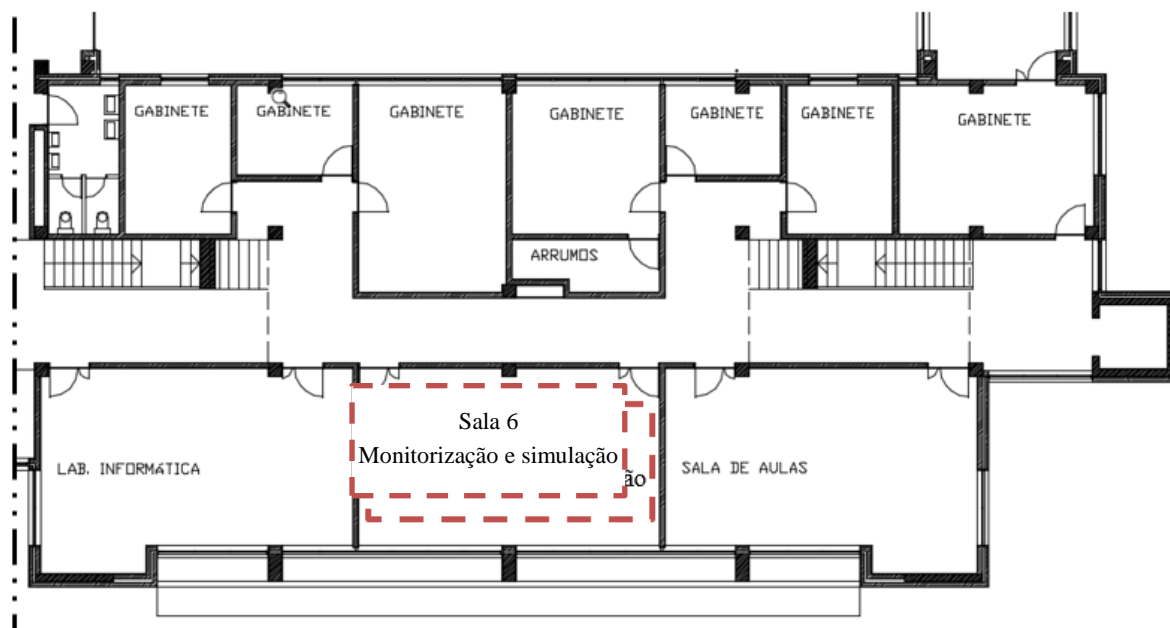


Figura 4-7 Piso térreo, Departamento de Gestão de Empresas da ESTGV

- Piso 1 (Figura 4-8)
 - 1 Laboratório de informática;
 - 2 Salas de aula;
 - 8 Gabinetes.

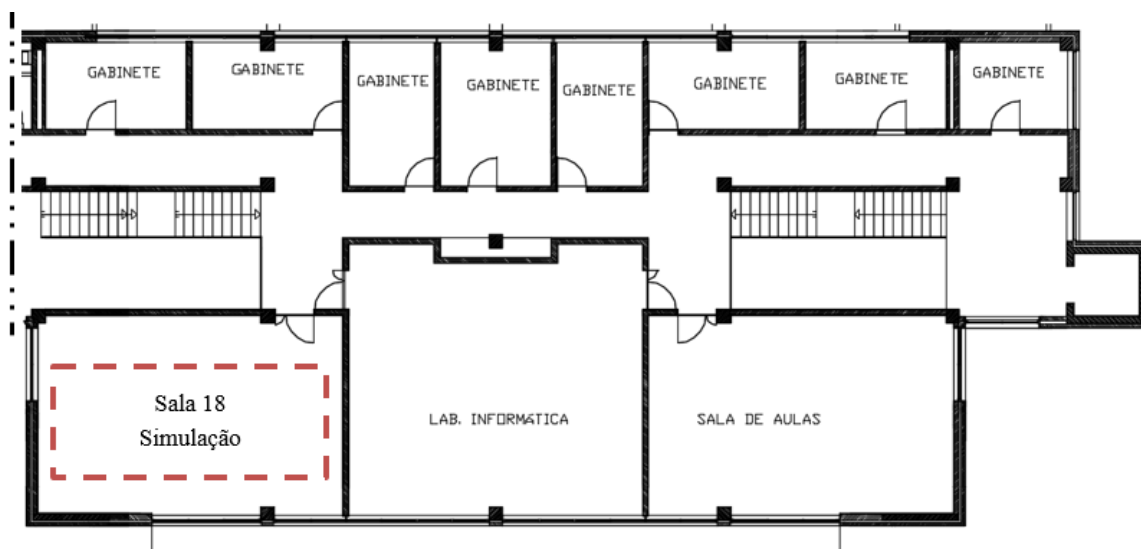


Figura 4-8 Piso 1, Departamento de Gestão de Empresas da ESTGV

4.3.2.3 Elementos construtivos

Vieira (2011) desenvolveu um trabalho de diagnóstico e proposta de reabilitação de algumas patologias identificadas no edifício da ESTGV. Desse trabalho, consta um levantamento da constituição dos elementos construtivos do edifício, consultados na Memória Descritiva do Projeto de Arquitetura, essa informação foi aproveitada neste trabalho.

- Piso térreo

A constituição do piso térreo apresenta-se esquematicamente na Figura 4-9 com a seguinte constituição:

1. Ladrilhos cerâmicos e argamassa de colagem [1,5 cm];
2. Betonilha hidrófugada [3 cm];
3. Membrana de impermeabilização [1,5 cm];
4. Massame [20 cm];
5. Enrocamento [15 cm].

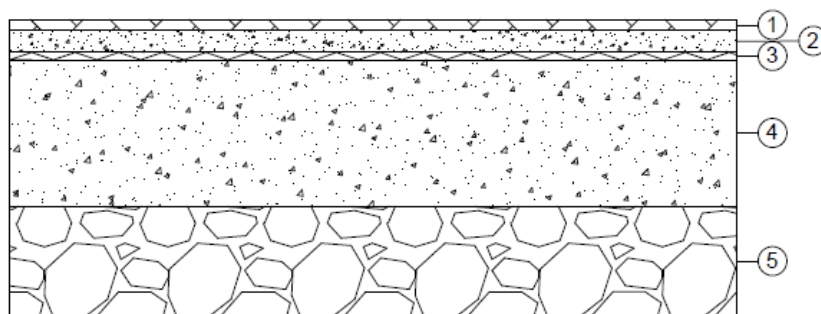


Figura 4-9 Pormenor da constituição do pavimento térreo

- Paredes interiores

A constituição das paredes interiores apresenta-se esquematicamente na Figura 4-10 com a seguinte constituição:

1. Reboco [1,5 cm];
2. Tijolo vazado [15 cm];
3. Reboco [1,5 cm].

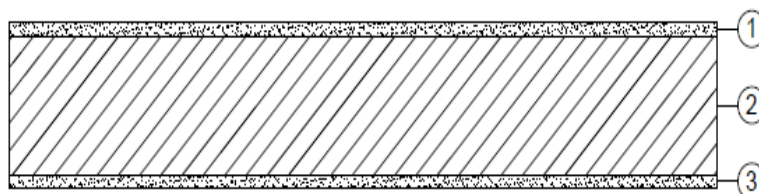


Figura 4-10 Pormenor da constituição das paredes interiores

- Paredes exteriores

A constituição das paredes interiores apresenta-se esquematicamente na Figura 4-11 com a seguinte constituição (do exterior para o interior):

1. Reboco exterior monomassa [2 cm];
2. Tijolo vazado [11 cm];
3. Caixa-de-ar [4 cm];
4. Isolamento térmico em placas de polistireno expandido [3 cm];
5. Tijolo vazado [15 cm];
6. Reboco interior [1,5 cm].

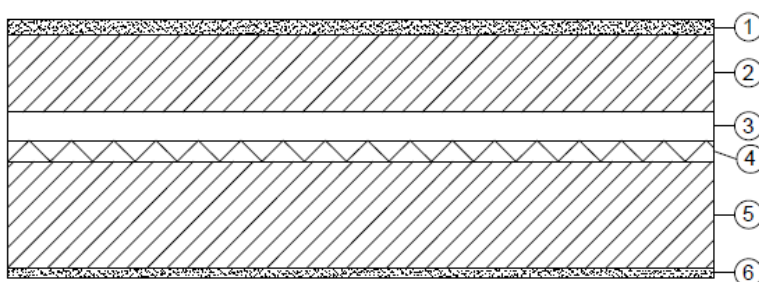


Figura 4-11 Pormenor da constituição das paredes exteriores

- Laje de piso

A constituição da laje de piso apresenta-se esquematicamente na Figura 4-12 com a seguinte constituição:

1. Ladrilhos cerâmicos e argamassa de colagem [1,5 cm];
2. Betonilha de regularização [3 cm];
3. Betão leve [10 cm];
4. Betão estrutural [30 cm];
5. Reboco [1,5 cm].

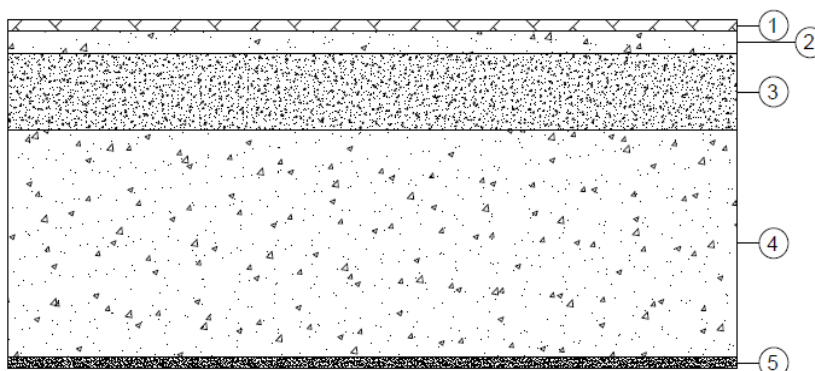


Figura 4-12 Pormenor da constituição da laje de piso

- Cobertura plana

A constituição da cobertura plana apresenta-se esquematicamente na Figura 4-13 Pormenor da constituição cobertura com a seguinte constituição:

1. Camada de proteção pesada composta por agregado grosso rolado [5 cm];
2. Isolamento térmico em placas de XPS (poliestireno extrudido) [5 cm];
3. Membrana impermeabilizante em PVC [0,15 cm];
4. Camada de forma: betão celular [22 cm];
5. Betão estrutural [20 cm];
6. Reboco interior [1,5 cm].

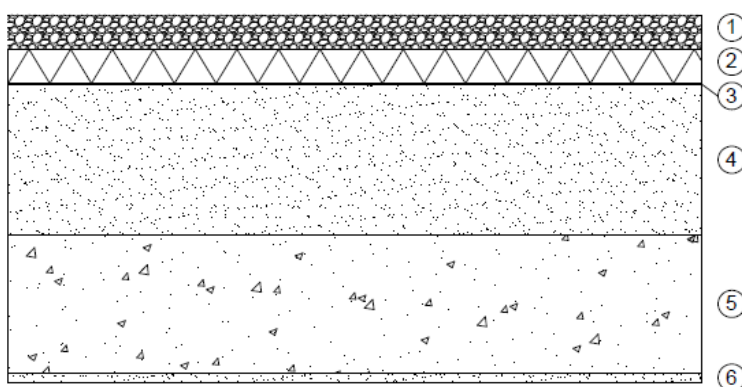


Figura 4-13 Pormenor da constituição cobertura plana

- Envidraçados e caixilharias

As caixilharias são de cor verde, de alumínio, sem corte térmico. Quanto aos envidraçados, não foi possível encontrar registos das espessuras dos vidros e da caixa-de-ar. Para ultrapassar esse contratempo, foi utilizado o medidor de espessuras, disponibilizado pela *Saint Gobain Glass* que permitiu estimar que se trata de um vidro duplo, com vidros de 6 mm e caixa-de-ar de 13 mm. Os vãos envidraçados possuem ainda proteção interior com persianas metálicas de cor verde, ajustáveis manualmente (Figura 4-14).



Figura 4-14 Proteção interior dos vãos envidraçados

- Resumo das propriedades

Resumindo as informações recolhidas sobre os elementos construtivos, é possível apresentar na Tabela 4-3 uma síntese global dos materiais e das suas principais propriedades com relevância para a análise térmica e energética.

Tabela 4-3 Resumo das propriedades/constituição dos elementos construtivos

	Camada	e [cm]	λ [W/(m.°C)]	C_p [W/(m.°C)]	ρ [kg/m ³]	U [W/(m ² .°C)]
Piso térreo	Ladrilho cerâmico e argamassa de colagem	1,5	1,150	1000	3500	1,429
	Betonilha hidrófugada	3	1,750	940	2300	
	Massame	20	2,500	1000	2400	
	Enrocamento	15	1,750	940	2300	
Parede interior	Reboco interior	1,50	0,510	960	1120	1,412
	Tijolo furado	15	0,385	982,31	650	
	Reboco exterior	1,50	0,510	960	1120	
Paredes exteriores	Reboco exterior monomassa	2	0,870	840	2085	0,558
	Tijolo vazado	11	0,407	984,81	670	
	Caixa-de-ar	4	0,222	1007	1,18	
	Isolamento térmico em placas de polistireno expandido	3	0,040	1400	15	
	Tijolo vazado	15	0,407	984,81	670	
	Reboco interior	1,50	0,510	960	1120	
Laje de piso	Ladrilhos cerâmicos e argamassa de colagem	1,50	1,150	1000	3500	1,910
	Betonilha de regularização	3	1,750	940	2300	
	Betão leve	10	2,500	1000	2400	
	Betão estrutural	30	2,500	1000	2400	
	Reboco	1,50	0,510	960	1120	
Cobertura plana	Camada de proteção pesada composta por agregado grosso	5	0,360	840	1840	0,471
	Isolamento térmico em placas de XPS	5	0,034	1400	35	
	Membrana impermeabilizante em PVC	0,15	0,160	1000	1380	
	Camada de forma: betão celular	22	1,350	1000	1800	
	Betão estrutural	20	2,500	1000	2400	
	Reboco interior	1,50	0,510	960	1120	

4.3.2.4 Ganhos internos

Criar um modelo de simulação que reproduza um comportamento semelhante ao de um edifício real, requer não só a introdução da geometria, mas também as informações relativas à sua utilização. Enquanto os parâmetros da geometria física são bem definidos, a utilização de um edifício de serviços pode ser altamente variável. No entanto, aspetos como a iluminação, utilização, equipamentos etc. tiveram de ser definidos para quantificar os ganhos internos. Os ganhos internos incluem: ocupação, iluminação e equipamentos.

- Ocupação e equipamentos

A utilização do edifício destina-se ao leccionamento de aulas. Nesse sentido, variáveis como o horário de utilização das salas, número de alunos que frequentam as aulas e número de equipamentos ligados são difíceis de quantificar. O programa *DesignBuilder* possui uma base de dados que permite a introdução de diversos dados relativos à atividade decorrente no edifício. A definição do metabolismo é uma delas, dada a utilização esperada, considerou-se a atividade metabólica correspondente à opção *reading seated* (leitura sentado) equivalente a 99 W/pessoa.

Recorrendo ao Departamento de Gestão de Empresas, recolheram-se informações sobre o horário de funcionamento das salas, a ocupação média registada e o número de equipamentos tais como computadores e projetores. Essas informações foram incluídas no modelo de simulação e encontram-se sumarizadas na Tabela 4-4. De acordo com o Anexo XV do Decreto-lei 79/2006, os equipamentos presentes numa sala de aula assumem 5 W/m², porém para efeitos de validação esse valor foi reduzido para 3 W/m².

Tabela 4-4 Ocupação e equipamentos nas diferentes zonas

	Zona	Densidade [n°. pessoas/m ²]	Área [m ²]	Número de pessoas	Equipamentos [W]	Ganhos [W]
Piso térreo	Laboratório 6	0,26	57	15	170	1655
	Sala 7	0,27	57	15	0	1511
	Sala 6	0,29	53	15	0	1507
	Gabinetes	0,03	154	5	0	457
	Corredor	0,05	131	7	0	649
Piso 1	Laboratório 10	0,06	80	5	240	716
	Sala 18	0,24	63	15	0	1488
	Sala 20	0,24	63	15	0	1489
	Gabinetes	0,05	110	5	0	543
	Corredor	0,04	156	7	0	693

- Iluminação

As salas de aula possuem boa iluminação natural, no entanto, existem períodos em que não se apresenta suficiente. A partir das luminárias existentes nas salas de aula, foram calculados os ganhos internos decorrentes da iluminação, utilizando a ferramenta de cálculo das potências de iluminação e equipamentos fornecida pelo *ITeCons* (Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade). De acordo com essa ferramenta de cálculo o valor médio a utilizar seria de $4,18 \text{ W/m}^2$, no entanto, ao validar o modelo esse valor fixou-se nos 3 W/m^2 .

De acordo com o Anexo XII do Decreto lei 79/2006, o perfil de percentagem de iluminação seria igual ao apresentado na Figura 4-15, no entanto, conhecendo a real utilização das salas de aula esse perfil não é o que melhor se adequa.

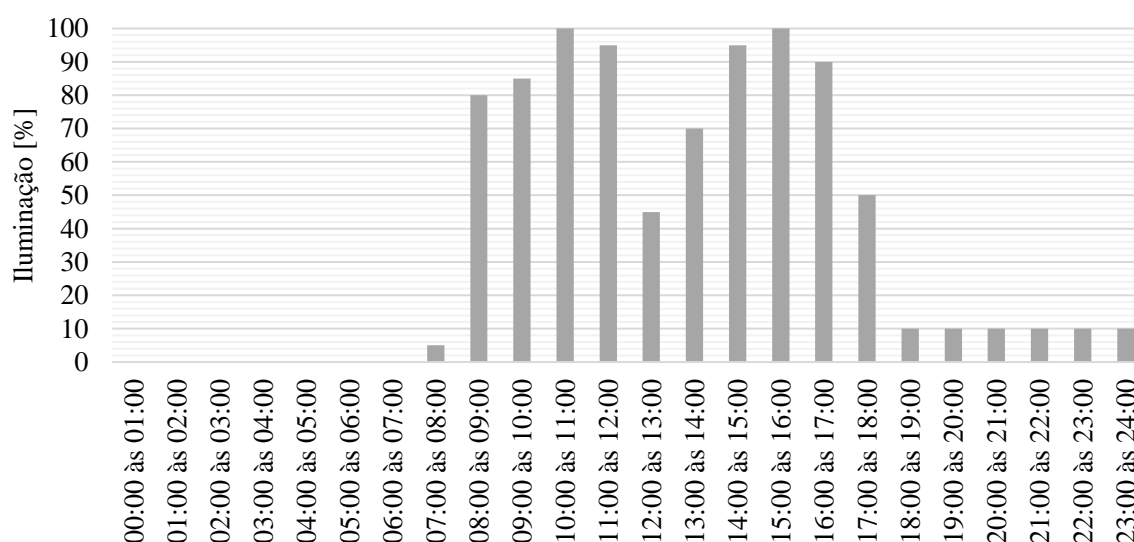


Figura 4-15 Perfil de iluminação, Decreto lei 79/2006

Além disso, o perfil constante no Anexo XV não contempla aulas em período pós-laboral nem aos sábados. Por este motivo, foi necessário criar um novo perfil, apresentado na Figura 4-16, que se adequa à verdadeira utilização das salas de aula.

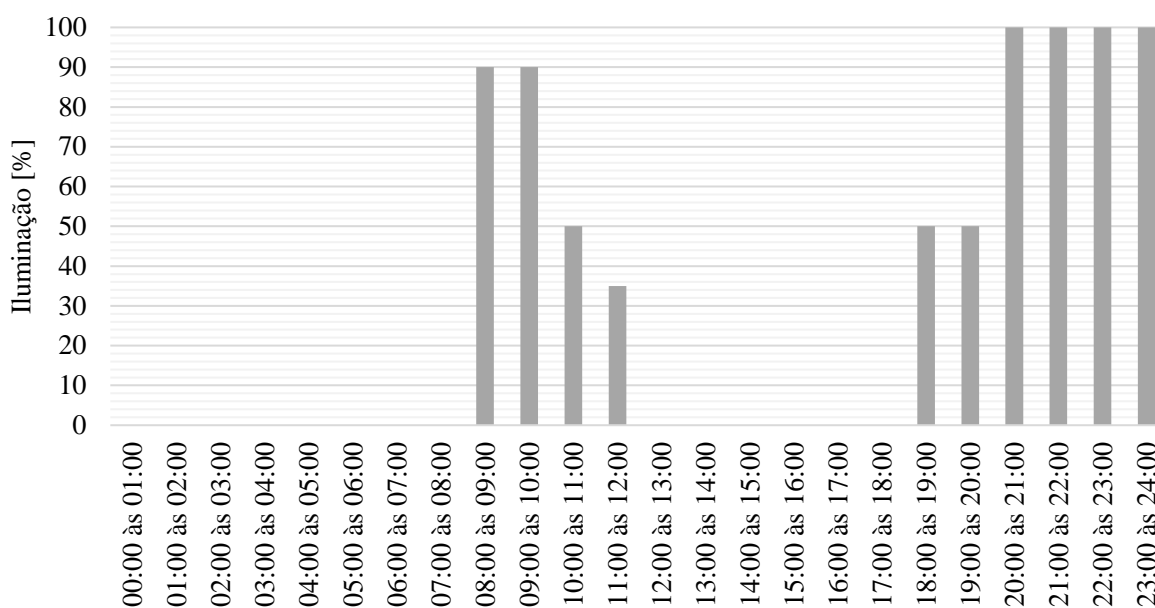


Figura 4-16 Perfil utilizado na simulação

O modelo de simulação possui diferentes salas com diferentes horários, por isso foi necessário criar um horário para cada sala associando-o ao perfil de iluminação geral. Desta forma, ainda que no perfil de iluminação esteja atribuída uma percentagem para uma dada hora, se a sala não estiver em utilização a iluminação estará desligada.

- Renovações horária de ar

O efeito da ventilação é, obviamente, crucial no desempenho térmico e energético de um edifício. No caso dos edifícios escolares, tendo em conta a elevada taxa de ocupação e, conseqüentemente, as preocupações relacionadas com a qualidade do ar interior, a ventilação assume um peso ainda mais importante no balanço energético global.

No entanto, a sua quantificação rigorosa é difícil, não só pela complexidade dos procedimentos experimentais necessários à sua quantificação, mas, essencialmente, pela sua enorme variabilidade no tempo, especialmente em edifícios com um desempenho fortemente dependente do comportamento dos utilizadores (abertura de janelas e portas).

Assim, neste trabalho, adotaram-se inicialmente os valores obtidos numa campanha de avaliação experimental desenvolvida há cerca de dois anos no mesmo edifício para caracterizar as condições de ventilação. Nesse estudo, desenvolvido por Almeida *et al.* (2016), o caudal de ventilação das salas de aula foi estimado a partir de medições da infiltração com recurso à porta ventiladora e através do Método do Gás Traçador e da Técnica do Declive.

Após esta iteração inicial, verificou-se necessário ajustar ligeiramente os valores das renovações em função das medições *in-situ* da temperatura do ar, tendo-se obtido os perfis apresentados nas Figuras 4-17 e 4-18, para os dias de semana e para o fim-de-semana, respetivamente.

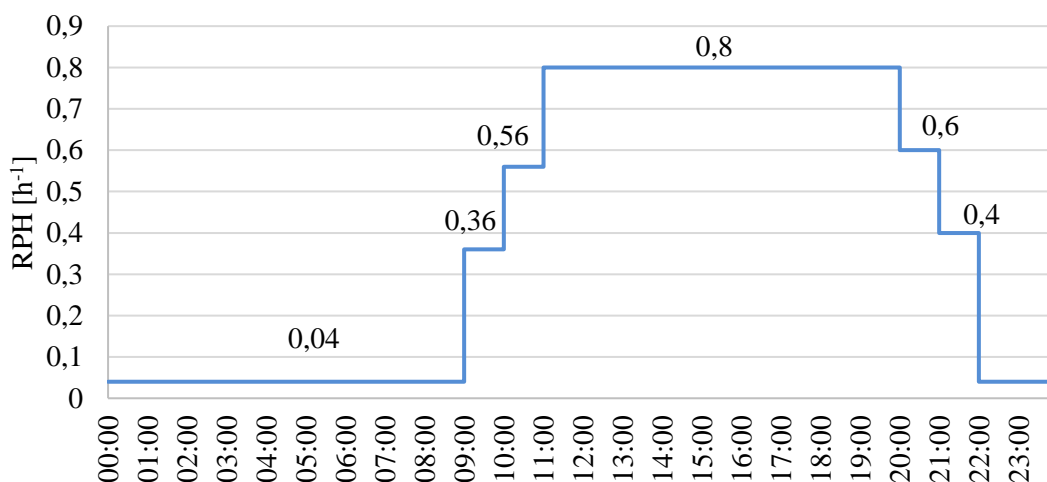


Figura 4-17 Renovações horárias de ar de segunda a sexta-feira

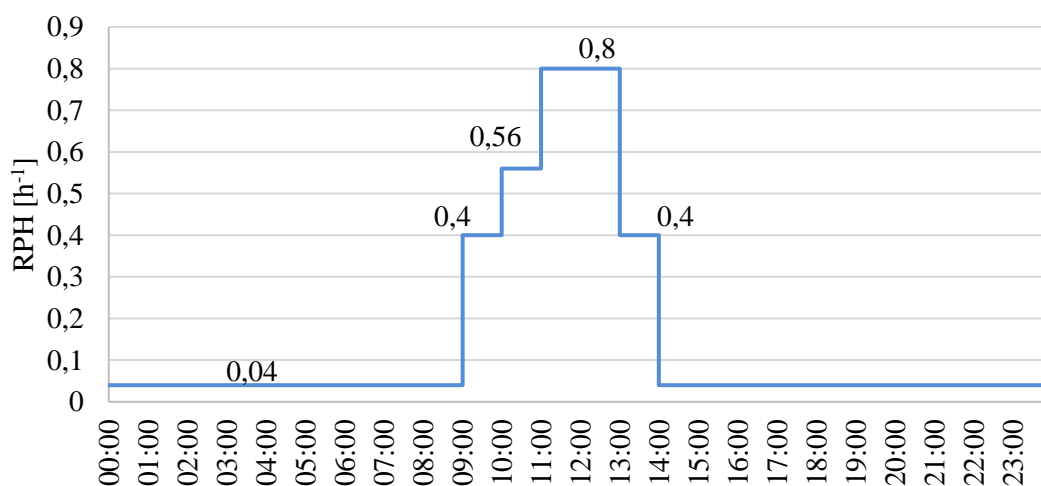


Figura 4-18 Renovações horárias de ar ao fim-de-semana

4.3.3 Validação do modelo de simulação

Depois da elaboração do modelo de simulação, foi necessário proceder à sua validação. Durante o período de 29 de março a 23 de abril de 2016, procedeu-se a monitorização da temperatura e da humidade relativa dentro da Sala 6, utilizando um sensor de medição de modelo HOBO-U12-011, responsável pelo armazenamento dos dados e também pela medição da temperatura e da humidade relativa. Este *data logger* tem uma precisão de $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$ e uma resolução de $0,03^{\circ}\text{C}$, para as medições de temperatura. E relação ao registo da humidade relativa, a precisão do equipamento é de $\pm 2,5\%$. O equipamento apresentado na Figura 4-19, foi cuidadosamente

colocado junto a uma parede interior, de forma a evitar a exposição solar direta ou outro tipo de influência indesejada.



Figura 4-19 Sensor de medição HOBO

Para o mesmo período, foram concedidos pela estação meteorológica da Escola Superior Agrária de Viseu, os dados climáticos locais. Desta forma, foi utilizado um ficheiro climático alterado com os dados recolhidos na estação.

Executada a simulação com os dados climáticos locais e todos os pressupostos enunciados ao longo deste capítulo, chegou-se à representação gráfica da temperatura medida e simulada, presente na Figura 4-20.

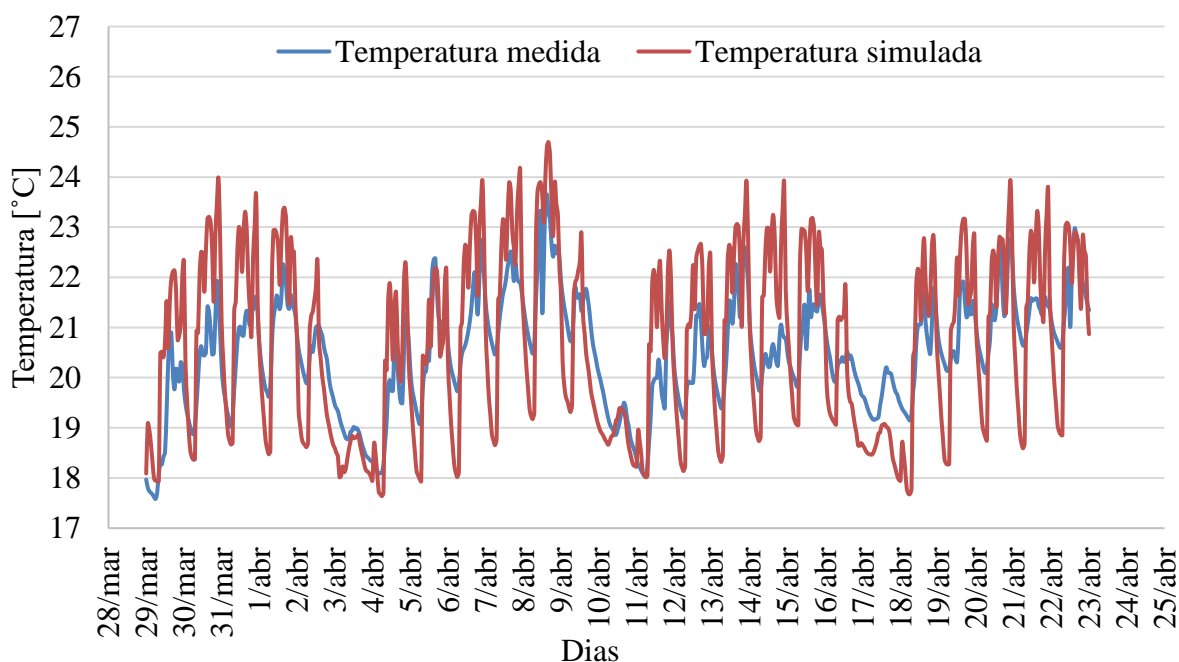


Figura 4-20 Variação da temperatura medida e simulada na Sala 6

Para confirmar como válido um modelo de simulação, o guia da ASHRAE 14-2002 utiliza o índice CVRMSE (*Coefficient of variation of the root mean square error*) que representa a variabilidade do modelo em relação aos valores medidos. A sua formulação é apresentada na equação (4-10):

$$CVRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{medida} - T_{simulada})^2}{n}} \frac{1}{\overline{T_{medida}}} \quad (4-10)$$

Onde:

T_{medida}	[°C]	Temperatura medida
$T_{simulada}$	[°C]	Temperatura simulada
$\overline{T_{medida}}$	[°C]	Média da temperatura medida
n	[-]	Número de medições

O valor do CVRMSE obtido para o modelo de simulação foi 5,57%, que comparado com os limites estabelecidos pelos guias da ASHRAE 14-2002 e da IPMVP (*International Performance Measurement & Verification Protocol*), confirma a validade do modelo.

Com a validação do modelo, é possível avançar para a simulação das soluções de PCM para as salas de aula e o consequente tratamento e comentário dos resultados que serão apresentados no capítulo seguinte.

5. Apresentação e discussão dos resultados

5.1 Enquadramento

No presente capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas segundo a metodologia descrita no capítulo 4. Desta forma, são avaliados os efeitos resultantes da introdução de materiais de mudança de fase nas salas de aula.

5.2 Considerações

Existem alguns pressupostos que devem ser enunciados, para que melhor se compreendam os cenários de simulação escolhidos neste trabalho. Como já referido, existem dois cenários alvo de análise: 1) Análise com sistema de AVAC, cujo objetivo é minimizar as necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento; 2) Análise com sistema de aquecimento e sem sistema de arrefecimento, cujo objetivo é, essencialmente, limitar o sobreaquecimento.

A configuração do sistema de AVAC requer que se definam os limites para o *setpoint*. Durante a estação de aquecimento, o *setpoint* definido corresponde ao valor regulamentar para o cálculo das necessidades de aquecimento em edifícios de serviços e comércio, ou seja 20 °C. Para a estação de arrefecimento, seguiu-se o mesmo critério limitando a temperatura máxima interior a 25 °C (Portaria n.º 349-D, 2013).

A configuração do sistema de AVAC exige ainda a definição do seu horário de funcionamento. Como já referido, a análise foi feita considerando dois cenários: com e sem arrefecimento. Para o período de aquecimento, o horário de funcionamento é o mesmo nos dois cenários e procurou-

se simular o atualmente praticado na ESTGV. Desta forma, em ambos os cenários, o aquecimento funciona de novembro a março, apenas nos dias úteis, das 8:00 h às 23:00 h.

Para realizar a análise do cenário com arrefecimento, foi introduzido um equipamento no *DesignBuilder* com o *setpoint* já referido, funcionando de abril a outubro, igualmente nos dias úteis, estando desligado nos períodos sem ocupação das salas de aula.

Apresenta-se na Figura 5-1 a configuração do sistema de AVAC e respetivos *setpoints*.

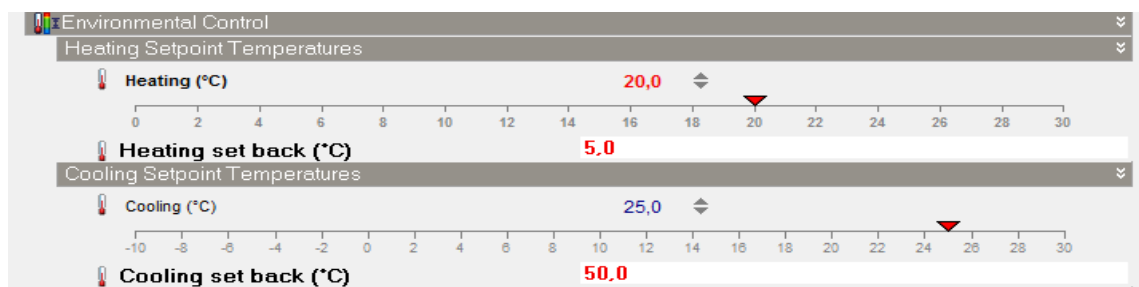


Figura 5-1 Configuração dos *setpoints* no modelo de simulação

Com o objetivo de adequar modelo de simulação à realidade escolar, foram introduzidos os períodos de férias (natal, páscoa, semana académica e férias de verão), assim como os feriados civis e religiosos.

As temperaturas interiores são, obviamente, influenciadas pelos ganhos internos, pelas propriedades dos elementos da envolvente e pelo clima exterior. Para as simulações anuais foi utilizado um ficheiro climático de um ano típico, gerado através do *software* CLIMAS-SCE – software para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios. Com esta aplicação é possível selecionar o município onde o edifício se localiza, obtendo assim, as estatísticas climatológicas e o ano meteorológico de referência, necessários para executar as simulações dinâmicas (LNEG, 2014).

O controlo dos dispositivos de sombreamento interiores das salas de aula foi simulado utilizando como critério o “brilho”. Este modelo está disponível no *EnergyPlus* através do controlo “*glare*”. Este controlo permite limitar os ganhos solares pelos envidraçados, estabelecendo um limite para o índice de iluminância proveniente do exterior. O limite máximo utilizado foi de 19, valor aconselhado pela publicação do “*Building Bulletin 90*” para iluminação em salas de aula (DEE, 2008).

5.3 Análise Geral

5.3.1 Enquadramento

Na análise geral pretende-se estudar os benefícios da utilização de PCM para a diminuição das necessidades energéticas e para a melhoria do conforto térmico. Neste subcapítulo, cada uma dessas análises é realizada individualmente para ambas as salas. Os resultados são apresentados através de um Indicador de Redução (Irn), cujo cálculo é apresentado na equação (5-1).

$$Irn = \left(\frac{N_e(\text{com PCM}) - N_e(\text{sem PCM})}{N_e(\text{sem PCM})} \right) \times 100 \quad (5-1)$$

Onde:

Irn	%	Indicador de redução de necessidades
N_e	[kWh/(m ² .ano)]	Necessidades de energia

Como se depreende, o indicador apresentado é calculado relativamente à simulação de referência, apresentando-se negativo quando o PCM possui um comportamento benéfico e positivo caso se verifique o contrário.

Para facilitar a interpretação, os resultados obtidos são apresentados graficamente, para a Sala 6 (piso térreo) e 18 (1º piso), tratando-se em primeiro lugar o cenário com sistema de AVAC e depois o cenário sem sistema de arrefecimento.

As diferentes soluções com introdução de PCM são representadas utilizando a seguinte simbologia: M27, 51 ou 91 (consoante a capacidade latente); Q21, 23, 25 ou 27 (consoante a temperatura de fusão); T ou T+P (consoante a solução seja aplicada só nos tetos ou nos tetos e paredes interiores).

5.3.2 Análise com sistema de AVAC

Neste subcapítulo serão apresentados e comentados os resultados das simulações feitas no âmbito da análise com sistema de AVAC, na Sala 6 (Piso térreo) e Sala 18 (Piso 1).

5.3.2.1 Sala 6 – piso térreo

- **Necessidades de aquecimento**

Na Sala 6, no cenário de referência, sem introdução de PCM, as necessidades energéticas para aquecimento, foram de 18,76 kWh/(m².ano). Na Figura 5-2 apresenta-se o efeito das diferentes soluções com introdução de PCM, avaliado de com o indicador *Irr*.

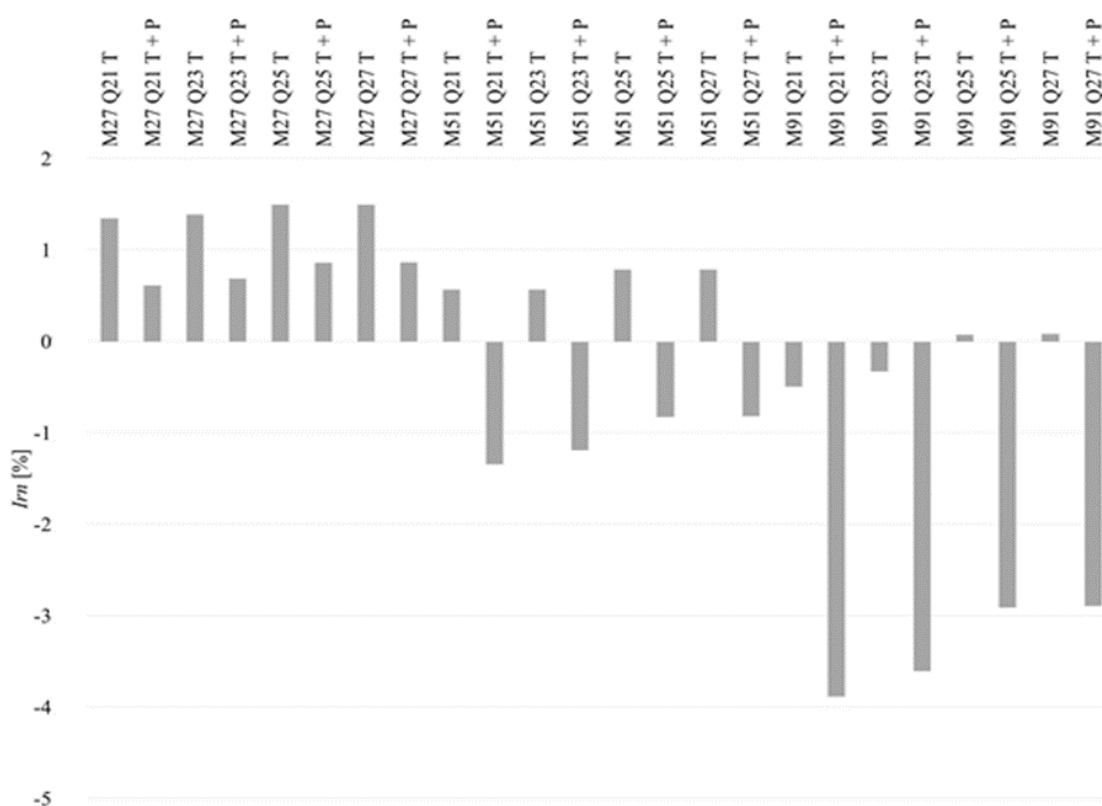


Figura 5-2 Redução das necessidades de aquecimento na Sala 6 (Piso térreo)

Da análise da Figura 5-2 é possível concluir que:

- O grupo M27 conduz a um aumento residual das necessidades de aquecimento, ou seja, tem um efeito negativo;
- O grupo M51 apenas se revela vantajoso quando se adiciona PCM nas paredes interiores; as soluções com PCM apenas no teto conduzem a um impacto negativo;
- O PCM M91 Q21 T+P revela a maior redução (3,88%) seguido pelo M91 Q23 T+P (3,61%);
- Globalmente, os ganhos resultantes da introdução do PCM não são muito significativos.

A simulação de referência revelou necessidades de aquecimento durante 1352 h. A introdução de PCM contribuiu, de forma geral, para a diminuição do número de horas de funcionamento do sistema de AVAC, ou seja, o número de horas em que a temperatura se encontra inferior a 20°C. Os resultados apresentam-se na Figura 5-3.

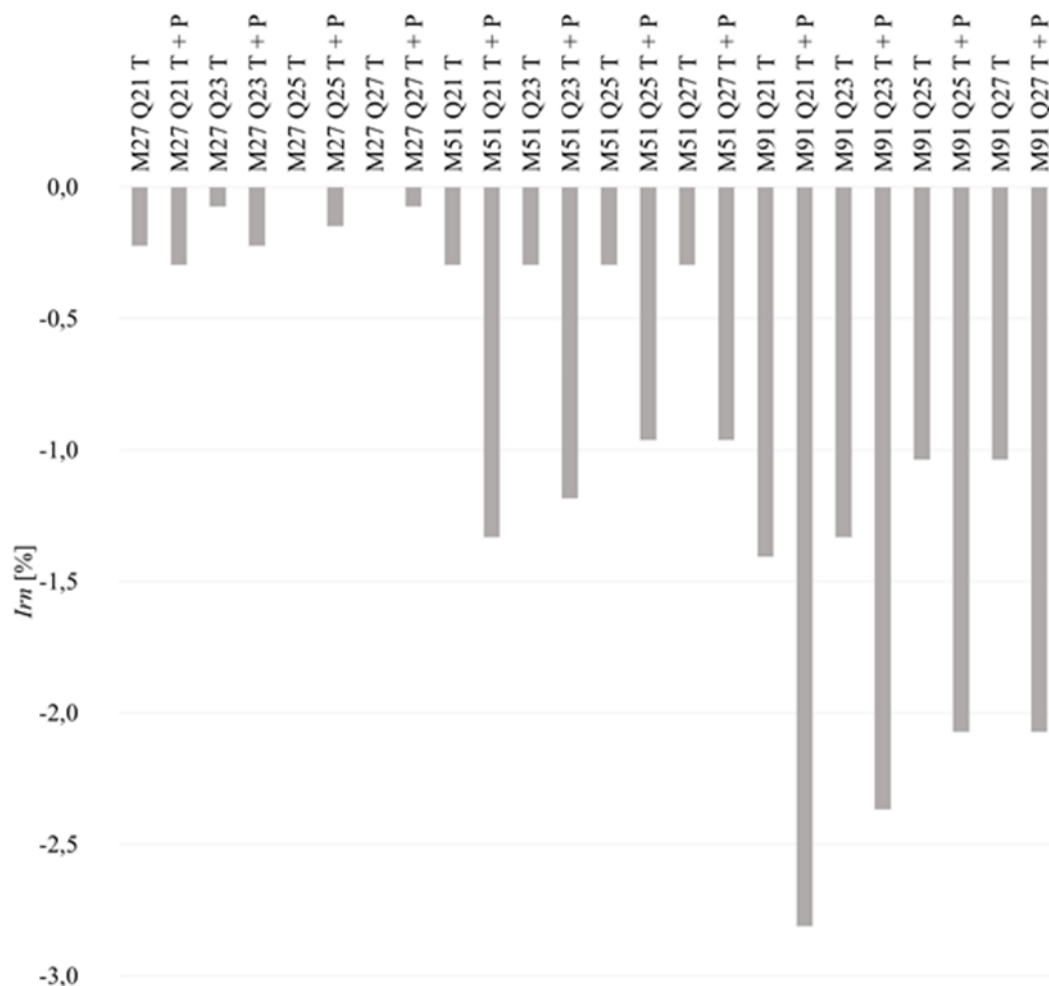


Figura 5-3 Redução do número de horas de funcionamento do sistema de AVAC na Sala 6

A Figura 5-3 permite retirar as seguintes conclusões:

- A redução do número de horas de funcionamento é residual, com uma redução máxima de 38 horas para a solução M91 Q21 T+P;
- Ainda que as necessidades evidenciadas na Figura 5 2 tenham demonstrado um aumento das necessidades energéticas para algumas soluções, a Figura 5 3 não revela aumento do número de horas de funcionamento do sistema de AVAC;
- As soluções com PCM no teto e paredes interiores exibem melhor desempenho;
- O grupo M91 apresenta maiores reduções, e a temperatura de mudança de fase de 21 °C é a que apresenta melhor desempenho.

•Necessidades de arrefecimento

Quanto às necessidades de arrefecimento, a Sala 6 exibiu na simulação de referência uma necessidade de energia de 5,46 kWh/(m².ano). A introdução das diferentes soluções de PCM corresponde à redução das necessidades exibidas na Figura 5-4.

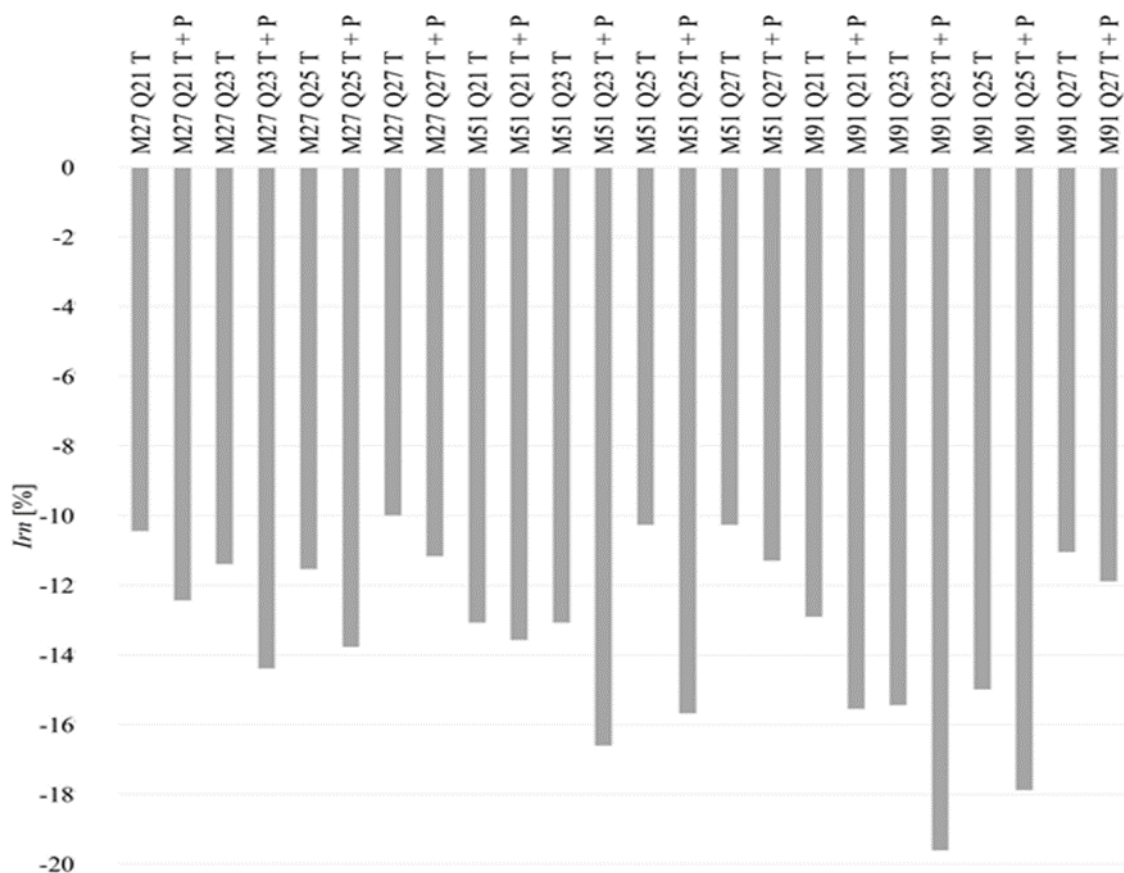


Figura 5-4 Redução das necessidades de arrefecimento na Sala 6

A Figura 5-4 permite concluir que:

- Todas as soluções com PCM conduzem a um desempenho mais interessante com redução das necessidades de arrefecimento;
- A temperatura de mudança de fase que melhores resultados apresenta é a de 23 °C;
- A utilização de PCM nos tetos e paredes interiores da sala apresenta, em média, uma redução adicional de 2,45% em relação à colocação apenas nos tetos;
- O grupo M91 é o que apresenta melhores resultados, com uma redução máxima de 19,59% para o PCM M91 Q23 T+P.

Quanto ao número de horas com necessidades de arrefecimento, na simulação referência registaram-se 482 h em que a temperatura excedeu os 25°C. A introdução de PCM contribuiu para a diminuição do número de horas de funcionamento do sistema de AVAC. Os resultados apresentam-se na Figura 5-5.

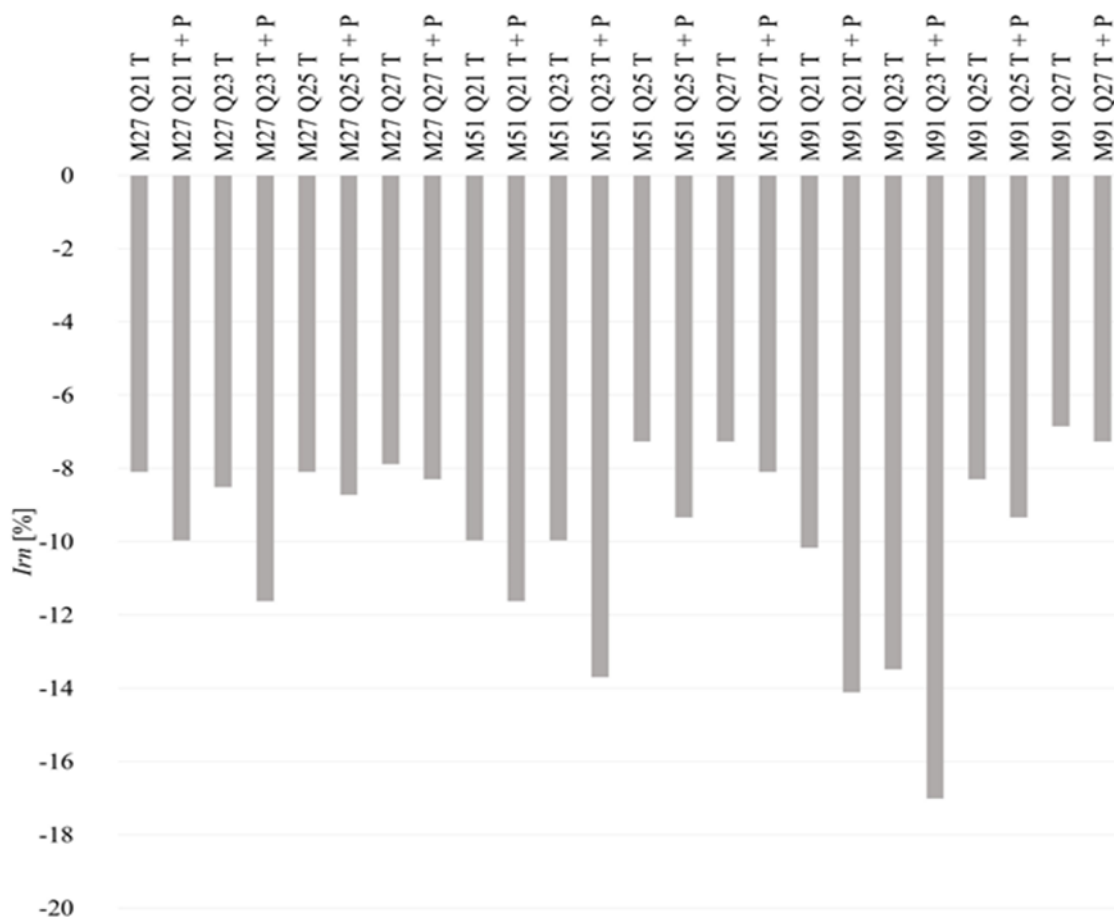


Figura 5-5 Redução do número de horas de funcionamento do sistema de AVAC na Sala 6

A Figura 5-5 permite constatar que todas as soluções com PCM revelam uma diminuição do número de horas de funcionamento do sistema de AVAC. O grupo M91 volta a apresentar os melhores resultados, chegando mesmo a uma redução de 17% (M91 Q23 T+P). Em qualquer uma das soluções de PCM utilizadas, a temperatura de mudança de fase de 23 °C revela o melhor desempenho, demonstrando a sua adequabilidade ao comportamento térmico da Sala 6.

- **Síntese final**

Para a síntese final, necessária à escolha das melhores soluções com PCM utilizadas na Sala 6, foi calculada a poupança gerada pela aplicação do material de mudança de fase. Para isso, foi feito o somatório das poupanças em arrefecimento e aquecimento de cada solução. As 5 soluções com melhor desempenho estão elencadas na Tabela 5-1, juntamente com o respectivo valor de poupança energética.

Tabela 5-1 Soluções com melhor desempenho na Sala 6

PCM	Poupança kWh/(m ² .ano)
M91 Q23 T + P	17,46
M91 Q21 T + P	15,76
M91 Q25 T + P	15,21
M91 Q27 T + P	11,91
M51 Q23 T + P	11,28

5.3.2.2 Sala 18 – 1º piso

- Necessidades de aquecimento

Relativamente à Sala 18, as necessidades energéticas para aquecimento na simulação do cenário de referência foram de 17,0 kWh/(m².ano). O efeito da introdução das soluções de PCM está sintetizado na Figura 5-6.

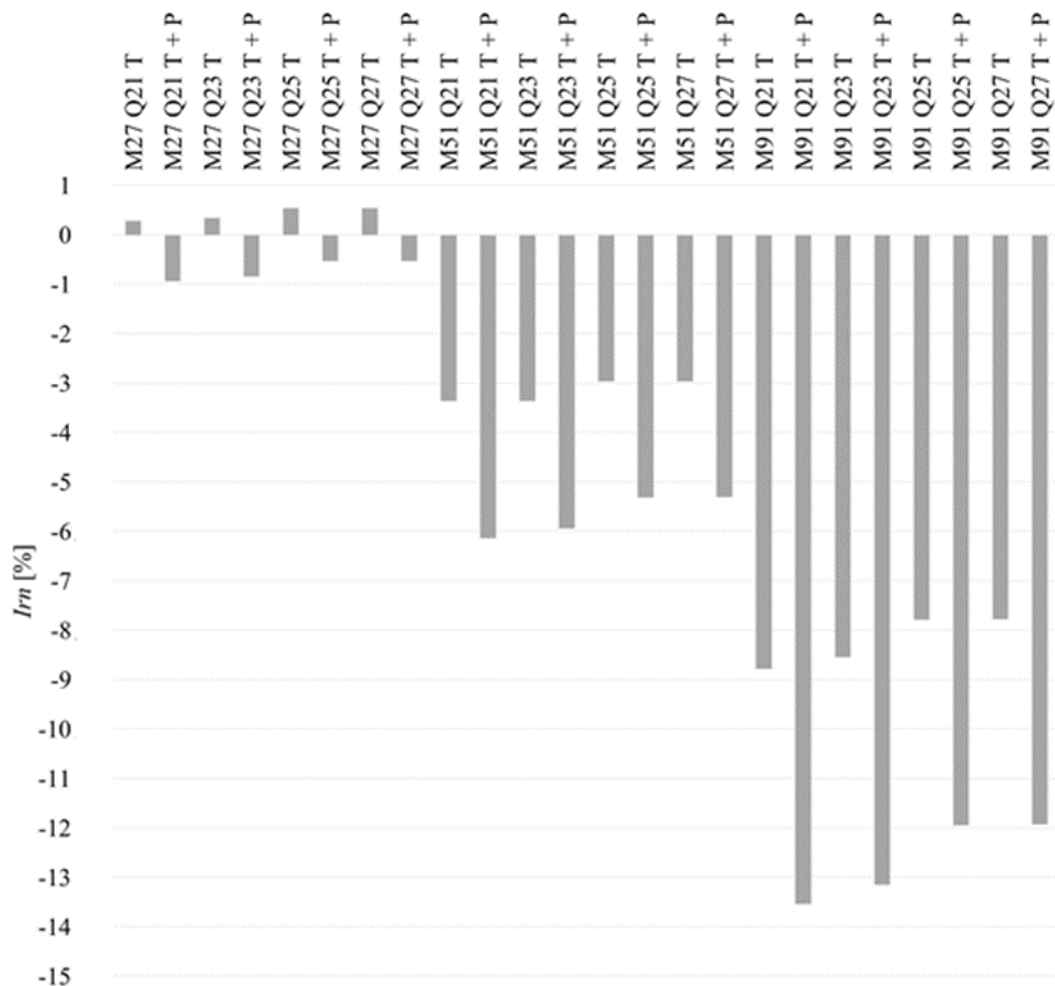


Figura 5-6 Redução das necessidades de aquecimento na Sala 18

Da análise da Figura 5-6 é possível concluir que:

- Os PCM's do tipo M27, com aplicação apenas nos tetos, revelam um aumento das necessidades de aquecimento, no entanto, residual;
- As soluções com PCM no teto e paredes interiores revelam, sempre, uma redução maior das necessidades em relação às soluções que apenas compreendem a aplicação do material no teto;
- A solução M91 Q21 T+P é a que apresenta melhor desempenho, chegando a uma redução de 13,53%;
- A temperatura de mudança de fase de 21 °C é a que melhor se adequa à Sala 18.

À semelhança da análise realizada na Sala 6, foi também avaliada a redução do número de horas de funcionamento necessárias para aquecimento. A simulação de referência apresenta uma necessidade de 1344 h e a representação gráfica do efeito causado pelos tipos de PCM é mostrado na Figura 5-7.

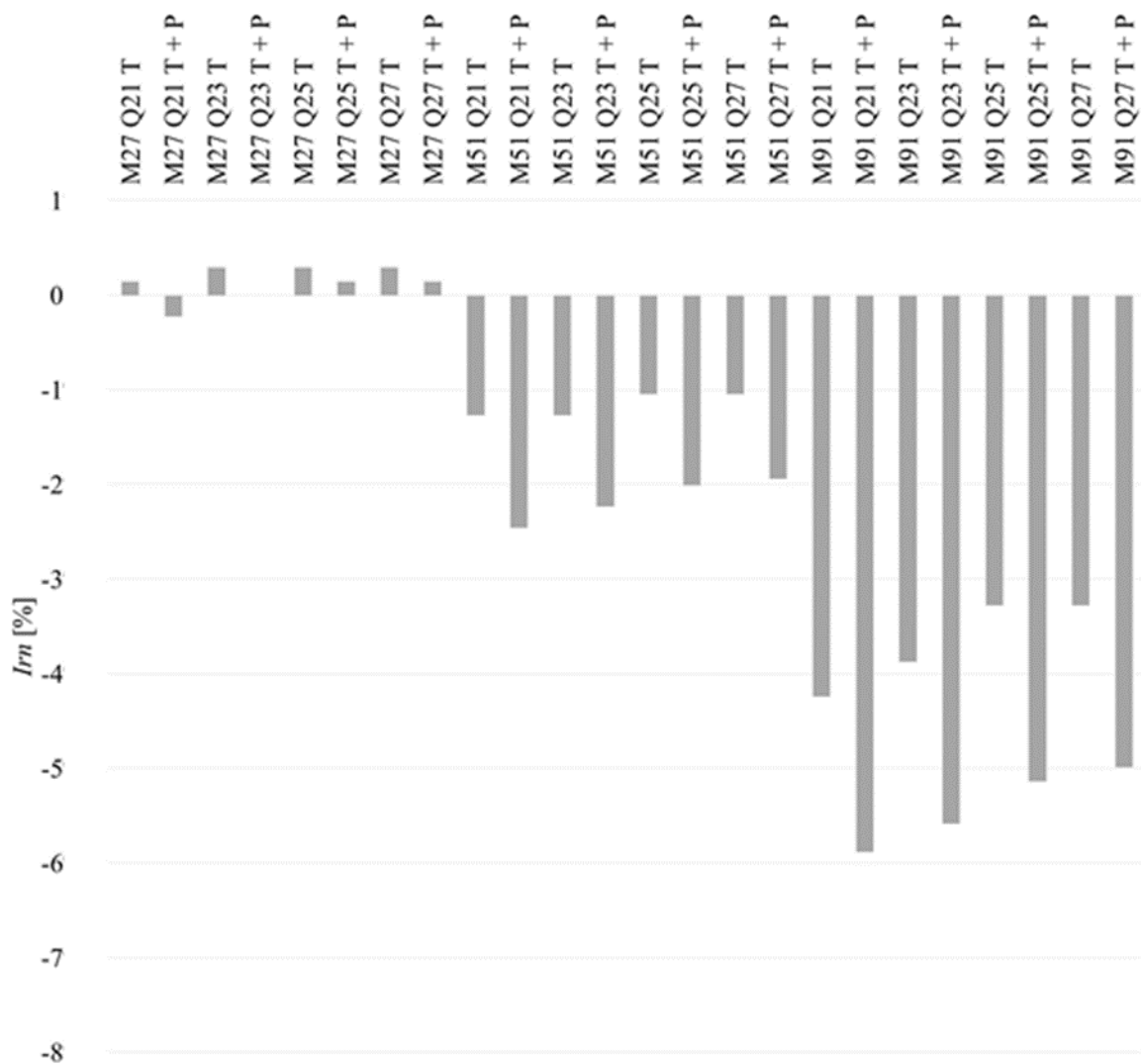


Figura 5-7 Redução o número de horas de funcionamento de sistema de AVAC na Sala 18

A partir da Figura 5-7 é possível concluir que:

- Os PCM's do tipo M27 evidenciam um efeito residual, em alguns casos, levando mesmo a um aumento das necessidades;
- O tipo de PCM que apresenta os melhores resultados é o M91;
- As soluções com PCM no teto e paredes interiores apresentam melhor desempenho, face as soluções com PCM apenas no teto;
- A temperatura de mudança de fase que melhor se adequa à Sala 18 é de 21 °C;
- A solução com melhor desempenho é M91 Q21 T+P.

- **Necessidades de arrefecimento**

Quanto à estação de arrefecimento, a Sala 18, no cenário de referência, requer 10,44 kWh/(m².ano) para manter a temperatura interior dentro do limite definido para o sistema de AVAC. A redução conseguida pelas soluções simuladas está sintetizada na Figura 5-8.

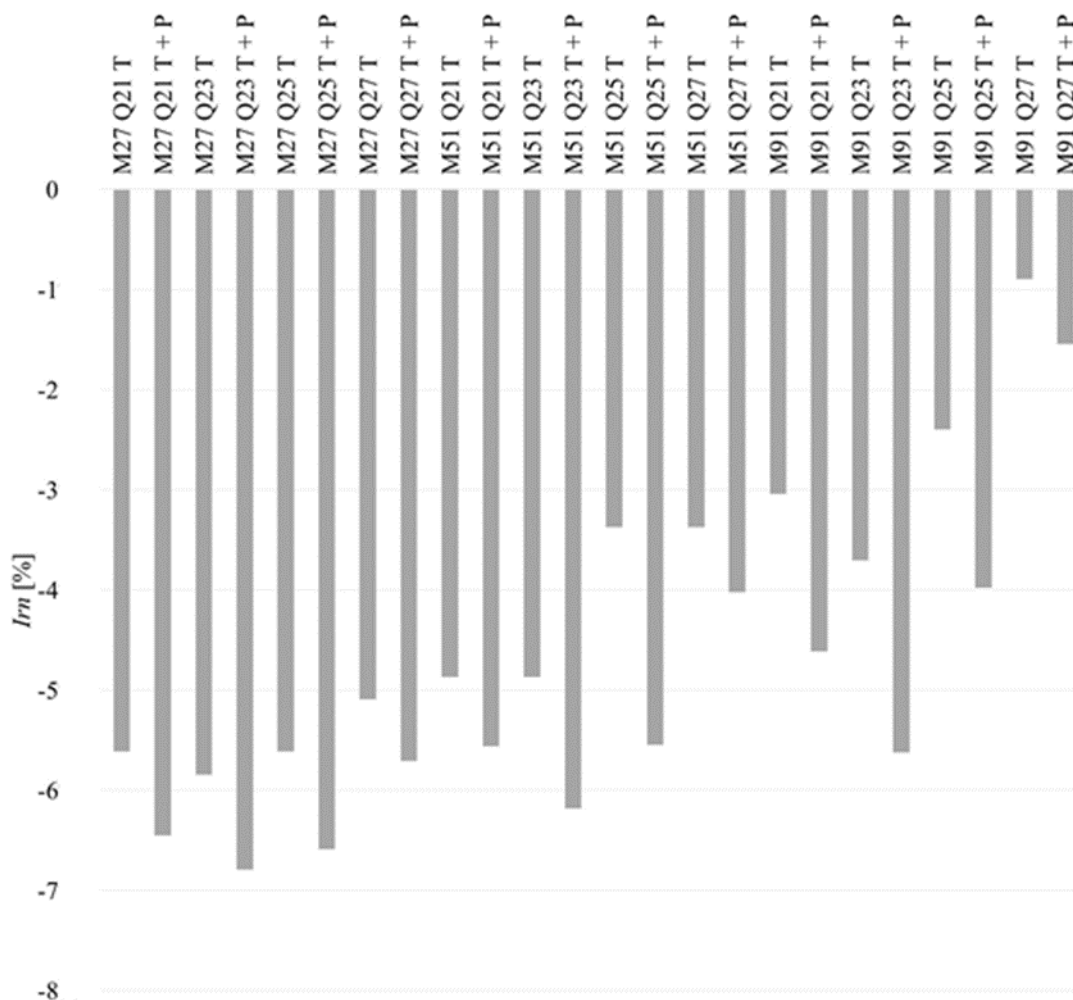


Figura 5-8 Redução das necessidades de arrefecimento na Sala 18

A partir da Figura 5-8 é possível notar uma mudança em relação à tendência observada ao longo desta análise. Os PCM's do tipo M27 demonstram agora melhores resultados que os restantes. Tendo em conta que os diferentes tipos de PCM possuem as mesmas propriedades térmicas, a espessura do material colocado pode ser considerada como fator determinante para explicar o melhor comportamento dos PCM's de menor espessura. O facto da Sala 18 estar no 1º Piso e da sua envolvente estar bem isolada, faz com que a adoção de materiais mais espessos aumente ainda mais a resistência térmica da sala, impedindo-a de libertar o calor armazenado pelo PCM. Ainda assim, é possível concluir que todas as soluções melhoram o desempenho energético da sala, conseguindo uma redução máxima de 6,79% a solução de PCM M27 Q23 T+P. A temperatura de mudança de fase que leva a melhores resultados nos diferentes tipos é a de 23 °C.

A partir da simulação do cenário de referência, regista-se uma necessidade de 713 h de arrefecimento, para que a temperatura da Sala 18 se mantenha dentro dos limites estabelecidos.

Na Figura 5-9, apresenta-se o efeito da utilização dos PCM's na redução do número de horas de funcionamento do sistema de AVAC para a estação de arrefecimento.

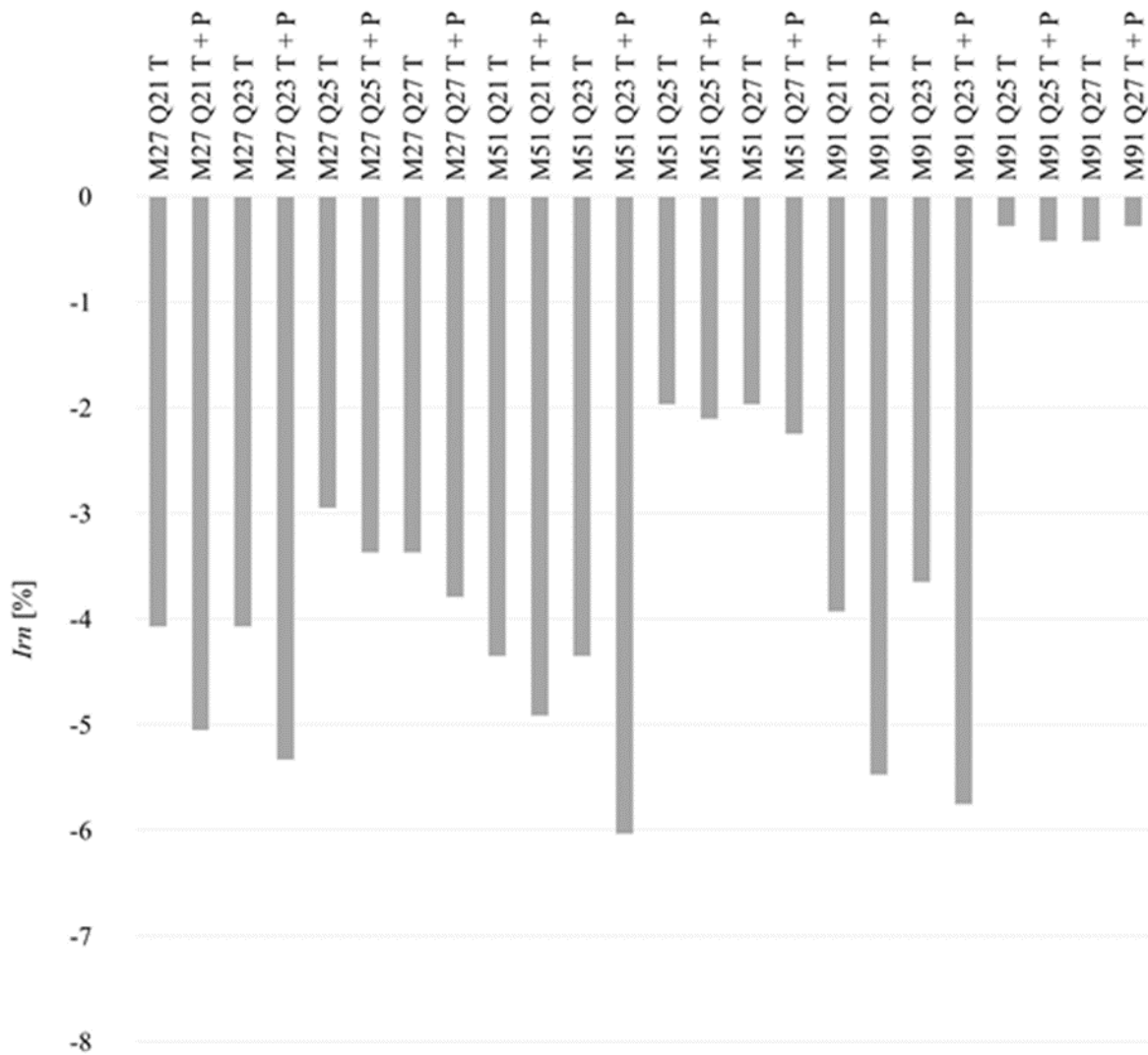


Figura 5-9 Redução do número de horas de funcionamento do sistema de AVAC na Sala 18

A partir da interpretação da Figura 5-9 conclui-se que todas as soluções com PCM originam uma redução do período total de funcionamento do sistema AVAC, porém com solução M51 Q23 T+P a revelar a maior redução. As temperaturas de mudança de fase mais elevadas (25 e 27°C) dão origem às menores reduções das horas de funcionamento. A temperatura de mudança de fase que melhor se adequa à sala é de 23°C.

- **Síntese final**

Tendo estudado as soluções propostas para a Sala 18, à semelhança do método utilizado para a Sala 6, são apresentadas na Tabela 5-2, as 5 melhores soluções que serão alvo de estudo na análise detalhada.

Tabela 5-2 Soluções com melhor desempenho na Sala 18

PCM	Poupança kWh/(m ² .ano)
M91 Q23 T + P	2,82
M91 Q21 T + P	2,78
M91 Q25 T + P	2,44
M91 Q27 T + P	2,19
M91 Q23 T	1,84

5.3.3 Análise sem sistema de arrefecimento

A adoção de soluções passivas, como a utilização de PCM em salas de aula, pode constituir-se como uma alternativa aos sistemas mecânicos, que possuem um custo de operação e manutenção elevado. Nesse sentido, está contemplado neste trabalho uma análise à estação de arrefecimento, num cenário sem sistema de arrefecimento. À semelhança da análise com sistema de AVAC, descrita no ponto anterior, são utilizados os mesmos pressupostos de base, desligando-se apenas o equipamento responsável pelo controlo da temperatura interior, no período de abril a outubro.

Esta análise tem o objetivo de avaliar o desconforto devido ao sobreaquecimento nas Salas 6 e 18, em termos de amplitude máxima, média, número de ocorrências e determinação dos graus-hora calculados apenas para o período de ocupação, entre as oito da manhã e as onze da noite. A temperatura de referência utilizada para o cálculo da incidência de sobreaquecimento, corresponde à temperatura regulamentar para o cálculo das necessidades de arrefecimento, ou seja, de 25 °C. A avaliação das soluções adotadas para este cenário é, uma vez mais, em termos comparativos face ao cenário de referência.

5.3.3.1 Sala 6 – piso térreo

Como já referido, um dos indicadores alvo de avaliação nesta análise é a magnitude do sobreaquecimento (maior diferença relativamente aos 25 °C). Na Figura 5-10, é apresentada a amplitude máxima de sobreaquecimento em graus para a Sala 6.

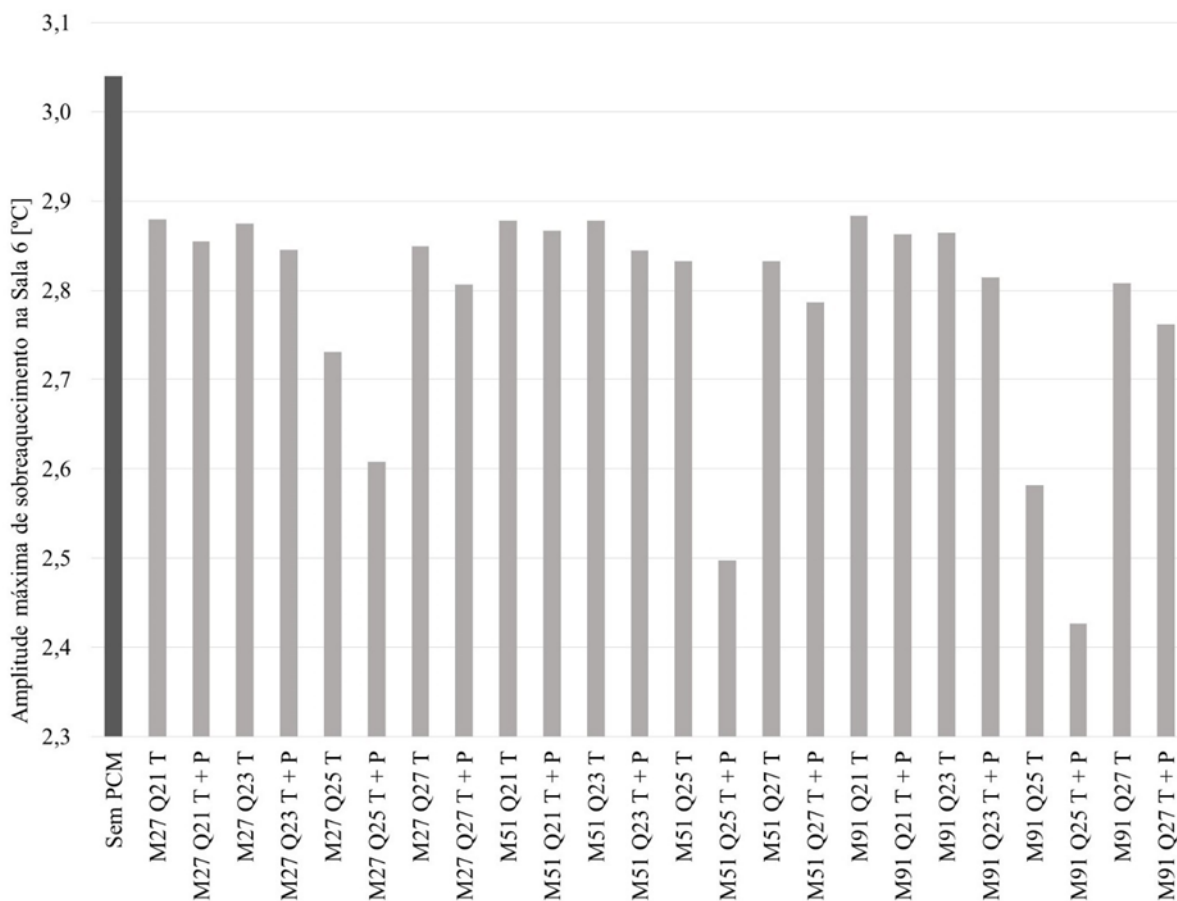


Figura 5-10 Amplitude máxima de sobreaquecimento na Sala 6

Como é possível concluir através da Figura 5-10, todas as soluções de PCM revelam um efeito positivo na redução da amplitude máxima de sobreaquecimento. Comparativamente à simulação de referência, que apresenta uma temperatura máxima de 28,04 °C, o PCM M91 Q25 T+P consegue uma redução de 20,17% do pico máximo de temperatura (27,43 °C). A temperatura de mudança de fase que melhor se adequa à Sala 6 é de 25 °C. A utilização de PCM nas paredes e tetos continua a revelar-se como a solução que leva a melhores resultados.

A temperatura média dos eventos de sobreaquecimento, revela a temperatura tendencial a que estarão sujeitos os ocupantes num determinado compartimento. Como se pode observar na Figura 5-11, a temperatura média é tanto maior, quanto maiores forem as flutuações do sobreaquecimento.

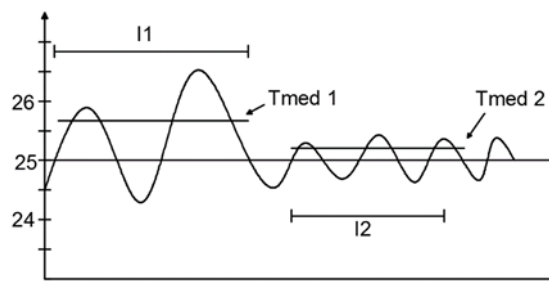


Figura 5-11 Exemplo explicativo da temperatura média do sobreaquecimento

Na Figura 5-12, apresenta-se graficamente a amplitude média de sobreaquecimento para a Sala 6.

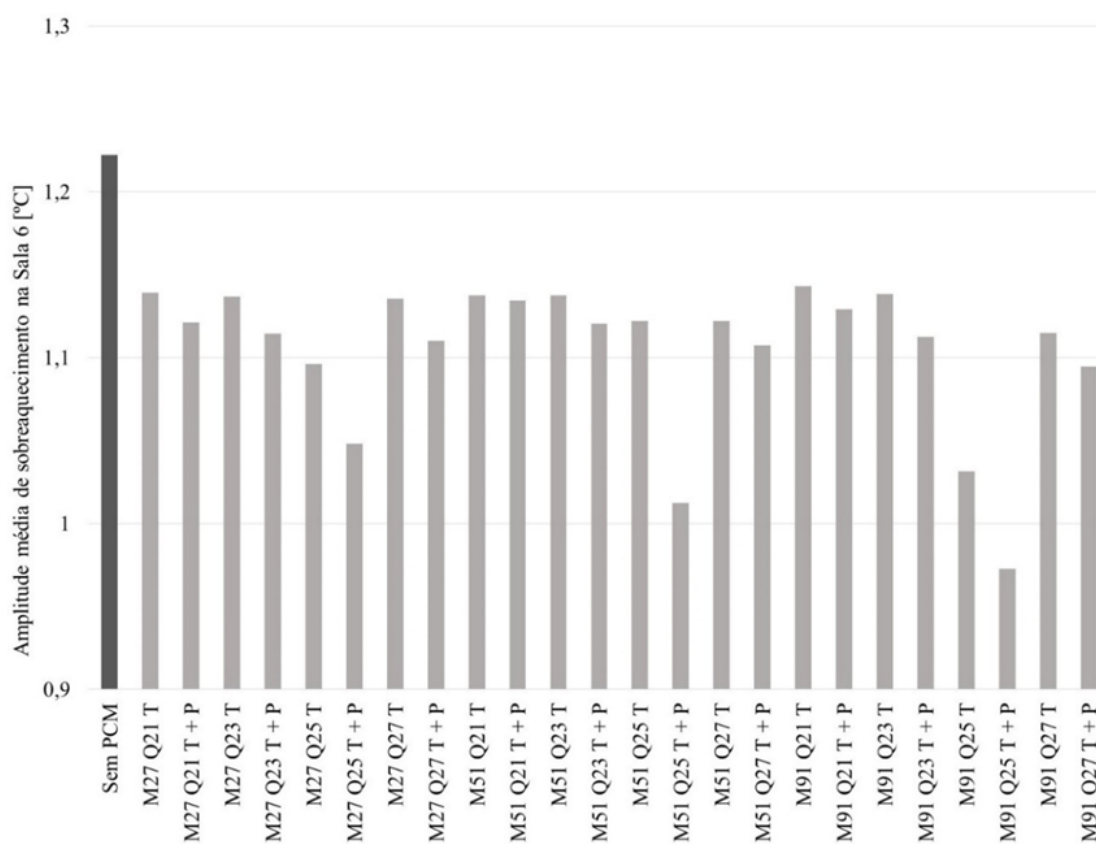


Figura 5-12 Amplitude média de sobreaquecimento na Sala 6

Como é possível verificar na Figura 5-12, todas as soluções de PCM utilizadas permitem reduzir a amplitude média de sobreaquecimento. A solução M91 Q25 T+P apresenta a maior redução da amplitude média de sobreaquecimento (0,25 °C). A temperatura de mudança de fase que melhor se adequa à Sala 6 é de 25 °C.

O sobreaquecimento pode também ser estudado em função do número de ocorrências e da soma acumulada dos graus-hora. O número de ocorrências permite elucidar sobre o nível de desconforto a que estarão sujeitos os ocupantes do compartimento. Por outro lado, a soma

acumulada dos graus-hora permite quantificar a carga térmica a remover para que a temperatura interior permaneça abaixo dos 25°C.

Na Figura 5-13 apresentam-se os graus-hora acumulados das diversas soluções.

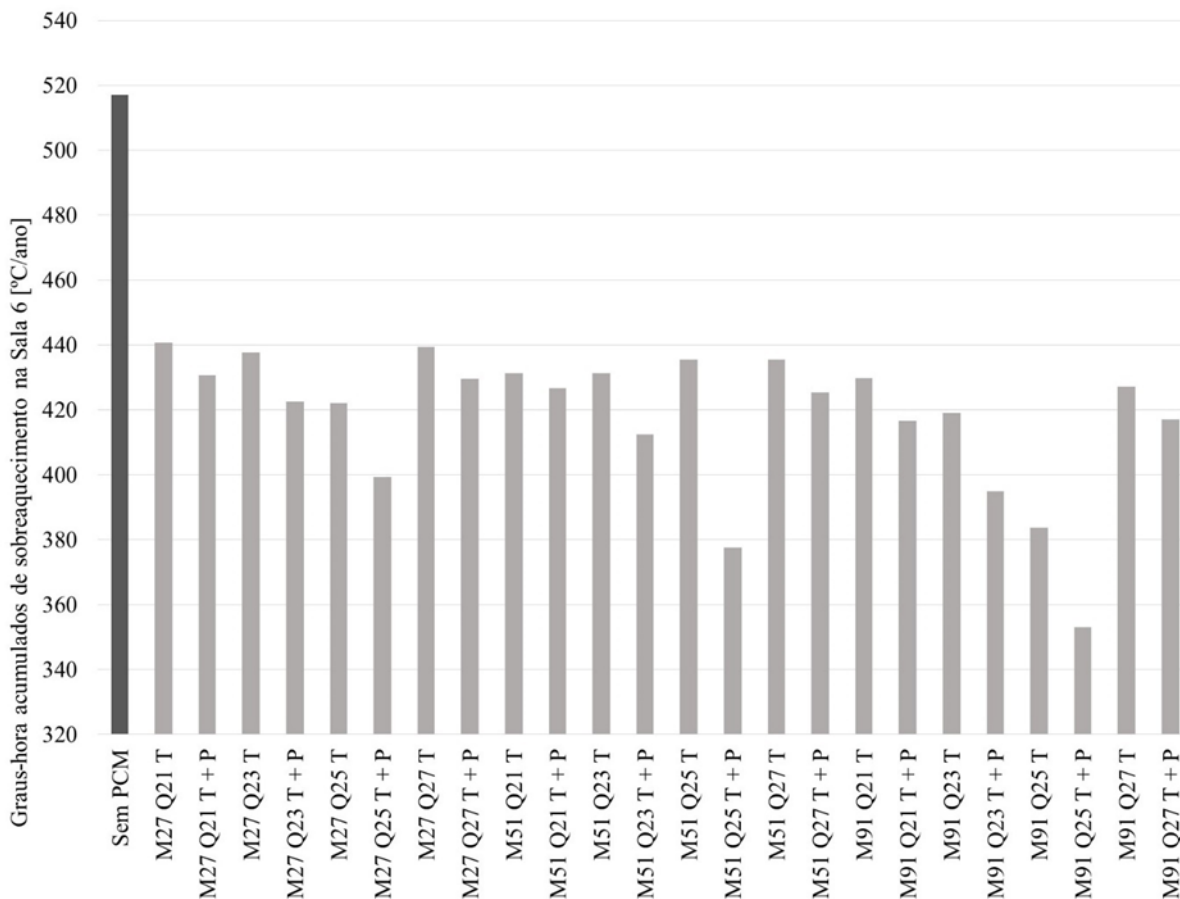


Figura 5-13 Graus-hora acumulados de sobreaquecimento na Sala 6

Observando a Figura 5-13, é possível constatar o seguinte:

- O PCM M91 Q25 T+P, é a solução que conduz ao valor mais reduzido de graus-hora de sobreaquecimento acumulados;
- Todas as soluções utilizadas, possuem melhor desempenho em relação à simulação de referência;
- A temperatura de mudança de fase de 25°C é a que conduz a melhores resultados.

O número de ocorrências de sobreaquecimento na Sala 6 é apresentado na Figura 5-14.

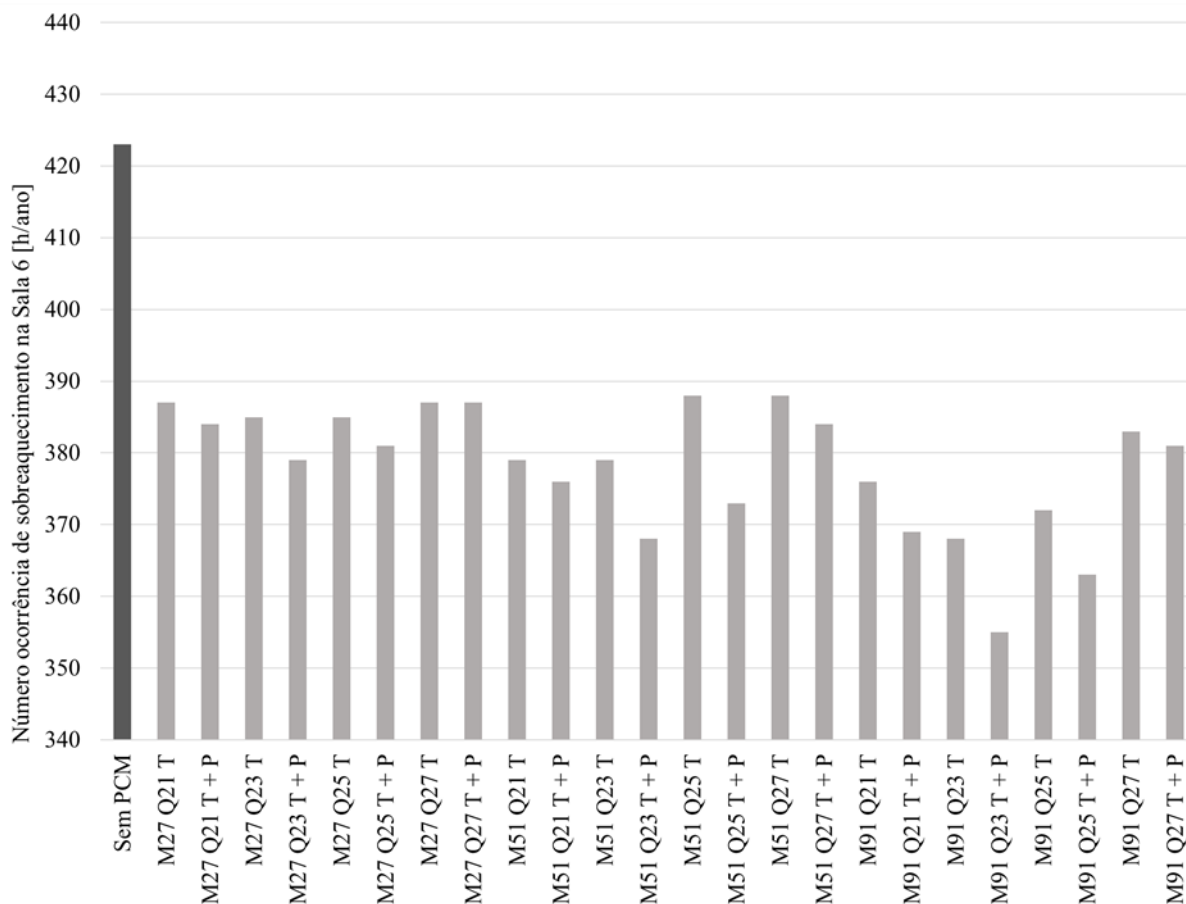


Figura 5-14 Número de ocorrências de sobreaquecimento na Sala 6

A partir da representação gráfica da Figura 5-14, pode concluir-se que a solução que conduz à maior redução do número de ocorrências de sobreaquecimento foi o M91 Q23 T+P, com uma redução de 16%.

À semelhança da análise com sistema de AVAC, onde foram escolhidas as soluções com PCM com melhor desempenho, são também escolhidos os 5 melhores referentes à análise sem arrefecimento. As soluções com melhor desempenho serão escolhidas em função da redução face à simulação de referência.

No entanto, uma vez que foram analisados 4 indicadores, foi necessário definir uma metodologia de apoio à decisão. Assim, foi efetuada uma soma ponderada das reduções conseguidas por cada cenário. Para a ponderação, admitiu-se que a amplitude média de sobreaquecimento fosse o indicador mais importante, visto que, seria responsável pela temperatura mais frequente de desconforto. Assim, atribuiu-se um peso de 20% para os indicadores de amplitude máxima, número de ocorrência de sobreaquecimento e graus-hora de sobreaquecimento acumulados e 40% para a amplitude média. A redução ponderada é calculada com recurso à equação (5-2).

$$R_{pond} = R_{Amax} \times 0,20 + R_{Améd} \times 0,40 + R_{Graus-hora} \times 0,20 + R_{n^{\circ}ocorr} \times 0,20 \quad (5-2)$$

Onde:

R_{pond}	[%]	Redução ponderada
R_{Amax}	[%]	Redução da amplitude máxima de sobreaquecimento
$R_{Améd}$	[%]	Redução da amplitude média de sobreaquecimento
$R_{Graus-hora}$	[%]	Redução dos graus-hora de sobreaquecimento
$R_{n^{\circ}ocorr}$	[%]	Redução de ocorrências de sobreaquecimento

- **Síntese final**

Aplicando esta metodologia, as soluções com PCM com melhor desempenho na Sala 6 estão indicadas na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 Soluções de PCM com melhor desempenho na análise sem sistema de arrefecimento na Sala 6

Soluções de PCM	R_{pond} [%]
M91 Q25 T + P	21,38
M51 Q25 T + P	18,20
M91 Q25 T	16,84
M27 Q25 T + P	15,94
M91 Q27 T + P	11,87

5.3.3.2 Sala 18 – 1º piso

A Figura 5-15 apresenta a amplitude máxima de sobreaquecimento na Sala 18.

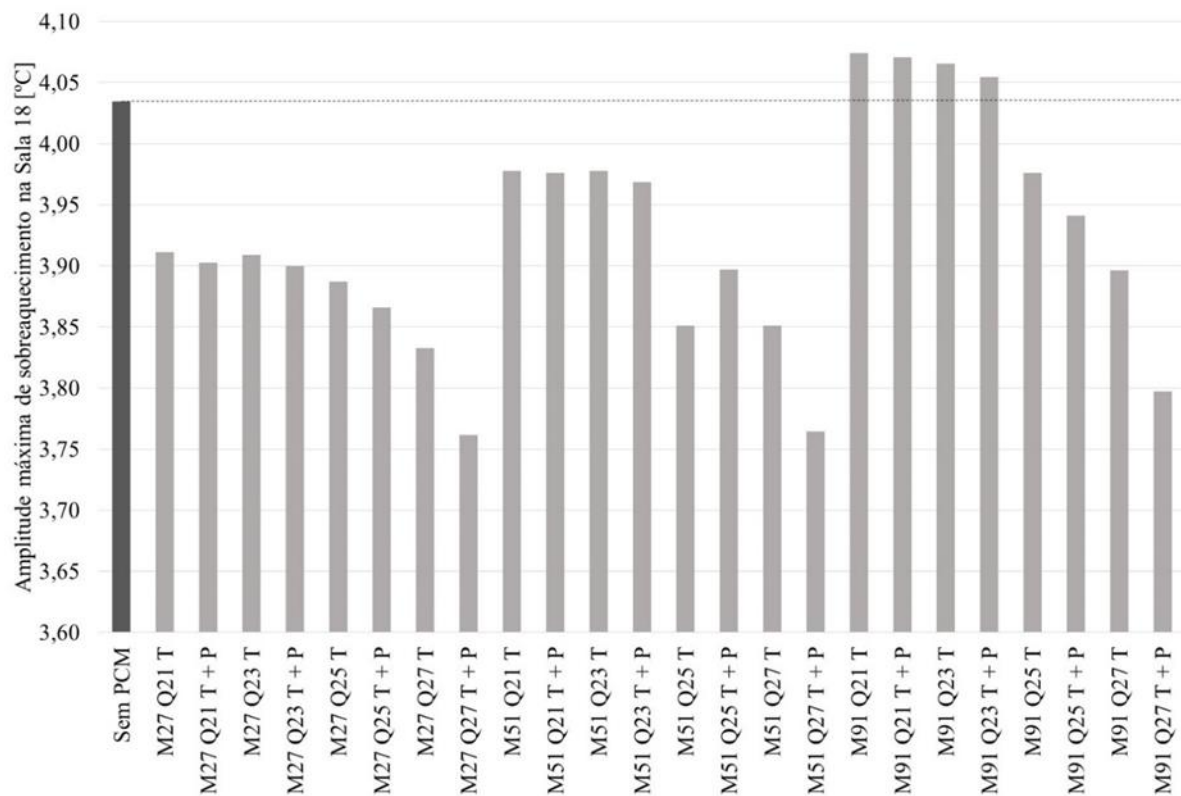


Figura 5-15 Amplitude máxima de sobreaquecimento na Sala 18

A utilização de PCM na Sala 18 traduz-se num efeito residual, obtendo-se uma redução máxima de 0,27 °C com tipo M27 Q27 T+P. As soluções de PCM com maiores espessuras e menor temperatura de mudança de fase apresentam os piores resultados. O tipo M91 apresenta, nas temperaturas de mudança de fase de 21 e 23 °C, uma amplitude superior à simulação de referência

A amplitude média de sobreaquecimento da Sala 18 é apresentada na Figura 5-16.

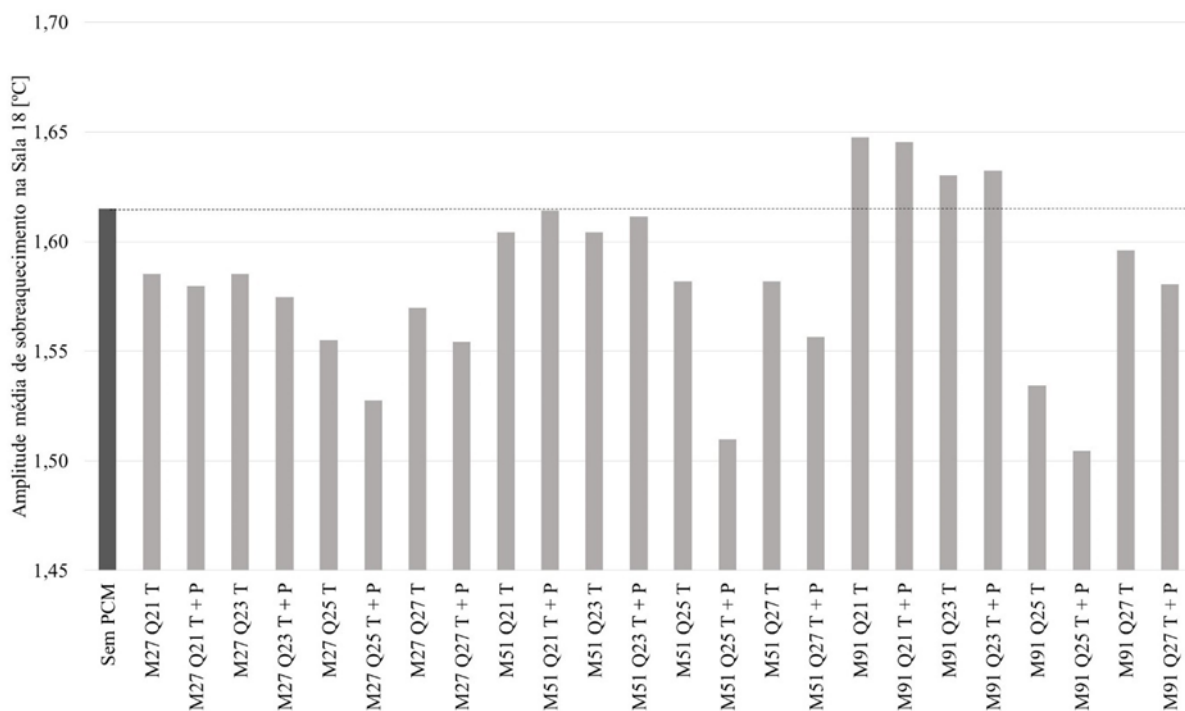


Figura 5-16 Amplitude média de sobreaquecimento na Sala 18

A amplitude média de sobreaquecimento para a Sala 18, à semelhança da amplitude máxima, não apresenta uma redução substancial. No entanto, a redução máxima é conseguida pelo PCM M91 Q25 T+P, com uma redução de 0,11 °C. Os PCM's do tipo M91 Q21 e M91 Q23 levam a um aumento da amplitude média residual, que ronda os 2%.

Na Figura 5-17, apresentam-se os graus-hora acumulados das diversas soluções de PCM.

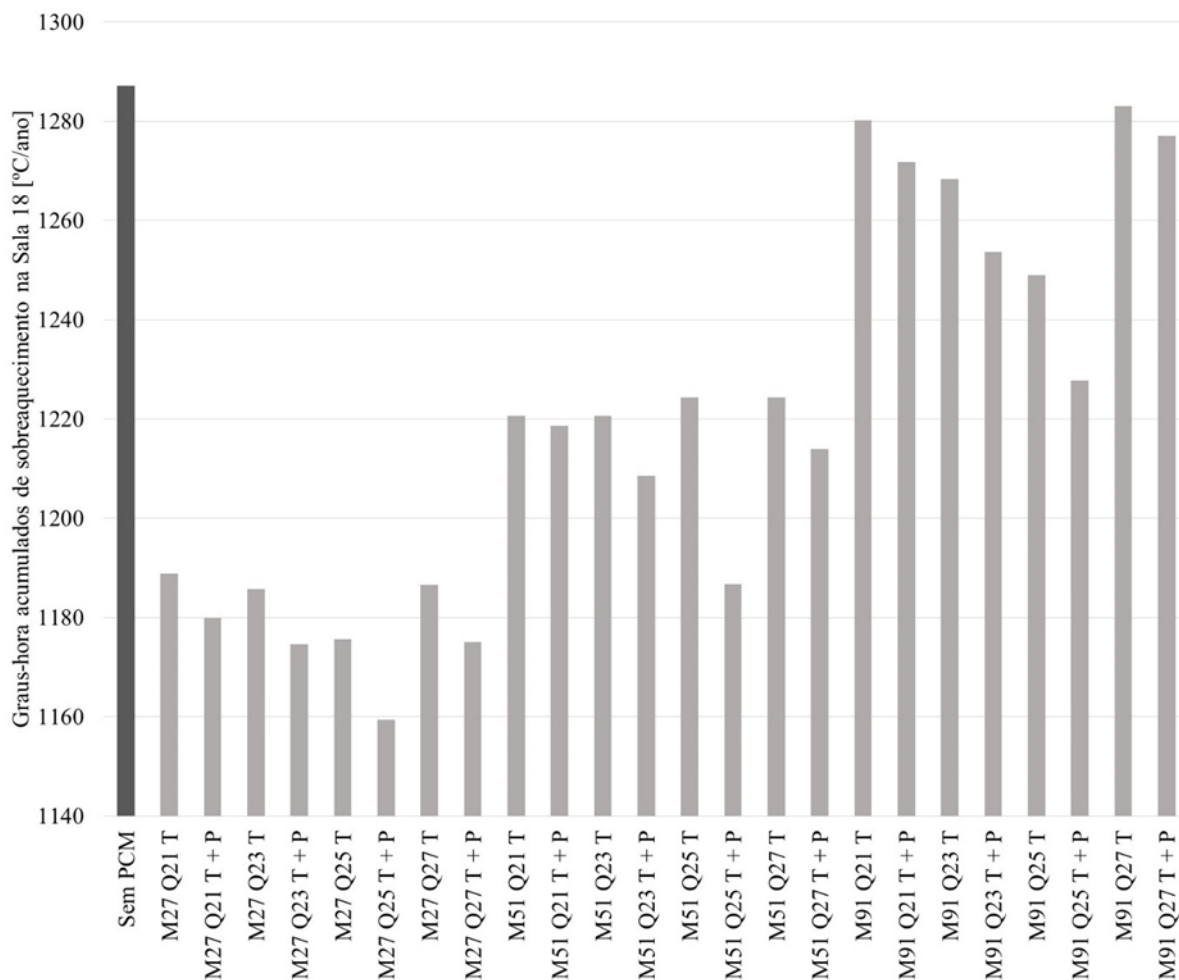


Figura 5-17 Graus-hora acumulados de sobreaquecimento na Sala 18

Este indicador demonstra que a aplicação de PCM na Sala 18 se traduz num efeito positivo na redução dos graus-hora de sobreaquecimento, chegando a uma redução máxima de 9,92% para solução M27 Q25 T+P. O tipo M27 possui o melhor desempenho neste indicador. A temperatura de mudança de fase de 25 °C, é a que conduz às maiores reduções, em qualquer um dos tipos de PCM.

O número de ocorrências de sobreaquecimento por ano na Sala 18 é apresentado na Figura 5-18.

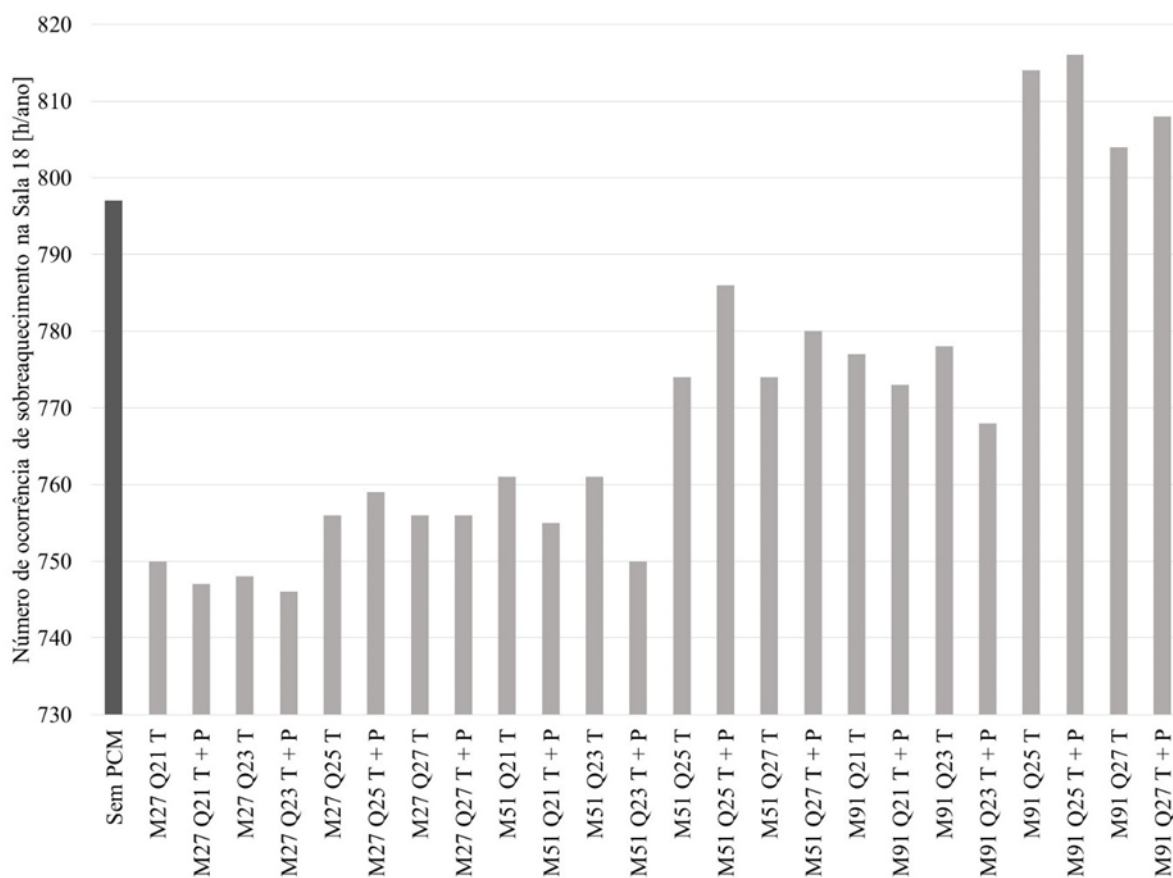


Figura 5-18 Número de ocorrência de sobreaquecimento por ano na Sala 18

A partir da Figura 5-18 é possível retirar as seguintes conclusões:

- Os PCM's do grupo M91, a partir da temperatura de mudança de fase de 25 °C, levam a um aumento de ocorrências de sobreaquecimento;
- O PCM M27 Q23 T+P traduz a maior redução (6,40%);
- Os PCM's com temperatura de mudança de fase de 23°C, quando aplicados nos tetos e paredes, revelam-se os mais eficazes dos respectivos grupos;
- Os PCM's com menor espessura mantêm-se com o melhor desempenho na Sala 18 na análise sem sistema de arrefecimento.

- **Síntese final**

Analisados os quatro indicadores, a escolha das soluções com melhor desempenho para a análise sem sistema de arrefecimento da Sala 18, apresenta-se na Tabela 5-4.

Tabela 5-4 Soluções PCM com melhor desempenho na análise sem sistema de arrefecimento na Sala 18

Soluções de PCM	R_{pond} [%]
M27 Q25 T + P	5,94
M27 Q27 T + P	5,62
M51 Q25 T + P	5,12
M27 Q25 T	4,97
M27 Q21 T + P	4,45

5.4 Análise detalhada

5.4.1 Enquadramento

Como referido no capítulo 4, as soluções com melhor desempenho na análise geral, são alvo de estudo na análise detalhada. Para esta análise, mantêm-se as considerações definidas no subcapítulo 5.2, à exceção do *timestep* das simulações, que passa de 30 para 60. Como o que se pretende é uma análise mais minuciosa, os dados de saída passam a ser de minuto em minuto.

No decorrer desta análise, é abordado inicialmente o efeito das soluções selecionadas na diminuição e no deslocamento do pico de necessidade diária de energia para o arrefecimento. Em seguida, é analisada a eficiência do ciclo de carga e descarga dos PCM's selecionados na análise sem arrefecimento, de forma a aferir se os PCM's estão a ser aproveitados de forma eficiente, numa base diária.

5.4.2 Análise detalhada com sistema de AVAC

5.4.2.1 Enquadramento

Segundo Muruganatham (2010), existe um potencial de poupança na utilização de materiais de mudança de fase quer para reduzir as necessidades de energia, quer para alterar os picos de procura.

Uma análise com o nível de detalhe que foi adotado não é possível de aplicar a todo o ano devido ao tempo necessário para o tratamento dos resultados. Desta forma, a análise detalhada com sistema de AVAC, foi realizada apenas para o período de 15 a 19 de julho, considerando como representativo de uma semana de verão. Os dados resultantes das simulações passam a

ser calculados e exportados com um intervalo de um minuto, com o objetivo de se tratarem os seguintes indicadores:

- Deslocamento do pico de necessidade de arrefecimento em relação à simulação de referência;
- Redução do consumo, comparado à simulação de referência;
- Redução percentual dos minutos de funcionamento do sistema de AVAC, em relação à simulação de referência.

5.4.2.2 Análise detalhada com sistema de AVAC na Sala 6

A redução diária da necessidade de pico de arrefecimento resultante da aplicação das soluções com PCM é apresentada na Figura 5-19. O pico da necessidade de arrefecimento da simulação de referência para a Sala 6 foi de 0,024 kW/m².

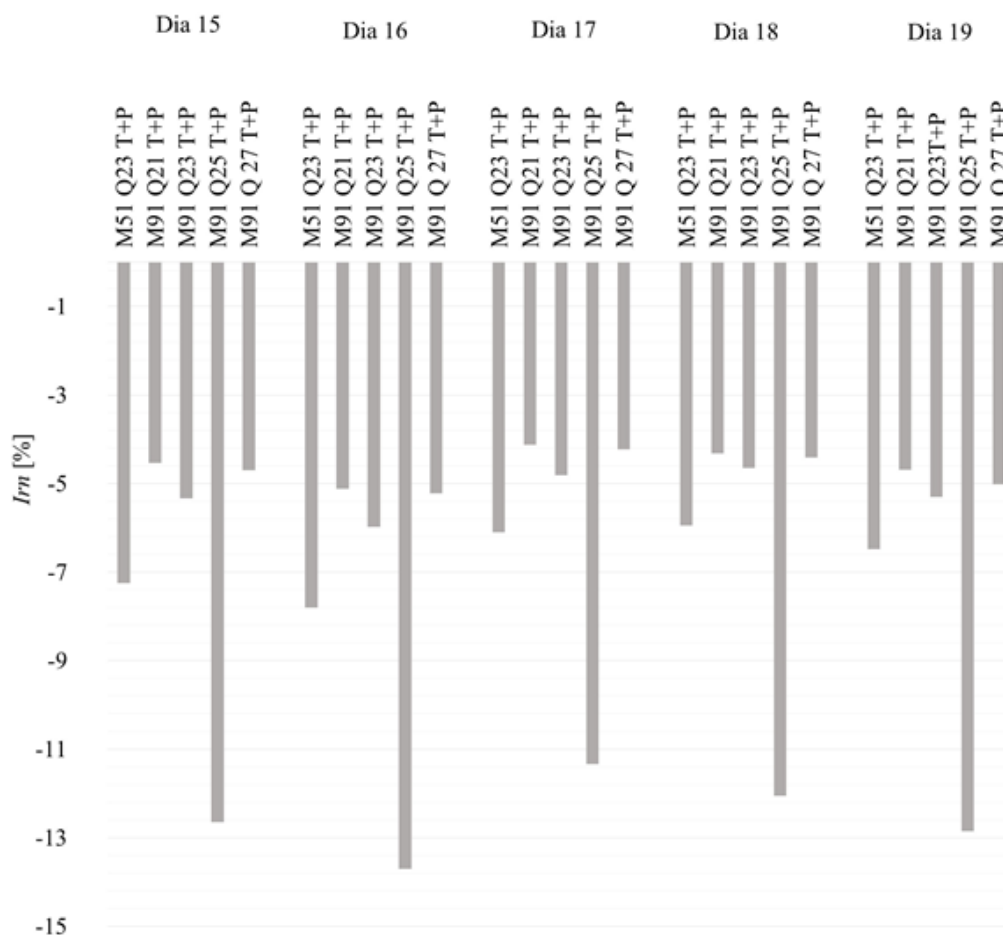


Figura 5-19 Redução da necessidade de pico de arrefecimento na Sala 6

A partir da Figura 5-19 é possível concluir que:

- Durante toda a semana analisada o PCM M91 Q25 T+P, é o que apresenta o melhor desempenho, com uma redução média de 12,52% em relação à simulação de referência;
- A solução PCM M91 Q21 T+P apresenta o menor desempenho na redução do pico.

A Tabela 5-5 apresenta o deslocamento do pico de necessidade de arrefecimento para a Sala 6.

Tabela 5-5 Deslocamento do pico de necessidade de arrefecimento, Sala 6

Deslocamento de pico						
Dia	Hora de Pico Sem PCM [h]	M51 Q23 T+P [h]	M91 Q21 T+P [h]	M91 Q23 T+P [h]	M91 Q25 T+P [h]	M91 Q27 T+P [h]
15	15:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
16	15:02	0:04	0:02	0:03	0:00	0:01
17	14:02	0:00	0:00	0:00	-0:01	0:00
18	21:59	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
19	15:03	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00

A utilização de PCM na Sala 6 não possui um efeito notório no deslocamento do pico de necessidade energética. Ainda assim, regista-se no dia 16 o atraso no pico de necessidade energética em todas as soluções, exceto o M91 Q25 T+P. O deslocamento máximo conseguido foi no dia 16, para o PCM M51 Q23 T+P, e de apenas 4 minutos.

Ao comparar os dias, é possível observar uma diferença significativa, entre o dia 18 e os restantes. Para a Sala 6, a quinta-feira é o dia da semana com maior período de aulas em regime pós-laboral. Dado que, os ganhos de iluminação aumentam nesse período e o valor considerado para as renovações horárias diminui, o pico de necessidade dá-se às 21:59. Ainda assim, no dia 18 o pico verificado às 21:59 de 20,62 W/m² é apenas 0,6 W/m² superior ao segundo valor máximo, verificado às 15:01.

A redução de minutos com necessidade de arrefecimento na Sala 6, é apresentado na Figura 5-20.

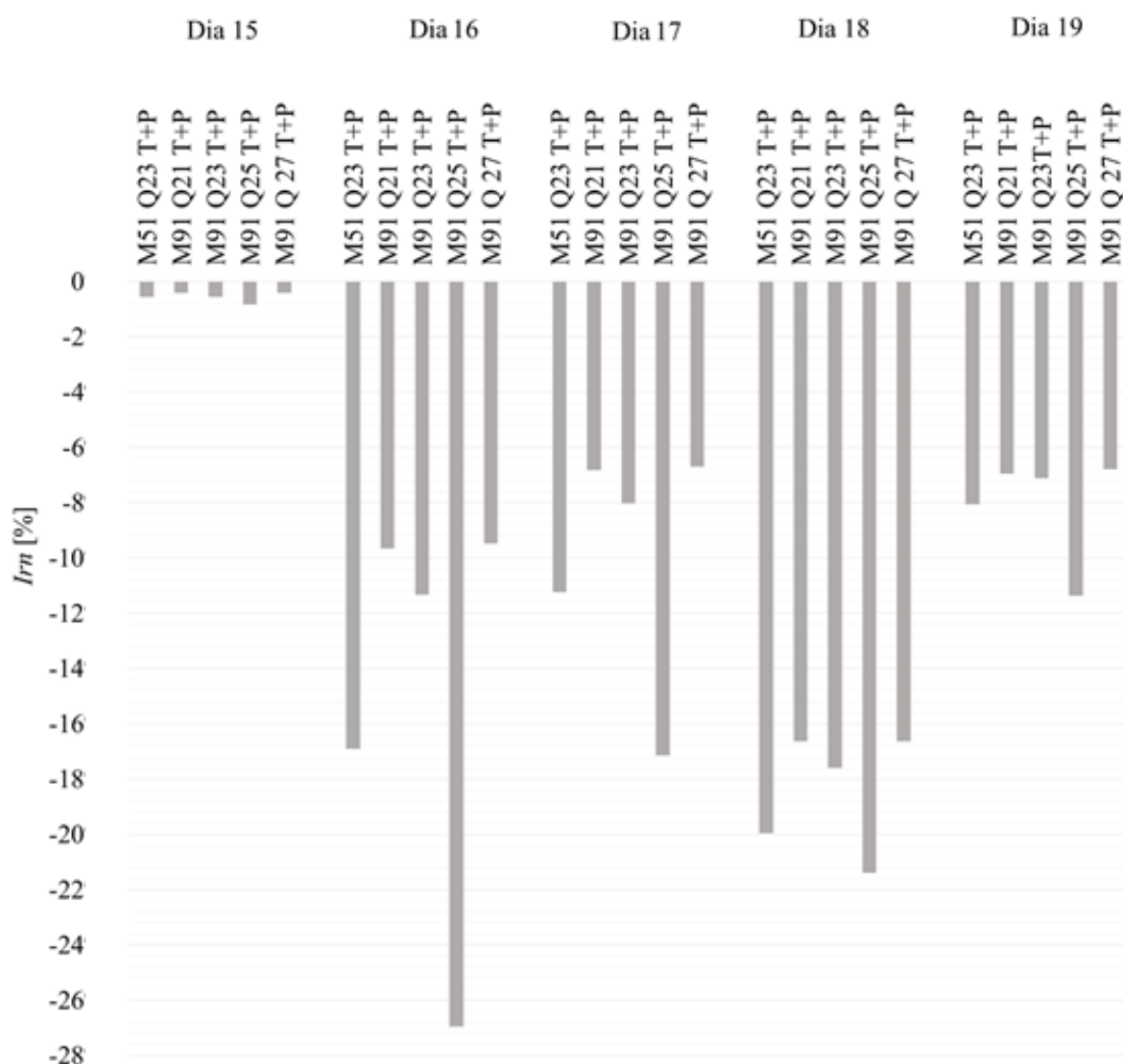


Figura 5-20 Redução do número de minutos com necessidade de arrefecimento na Sala 6

O número de minutos necessários para arrefecimento registados na simulação de referência apresentam-se na Tabela 5-6.

Tabela 5-6 Número de minutos com necessidade de arrefecimento da simulação de referência na Sala 6

	Dia 15	Dia 16	Dia 17	Dia 18	Dia 19
Número de minutos [min]	721	538	747	631	633

A redução do número de minutos com necessidades de arrefecimento na Sala 6, permite, no máximo, diminuir o tempo de funcionamento do sistema de AVAC em 26,95% em relação à

simulação de referência, no dia 16. O PCM M91 Q25 T+P consegue o melhor desempenho durante o período analisado, com uma média de redução de 15,54%

Na Tabela 5-7 apresentam-se as necessidades de arrefecimento acumuladas diárias para a Sala 6, para a semana em estudo.

Tabela 5-7 Necessidades diárias arrefecimento na Sala 6

	Sem PCM	M51 Q23 T+P	M91 Q21 T+P	M91 Q23 T+P	M91 Q25 T+P	M91 Q27 T+P
	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]
Dia 15	9,80	8,33	8,86	8,73	7,38	8,86
Dia 16	7,33	6,24	6,58	6,48	5,63	6,58
Dia 17	12,88	11,46	11,88	11,74	10,45	11,87
Dia 18	7,80	6,83	7,09	7,00	6,08	7,08
Dia 19	8,59	7,47	7,74	7,65	6,66	7,73
Total	46,40	40,33	42,16	41,59	36,21	42,12

Como é possível verificar através da Tabela 5-7 a solução que apresenta a menor necessidade acumulada é o PCM M91 Q25 T+P.

5.4.2.3 Análise detalhada com sistema de AVAC na Sala 18

A redução da necessidade de pico de arrefecimento (valores horários), conseguida pelos PCM's escolhidos para a Sala 18 é apresentada na Figura 5-21. O pico de necessidade de arrefecimento da simulação de referência para a Sala 18 foi de 0,025 kW/m².

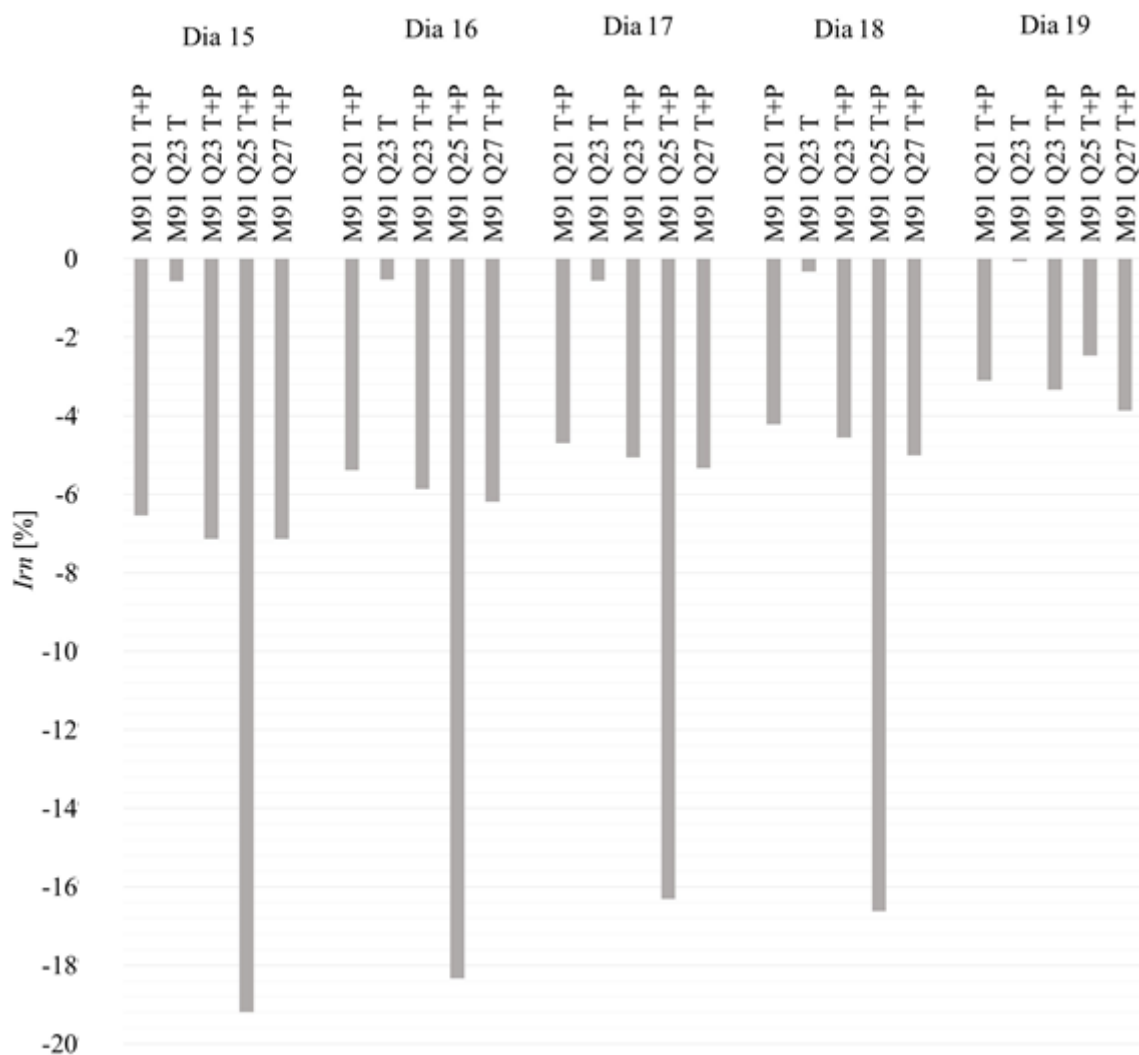


Figura 5-21 Redução da necessidade de pico de arrefecimento na Sala 18

A partir da representação gráfica na Figura 5-21 é possível concluir que:

- Todas as soluções de PCM escolhidos exibem redução da necessidade de pico, ainda que, no caso do M91 Q23 T a redução seja residual;
- A solução M91 Q25 T+P apresenta-se como a solução que melhor se adequa à Sala 18, à exceção do dia 19, onde o melhor é o M91 Q27 T+P, no entanto, a diferença é de apenas 0,0004kW/m²;
- A redução máxima conseguida foi de 19,19%, verificada no primeiro dia da análise.

O deslocamento do instante em que ocorre o pico, provocado pela utilização de PCM na Sala 18, apresenta-se na Tabela 5-8.

Tabela 5-8 Deslocamento do pico de necessidade de arrefecimento na Sala 18

Dia	Hora de Pico Sem PCM [h]	M91 Q21 T+P [h]	M91 Q23 T [h]	M91 Q23 T+P [h]	M91 Q25 T+P [h]	M91 Q27 T+P [h]
15	14:00	0:00	1:00	0:00	0:00	0:00
16	21:00	0:01	0:00	0:01	0:55	0:01
17	19:02	0:05	0:03	0:05	0:02	0:02
18	20:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
19	21:00	0:00	0:00	0:00	-0:59	0:00

A partir da Tabela 5-8 é possível concluir que:

- O PCM M91 Q23 T regista o maior deslocamento do pico, que acontece no dia 15 (1 h);
- Globalmente, o PCM M91 Q25 T+P regista os maiores deslocamentos dos picos diários de necessidade durante a semana escolhida;
- Quando comparados os dias, é possível verificar a grande disparidade que ocorre entre o dia 15 e os restantes. No dia 15 os ganhos através da radiação solar são mais significativos, a radiação verificada no ficheiro climático às 14 horas desse dia é cerca do dobro do valor verificado para os restantes dias.

A redução do número de minutos com necessidade de arrefecimento na Sala 18 está apresentada na Figura 5-22.

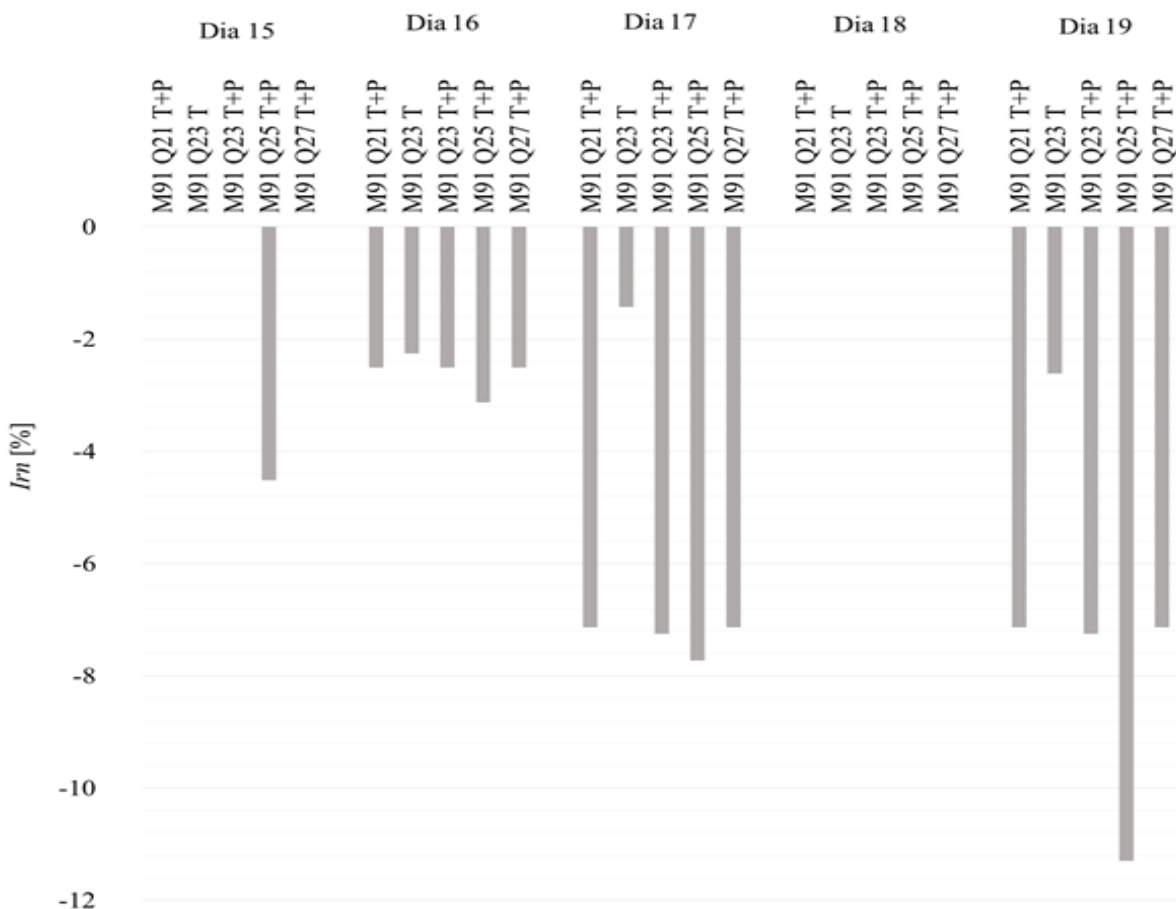


Figura 5-22 Redução do número de minutos com necessidade de arrefecimento na Sala 18

O número de minutos necessários para arrefecimento registados na simulação de referência apresentam-se na Tabela 5-9.

Tabela 5-9 Número de minutos com necessidade de arrefecimento para a simulação de referência

	Dia 15	Dia 16	Dia 17	Dia 18	Dia 19
Número de minutos [min]	841	799	841	841	841

A representação gráfica da Figura 5-22, acerca da redução do número de minutos com necessidade de arrefecimento, permite concluir que:

- O PCM que leva à maior redução do período de tempo com necessidades de arrefecimento foi o M91 Q25 T+P;
- Nenhum dos PCM's escolhidos levou a um aumento do período de tempo com necessidades de arrefecimento.

A Tabela 5-10 apresenta as necessidades diárias acumuladas, registadas para cada uma das soluções com PCM.

Tabela 5-10 Necessidades diárias arrefecimento, Sala 18

	Sem PCM	M91 Q21 T+P	M91 Q23 T	M91 Q23 T+P	M91 Q25 T+P	M91 Q27 T+P
	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]
Dia 15	12,26	10,73	12,02	10,60	8,03	10,67
Dia 16	15,85	14,56	15,67	14,45	11,99	14,46
Dia 17	16,84	15,58	16,69	15,49	12,77	15,50
Dia 18	15,36	14,23	15,21	14,15	11,55	14,15
Dia 19	13,24	12,28	13,13	12,23	10,00	12,23
Total	73,55	67,39	72,74	66,92	54,33	67,01

A utilização de PCM na Sala 18 permite a diminuição das necessidades de energia para arrefecimento. Das soluções estudadas é possível concluir, através da Tabela 5-10, que o PCM M91 Q25 T+P apresenta a maior redução das necessidades energéticas durante a semana em estudo.

5.4.3 Análise detalhada sem sistema de arrefecimento

5.4.3.1 Enquadramento

Na análise geral, foi estudado o potencial de impacto dos materiais de mudança de fase em questões relacionadas com o conforto térmico (redução do sobreaquecimento) e redução das necessidades energéticas. No entanto, é, igualmente, interessante perceber se a solução escolhida está a ser devidamente aproveitada de acordo com as condições existentes, ou seja, determinar a eficiência do PCM.

O desempenho em termos de armazenamento de calor latente deve ser estudado em função da sua capacidade de carga e descarga de energia. Se for utilizado um PCM, que só esteja a armazenar uma pequena quantidade de calor face à sua real capacidade, a sua aplicação está sobredimensionada e certamente não económica. Da mesma forma, um PCM que não cumpra os seus ciclos de carga e descarga, não terá capacidade para executar esse processo de forma eficiente numa base diária.

Com base nestes pressupostos, nesta análise, é averiguado o comportamento dos PCM's selecionados, na semana de 15 a 19 de julho.

5.4.3.2 Metodologia de cálculo

Existem vários estudos que tratam a aplicabilidade de PCM em termos de melhoria do conforto térmico e redução das necessidades energéticas, no entanto, acerca da eficiência de armazenamento de calor latente não existem muitos (Ramakrishnan, *et al.*, 2016).

Segundo Ramakrishnan *et al.* (2016), um PCM aplicado num edifício a trabalhar em condições ideais carrega durante o dia (12h) e descarrega completamente durante a noite (12h). Para a avaliação da eficiência dos PCM's, o autor calcula 4 fatores de eficiência, T_C, T_{DC}, L_C e L_{DC} , que demonstram o comportamento dos PCM's durante um dia. A partir desses fatores, são calculados os coeficientes de eficiência que permitem avaliar o rendimento dos PCM's.

Assim, os fatores de eficiência, T_C e T_{DC} , revelam a eficiência do ciclo de carga e descarga dos PCM's, respetivamente. O seu cálculo é apresentado nas equações (5-3) e (5-4) (Ramakrishnan, *et al.*, 2016).

$$T_C = \frac{TC_{PCM}}{720} \quad (5-3)$$

Onde:

T_C	[-]	Fator de duração do armazenamento de calor latente
TC_{PCM}	[min]	Número de minutos a armazenar calor latente

$$T_{DC} = \frac{TD_{PCM}}{720} \quad (5-4)$$

Onde:

T_{DC}	[-]	Fator de duração da libertação de calor latente
TD_{PCM}	[min]	Número de minutos a descarregar calor latente

A fração de calor latente que é armazenada ou libertada representa o processo de solidificação e fusão do PCM. Um PCM que armazene uma porção reduzida de calor latente relativamente à sua capacidade, não é de todo um PCM apetecível. Para calcular os fatores que revelam a porção de calor latente armazenada e libertada durante um dia, são utilizadas as equações (5-5) e (5-6).

$$L_C = \frac{H_A}{H_{MF}} \quad (5-5)$$

Onde:

L_C	[-]	Fator de calor latente armazenado
H_A	[J]	Calor latente armazenado por dia
H_{MF}	[J]	Capacidade total latente

$$L_{DC} = \frac{H_L}{H_{MF}} \quad (5-6)$$

Onde:

L_{DC}	[-]	Fator de calor latente libertado
H_L	[J]	Calor latente libertado por dia

Ao combinar os fatores atrás referidos, surgem os coeficientes: CE – coeficiente de eficiência de descarga; e HE – coeficiente de eficiência de carga. A formulação matemática dos coeficientes CE e HE é apresentada nas equações (5-7) e (5-8).

$$CE = \sqrt{L_C \times T_C} \quad (5-7)$$

$$HE = \sqrt{L_{DC} \times T_{DC}} \quad (5-8)$$

De acordo com a formulação apresentada, para o cálculo dos fatores de eficiência, é necessário determinar a evolução do calor latente armazenado e libertado durante o período em análise. Para isso, é necessário determinar a evolução da entalpia na camada de PCM. Como referido no capítulo 4, o algoritmo utilizado para os materiais de mudança de fase, utiliza a metodologia de cálculo das diferenças finitas, para isso o *EnergyPlus* divide a camada de PCM em nós e atualiza as entalpias num processo iterativo apresentado na equação (4-4).

Neste trabalho, foi utilizada uma metodologia simplificada para a determinação da entalpia. Os PCM's presentes na base de dados do *DesignBuilder* são caracterizados por 16 pares de entalpia-temperatura que revelam o comportamento do PCM.

Os grupos de PCM apenas variam em termos de espessura mantendo as restantes propriedades inalteradas, como apresentado na Tabela 5-11.

Tabela 5-11 Propriedades dos tipos de PCM

	e	λ	C_p	ρ
	[m]	[W/ (m.K)]	[J/ (kg. K)]	[kg/m ³]
M27	0,0112	0,200	1970	235
M51	0,0208	0,200	1970	235
M91	0,0371	0,200	1970	235

Como é possível concluir através da Tabela 5-11, todos os tipos de PCM possuem as mesmas propriedades, à exceção da espessura. A diferença que existe entre as várias soluções estudadas está refletida nos pares entalpia-temperatura que dão origem à curva de mudança de fase. Desta forma, surgiu a necessidade de estabelecer uma relação entre os tipos de PCM e as suas temperaturas de mudança de fase. Para isso, procedeu-se ao cálculo da capacidade de armazenamento de calor latente por metro quadrado, dando origem a novas curvas que contemplavam a espessura do material e capacidade latente de cada solução.

Por observação da curva de entalpia-temperatura, verifica-se que o PCM não muda de fase a uma temperatura fixa, mas sim, numa gama de temperaturas mais alargada. Desta forma, foram escolhidos 4 pares de temperatura-entalpia que representassem o maior intervalo de armazenamento de entalpia para cada uma das temperaturas de mudança de fase.

Com a utilização da ferramenta de cálculo Excel®, representaram-se graficamente as curvas dos tipos de PCM, para cada temperatura de mudança de fase, como apresentado a título de exemplo na Figura 5-23. Ao traçar uma linha de tendência a cada função foi possível, de forma simplificada, obter equações que permitissem calcular a entalpia a partir da temperatura instantânea dos PCM's (obtida como *output* do *EnergyPlus*).

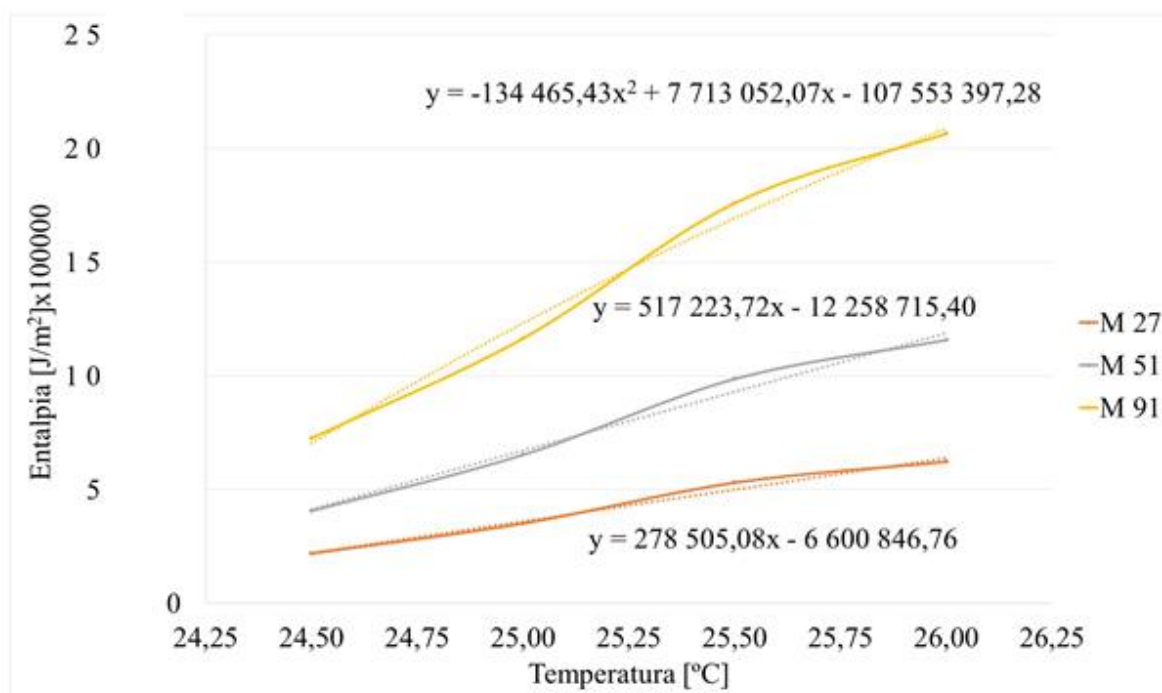


Figura 5-23 Exemplo das equações utilizadas para os PCM's com temperatura de mudança de fase 25 °C

5.4.3.3 Análise detalhada sem sistema de arrefecimento na Sala 6

Atendendo às propriedades dos materiais de mudança de fase, o rendimento do ciclo de carga e descarga é influenciado pela temperatura interna do PCM. Assim, o cálculo dos fatores de eficiência relativos ao período de carga e descarga de energia necessita que se determine a evolução do estado do PCM. A Figura 5-24 apresenta a distribuição dos períodos de funcionamento dos PCM's escolhidos durante a semana em estudo.

Os períodos estão divididos em função da temperatura do PCM. Caso a sua temperatura interna seja superior ou inferior à sua gama de mudança de fase considera-se acima ou abaixo, respetivamente. Se a temperatura interna estiver contida dentro da gama de temperatura de mudança de fase, a evolução crescente ou decrescente revela se o PCM está a carregar ou descarregar.

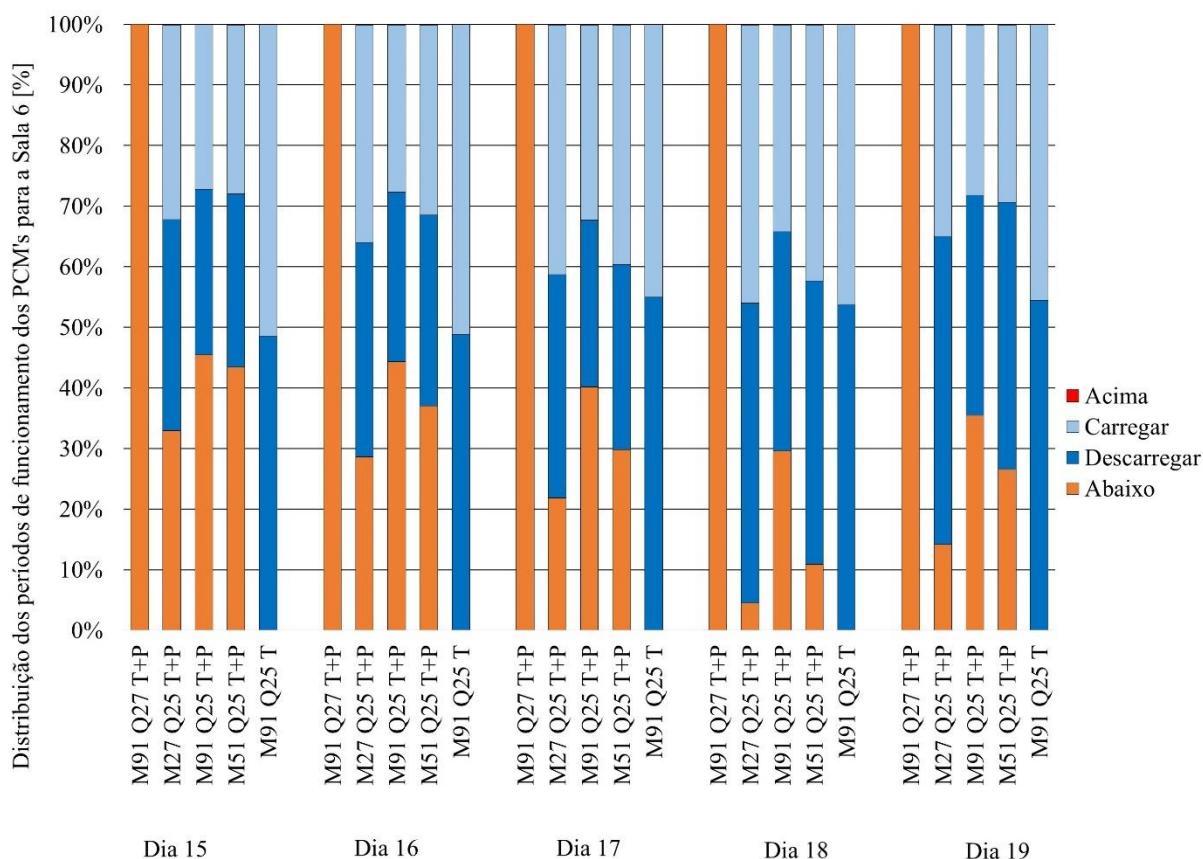


Figura 5-24 Distribuição dos períodos de funcionamento dos PCM's para a Sala 6

A partir da Figura 5-24 é possível concluir que:

- O PCM M91 Q27 T+P possui, sempre, a sua temperatura interna abaixo da gama de temperaturas de mudança de fase;
- O PCM M91 Q25 T está sempre dentro da gama de temperaturas de mudança de fase, o que lhe permitirá atingir maior eficiência;
- Os restantes casos possuem alguns períodos em que a temperatura interna do material é inferior a gama de temperaturas de mudança de fase, fazendo prever uma menor eficiência face à solução M91 Q25 T.

Para o cálculo dos coeficientes de eficiência, são necessários os fatores de eficiência apresentados no subcapítulo 5.4.3.2. Os fatores de eficiência T_C e T_{DC} são apresentados na Figura 5-25.

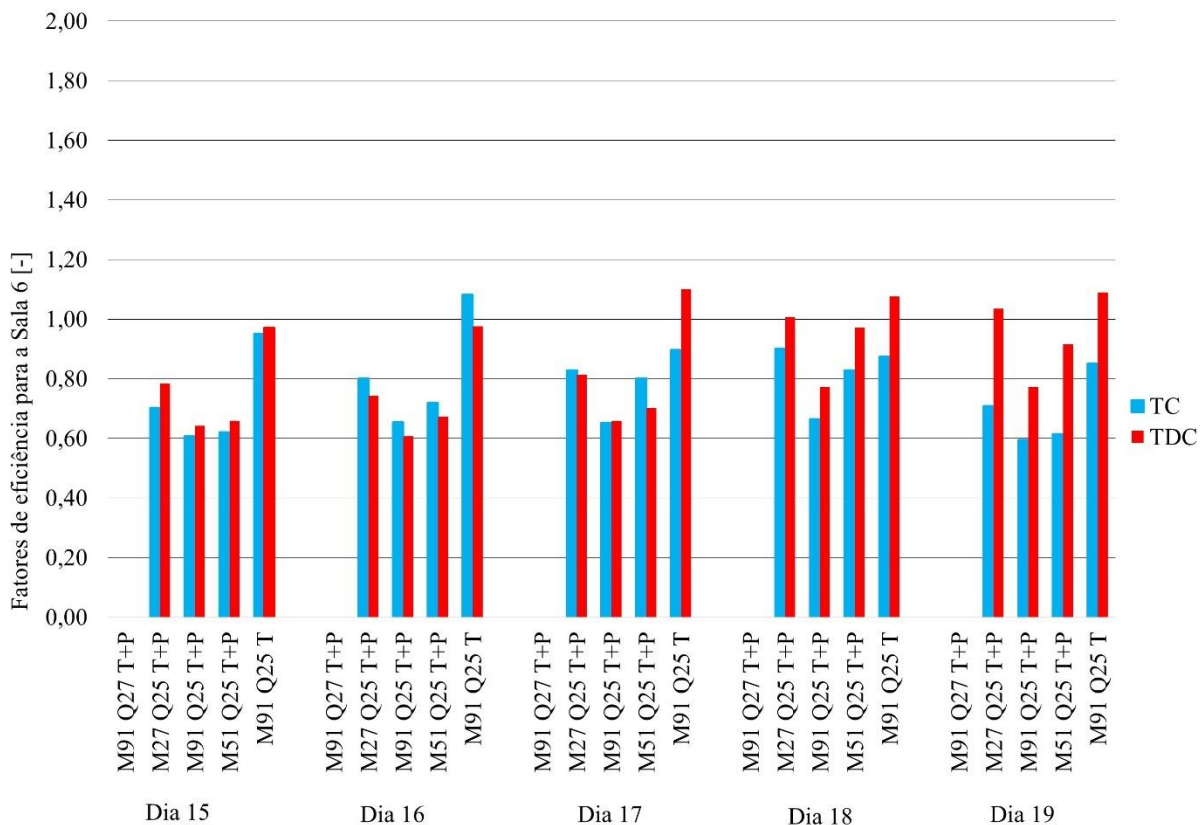


Figura 5-25 Fatores de eficiência T_C e T_{DC} para a Sala 6

Dado que um PCM ideal deverá permanecer quer em carga, quer em descarga, 720 min (fator de eficiência igual a 1,0). Valores inferiores a 1,0 significam que o PCM não descarrega/carrega durante o tempo considerado para um PCM ideal. Consequentemente, valores superiores a 1,0 significam que o PCM descarrega/carrega durante um tempo superior ao considerado para um PCM ideal.

Desta forma, a partir da interpretação da Figura 5-25 é possível concluir que:

- A solução M91 Q25T apresenta os valores mais próximos do PCM ideal;
- A solução M91 Q27 T+P não se encontra em qualquer um dos dias estudados em mudança de fase;
- As restantes soluções de PCM revelam um comportamento semelhante entre si, destacando-se ligeiramente a solução M27 Q25 T+P.

A quantidade de energia armazenada e libertada em mudança de fase é avaliada pelos fatores de eficiência L_C e L_{DC} . Quanto maior for a quantidade de energia armazenada e libertada no processo de carga e descarga, mais elevados serão os coeficientes de eficiência. Os fatores de eficiência L_C e L_{DC} , apresentam-se na Figura 5-26.

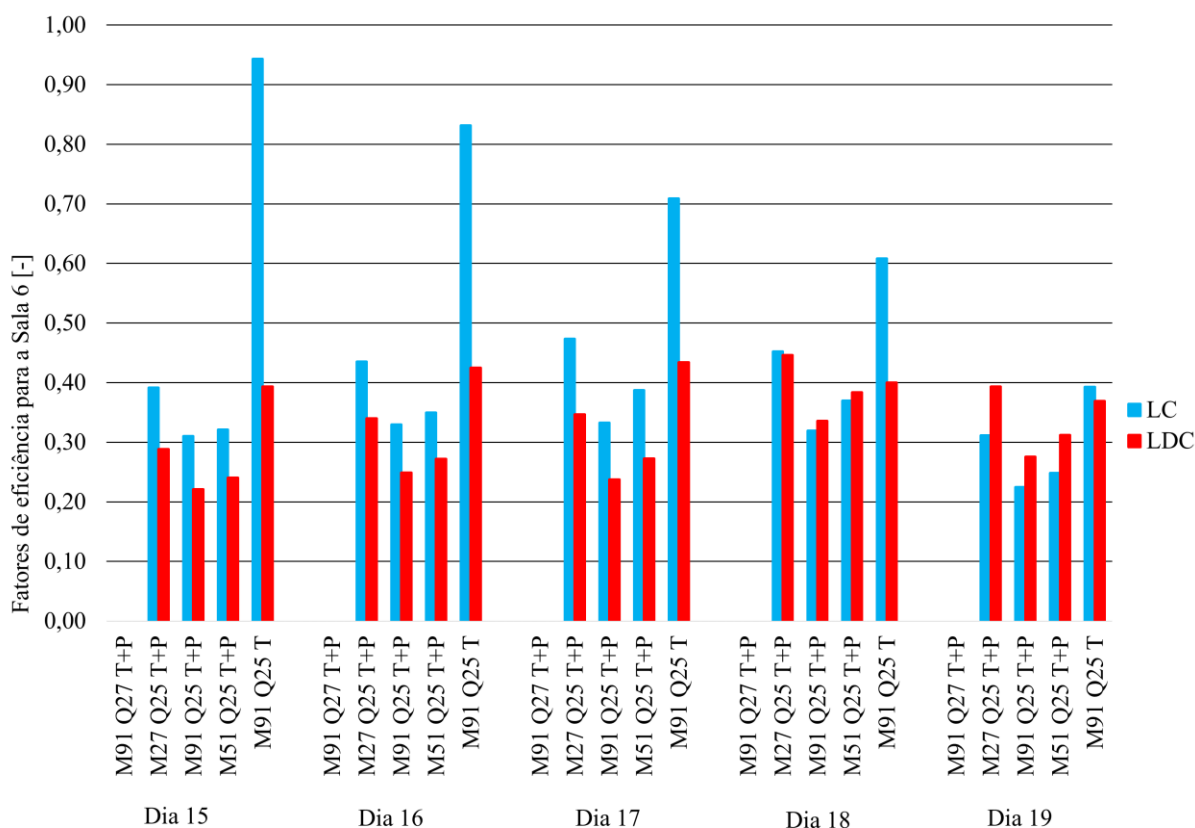


Figura 5-26 Fatores de eficiência L_C e L_{DC} para a Sala 6

Com os fatores de eficiência L_C e L_{DC} apresentados na Figura 5-26, é possível concluir que em nenhum dos dias do período de estudo, os PCM's selecionados armazenam ou libertam a sua capacidade total. Aliás, os valores apresentados estão bastante abaixo da sua capacidade. Pode concluir-se também que a solução com PCM M91 Q25T armazena mais calor do que os restantes, levando a pensar que a colocação extra de PCM nas paredes interiores não se revela necessária, uma vez que a capacidade instalada (tetos) não se esgota em nenhum dos dias. Verifica-se também que os PCM's não conseguem, durante a maior parte dos dias, descarregar o calor latente armazenado.

Tendo calculados os fatores de eficiência, é possível determinar a eficiência das diferentes soluções estudadas nesta análise. Os coeficientes de eficiência HE e CE para a Sala 6 são apresentados na Figura 5-27.

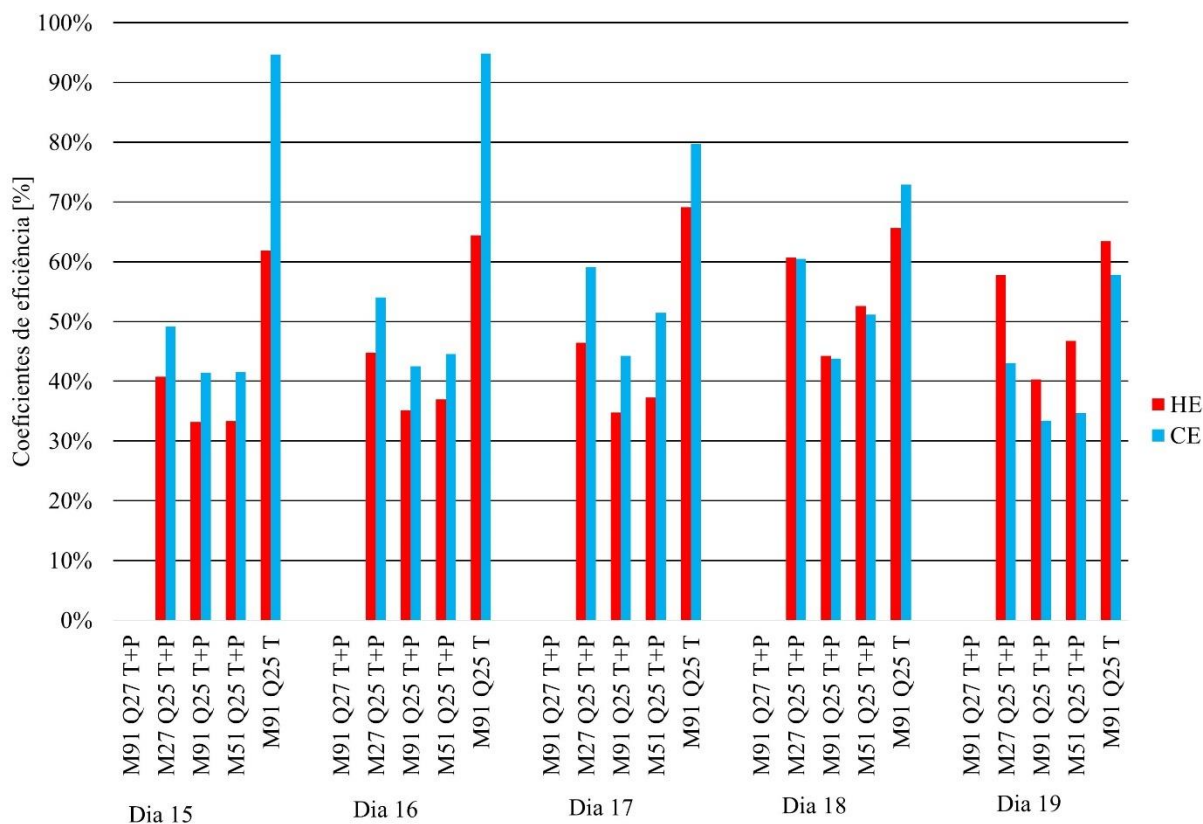


Figura 5-27 Coeficientes de eficiência HE e CE

Tendo em conta que o coeficiente HE exprime a eficiência de aquecimento e CE a eficiência de arrefecimento, consegue-se concluir que os PCM's têm mais facilidade em armazenar energia do que proceder à sua libertação. A solução que consegue os coeficientes de eficiência mais elevados é a M91 Q25T seguido da solução M27 Q25 T+P.

5.4.3.4 Análise detalhada sem arrefecimento na Sala 18

À semelhança da análise realizada para a Sala 6, foi aplicado o mesmo procedimento, desta vez, para a Sala 18, com os PCM's escolhidos na análise geral sem arrefecimento. Assim, apresenta-se na Figura 5-28 a distribuição dos períodos de funcionamento dos PCM's durante a semana estudada.

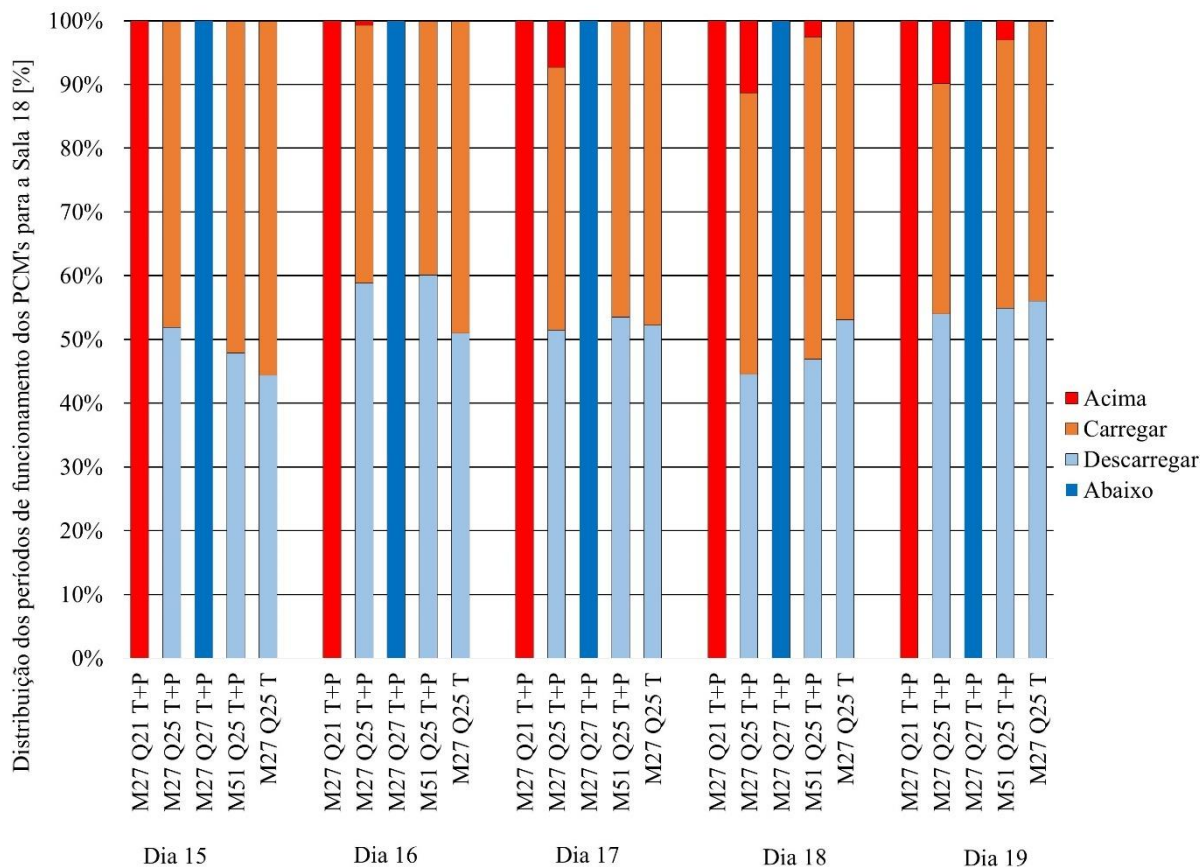


Figura 5-28 Distribuição dos períodos de funcionamento dos PCM's, Sala 18

A partir da Figura 5-28 é possível concluir que o PCM M27 Q21 T+P encontra-se sempre com a sua temperatura acima da gama de mudança de fase, não revelando um comportamento desejável. Contrariamente ao anterior, o M27 Q27 T+P permanece sempre com a sua temperatura abaixo da gama de mudança de fase. Os PCM's com a temperatura de mudança de fase de 25°C exibem as melhores distribuições, destacando-se as soluções M51 Q25 T+P e M27 Q25 T+P.

Os fatores de eficiência T_C e T_{DC} referentes à Sala 18 estão representados na Figura 5-29

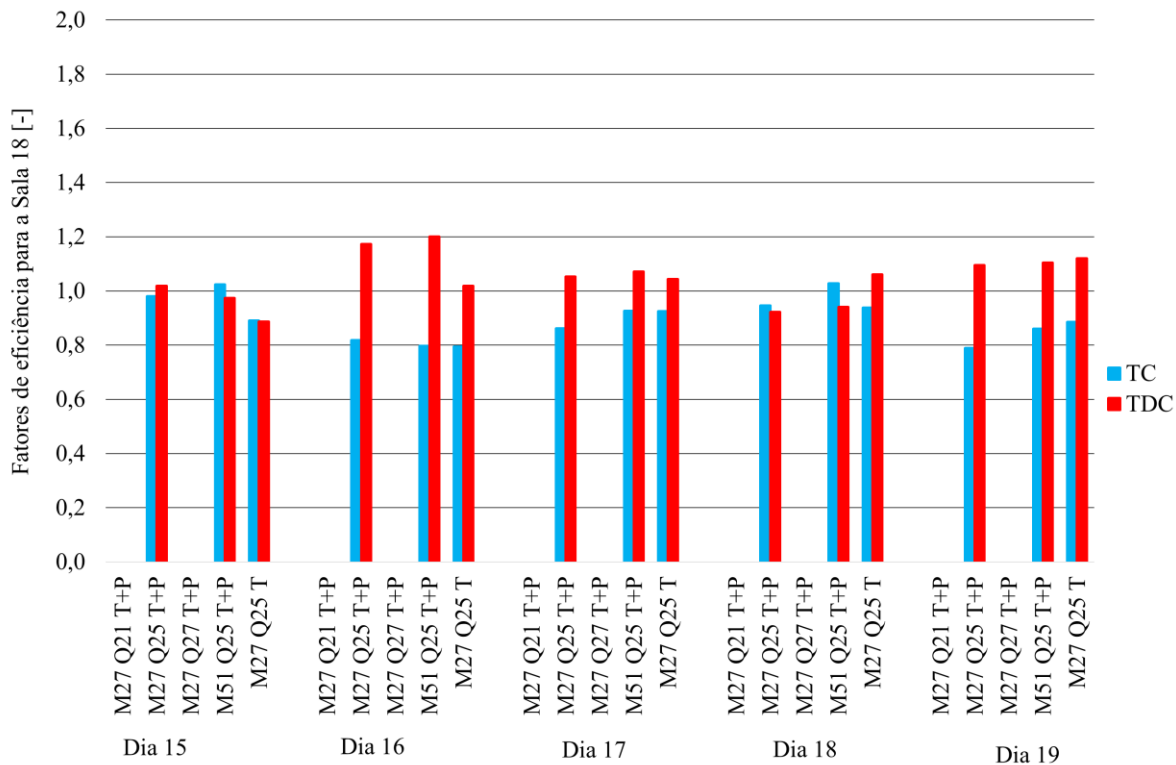


Figura 5-29 Fatores de eficiência T_C e T_{DC} para a Sala 18

Como já referido anteriormente, os PCM's M27 Q21 T+P e M27 Q27 T+P não se encontram, em nenhum momento, dentro da gama de mudança de fase, levando a que os fatores sejam iguais a zero. As restantes soluções seguem uma tendência semelhante entre eles, com valores próximos da unidade, o que, em relação a eficiência dos períodos de carga e descarga leva à expectativa de eficiências elevadas.

Os fatores de eficiência LC e LDC para a Sala 18, apresentam-se na Figura 5-30.

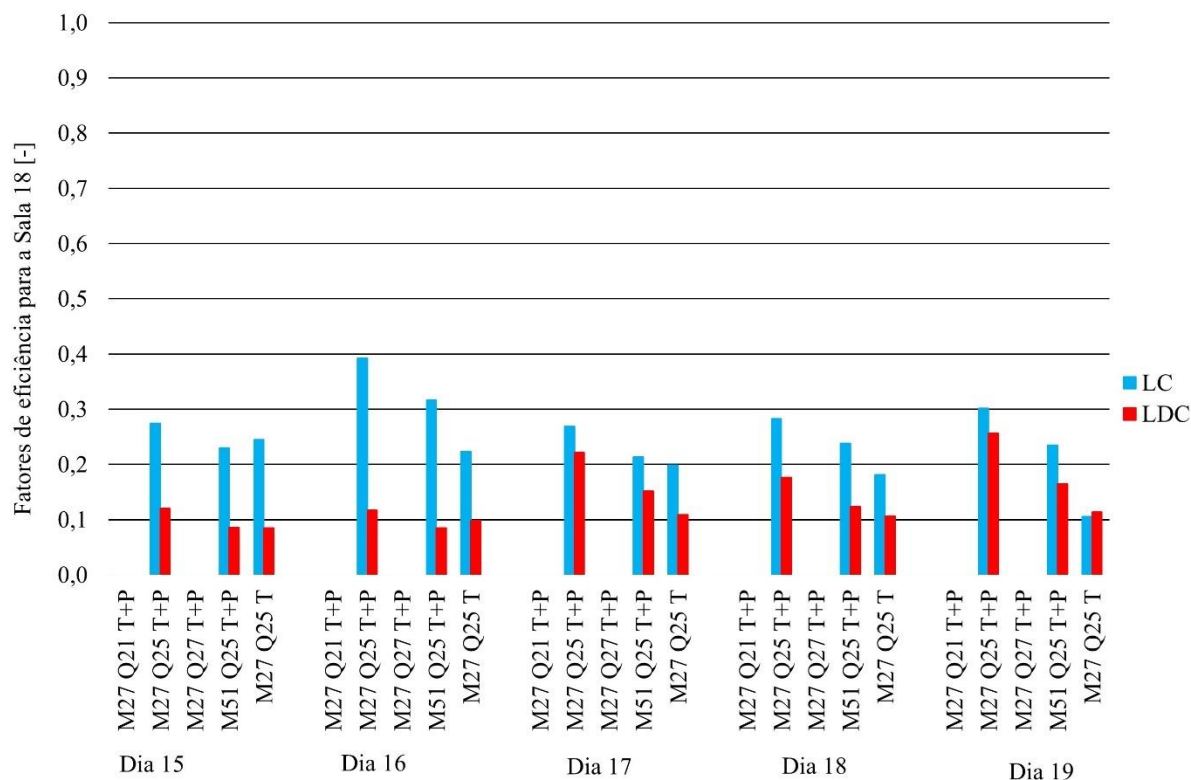


Figura 5-30 Fatores de eficiência LC e T_{DC} para Sala 18

Interpretando a Figura 5-30, é possível concluir que:

- A solução PCM M27 Q27 T+P e M27 Q21 T possuem todos os seus fatores iguais a zero;
- A solução M27 Q25 T+P e M51 Q25 T+P apresentam os fatores com o valor mais elevado;
- Quanto aos fatores que têm em conta o armazenamento e libertação de energia, possuem valores muito reduzidos, fazendo prever baixos coeficientes de eficiência.

Os coeficientes de eficiência da Sala 18 estão apresentados na Figura 5-31.

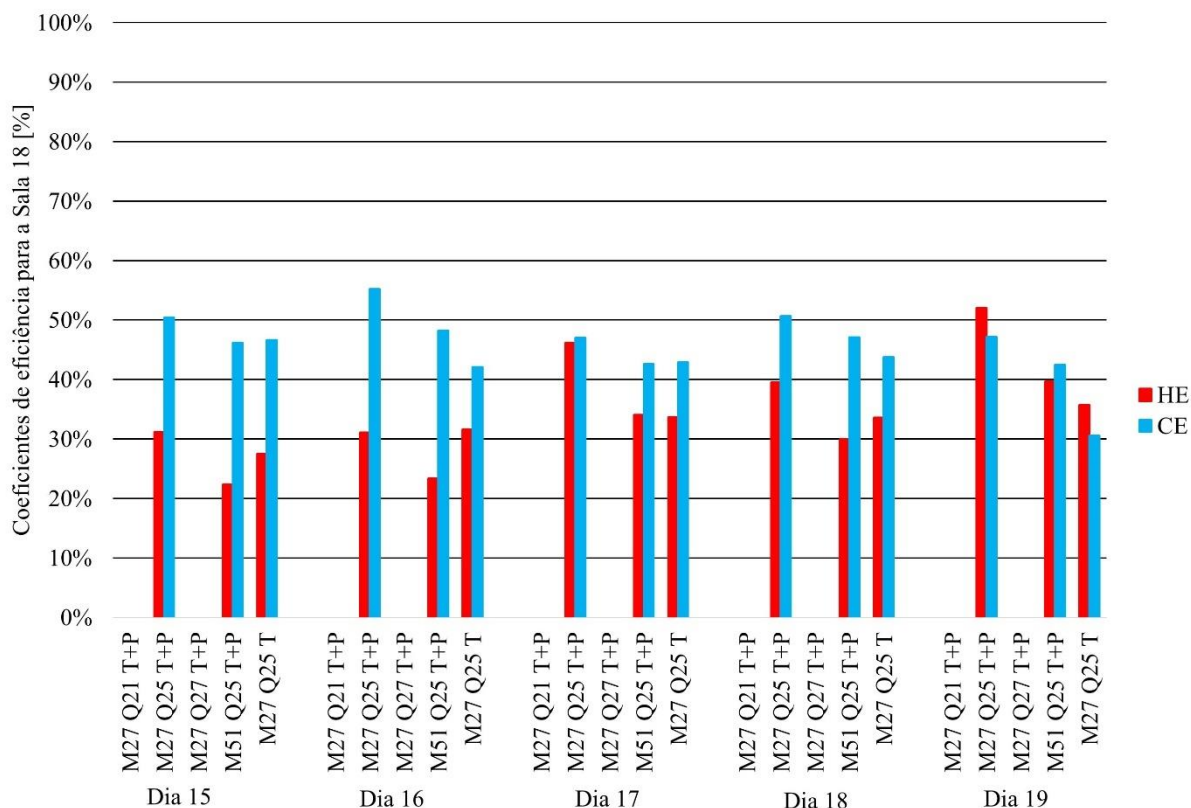


Figura 5-31 Coeficientes de eficiência dia 25 para a Sala 18

A interpretação Figura 5-31 permite concluir que os PCM’s revelam baixa eficiência. Se pelo lado dos fatores que revelam o período de carga e descarga existe um equilíbrio que poderia potenciar os coeficientes de eficiência, os fatores que têm em conta o armazenamento e libertação de energia são muito baixos, o que leva a uma redução da eficiência dos PCM’s utilizados. O PCM M27 Q25 T+P revela a melhor eficiência.

5.5 Análise económica e de sensibilidade

No decorrer deste capítulo, foi estudado o efeito da introdução de PCM no edifício escolar da ESTGV. As conclusões retiradas foram essencialmente acerca do potencial de poupança das necessidades energéticas e do seu impacto na manutenção do conforto térmico. No entanto, o custo é, muitas vezes, a variável mais importante no momento da decisão.

Assim, foi aplicado um método de avaliação que determina o período de retorno do investimento. A análise é feita a preços constantes e para três cenários distintos, apresentados na Tabela 5-12:

Tabela 5-12 Cenários da análise económica e de sensibilidade

Cenário	Taxa de	Taxa de variação	Custo do kWh, (c) [€]
	atualização, (d) [%]	do custo do produto, (e) [%]	
1	2	1	0,20
2	3	2	0,50
3	7	3	0,70

Tendo em conta que em toda a bibliografia consultada não existem referências a custos relacionados com a manutenção e que os custos de instalação do material são iguais para todas as soluções, apenas entraram custos de aquisição e as necessidades energéticas determinadas na análise geral com sistema de AVAC.

Os preços por metro quadrado utilizado nesta análise são indicados na Tabela 5-13.

Tabela 5-13 Preços por m² das soluções de PCM utilizadas

	Q21	Q23	Q25	Q27
M27				
M51	Esta informação não pode ser disponibilizada			
M91				

O período de retorno do investimento calculado para a Sala 6 e 18 é apresentado graficamente nas Figuras 5-32 e 5-33.

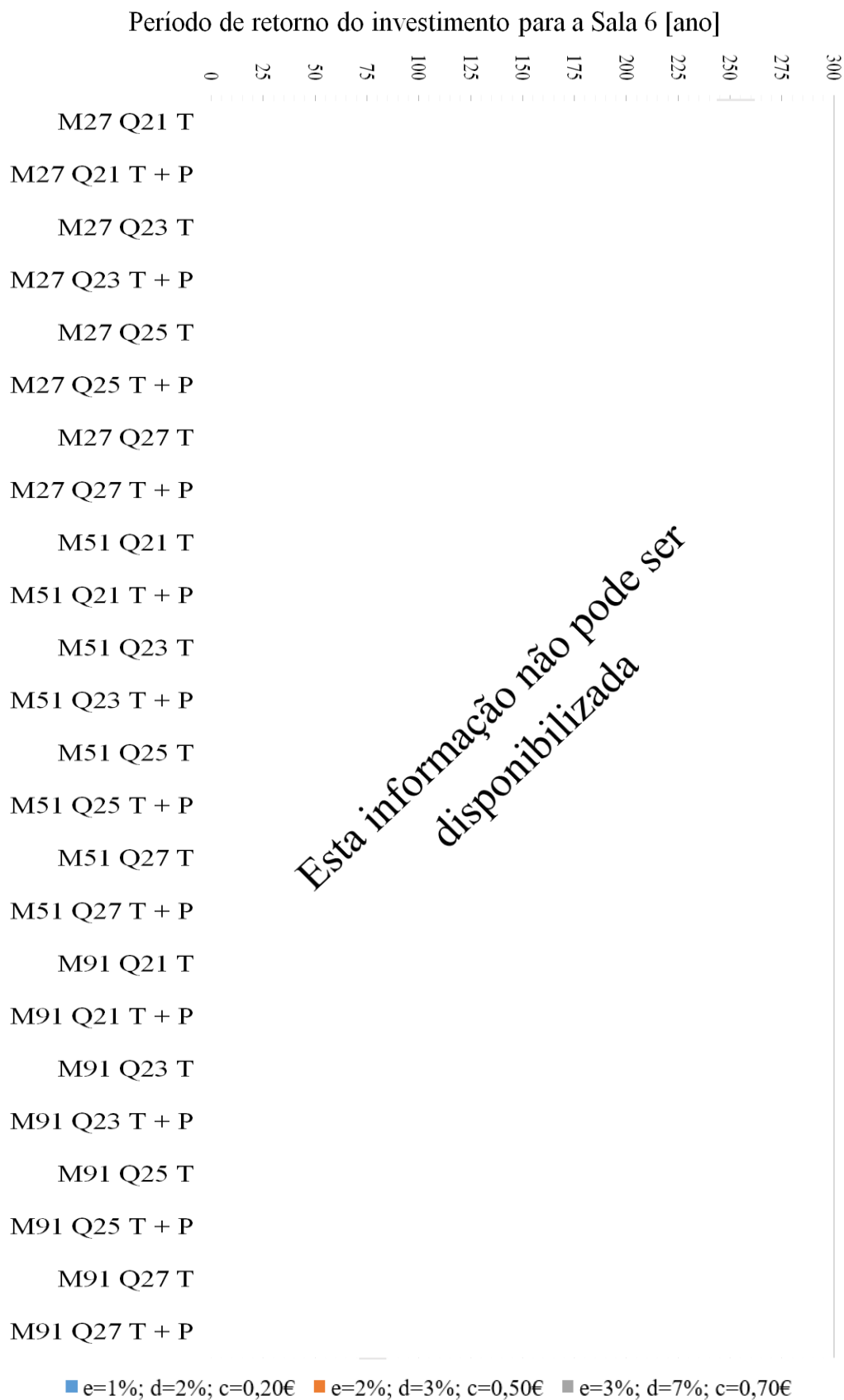


Figura 5-32 Período de retorno do investimento, Sala 6

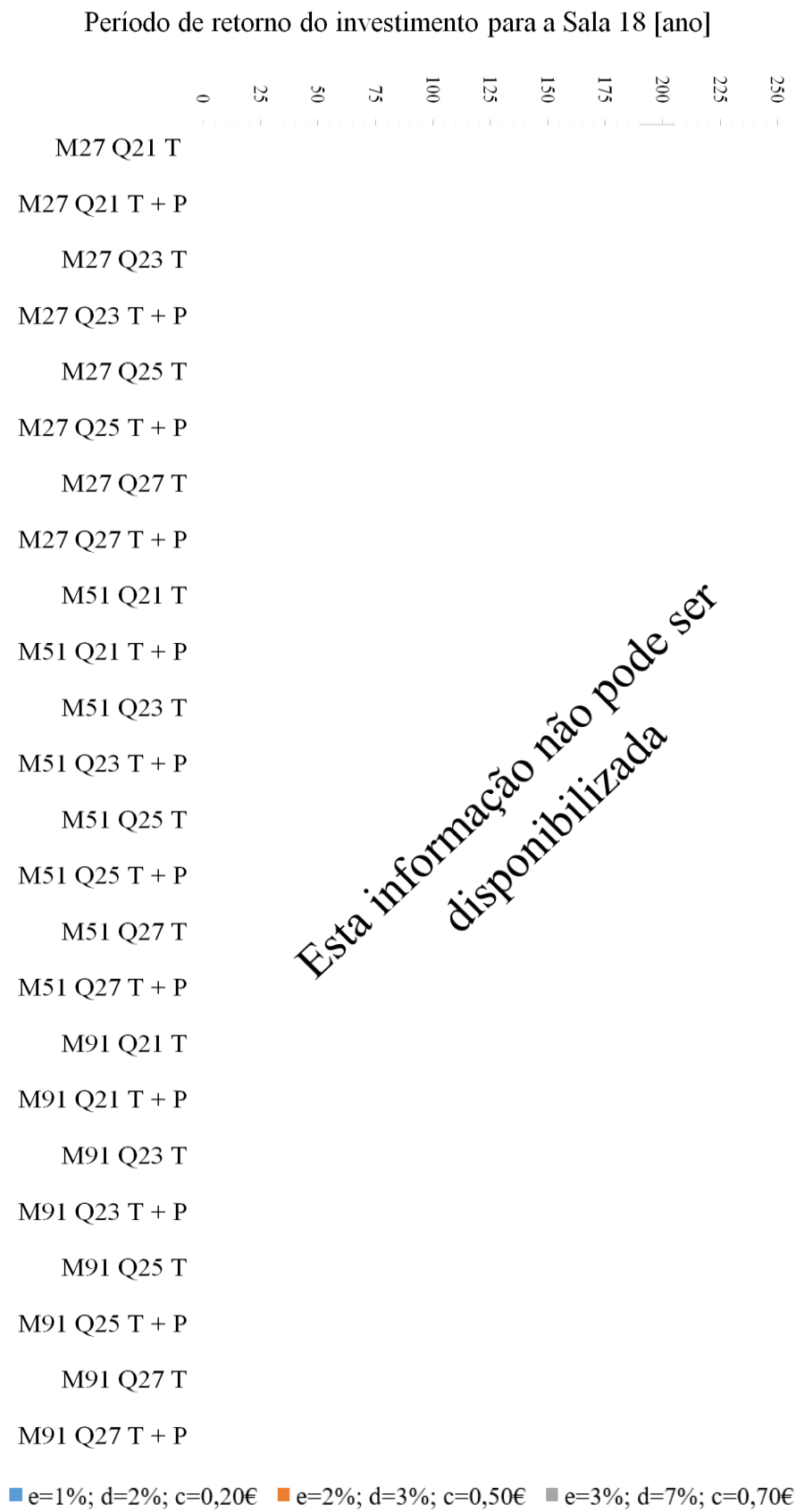


Figura 5-33 Período de retorno do investimento para a Sala 18

6. Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

O parque edificado português possui uma área de 452 000 000 m². Sabendo que 70% dos edifícios foram contruídos antes da primeira publicação do regulamento acerca das características de comportamento térmico de edifícios, a reabilitação energética é um tema em de grande destaque, fortemente motivado pela União Europeia, que sucessivamente tem libertado diretivas, que visam a promoção da melhoria do desempenho energético dos edifícios. Com o objetivo de tornar realidade os edifícios de necessidades quase nulas de energia, os técnicos deverão adotar medidas que permitam alcançar os requisitos necessários.

Para conseguir edifícios de elevado desempenho energético existem três principais estratégias: 1) Adoção de soluções passivas; 2) Soluções híbridas; 3) Soluções ativas. Neste trabalho, foi dada especial atenção à introdução de materiais de mudança de fase (soluções passivas).

A aplicabilidade de materiais de mudança de fase em edifícios requer algumas propriedades específicas tais como, a baixa inflamabilidade, a temperatura de mudança de fase adequada a aplicação e elevada capacidade de armazenamento de calor.

Neste trabalho foi simulado um bloco do edifício escolar da ESTGV, avaliando-se diversas soluções de reabilitação com incorporação de PCM macro-encapsulado (BIO-PCM). Para validar o modelo de simulação, foram registadas as temperaturas da Sala 6, entre os dias 29 de março e 23 de abril de 2016. Foi ainda necessário criar um ficheiro climático, utilizando as condições atmosféricas medidas na proximidade do local. A validação do modelo criado conduziu a um CVRMSE de 5,57%, valor bastante aceitável, de acordo com o preconizado pela ASHRAE 14-2002.

Para testar a aplicação de materiais de mudança de fase em salas de aula, foram escolhidos os PCM's M27, M51 e M91 com as temperaturas de mudança de fase de 21, 23, 25 e 27°C, disponíveis na base de dados do *DesignBuilder*.

6.1.1 Necessidades de aquecimento e arrefecimento

A análise com sistema de AVAC na Sala 6 (piso térreo) revelou resultados inesperados, quando analisada a estação de aquecimento. Os PCM's do grupo M27 revelaram um aumento residual das necessidades de aquecimento. Já o grupo M51, apenas originou poupanças quando aplicado nos tetos e nas paredes interiores. Na análise da estação de aquecimento, destacaram-se os PCM's do grupo M91, com uma poupança máxima de 3,88%, conseguida pela solução M91 Q21 T+P.

Quanto às necessidades de arrefecimento, os resultados demonstram um potencial de poupança entre os 9,98 e os 19,59% em relação à simulação do modelo base, que registou uma necessidade anual de 5,46 kWh/(m².ano). O PCM M91 Q23 T+P registou a redução máxima das necessidades de arrefecimento. Quanto às necessidades de arrefecimento, a temperatura de mudança de fase que mostrou mais adequabilidade à Sala 6 foi de 23°C, para todos os grupos de PCM.

A mesma análise na Sala 18, registou uma necessidade de aquecimento para a simulação de referência de 17 kWh/(m².ano). A introdução de PCM revelou maiores poupanças, comparativamente à Sala 6, atingindo uma poupança máxima de 13,53% para o PCM M91 Q21 T+P. Os PCM's do grupo M27 quando aplicados apenas nos tetos revelam um aumento residual das necessidades. Quanto à temperatura de mudança de fase que melhor se adequou à sala foi a temperatura de 21°C.

Em relação às necessidades de arrefecimento da Sala 18, registaram-se para a simulação de referência 10,44 kWh/(m².ano). Todos os PCM's simulados levaram a uma diminuição das necessidades, destacando-se os PCM's do grupo M27. A utilização de PCM com maior espessura levou a que o calor tivesse mais dificuldade em ser dissipado, demonstrando melhores desempenhos para aplicações menos espessas. O PCM com maior redução foi o M27 Q23 T+P (6,79%). A temperatura de mudança de fase que levou aos melhores resultados foi de 23°C.

6.1.2 Estudo do risco de sobreaquecimento

A análise sem sistema de arrefecimento foi realizada com o objetivo de determinar o efeito dos PCM's na redução do sobreaquecimento e consequente melhoria do conforto térmico. Para averiguar sobre esse efeito foram calculados 4 indicadores: Amplitude máxima de sobreaquecimento; Amplitude média de sobreaquecimento; Número de ocorrências de sobreaquecimento; e graus-hora de sobreaquecimento.

Para a Sala 6 foi possível reduzir a amplitude máxima de sobreaquecimento em $0,61^{\circ}\text{C}$ com o PCM M91 Q25 T+P. A temperatura de mudança de fase que levou à maior redução da amplitude máxima de sobreaquecimento em todos os grupos de PCM foi a de 25°C . A amplitude média de sobreaquecimento registou uma redução máxima de $0,25^{\circ}\text{C}$ com o PCM M91 Q25 T+P. Em relação aos graus-hora de sobreaquecimento, houve uma redução generalizada, variando entre os 163 e os 76 $^{\circ}\text{C}$, com o PCM M91 Q25 T+P a obter a redução máxima. Quanto à redução do número de ocorrências de sobreaquecimento, o PCM M91 Q23 T+P originou a maior redução (16%). A temperatura de mudança de fase de 23°C levou às maiores reduções de número de ocorrências de sobreaquecimento em todos os grupos.

A mesma análise na Sala 18 levou a uma redução da amplitude máxima de sobreaquecimento de $0,27^{\circ}\text{C}$ com o PCM M27 Q27 T+P. Contrariamente ao esperado, os PCM's M91 com temperaturas de mudança de fase de 21 e 23°C conduziram a um aumento da amplitude máxima de sobreaquecimento. Esse comportamento mantém-se na análise da temperatura média de sobreaquecimento. O PCM que contribuiu para a maior redução da temperatura média foi o M91 Q25 T+P com o valor de $0,11^{\circ}\text{C}$. Quanto aos graus-hora acumulados de sobreaquecimento, a utilização de PCM demonstrou-se sempre benéfica, com os PCM's do grupo M27 a revelarem o melhor desempenho, com uma redução máxima de 127°C para o M27 Q25 T+P e mínima de 4°C para o M91 Q27 T. Para este indicador, a temperatura de mudança de fase que mais se adequou à Sala 18 foi a de 25°C . O número de ocorrências de sobreaquecimento foi reduzido com a aplicação de PCM, com uma redução máxima de 6,40% para o PCM M27 Q23 T+P. Para o indicador do número de ocorrências de sobreaquecimento, a temperatura que melhor se adequou à sala foi a de 23°C .

6.1.3 Redução do consumo de pico

Com os PCM's que exibiram o melhor desempenho no cenário com sistema de AVAC, foi realizada uma análise detalhada para uma semana típica de verão, conseguindo-se uma diminuição da necessidade de pico de 12,52% (M91 Q25 T+P) em relação à simulação de referência ($0,024\text{kW}/\text{m}^2$). Na Sala 6, o efeito dos PCM's para o deslocamento do pico de consumo, não foi especialmente notada. Quanto à diminuição do período necessário de arrefecimento, a utilização de PCM permitiu uma redução de 26,95% com o PCM M91 Q25T+P. Quanto à redução das necessidades de arrefecimento diárias acumuladas o PCM M91 Q25 T+P revela a maior redução.

Na Sala 18 o PCM M91 Q25 T+P levou à maior redução da necessidade de pico de arrefecimento, com uma redução máxima de 19,19% em relação à simulação de referência ($0,025\text{kW}/\text{m}^2$). O deslocamento do pico foi mais notório, conseguindo um atrasado de 1 hora (M91 Q23T) em relação à simulação de referência no dia 15. Esta ordem de grandeza no deslocamento foi também conseguida pelo PCM M91 Q25 T+P, porém no dia seguinte. No que toca à redução do período de arrefecimento, o PCM M91 Q25 T+P conseguiu a maior redução

(11,30%). Em relação à redução das necessidades de energia diárias acumuladas, o PCM M91 Q25 volta a exibir a maior redução (26,13%).

6.1.4 Eficiência das soluções de PCM (carga e descarga)

Além da análise detalhada dos PCM's com melhor desempenho no cenário com sistema de AVAC, foi também realizado um estudo sobre a eficiência do ciclo de carga e descarga dos PCM's melhor qualificados na análise sem arrefecimento. Foram calculados os fatores e os coeficientes de eficiência que caracterizam o desempenho dos PCM's.

Em relação aos PCM's utilizados na Sala 6, destaca-se pela negativa o PCM M91 Q27 T+P, uma vez que, durante a semana estudada permanece sempre abaixo da sua temperatura de mudança de fase. A solução M91 Q25T mostrou a maior eficiência no tempo de carga e descarga, no entanto, ao longo da semana exibe dificuldade em libertar o calor armazenado. O PCM que apresenta a maior eficiência, quer de aquecimento, quer de arrefecimento é o PCM M91 Q25T.

Na Sala 18 existem dois PCM cuja temperatura nunca se encontra dentro da gama de mudança de fase, nomeadamente o PCM M27 Q21 T+P (abaixo) e o PCM M27 Q27 T+P (acima). Quanto ao ciclo de carga e descarga, os PCM's M27 Q25 T+P e o M51 Q25 T+P apresentam-se mais tempo a descarregar, no entanto, carregam mais do que descarregam. Além disso, a quantidade de energia que armazenam e libertam está bastante aquém das suas capacidades, fazendo com que os rendimentos sejam bastante baixos. Ainda assim, o PCM M27 Q25 T+P revela a melhor eficiência.

6.1.5 Análise económica e de sensibilidade

Para finalizar a análise da introdução de materiais de mudança de fase na ESTGV foi determinado o período de retorno do investimento, que, em nenhuma das salas representa um investimento viável.

6.1.6 Síntese final

Ainda que a utilização dos materiais de mudança de fase não tenha produzido resultados que tornem economicamente viável a sua aplicação, na Sala 6, assim como na Sala 18, para as simulações feitas com sistema de AVAC a solução que apresenta o melhor desempenho de poupança global é o PCM M91 Q23 T+P com poupanças de 91,7 e 176,8 kW/ano, respetivamente.

Para as simulações realizadas no cenário sem arrefecimento, cenário que retrata a atual situação do edifício, atendendo ao cálculo da redução ponderada do sobreaquecimento verificado nas duas salas, apresentado na equação (5-2), a solução M91 Q25 T+P apresentou para a Sala 6 a

maior redução (21,38%), já para Sala 18 a solução a ser aplicada seria a M27 Q25 T+P que apresentou uma redução de 5,94%.

Considerando que a análise detalhada foi realizada apenas para uma semana típica de verão, os resultados podem não ser representativos para o período anual, ainda assim, para a análise detalhada com arrefecimento a solução M91 Q25 T+P apresentou o melhor desempenho na redução do pico de consumo em ambas as salas, sendo por isso, a solução escolhida.

Quanto à análise detalhada para o cenário sem arrefecimento, a solução com melhor desempenho para a Sala 6 seria o PCM M91 Q25 T, enquanto que para a Sala 18 seria o PCM M27 Q25 T+P.

Na Figura 6-1 é apresentado um esquema síntese das melhores soluções por análise e por sala.

		Sala 6	Sala 18
Análise Geral	Com sistema de AVAC	M91 Q23 T+P	M91 Q23 T+P
	Sem sistema de arrefecimento	M91 Q25 T+P	M27 Q25 T+P
Análise Detalhada	Com sistema de AVAC	M91 Q25 T+P	M91 Q25 T+P
	Sem sistema de arrefecimento	M91 Q25 T+P	M27 Q25 T+P

Figura 6-1 Esquema síntese das melhores soluções por análise e por sala

6.2 Trabalhos futuros

Na sequência do trabalho realizado na presente dissertação identificam-se algumas oportunidades para trabalhos futuros:

- O estudo de soluções onde se combinem diferentes PCM ou diferentes temperaturas de mudança de fase;
- A influência da ventilação noturna, com o objetivo de descarregar completamente o calor latente armazenado;
- Modelação de outros casos de estudo; aeroportos, centros comerciais, etc.;
- Simulação do uso de PCM's na envolvente translúcida;

Referências

- ADENE. (2012). *Guia da eficiência energética*.
- Alexiades, V., & Solomon, A. D. (1993). *Mathematical modeling of melting and freezing processes*. Tennessee.
- Almeida, R. M. S. F. (2011). *Avaliação do desempenho higrotérmico do parque escolar reabilitado*. Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto.
- Almeida, R. M. S. F., Ramos, N. M., & Freitas, V. P. (Janeiro de 2016). *Thermal comfort models and pupils' perception in free-running school buildings of a mild climate country*. *Energy and Buildings*, 64-75. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.066.
- Almeida, R. M. S. F., Pinto, M., Pinho, P. G., Lemos, L.T., (2016). *Natural ventilation and indoor air quality in educational buildings: experimental assessment and improvement strategies*, *Energy Efficiency*. doi:10.1007/s12053-016-9485-0
- ASHRAE. (2010). *ASHRAE Standard 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta GA.
- Baiona, R. M. (2014). *NZEB – Um desafio para a engenharia civil*. Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa.
- Baker, N. &. (1996). *Thermal comfort for free-running buildings*. *Energy and Buildings*, 23, 175-182. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(95)00942-6
- BPIE. (Outubro de 2011). *Europe's buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings*.
- Cabeza, L. F., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., & Zubillaga, O. (2007). *Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings*. *Energy and Buildings*, 39, 113-119. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.030.
- Carvalho, I. M. (2013). *Dimensionamento de um sistema de teto arrefecido integrando materiais de mudança de fase*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial.

- Castilho, A. J. (2014). *Simulação numérica do efeito de pcm no conforto térmico de edifícios*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil.
- CIBSE. (2006). *Dedree-days: theory and application TM41*.
- Coelho, D. (2014). *Avaliação do Conforto Térmico em salas de aula*. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Departamento de Engenharia Civil, Viseu.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W., Huang, Y., Pedersen, C. O., Glazer, J. (2001). *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- Crawley, D. B., Pedersen, C. O., Lawrie, L. K., & Winkelmann, F. C. (2000). *EnergyPlus: Energy Simulation Program*. *ASHRAE JOURNAL*, 49-55.
- Cunha, F. A. (2015). *Estudo de estratégias e tecnologias de climatização para atingir Edifícios nZEB*. Dissertação Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica, Porto.
- Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios.
- Decreto Lei nº 118/2008
- DEE. (2008). *Lighting design lighting design for schools*. Londres: Department for Education and Employment.
- DGEG. (Agosto de 2014). *Estratégia Nacional para a Renovação de Edifícios*.
- DGEG. (Março de 2016). *Energia em Portugal*.
- ENERGYPLUS, 2010. *EnergyPlus Engineering Reference*. Disponível <URL <https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs.../EngineeringReference.pdf> (Consultado em fevereiro de 2016)
- Fernandes, F. (Novembro de 2013). *Curso de auditorias energéticas em edifícios de serviços, agência para energia (ADENE)*.
- Figueiredo, A., Figueira, J., Vicente, R., & Maio, R. (2016). *Thermal comfort and energy performance: Sensitivity analysis to apply the Passive House concept to the Portuguese*

- climate. Building and Environment*, 103, 276-288. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.031>
- Figueiredo, A., Figueira, J., Vicente, R., & Maio, R. (Julho de 2016). *Thermal confort and energy performance: sensitivity analysis to apply the passive house concept to the Portuguese climate*. 103, 276-288. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.031>
- Fuller, S. K., & Petersen, S. R. (1996). *Life-cycle costing manual for the federal energy management program, 1995 Edition*. NIST handbook.
- Gowreesunker, B. L. (2013). *Phase change thermal energy storage for the thermal control of large thermally lightweight indoor spaces*. Tese de Doutorado, School of Engineering and Design Brunel University.
- Hawes, D., Feldman, D., & Banu, D. (1993). *Latent heat storage in building materials*. *Energy and Buildings*, 20(1), 77-86. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(93\)90040-2](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(93)90040-2)
- IBM Corporation. (2010). *Eficiência Energética dos Edifícios e da Iluminação Pública na Administração Pública*.
- International Energy Agency. (2015). *Energy and Climate Change*.
- International Energy Agency. (2015). *Key World Statistics*.
- International Institute of Refrigeration. (2007). *Refrigeration drives sustainable development, state of the art*. IIR.
- Kalnæs, S. E., & Jelle, B. P. (Maio de 2015). *Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities*. *Energy and Buildings*, 94, 150-176. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>.
- LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia. (s.d.). *LNEG*. Obtido em 2016 de Agosto de 17, de LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia: <http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/>
- Marialena Nikolopoulou, K. Steemers (2003). *Thermal confort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces*. *Energy and Buildings*, 35, 95-101. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1)
- Mehling, H., & Cabeza, L. (2008). *Heat and cold storage with PCM An up to date introduction into basics and applications*. Berlin: Springer.
- Na, Z., Zhenjun, M., & Shengwei, W. (2009). *Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review*. *Energy Conversion and*

Management, 50(12), 3169-3181.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.019>.

Nicol, J. F., Hacker, J., Spires, B., & Davies, H. (2009). *Suggestion for new approach to overheating. Building Research & Information*, 37, 348-357.
doi:10.1080/09613210902904981

Paiva, L. (2015). Apontamentos das aulas de análise de investimentos.

Pereira, P. S. (2015). *Reabilitação da cantina da feup para melhoria do conforto higrotérmico*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil.

PORDATA. (Sem data). <http://www.pordata.pt/>. Obtido em 23 de 02 de 2016, de <http://www.pordata.pt/>:
<http://www.pordata.pt/DB/Municipios/Ambiente+de+Consulta/Tabela>

PORDATA. (Sem data). *PORDDATA*. Obtido em 23 de Fevereiro de 2016, de *PORDDATA*:
<https://www.pordata.pt/DB/Municipios/Ambiente+de+Consulta/Tabela>

Ramakrishnan, S., Wang, X., Alam, M., Sanjayan, J., & Wilson, J. (2016). *Parametric analysis for performance enhancement of phase change materials in naturally ventilated buildings. Energy and Buildings*, 124, 35-45.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.065>.

Reda, F., Mazzeo, D., Arcuri, N., & Bruno, R. (16 de 06 de 2014). *Use of PCM materials for the reduction of thermal energy requirements*. Obtido de <http://www.ibpsa.org/proceedings/BSA2013/39.pdf>

Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios. Decreto Lei nº 79/2006

Schossig, P., Henning, H.-M., Gschwander, S., & Hausmann, T. (2005). *Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89, 297-306. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2005.01.017>.

Schröder, J., & Gawron, K. (1981). *Latent heat storage. Energy Research*, 103-109.
doi:10.1002/er.4440050202

Silva, N. T. (2009). *Incorporação de materiais de mudança de fase em materiais de construção*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil.

Silva, S. M., Mateus, R., Marques, L., Ramos, M., & Almeida, M. (Novembro de 2016). *Contribution of the solar systems to the nZEB and ZEB design concept in Portugal –*

-
- Energy, economics and environmental life cycle analysis. Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, 59-74. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.053>.
- Sulaiman, H., & Olsina, F. (2014). *Comfort reliability evaluation of building designs by stochastic hygrothermal simulation. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 171-184. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.162>.
- Sun, Y., Wang, S., Xiao, F., & Gao, D. (2013). *Peak load shifting control using different cold thermal energy storage facilities in commercial buildings: A review. Energy Conversion and Management*, 71, 101-114. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.026>.
- Vautherot, M., Maréchal, F., & Farid, M. M. (Março de 2015). *Analysis of energy requirements versus comfort levels for the integration of phase change materials in buildings. Journal of Building Engineering*, 1, 53-62. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2015.03.003>.
- Vautherot, M., Maréchal, F., & Farid, M. M. (2015). *Analysis of energy requirements versus comfort levels for the integration of phase change materials in buildings. Journal of Building Engineering*, 1, 53-62. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2015.03.003>.
- Vieira, S. G. (2011). *Diagnóstico e projeto de reabilitação de reabilitação da patologia do edifício da ESTGV*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia de Construção e Reabilitação, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Departamento de Engenharia Civil, Viseu.
- Voelker, C., Kornadt, O., & Ostry, M. (2008). *Temperature reduction due to the application of phase change materials. Energy and Buildings*, 40(5), 937-944. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.07.008>.
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2004). *Free-cooling of buildings with phase change materials. International Journal of Refrigeration*, 27(8), 839-849. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.03.015>.
- Zhang, Y., Lin, K., Yang, R., Di, H., & Jiang, Y. (2006). *Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. Energy and Buildings*, 38(10), 1262-1269. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.02.009>.
- Zhou, D., Zhao, C., & Tian, Y. (2012). *Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Applied Energy*, 92, 593-605. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>.
-