



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Estratégias para o incremento da inércia térmica em edifícios: utilização de PCMs

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

João Paulo Ferreira Lopes

Orientadores

Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos e Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar pela disponibilidade, ensinamentos, sugestões e colaboração prestada, indispensáveis para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos e malta do Rugby, pela preocupação e interesse demonstrados durante este projeto e pelos bons momentos passados durante o meu percurso académico.

À minha namorada, Ana Rita, pelo seu apoio em todas as alturas, pela sua compreensão e pela sua palavra amiga nos momentos mais necessários.

À minha família, em especial aos meus pais, por toda a paciência e incentivo durante a realização deste projeto bem como durante toda a minha vida.

RESUMO

O comportamento térmico dos edifícios depende de muitos parâmetros, sendo um deles a respetiva massa com influência direta na inércia térmica. A inércia térmica pode resultar em benefícios no comportamento térmico dos edifícios influenciando o consumo de energia para aquecimento e arrefecimento. Sendo a inércia térmica particularmente importante em climas mediterrâneos devido às grandes amplitudes térmicas diárias e à forte radiação solar, procuram-se para os edifícios, em particular os de reduzida massa, estratégias para aumentar a sua inércia térmica. Uma possibilidade promissora consiste na utilização de materiais de mudança de fase (PCMs – “Phase Change Materials”), caracterizados por uma elevada capacidade de acumulação de calor sem variação significativa de temperatura (calor latente).

Existem no mercado hoje em dia diversos produtos contendo PCMs para utilização/aplicação no sector da construção. Os PCMs podem ser utilizados sob a forma passiva, ao serem incorporados nos materiais de construção para armazenamento de energia térmica, ou sob a forma ativa, onde são utilizados nos sistemas de aquecimento e arrefecimento.

Na presente dissertação é feita a revisão do estado da arte deste tipo de sistemas, avalia-se a sua aplicabilidade a edifícios e estimam-se os benefícios da incorporação de PCMS, recorrendo a doze casos de teste descritos na norma EN 15265 2007. Para a realização deste estudo recorreu-se ao software de simulação dinâmica de edifícios, o DesignBuilder. Analisou-se a influência da incorporação de dois PCMS com temperaturas de fusão diferentes e a sua influência na melhoria do desempenho energético e do conforto térmico dos casos de teste. Os resultados obtidos demonstram uma diminuição de consumos energéticos, menores amplitudes térmicas e melhores índices de conforto térmico.

Palavras-chave: Eficiência energética, Comportamento térmico, Inércia térmica, Materiais de mudança de fase, Calor latente.

ABSTRACT

The thermal performance of buildings depends on many parameters, one being the respective mass with direct influence on the thermal inertia. The thermal inertia of buildings may result in benefits with regard to its thermal behavior and its consumption of energy for heating and cooling. Thermal inertia is particularly important in Mediterranean climates, due to daily thermal amplitudes and solar radiation, strategies for buildings, in particular with reduced mass, to increase thermal inertia. A promising possibility is the use of phase change materials (PCMs - "Phase Change Materials") characterized by a high capacity for heat accumulation without significant variation in temperature (latent heat).

Exist in the market nowadays many products containing PCMs for use / application in the construction sector. The PCMs can be used as a passive, incorporated into building materials for thermal storage, or as active, used in heating and cooling systems.

In this thesis it is made a review to the state of art of such systems, evaluation and its applicability to buildings and estimated the benefits of using the incorporation of PCMs, using twelve test cases described in EN 15265 2007. For this study it is used the dynamic simulation software of buildings, the DesignBuilder. It is analyzed the influence of incorporation of two PCMs with different melting temperatures and their influence on improving energy performance and thermal comfort of the test cases. The results showed reduction of energy consumption, lower temperature ranges and better thermal comfort.

Key words: Energy efficiency, Thermal behavior, Thermal inertia, Phase Change Materials, Latent Heat.

ÍNDICE

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 | Enquadramento | 1 |
| 1.2 | Objetivos..... | 2 |
| 1.3 | Estrutura da dissertação | 2 |
| 2 | Revisão do estado da arte | 4 |
| 2.1 | Enquadramento | 4 |
| 2.1.1 | Eficiência energética..... | 4 |
| 2.1.2 | Conforto térmico | 5 |
| 2.1.3 | Inércia térmica | 7 |
| 2.2 | Técnicas para o incremento da inércia térmica..... | 8 |
| 2.2.1 | Massa da envolvente..... | 8 |
| 2.2.2 | Resistência térmica e isolamento..... | 9 |
| 2.2.3 | Contacto com o solo | 10 |
| 2.2.4 | Sistemas passivos e ativos | 11 |
| 2.2.5 | Aumento de massa térmica..... | 15 |
| 2.3 | Materiais de mudança de fase (<i>Phase Change Materials</i>)..... | 15 |
| 2.3.1 | Calor sensível e calor latente | 16 |
| 2.3.2 | Classificação e propriedades dos PCMs..... | 17 |
| 2.3.3 | Métodos de incorporação dos PCMs | 18 |
| 2.4 | PCMs nos elementos construtivos | 20 |
| 2.4.1 | Sistemas passivos de armazenamento | 22 |
| 2.4.2 | Sistemas ativos de armazenamento | 29 |
| 2.5 | Modelação energética de edifícios..... | 30 |
| 2.5.1 | Ferramentas de simulação energética de edifícios | 31 |
| 3 | Casos de estudo | 33 |
| 3.1 | Verificação do modelo..... | 33 |
| 3.1.1 | Descrição dos casos de teste..... | 34 |
| 3.1.2 | Resultados obtidos..... | 36 |
| 3.2 | Incorporação de PCMs..... | 37 |
| 3.2.1 | Consumos de energia..... | 38 |
| 3.2.2 | Influência das superfícies adiabáticas..... | 42 |
| 3.2.3 | Conforto térmico | 43 |
| 3.2.4 | Comportamento térmico | 48 |

| | | |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4 | Conclusões..... | 56 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 58 |
| | Anexo A – Validação do modelo | 61 |
| | Anexo B – Incorporação dos PCMs | 62 |
| | Anexo C – Superfícies adiabáticas | 63 |
| | Anexo D – Fanger mensal | 64 |
| | Anexo E – Resultados de PMV para Semana de projeto de verão..... | 67 |
| | Anexo F – Resultados de PMV para semana de projeto de inverno | 70 |
| | Anexo G – Distribuição de temperaturas | 73 |
| | Anexo H – Resultados de temperatura do ar interior para semana projeto de verão | 75 |
| | Anexo I – Resultados de temperatura do ar interior para semana projeto de inverno..... | 78 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Ganhos e perdas térmicas de um edifício (Construironline 2013)..... | 5 |
| Figura 2.2 – Amplitude térmica interior/exterior (greenspec 2013)..... | 8 |
| Figura 2.3 – Compartimento com pedras usadas para armazenar calor (Santos 2012)..... | 9 |
| Figura 2.4 - Solução de uso do solo para aumento da inércia térmica (Santos et al. 2012)..... | 11 |
| Figura 2.5 – Esquema de funcionamento Trombe Wall. a)Sem ventilação; b)Inverno, com termocirculação; c) Verão, ventilação cruzada (Stazi et al. 2012)..... | 13 |
| Figura 2.6 – Espessura dos diferentes materiais para a mesma capacidade de armazenamento de calor (Santos et al. 2012)..... | 15 |
| Figura 2.7 – Calor sensível e calor latente (Santos et al. 2012)..... | 16 |
| Figura 2.8 – Classificação PCMs (Rathod & Banerjee 2013)..... | 17 |
| Figura 2.9 – a) Macroencapsolamento de PCMs (D. Zhou et al. 2012); b) PCM Microencapsulado (Santos 2012)..... | 19 |
| Figura 2.10 – <i>Shape stabilized</i> PCM (Y. P. Zhang et al. 2006)..... | 20 |
| Figura 2.11 – Localização e aplicação dos PCMs na envolvente dos edifícios (Y. Zhang et al. 2007)..... | 21 |
| Figura 2.12 – Fatores para o sucesso de aplicações de PCMs (Rodriguez-Ubinas et al. 2012)..... | 22 |
| Figura 2.13 – BioPCmat M27 (PCSE 2013)..... | 23 |
| Figura 2.14 – Aplicações BioPCmat: a)Parede de trombe; b)teto falso; c) Decoração; d) Telhado; (PCSE 2013)..... | 24 |
| Figura 2.15 – Soluções testadas, com e sem PCM (Kuznik et al. 2008)..... | 24 |
| Figura 2.16 – Vista esquemática de uma parede. Microcápsulas de PCM são integradas no interior do gesso (Schossig et al. 2005)..... | 25 |
| Figura 2.17 – Lamelas contendo PCM: a) horizontal; b) vertical (Santos et al. 2012)..... | 26 |
| Figura 2.18 – a) Esquematização do pavimento b) perfil do quarto com PCM (G. Zhou et al. 2008)..... | 27 |
| Figura 2.19 – Célula de teste, sistemas DGU_CG e DGU_PCM (Goia et al. 2013)..... | 28 |
| Figura 2.20 – Tijolo com PCM macroencapsulado (Silva et al. 2012)..... | 29 |
| Figura 2.21 – Montagem do piso radiante com <i>shape stabilized</i> PCMs (K. Lin et al. 2005)..... | 30 |
| Figura 3.1 – Caso de teste (EN 15265 2007) no modelado no DesignBuilder..... | 33 |
| Figura 3.2 – Erro de validação do modelo..... | 37 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.3 – Curvas de temperatura-entalpia dos PCMs modelados | 38 |
| Figura 3.4 – Variação do consumo energético com a aplicação BioPCM M182/Q21..... | 38 |
| Figura 3.5 – Variação do consumo energético com a aplicação BioPCM M182/Q25..... | 39 |
| Figura 3.6 – Consumos de energia para aquecimento | 39 |
| Figura 3.7 – Consumos de energia para arrefecimento | 40 |
| Figura 3.8 – Consumos total de energia | 40 |
| Figura 3.9 – Diferenças no consumo de energia para aquecimento | 41 |
| Figura 3. 10 – Diferenças no consumo de energia para arrefecimento | 41 |
| Figura 3.11 – Consumo de energia: influência das superfícies adiabáticas e não adiabáticas..... | 42 |
| Figura 3.12 – Resultados anuais do índice PMV (BioPCM ativo) | 44 |
| Figura 3.13 – Resultados anuais do índice PMV (BioPCM Passivo) | 44 |
| Figura 3.14 – Índice mensal de conforto térmico PMV (Teste 6): a) Ativo; b) Passivo..... | 45 |
| Figura 3.15 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 1): a) Ativo; b) Passivo | 45 |
| Figura 3.16 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de verão (Teste 8): a) Ativo; b) Passivo | 46 |
| Figura 3.17 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de inverno (Teste 7): a) Ativo; b) Passivo | 46 |
| Figura 3.18 – Índice de conforto térmico PMV para o dia mais quente semana de projeto de verão (Teste 1): a) Ativo; b) Passivo | 47 |
| Figura 3.19 – Índice de conforto térmico PMV para o dia mais frio semana de projeto de inverno (Teste 1): a) Ativo; b) Passivo | 48 |
| Figura 3.20 – Distribuição anual de temperaturas BioPCM Ativo (testes 1 a 4) | 48 |
| Figura 3.21 – Distribuição anual de temperaturas BioPCM Ativo (testes 5 a 8) | 49 |
| Figura 3.22 – Distribuição anual de temperaturas BioPCM Ativo (testes 9 a 12) | 50 |
| Figura 3.23 – Distribuição anual de temperaturas BioPCM Passivo (testes de referência) ... | 51 |
| Figura 3.24 – Distribuição anual de temperaturas BioPCM Passivo (Testes de referência +Telhado) | 51 |
| Figura 3.25 – Temperatura do ar mensal (Teste 6): a) ativo; b) passivo | 52 |
| Figura 3. 26 – Temperatura do ar: semana de projeto de verão (Teste 11): a) ativo; b) passivo..... | 53 |
| Figura 3.27 – Temperatura do ar: semana de projeto de verão (Teste 12): a) ativo; b) passivo..... | 53 |
| Figura 3.28 – Temperatura do ar: semana de projeto de inverno (Teste 11) a) ativo; b) passivo..... | 54 |
| Figura 3.29 – Temperatura do ar para o dia mais quente semana de projeto de verão (Teste 1): a) Ativo; b) Passivo | 54 |

Figura 3.30 – Temperatura do ar para o dia mais frio semana de projeto de inverno (Teste 1):
a) Ativo; b) Passivo 55

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 2.1 – Classe de inércia térmica (RCCTE 2006)..... | 7 |
| Quadro 2.2 – Sistemas ativos e passivos (adaptado de (Chan et al. 2010)..... | 11 |
| Quadro 3.1 - Áreas do Compartimento de referência..... | 34 |
| Quadro 3.2 - Propriedades termofísicas dos componentes opacos..... | 35 |
| Quadro 3.3 – Resumo dos Casos de Teste | 36 |

SIMBOLOGIA

kg_{ep} – Quilograma equivalente de petróleo
tep – Tonelada equivalente de petróleo
°C – Grau centígrado
 λ – Condutibilidade térmica
R – Resistência térmica
It – Índice de inércia
 M_{si} – Massa superficial útil do elemento
 S_i – Área da superfície interior do elemento
 A_p – Área útil do pavimento
COP – Coeficiente de performance
d – Espessura
 ρ – Massa específica
 C_p – Calor específico
 Q_H – Consumo energético de aquecimento
 Q_C – Consumo energético de arrefecimento
 Q_{total} – Consumo energético total
 rQ_H – Erro de precisão dos valores de aquecimento
 rQ_C – Erro de precisão dos consumos de arrefecimento
 $Q_{H,ref}$ – Consumo energético de aquecimento EN15265 2007
 $Q_{C,ref}$ – Consumo energético de arrefecimento EN15265 2007
 $Q_{tot,ref}$ – Consumo energético total EN 15265 2007
 ΔQ_H – Diferença dos Consumos de Aquecimento
 ΔQ_C – Diferença dos Consumos de Arrefecimento

ABREVIATURAS

PCM – *Phase Change Material* (Materiais de Mudança de Fase)

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

DCS – *Differential Scanning Calorimeter*

DTA – *Differential Thermal Analysis*

PCSE – *Phase Change Solutions Energy*

PMV – *Predicted Mean Vote* (Voto médio estimado)

PPD – *Percentage of People Dissatisfied* (Percentagem de pessoas insatisfeitas)

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

EPS – Poliestireno Expandido Moldado

XPS – Poliestireno Expandido Extrudido

MW – *Mineral Wool* (Lã mineral)

PUR – Espuma Rígida de Poliuretano

EN – *European Standard* (Norma europeia)

ISO – *International Organization for Standardization*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A questão ambiental assume cada vez mais um papel importante na qualidade de vida das populações. Há uma crescente consciencialização do impacto que as atividades humanas podem ter no ambiente, para que se alcance um desenvolvimento sustentável. Neste contexto, a eficiência energética e a sustentabilidade dos edifícios é um tema de grande importância e campo de numerosos estudos.

Tendo como exemplo a União Europeia, o sector da construção consome cerca de 40% do total de energia e emite 40% da totalidade de CO₂ (Soares et al. 2013). No que respeita a resíduos de construção e demolição, o sector da construção acarreta cerca de 30-50% dos resíduos totais nos países de rendimentos elevados (Santos et al. 2011).

A redução dos consumos energéticos, o melhor aproveitamento energético e melhor capacidade de conservar energia nos edifícios são fundamentais para a eficiência energética e sustentabilidade. A construção tem evoluído no sentido haver uma maior sustentabilidade no que diz respeito ao consumo de energia.

Nos dias de hoje, os sistemas de armazenamento de energia térmica podem ser usados para reduzir a dependência de combustíveis fósseis dos edifícios, contribuindo para um uso mais eficiente dos recursos naturais e reforçar a viabilidade do uso do calor armazenado (Soares et al. 2013). A prática para promover o comportamento térmico dos edifícios passa pelo aumento da resistência térmica da envolvente, o que por vezes não é viável por limitações de espessura ou mesmo o fator económico.

Uma forma eficaz de reduzir o consumo de energia para aquecimento e arrefecimento de edifícios pode passar pela incorporação de PCMs. PCMs são materiais com capacidade de armazenamento de energia na forma de calor, armazenamento que se observa pela mudança de estado do material a um determinado intervalo de temperatura. A sua incorporação pode fazer-se nos elementos do edifício (nas paredes, vidros, tetos ou pavimentos), para armazenamento de energia térmica em forma de calor latente, (Soares et al. 2013).

A incorporação de PCMs permite também aumentar as condições de conforto térmico dos ocupantes, surgindo assim a oportunidade de estudar a incorporação de PCMs em edifícios e o seu papel de incremento da inércia térmica.

1.2 Objetivos

Esta dissertação, realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, visa estudar a eventual melhoria do comportamento térmico e eficiência energética de edifícios através da utilização de PCMs. Pretende-se também fazer uma revisão do estado da arte sobre esta temática, identificando diversas estratégias para o incremento da inércia térmica, apresentando diversos métodos de incorporação de PCMs em elementos construtivos de edifícios e mostrando sistemas passivos e ativos contendo PCMs. Também se entendeu útil fazer uma pesquisa das principais ferramentas de simulação energética em edifícios, identificando as que permitem modelar a incorporação de PCMs.

Para se realizar este estudo, foram modelados vários casos de teste com e sem incorporação de PCMs, recorrendo ao software de simulação dinâmica de edifícios, *DesignBuilder* (com motor de cálculo *EnergyPlus*). Os casos de teste são os estipulados na norma EN 15265, permitindo assim verificar a precisão dos modelos implementados antes da incorporação dos PCMs. Com os resultados obtidos pelo programa analisou-se o comportamento térmico e consumo energético dos casos de teste, procurando avaliar em que medida os PCMs podem influenciar os consumos de energia e o conforto térmico dos ocupantes.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em quatro capítulos que têm como objetivo apresentar, analisar e discutir a informação relativa à matéria em estudo.

Neste primeiro capítulo é apresentado sucintamente o tema estudado, os objetivos e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, intitulado “Revisão do estado da arte”, é abordada a eficiência energética em edifícios, conforto térmico, inércia térmica e os principais conceitos relacionados com esta matéria. É feita uma pesquisa bibliográfica sobre estes conceitos e a sua importância para o incremento da inércia térmica, introdução ao conceito de material de mudança de fase (PCMs), os seus tipos, propriedades e a sua aplicação na construção. No final do capítulo é apresentada a ferramenta de simulação dinâmica utilizada na dissertação.

O terceiro capítulo é destinado aos casos de estudo. Apresenta-se o método de validação da ferramenta de simulação, a incorporação dos PCMs e os resultados obtidos.

No quarto capítulo são apresentadas as conclusões desta dissertação e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 Enquadramento

No presente capítulo são abordados conceitos e fatores imprescindíveis a uma melhor compreensão do tema. Não são abordados de um modo exaustivo todos os conceitos nesta área, contudo, procura-se apresentar alguma da informação existente, relevante para o presente trabalho, sequenciando a informação de modo a estruturar os conhecimentos sobre eficiência energética, a importância da inércia térmica em edifícios e técnicas para o seu aumento.

2.1.1 Eficiência energética

A eficiência energética pode ser definida como a otimização dos consumos energéticos através de estratégias que combatam o uso excessivo e desperdício de energia e promovam o seu uso racional.

No que se refere aos edifícios, a energia fornecida aos consumidores é por vezes mal aproveitada e a eficiência energética traduz-se em estratégias que combatam esse mau uso de energia. A grande parte de energia gasta nos edifícios, sobretudo residenciais, às funções de aquecimento e arrefecimento ambiente, preparação de águas quentes sanitárias, iluminação e equipamentos.

A energia, de acordo com o RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) divide-se em 3 tipos:

- A energia útil, corresponde à energia que é fornecida um determinado espaço interior, ou seja, o calor que é necessário fornecer ou remover [kW/h];
- Energia Final, corresponde à energia incorporada no combustível ou energia elétrica consumidos pelos equipamentos, sob diferentes formas: eletricidade [kW/h], gás [m³], biomassa [kg] entre outros;
- Energia Primária, o correspondente de energia final existente na natureza, petróleo, gás natural, vento, biomassa, solar etc. Normalmente quantificada em termos de massa equivalente de petróleo, quilograma equivalente de petróleo - [kgep] ou tonelada equivalente de petróleo - [tep];

A razão entre energia útil e energia final representa a eficiência dos sistemas, designado de COP (*coefficient of performance*).

O consumo de energia em edifícios depende de diversos fatores. Destacam-se os relacionados com a localização (temperatura do ar, humidade relativa, número de horas de exposição solar, vento, temperatura do solo, etc.), a envolvente do edifício (orientação, exposição solar, elementos opacos, pontes térmicas, envidraçados, sombreamento, etc.), os equipamentos (aquecimento, ar-condicionado, ventilação, água quente)

A base teórica para um balanço energético consiste no equilíbrio entre ganhos e perdas térmicas que se dão através da envolvente. Assim sendo, as trocas de calor entre interior e exterior têm um papel fundamental no desempenho energético. Para esse equilíbrio são considerados: os ganhos e perdas térmicas por condução e infiltração de ar através da envolvente opaca, os ganhos e perdas pelos vãos envidraçados e os ganhos internos (Figura 2.1).

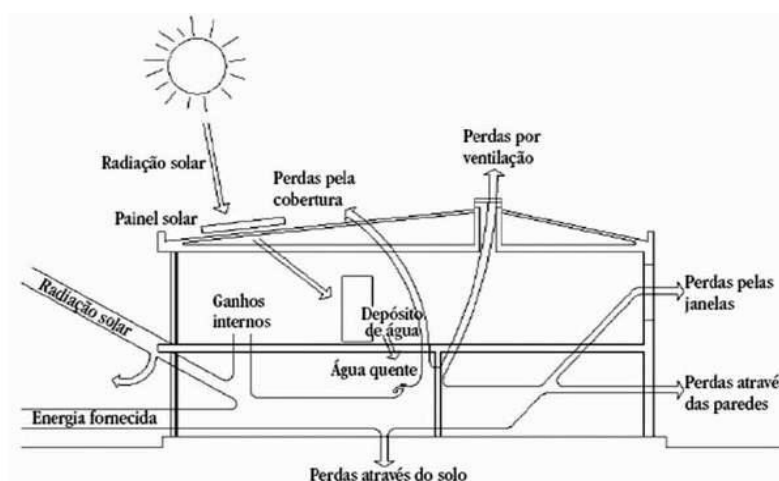


Figura 2.1 – Ganhos e perdas térmicas de um edifício (Construironline 2013)

2.1.2 Conforto térmico

A noção de conforto térmico é algo complexa e não se revela muito exata, pois varia de pessoa para pessoa. A condição de conforto térmico depende não só de parâmetros ambientais (temperatura do ar, temperatura das superfícies envolventes, humidade relativa, velocidade do ar, etc.), mas também de parâmetros individuais dos ocupantes, como o do tipo de vestuário ou o metabolismo de cada indivíduo.

Nos tempos que correm, a procura de melhor conforto térmico dos ocupantes tem vindo a aumentar. Essa procura tem grande impacto nos consumos energéticos, sendo fundamental garantir, para um mesmo nível de conforto térmico, medidas que conduzam a menores consumos energéticos (maior eficiência).

O desenvolvimento dos edifícios é baseado no critério de poupança de energia, que associa o isolamento térmico, os ganhos solares, e a inércia térmica com o conforto térmico. O conforto térmico pode ser definido como a satisfação expressa por um indivíduo no que diz respeito ao ambiente térmico do meio que o envolve. Para se estar numa situação de conforto térmico um indivíduo não deverá sentir-se nem muito quente, nem muito frio, existindo portanto, uma perceção pessoal na valorização de conforto térmico, nomeadamente relacionada com o metabolismo de cada um (Hacene et al. 2011).

De acordo com o RCCTE (2006), as condições de conforto de referência são uma temperatura do ar de 20°C para estação de aquecimento e 25°C e 50% de humidade relativa para estação de arrefecimento.

Vários investigadores têm vindo a desenvolver modelos matemáticos para prever a resposta dos ocupantes em termos térmicos, físicos e psicológicos, no que respeita ao conforto.

Fanger desenvolveu uma equação que quantifica o conforto térmico estabelecendo um índice PMV, *Predicted Mean Vote*. O modelo de Fanger é feito através de uma análise energética que tem em conta todas as possibilidades de perda de energia do corpo. O índice de Fanger está ainda relacionado com a percentagem de ocupantes insatisfeitos ou PPD, *Predicted percentage of dissatisfied*.

Fanger utilizou uma escala de 7 pontos para avaliar a sensação de conforto térmico:

- 3 → Muito quente (*Hot*);
- 2 → Quente (*Warm*);
- 1 → Ligeiramente quente (*Slightly warm*);
- 0 → Neutro (*Neutral*);
- -1 → Ligeiramente frio (*Slightly cool*);
- -2 → Frio (*Cool*);
- -3 → Muito frio (*Cold*);

Apesar do conforto térmico estar classificado segundo esta escala, os cálculos do EnergyPlus são realizados de forma contínua, sendo possível serem encontrados valores fora da escala. Não é necessariamente um erro do programa, apenas o cálculo não tem em consideração esta escala apresentando os valores finais. (PCSE 2013)

Os parâmetros ambientais que influenciam as condições de conforto térmico são:

- Temperatura do ar;
- Temperatura Radiante;
- Velocidade do ar;
- Humidade do ar.

2.1.3 Inércia térmica

A massa da envolvente e interior dos edifícios é um parâmetro importante, que está sobretudo relacionado com a espessura, tipo de material usado e a capacidade de retardar a transferência de calor através da estrutura. Edifícios com grande massa interna apresentam normalmente inércia térmica forte (Santos et al. 2012).

A inércia térmica dos edifícios tem elevado impacto nas transferências de calor entre interior e exterior, e reflete a capacidade de manter estável e confortável o ambiente interior. Para proporcionar máxima eficácia e rendimento de sistemas para conforto térmico, a inércia térmica é uma estratégia importante a conciliar com sistemas de aquecimento e arrefecimento.

No RCCTE, (RCCTE 2006) a inércia térmica interior de uma fração autónoma é definida em função da capacidade de armazenamento de calor que os locais apresentam e depende da massa superficial útil dos elementos de construção. O seu cálculo é dado pela expressão (1), massa superficial útil por metro quadrado de área de pavimento (I_t).

$$I_t = \frac{\sum M_{si} S_i}{A_p} \quad (1)$$

M_{si} é a massa superficial útil do elemento i (kg/m^2), S_i é a área da superfície interior do elemento i (m^2) e A_p é a área útil do pavimento (m^2).

Quadro 2.1 – Classe de inércia térmica (RCCTE 2006)

| Classe de inércia | Massa superficial útil por metro quadrado da área de pavimento (kg/m^2) |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Fraca | $I_t < 150$ |
| Média | $150 \leq I_t \leq 400$ |
| Forte | $I_t > 400$ |

A inércia térmica é de extrema importância nos edifícios, pois permite reduzir a amplitude térmica interior diária. Adicionalmente, existe um atraso ou desfasamento entre os picos de temperatura que pode atingir as 6 horas (Figura 2.2).

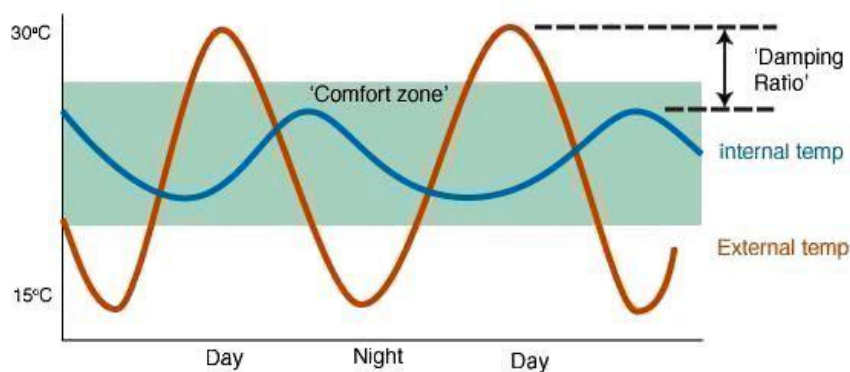


Figura 2.2 – Amplitude térmica interior/exterior (greenspec 2013)

Geralmente, um edifício de inércia térmica forte permite melhorar as condições de conforto e minimizar os consumos de energia para aquecimento/arrefecimento. Contudo, há situações em que uma inércia forte pode trazer inconvenientes. Os mais relevantes são para regimes de ocupação intermitente. Neste caso, ter inércia térmica forte implica um maior intervalo de tempo até que se consigam atingir as condições de conforto. Deste modo, o funcionamento dos sistemas de climatização é prolongado levando a maiores consumos energéticos (exemplo: habitação utilizada apenas durante o fim de semana).

2.2 Técnicas para o incremento da inércia térmica

2.2.1 Massa da envolvente

A necessidade de massa na envolvente de um edifício é influenciada pelas variações de temperatura, que determinam a necessidade de resistência térmica (isolamento) e a capacidade de absorção do calor. A massa interna armazena o excesso de calor, libertando-o em períodos de desocupação ou períodos de arrefecimento, promovendo um desfasamento temporal entre o pico de temperatura no exterior e o pico de temperatura interior.(Al-Homoud 2005)

Uma solução fácil e económica para o aumento de inércia térmica consiste no uso de pedra (Figura2.3), tirando partido da sua grande massa térmica. Este tipo de soluções deverá

preferencialmente ficar localizado em zonas centrais do edifício, caves ou andares inferiores. (Santos et al. 2012).



Figura 2.3 – Compartimento com pedras usadas para armazenar calor (Santos 2012)

2.2.2 Resistência térmica e isolamento

A aplicação de isolamento térmico tem como principal função o aumento da resistência térmica da envolvente do edifício, sendo fundamental para garantir conforto térmico e minimizar os custos energéticos. As perdas térmicas dão-se a partir da envolvente do edifício (fachadas, cobertura e pavimento), através de trocas entre o ambiente interior e exterior. O isolamento térmico permite reduzir estas trocas por transmissão.

Isolante térmico é o material com condutibilidade térmica (λ) inferior a 0,065 W/m. °C, ou cuja resistência térmica (R) é superior a 0,30 m² °C/W (RCCTE 2006).

Al-Homoud (2005) referiu que a posição do isolamento térmico em relação à massa não é crítica do ponto de vista térmico. Para qualquer material de construção terá a mesma resistência térmica independentemente da sua localização na estrutura. A forma de aplicação depende do tipo de estrutura, o tipo de material usado na estrutura e no isolamento e localização da mesma. Nas paredes o isolamento poderá estar na face interior, exterior ou na caixa-de-ar. Para cada uma das soluções há vantagens e desvantagens.

O isolamento interior é protegido pela massa contra o ambiente exterior e contra possíveis danos, sendo que a estrutura fica mais próxima da temperatura exterior. Está também mais sujeita a expansões /retrações (menor durabilidade), existência de mais pontes térmicas e minimiza os benefícios do aquecimento da massa (menor inércia térmica).

O isolamento exterior possibilita que a massa da envolvente armazene ganhos solares e internos excessivos, sendo que, permite ter menores amplitudes térmicas e atraso nos valores de pico (Figura 2.2), oferecendo uma maior durabilidade aos materiais. Possibilita ainda suporte para arrefecimento no verão e aquecimento solar passivo no inverno.

O isolamento na camada intermédia (ex. caixa-de-ar) fornece distribuição igual de isolamento nos componentes. Pode atingir um meio-termo entre benefícios de isolamento pelo interior e exterior.

Os isolamentos mais correntemente utilizados são:

- Poliestireno Expandido Extrudido (XPS);
- Poliestireno Expandido Moldado (EPS);
- Espuma Rígida de poliuretano (PUR);
- Lã mineral (MW);
- Aglomerado Negro de cortiça.

2.2.3 Contacto com o solo

O solo tem grande inércia térmica, devido à sua grande massa. O contacto das edificações com o solo pode ser uma solução a ter em conta, pois durante o verão a temperatura do solo é inferior e no inverno é superior, relativamente à temperatura média ambiente exterior. O solo pode funcionar como dissipador de calor para climas quentes e existem inúmeras maneiras de tirar partido da inércia térmica do solo (Figura 2.4).

Uma técnica que permite tirar melhor partido da elevada inércia térmica do solo é o uso de tubagens enterradas como permutador de calor solo-ar. Isto é obtido através da circulação de ar, ou circulação de um líquido de refrigeração. O sistema de circulação de ar é o mais económico e simples, necessitando apenas de um ventilador para forçar a circulação de ar para o modo de arrefecimento e uma resistência elétrica para o modo de aquecimento. Para um sistema baseado na circulação de um líquido é necessária uma bomba de calor, sendo este um sistema mais eficiente mas também mais dispendioso em termos de investimento inicial (Santos et al. 2012).

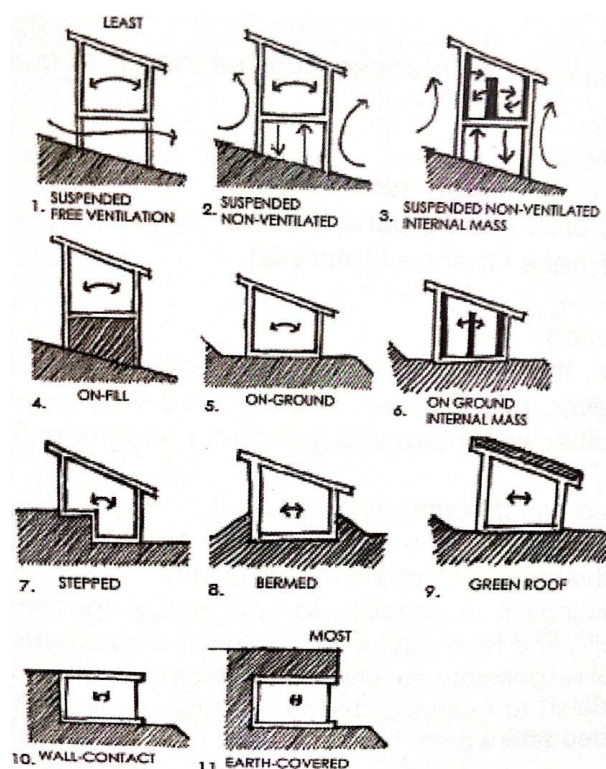


Figura 2.4 – Solução de uso do solo para aumento da inércia térmica (Santos et al. 2012)

2.2.4 Sistemas passivos e ativos

Sistemas solares passivos definem-se como sistemas integrados nos edifícios com o objetivo de proporcionar o aquecimento natural dos mesmos. Toda a energia térmica é transferida por meios naturais, ou seja, radiação, condução e convecção natural. Pelo contrário, nos sistemas ativos, recorre-se a meios artificiais para a transferência de calor, nomeadamente convecção forçada de fluidos por meio de bombas ou ventiladores (Maldonato 1985).

Quadro 2.2 – Sistemas ativos e passivos (adaptado de (Chan et al. 2010).

| | Aquecimento | Arrefecimento |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ativo Equipamento elétrico ou mecânico, como ventiladores ou bombas, para aumentar a quantidade de calor | Usa um coletor solar onde o componente absorvente absorve energia de radiação, converte em calor, e transfere o calor pelo coletor. A energia recolhida é armazenada para satisfazer as necessidades de aquecimento Coletores solares | Usa a energia absorvida pela fonte de calor solar em aparelhos de ar-condicionado, vulgarmente conhecidos como sistemas de ar-condicionado assistidos por energia solar. Sistemas de refrigeração de absorção, sistemas de absorção dessecantes líquidos ou sólidos |
| Passivo Sem o uso de equipamentos mecânicos; Sem o uso, ou quase nenhum uso de energia externa | Possível de ganhar ou reter calor através de energia solar passiva, o calor da radiação solar é absorvido, armazenado ou usado para pré-aquecer o ar ventilado Coletores solares: Componentes construtivos como fachadas ou telhados | Gera canais e fluxos de ar, removendo o calor e criando efeitos de arrefecimento: como exemplo, a ventilação natural Dispositivos como componentes construtivos como fachadas ou telhados |

Sistemas solares passivos

Tal como já referido, nos sistemas solares passivos de aquecimento através dos vários elementos da envolvente a energia solar é recolhida, armazenada e distribuída por meios naturais, geralmente sem recorrer ao consumo de energia ou meios mecânicos (Chan et al. 2010).

Os materiais de construção como o tijolo, pedra, betão, etc., que compõem a envolvente dos edifícios podem armazenar energia, este armazenamento depende da massa dos elementos. A energia é armazenada durante o dia e posteriormente libertada no período da noite, contribuindo este fenómeno para a diminuição da amplitude térmica.

Os sistemas solares passivos de aquecimento incluem:

- **Ganhos diretos:** efeito da radiação solar incidente, onde a energia térmica pode ser usada no aquecimento de espaços interiores ou ficar armazenada na massa térmica do edifício.

- **Ganhos indiretos:** é usada uma massa térmica de armazenamento entre o vidro e o espaço interior. A captação feita pela incidência da radiação solar é posteriormente transferida ao interior.

Nos sistemas de ganho indireto há um intervalo de tempo entre a radiação solar e o calor transmitido para o espaço, podendo-se tirar partido desta situação para se manter o interior aquecido quando se pretende. A gestão é feita através de sistemas de ventilação. Exemplos de sistemas passivos de captação de energia solar de forma indireta são: parede de trombe, parede de água e *trans wall* (Vineet Veer Tyagi & Buddhi 2007).

Parede de Trombe

A parede de trombe clássica (Figura 2.5) situa-se intercalada entre o vidro e o espaço interior. O vidro é sujeito à radiação solar fazendo efeito de estufa na caixa-de-ar, maximizando a absorção de calor por parte da parede. Parte da energia incidente é transferida pela parede, outra parte é conduzida através de aberturas na zona superior e inferior da parede onde circula o ar. O ar aquecido sai no topo da parede e é renovado por ar mais frio que entra pela abertura inferior (Chan et al. 2010).

É um sistema passivo de captação de energia solar de forma indireta, sobretudo usado para o aquecimento interno dos edifícios através da transferência de calor, armazenado na parede, para os espaços interiores.

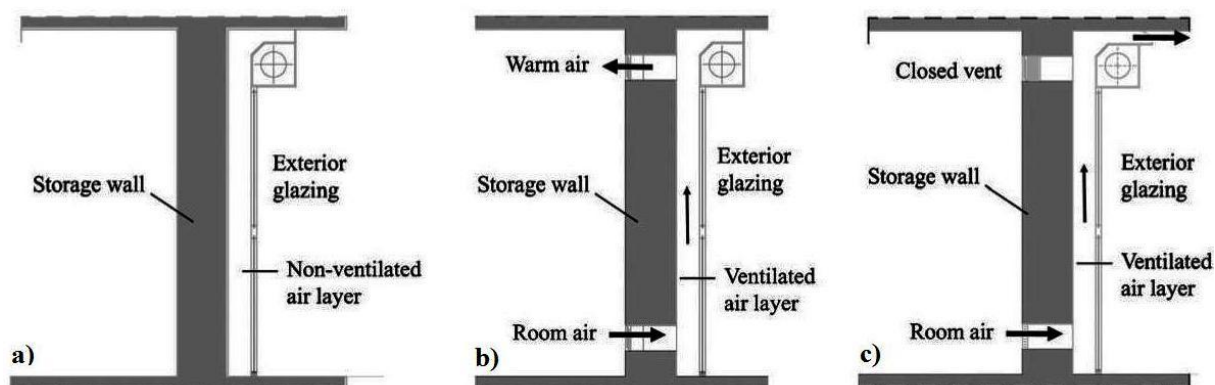


Figura 2.5 – Esquema de funcionamento de uma parede de trombe Wall. a) Sem ventilação; b) Inverno, com termocirculação; c) Verão, ventilação cruzada (Stazi et al. 2012).

Os modos de funcionamento de uma parede de trombe, para aquecimento do interior sem o recurso a ventilação natural (Figura 2.5 a)), a energia solar incidente é acumulada pela parede sob a forma de calor e é transferida para o interior. No caso da figura 2.5 b), o ar frio entra pela abertura inferior. Este circula pela caixa-de-ar entre a parede e o vidro, onde ocorre o fenómeno de efeito de estufa, aquecendo o ar que posteriormente volta ao interior já aquecido. No terceiro caso, Figura 2.5 c), é o modo de arrefecimento. O ar do interior vai circular pela caixa-de-ar diretamente para o exterior.

O dimensionamento da parede de trombe baseia-se na utilização de materiais com elevada capacidade de armazenamento de calor, tais como tijolo, betão, pedra, etc. A superfície externa da parede é normalmente de cor preta para aumentar a taxa de absorção. A quantidade de calor a acumular pela parede de trombe depende do calor específico dos materiais usados, da espessura, condições climáticas, envolvente, volume dos espaços interiores, orientação, vidro e aberturas (Saadatian et al. 2012).

Parede de água

Este sistema é semelhante às paredes de trombe, sendo que, o material de armazenamento de calor neste caso é a água. São utilizados contentores de água com a forma de parede, e o exterior da parede é escurecido para aumentar a absorção da radiação solar. As paredes de água têm um vidro em frente ao contentor que permite a incidência dos raios solares. São sistemas com possibilidade de funcionamento para aquecimento ou arrefecimento (Saadatian et al. 2012).

Sistemas de arrefecimento passivo

Os sistemas de arrefecimento passivo em edifícios baseiam-se em tecnologias ou técnicas usadas para arrefecer o interior do edifício. O arrefecimento passivo envolve o arrefecimento dos edifícios sem a utilização de aparelhos que consomem energia. De referir que o termo 'passivo' não exclui as tecnologias de arrefecimento que recorrem ao uso de ventilador, quando a aplicação pode melhorar o desempenho de arrefecimento com uso mínimo de eletricidade (Waqas & Ud Din 2013; Hughes et al. 2011).

A redução das necessidades de arrefecimento pode ser feita através de estratégias que permitam diminuir os ganhos de calor ou que permitam a dissipação do mesmo. A orientação solar é um fator determinante nestes sistemas, principalmente no que diz respeito a radiação solar direta em vãos envidraçados. Neste ponto é importante referir sistemas de arrefecimento passivo como: trocas de calor com o solo; Sistemas de arrefecimento evaporativo; Técnicas de ventilação; Sistemas de arrefecimento radiativo.(Givoni 2011)

-Arrefecimento pelo solo: como referido no ponto 2.2.3 (contacto com o solo), o ambiente quente pode ser arrefecido através de trocas de calor com o solo.

-Arrefecimento evaporativo: baseia-se na diminuição da temperatura através de evaporação de água. Antes de entrar no edifício o ar é arrefecido através da mudança de fase da água do estado líquido para o estado gasoso. (Chan et al. 2010).

-Técnicas de ventilação: o ar do exterior é insuflado para o interior do edifício, também com o intuito de garantir a do ar interior. Os tipos de ventilação são:

- Ventilação natural - fluxo natural do ar, que é controlado pelos ocupantes através da abertura de janelas;
- Ventilação natural avançada - onde o fluxo e a direção do ar ventilado é controlado de forma natural para além de janelas, ou seja, chaminés ou torres de vento;
- Ventilação mecânica - Geralmente é usado ventilador central ou local que promove o arrefecimento e ventilação do edifício.
- Ventilação noturna - Os componentes estruturais são arrefecidos pelo ar, geralmente à noite (ar mais fresco), reduzindo a temperatura interior do edifício e melhorando a qualidade do ar para o dia seguinte (Raj & Velraj 2010).

-Arrefecimento radiativo: é feito pela radiação dos elementos da envolvente, libertando calor para o exterior (Muselli 2010).

2.2.5 Aumento de massa térmica

Nos últimos anos têm vindo a ser investigado a solução de aumento de massa térmica com o recurso a PCMs “*phase change materials*”, i.e., materiais de mudança de fase.

A utilização de PCMs na construção tem começado a desenvolver-se, muito devido à sua maior capacidade de armazenamento térmico, que permite aumentar a inércia térmica dos edifícios sem ter que recorrer a outro tipo de materiais, ditos mais ‘pesados’. A Figura 2.6 demonstra a vantagem dos PCMs em termos de espessura, para a mesma capacidade de armazenamento de calor em relação a outro tipo de materiais (Santos et al. 2012).

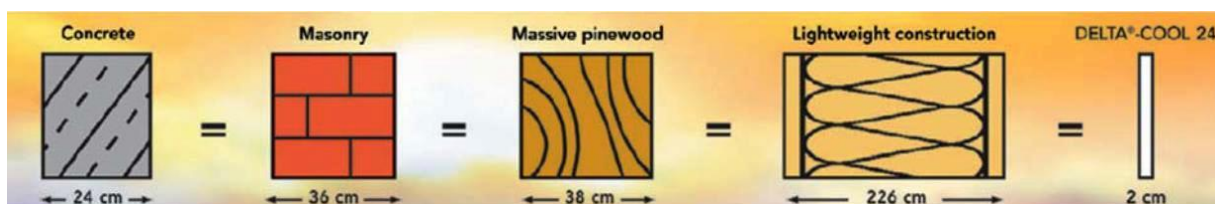


Figura 2.6 – Espessura de diferentes materiais para a mesma capacidade de armazenamento de calor (Santos et al. 2012).

2.3 Materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials*)

Neste ponto pretende-se fazer uma introdução ao conceito de *phase change materials*, PCMs, nomeadamente: a sua classificação, propriedades mais relevantes, o seu modo de funcionamento e aplicações. Geralmente recorre-se a uma construção tradicional de betão

Na construção tradicional, geralmente recorre-se a materiais como betão ou tijolo, com grande massa térmica, para ter temperaturas mais estáveis. Com o uso dos PCMs é possível obter os benefícios da massa térmica sem ter que recorrer a este tipo de estruturas ‘pesadas’. Estes materiais armazenam o calor de uma forma sensível, o que limita a sua capacidade de acumular energia e contrariar as flutuações de temperatura existentes entre dia e noite. Estes fatores podem levar a um maior consumo para climatização. Uma alternativa para combater esta insuficiência de armazenamento de energia térmica é o uso do calor latente dos materiais, uma das propriedades dos PCMs, que são caracterizados como materiais com capacidade de alterar o seu estado físico num intervalo de temperatura, absorvendo ou libertando calor (Vineet Veer Tyagi & Buddhi 2007).

2.3.1 Calor sensível e calor latente

O melhor exemplo para explicar o conceito de PCM é a água, que pode apresentar três formas distintas: o estado sólido (gelo), o estado líquido e em forma de vapor. Os processos de mudança de fase denominam-se de fusão, solidificação (transição do estado sólido para o líquido e o inverso, a uma temperatura de 0°C) e vaporização (transição do estado líquido para vapor a uma temperatura de 100°C). Associada a estas transições está associada uma energia térmica.

Devido ao armazenamento de energia térmica de forma latente dos PCMs (Figura 2.7), estes conferem uma maior capacidade de armazenamento de calor por unidade de volume em comparação com os materiais de construção convencionais, que armazenam energia de forma sensível (Baetens et al. 2010).

O calor sensível é a quantidade de energia sob a forma de calor que provoca a mudança de temperatura num corpo sem alteração do seu estado, ou seja, a temperatura aumenta à medida que absorve calor. O calor latente é a energia sob a forma de calor que não provoca variação de temperatura mas que altera o seu estado.

PCM absorve e liberta energia a uma temperatura constante, podendo armazenar entre 5 a 14 vezes mais calor por unidade de volume quando comparado com armazenamentos sensíveis, como alvenaria ou pedra (Sharma et al. 2009).

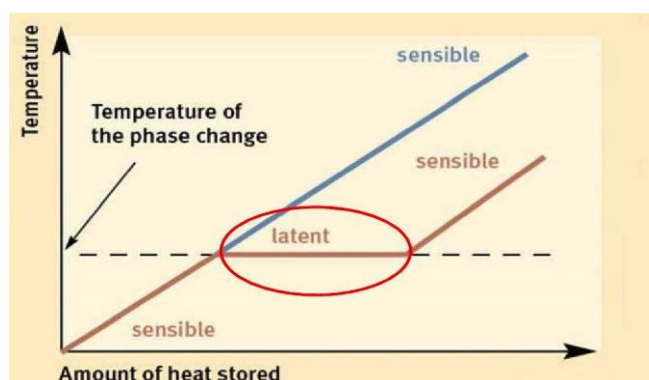


Figura 2.7 – Calor Sensível e Calor Latente (Santos et al. 2012)

Para melhor compreensão da diferença entre calor sensível e calor latente, “a fusão de 1 kg de gelo, requer a mesma quantidade de calor para aquecer 1 kg de água de 1°C para 80°C”, ou seja, a energia necessária para fundir 1 kg de gelo, (calor latente) é de 333kJ/kg, é equivalente à energia necessária para aquecer 1 litro de água de 1°C até 80°C, cujo valor é 332 kJ/kg (Santos 2012).

2.3.2 Classificação e propriedades dos PCMs

Os PCMs podem ser divididos em 3 categorias: orgânicos, inorgânicos e eutéticos (Figura 2.8). Os compostos orgânicos são ainda divididos em parafínicos e não-parafínicos. Os inorgânicos dividem-se em sais hidratados e metálicos. Os eutéticos são misturas de 2 ou mais componentes, que fundem e cristalizam congruentemente, formando uma mistura de cristais. Eutéticos podem ser misturas do tipo orgânico-orgânico, orgânico-inorgânico e inorgânico-inorgânico (Soares et al. 2013).

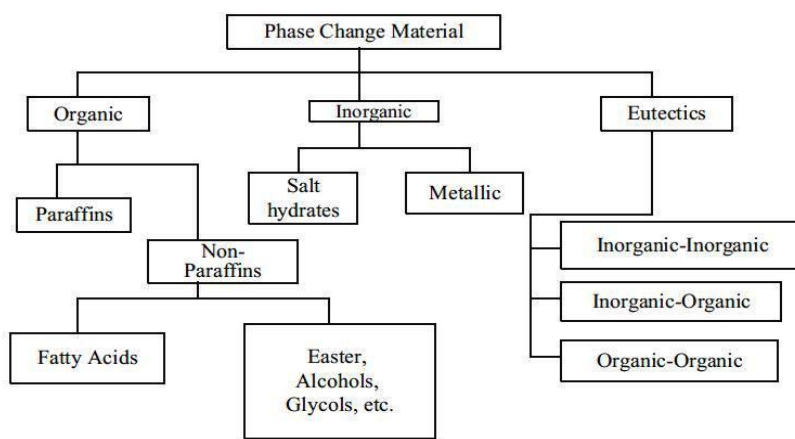


Figura 2.8 – Classificação PCMs (Rathod & Banerjee 2013)

Os PCMs para serem utilizados como sistemas de armazenamento de calor latente devem possuir determinadas propriedades térmicas, físicas, cinéticas, químicas e económicas. Deverão também ter propriedades que reduzam o impacto ambiental durante o seu ciclo de vida (Soares et al. 2013).

Em termos gerais, são exigidos aos PCMs as seguintes características (Sharma et al. 2009):

- **Características térmicas:** a seleção do PCM deverá assegurar que a temperatura de aquecimento/arrefecimento seja semelhante à transição de mudança de estado do PCM, o calor latente deverá ser o maior possível e a condutibilidade térmica elevada para promover a transferência de calor;
- **Características físicas:** os PCMs deverão ter estabilidade na mudança de fase de modo a armazenar o máximo de energia possível com o mínimo de utilização de PCM e reduzida variação de volume na mudança de fase;
- **Características cinéticas:** deverá ter uma taxa de cristalização suficiente para evitar o sobreaquecimento;

- **Características químicas:** possuir estabilidade química a longo termo, ser compatível com os materiais de construção, não ser tóxico, corrosivo ou explosivo.

D. Zhou et al. (2012) enunciaram vantagens e desvantagens de cada categoria de PCM:

PCMs Orgânicos

- **-Vantagens:** PCMs orgânicos são quimicamente mais estáveis e recicláveis, disponíveis com grandes intervalos de mudança de fase, elevado calor latente por unidade de volume, possuem boa compatibilidade com outros materiais e o sobreaquecimento não é significativo;
- **-Desvantagens:** Podem ser inflamáveis, possuem baixa condutividade térmica (0,2 W/m K) e apresentam variação de volume no processo de mudança de fase;

PCMs Inorgânicos

- **-Vantagens:** Apresentam elevado calor latente por unidade de volume, pequena variação de volume no processo de mudança de fase, elevada condutibilidade térmica e são mais acessíveis economicamente;
- **-Desvantagens:** São normalmente preteridos em relação aos orgânicos, pois são quimicamente instáveis, corrosivos em grande parte dos metais e tendem a sobreaquecer;

Misturas Eutécticas

- **-Vantagens:** Possuem temperaturas de fusão exatas e grande densidade volumétrica de armazenagem térmica.
- **-Desvantagens:** Falta de resultados atualmente disponíveis sobre as suas propriedades Termofísicas e elevado custo de mercado.

As técnicas mais comuns para determinar as propriedades térmicas dos PCMs são: DSC, *differential scanning calorimeter* e DTA, *differential thermal analysis*. DSC consiste no aquecimento/arrefecimento de uma amostra e medição da energia absorvida/libertada, que permite saber o intervalo de temperaturas de mudança de fase e a energia associada a esse intervalo. DTA é um método alternativo ao DSC, que mede as diferenças de temperatura entre amostras e uma referência, quando ambas estão sujeitas ao mesmo calor (Soares et al. 2013).

2.3.3 Métodos de incorporação dos PCMs

Soares et al. (2013) indica 3 métodos de incorporação dos PCMs em edifícios: incorporação, imersão e encapsulamento.

- **Incorporação:** os PCMs são diretamente incorporados nos materiais de construção, sendo o método mais simples e económico. Os PCMs no estado líquido, sólido ou pó, são diretamente misturados com outros materiais de construção, como por exemplo o betão ou gesso. A incorporação tem a desvantagem de incompatibilidade com alguns materiais e problemas de escorrências (*leakage*).

-**Imersão:** é feita para materiais porosos, como o gesso cartonado, tijolos ou blocos de cimento. Os materiais são submersos em PCM derretido, que por capilaridade, são absorvidos pelo material. Tem a desvantagem de possíveis escorrências quando se dá a mudança de estado e eventual interação com os materiais.

-**Encapsulamento:** neste método os PCMs deverão compreender alguns aspetos, como a resistência mecânica, flexibilidade, resistência à corrosão, estabilidade térmica, atuar como barreira protegendo o PCM de interações perigosas com o ambiente, superfície suficiente para transferência de calor, prover estabilidade estrutural e fácil manuseamento. São definidos dois tipos de encapsulamento: microencapsulamento e macroencapsulamento (Figura 2.9).

- O microencapsulamento previne os PCMs de escorrências durante a fase líquida, o que expande a possibilidade de integração dos PCM's com materiais de construção como o cimento, cal, betão, argamassa, tintas, selantes, entre outros revestimentos;
- No macroencapsulamento, os PCMs são embalados num recipiente de maiores dimensões, como tubos, esferas, painéis, ou outros recipientes e são posteriormente incorporados nos elementos construtivos;

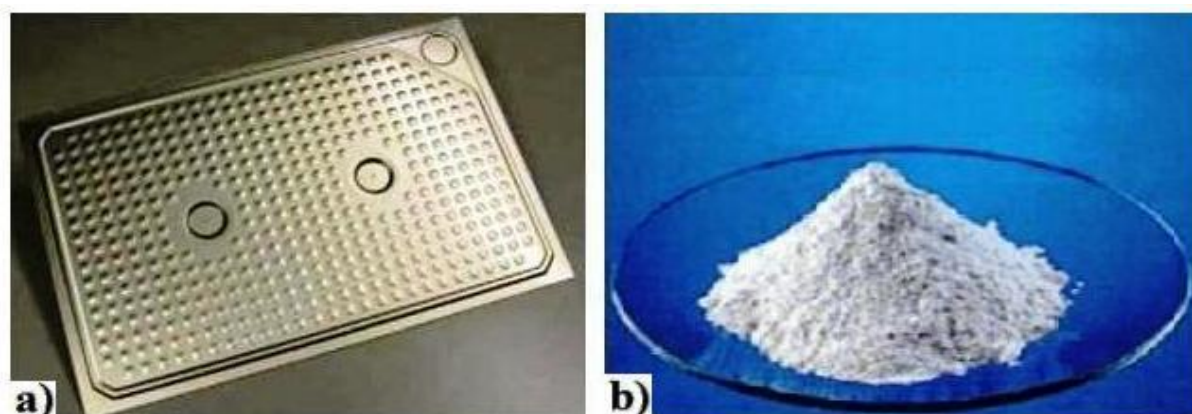


Figura 2.9 – a) Macroencapsulamento de PCMs(D. Zhou et al. 2012); b) PCM Microencapsulado (Santos 2012)

Recentemente um novo composto de PCM tem atraído a atenção de investigadores, “*shape-stabilized*” PCMs (Figura 2.10), i.e., PCMs sob forma estabilizada, devido ao seu grande calor específico, adequada condutibilidade térmica, aptidão de manter a forma na mudança de estado, e boa performance ao longo do tempo para ciclos múltiplos (N. Soares et al. 2013).

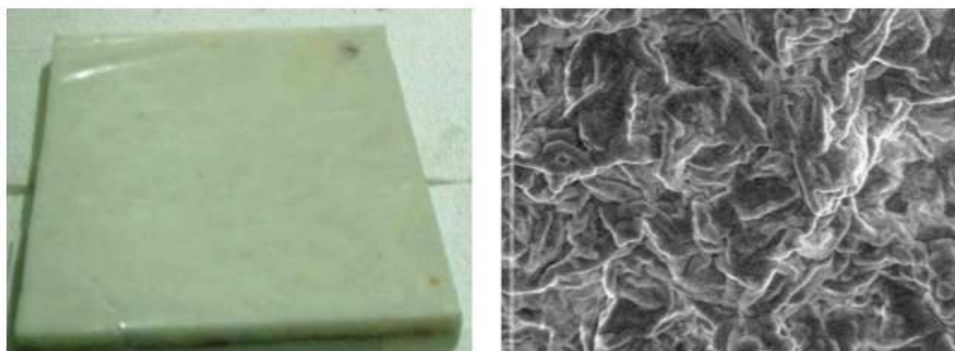


Figura 2.10 – *Shape stabilized* PCM (Y. P. Zhang et al. 2006)

O armazenamento térmico deste género de PCM é mais simples, uma vez que não necessita de dispositivos especiais ou recipientes para encapsular o PCM. Com base nos seus benefícios é proposto a sua aplicação em edifícios (Y. P. Zhang et al. 2006).

2.4 PCMs nos elementos construtivos

A utilização dos PCMs em elementos construtivos tem inúmeras áreas de aplicação, A sua aplicação pode ser de duas formas: sob a forma passiva, em que os PCMs são incorporados nos materiais de construção, contribuindo para o armazenamento de energia térmica, e sob a forma ativa onde o PCM é incorporado nos sistemas de aquecimento ou arrefecimento.

Na figura seguinte são esquematizadas algumas das possíveis utilizações de PCMs incorporadas em edifícios: Aquecimento solar passivo; Aquecimento ativo e arrefecimento noturno.

Para a aplicação de PCMs é fundamental ter em atenção o tipo de efeito pretendido, consoante se trate de climas quentes ou frios, estruturas leves ou ‘pesadas’, as suas características arquitetónicas e da envolvente (Figura 2.11), o tipo de utilização do edifício, etc. Em função destes parâmetros será escolhida a natureza do PCM, a sua temperatura de mudança de fase, a percentagem a utilizar, a sua localização na estrutura e a forma como vai ser incorporado.

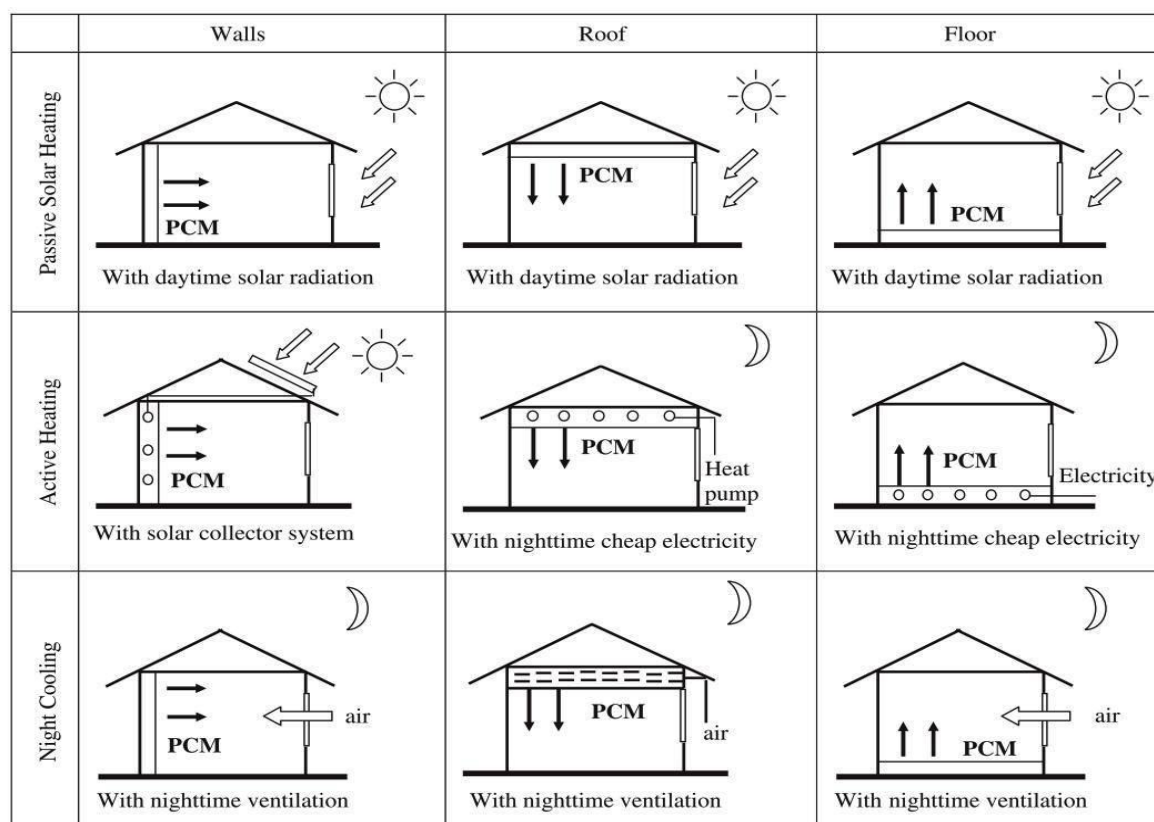


Figura 2.11 – Localização e aplicação dos PCMs na envolvente dos edifícios(Y. Zhang et al. 2007)

A utilização de PCMs na envolvente dos edifícios tem a vantagem de oferecer maiores áreas para transferência de calor passivo para cada zona do edifício, o que acrescenta armazenamento térmico de aquecimento solar passivo, e cria oportunidade de arrefecimento por ventilação e diminuição das amplitudes térmicas. Outras vantagens referentes a esta utilização dos PCMs, será a dispensa do uso de outro tipo de sistemas e o facto de não acarretarem custos adicionais para além do material (Y. Zhang et al. 2007).

Segundo Rodriguez-Ubinas et al. 2012, os fatores que afetam o sucesso do uso de PCMs como materiais de armazenamento térmico de calor latente são: a localização do PCM, o conteúdo ou forma de integração, temperatura de fusão e estratégias para o suporte dos PCMs (Figura 2.12) (Rodriguez-Ubinas et al. 2012).

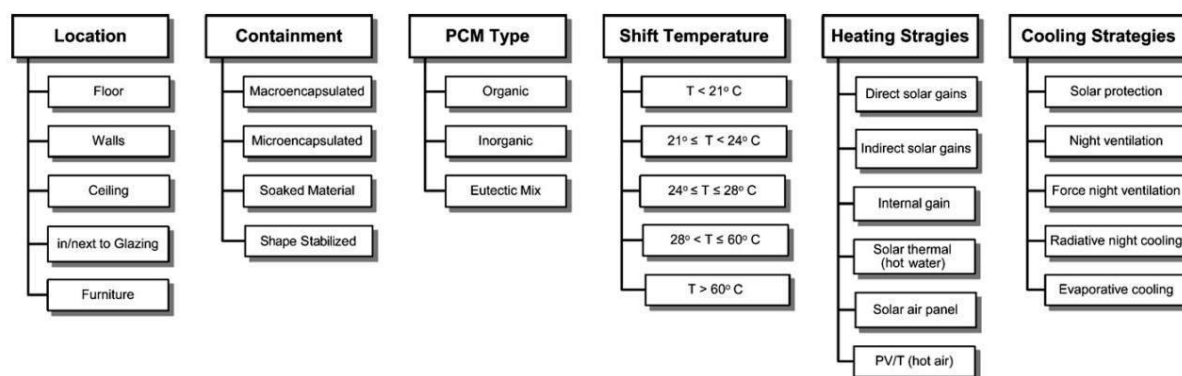


Figura 2.12 – Fatores para o sucesso de aplicações de PCMs (Rodríguez-Ubinas et al. 2012).

2.4.1 Sistemas passivos de armazenamento

A aplicação dos PCMs na construção tem como objetivo o aproveitamento de ganhos térmicos (solares e internos): favorecendo o aproveitamento de ganhos solares no inverno e o arrefecimento noturno no verão. E para aproveitamento de ganhos térmicos internos com a utilização de fontes de calor ou frio. (Vineet Veer Tyagi & Buddhi 2007).

De acordo com os mesmos autores, as três formas de aplicação dos PCMs para aquecimento e arrefecimento em edifícios são: (i) PCMs nos elementos de construção; (ii) PCMs em elementos do edifício; e (iii) PCMs nas unidades de armazenamento de calor e frio. Os dois primeiros são sistemas passivos, onde o calor ou frio armazenado é automaticamente libertado quando a temperatura interior ou exterior sobe ou desce para além do intervalo de fusão. A terceira forma de aplicação é um sistema ativo, onde o calor ou frio é armazenado em condições de confinamento térmico, separando-o do edifício através do isolamento. Por outras palavras, o calor ou frio é usado apenas se necessário e não naturalmente, isto dependendo de como e onde o PCM está integrado (Vineet Veer Tyagi & Buddhi 2007)

Parede de Trombe contendo PCMs

As paredes de trombe clássicas armazenam o calor de forma sensível, mas devido ao seu potencial de armazenamento por unidade de massa, a implementação de PCM na parede de trombe é um conceito atrativo, uma vez que, com o uso de PCMs é requerido menos espaço que uma parede de trombe clássica, sendo também uma solução mais leve (Vineet Veer Tyagi & Buddhi 2007).

PCM wallboards

Os *wallboards*, como por exemplo em gesso cartonado, são baratos e muito utilizados com grande variedade de aplicações, fazendo-os ser mais adequados para PCM encapsulados (Sharma et al. 2009). O uso de PCMs nos “wallboards” vai fornecer o armazenamento térmico distribuído por todo o edifício, permitindo o funcionamento como sistema solar passivo e possibilitando a diminuição das cargas de aquecimento/arrefecimento em construções com baixa massa térmica (Baetens et al. 2010).

A sua eficiência depende de vários fatores, como por exemplo: como o PCM é incorporado no *wallboard*; a orientação da parede; as condições climáticas; os ganhos solares diretos; os ganhos internos; a cor da superfície; a taxa de ventilação; o tipo de PCM escolhido e o seu intervalo de temperatura de mudança de fase; a sua capacidade de calor latente por unidade de área; entre outros (Soares et al. 2013).

BioPCM™

Este produto é comercializado pela *Phase Change Energy Solutions* (PCSE 2013) maioritariamente disponível como BioPCmat M27 M51 e M91 (Figura 2.13). Está disponível numa variedade de M-valores, sendo o valor M é definido consoante a capacidade de armazenamento de calor latente. Quanto maior o valor de M maior quantidade de PCMs estão incorporados, traduzindo-se em maior capacidade de armazenamento.

BioPCmat é um produto de baixo custo, incorporado numa tela que pode ser permeável ou impermeável. É comercializado com uma largura de 0,42m e um comprimento 1,22m ou 2,44m.



Figura 2.13 – BioPCmat M27/Q23 (PCSE 2013)

A temperatura de mudança de fase destes produtos pode ser selecionada de entre os seguintes valores: 23, 25, 27 e 29°C, podendo ser comercializado com outra temperatura personalizada. Q23 indica que a temperatura de fusão é de 23°C(PCSE 2013).

O BioPCmat tem diversas aplicações, podendo estar em contacto direto com o interior dos edifícios ou incorporado nos elementos construtivos. Na Figura 2.14 apresentam-se alguns exemplos de aplicação sugeridos pelo fabricante.

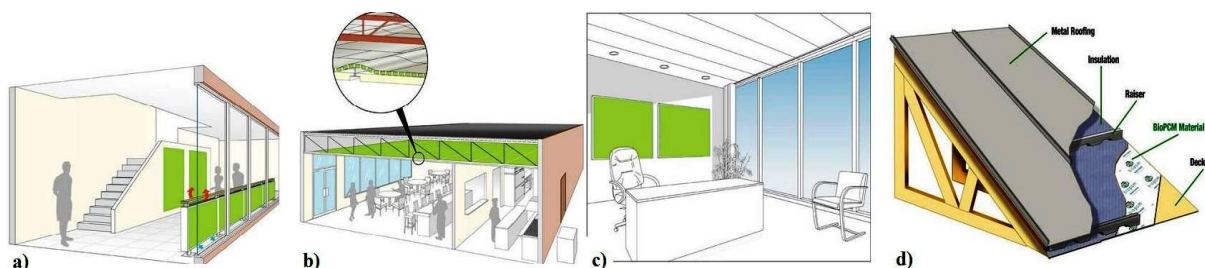
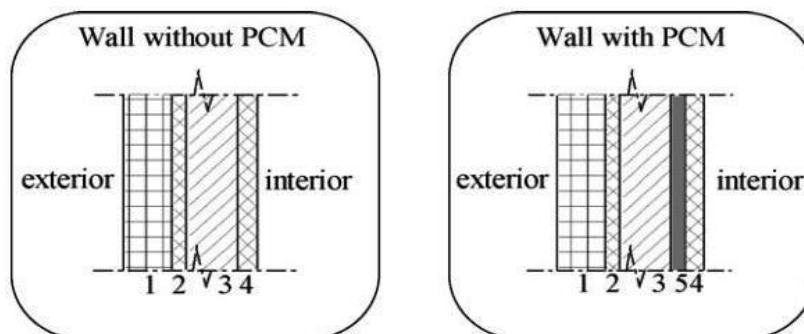


Figura 2.14 – Aplicações BioPCmat: a) Parede de trombe; b) Teto falso; c) Decoração; d) Telhado (PCSE 2013)

Paredes contendo PCM

A incorporação nas paredes tem tido algum sucesso, pois proporciona o aumento da capacidade de armazenamento de energia térmica. Isto tem particular interesse para aplicações solares passivas, elevadas amplitudes térmicas, etc (Y. Zhang et al. 2007).

Kuznik et al. (2008) investigaram uma solução de aplicação de painéis com 5mm de espessura incorporando 60% de PCM microencapsulado com mudança de fase aos 22°C entre duas camadas de poliestireno e gesso (Figura 2.15). Nas células de teste, através de uma câmara climática, fez-se variar a temperatura entre 15°C e 30°C e foram instaladas 12 lâmpadas de 1000W. Obteve-se para a parede sem PCM temperaturas entre 18.9 - 36.6°C e no caso da parede de PCM 19.8 - 32.8°C. Verificou-se uma estratificação das temperaturas em 1°C, entre 0.87 e 1.7m do chão, no caso da parede de referência. Concluiu-se que a utilização dos PCMs reduzia as flutuações de temperatura nas células de teste em 4.7%.



(1) 50 mm wood plate, (2) 10 mm plaster, (3) 50 mm polystyrene, (4) 13 mm plaster and (5) 5 mm PCM.

Figura 2.15 – Soluções testadas, com e sem PCM (Kuznik et al. 2008)

Schossig et al. (2005) investigaram durante 5 anos a incorporação de microcápsulas de PCM em pastas de gesso aplicadas a construção de estrutura leve (Figura 2.16). Foram construídas duas células de teste com e sem PCMs, uma com 6mm de espessura incorporando 40% PCM e outra com 15mm de espessura incorporando 20% PCM. No período monitorizado observou-se uma temperatura interior máxima para a célula de PCM de cerca de 4°C mais baixa em relação à célula de referência, e sendo atingida 1 hora mais tarde. Usando sombreamento, através de estores interiores, a diferença foi de apenas 2°C. O contributo dos PCMs foi de tal forma significativo que apenas se registaram temperaturas acima dos 28°C, num intervalo de apenas 5 horas, comparativamente às 50 horas de temperaturas acima dos 28°C observadas na célula de referência.

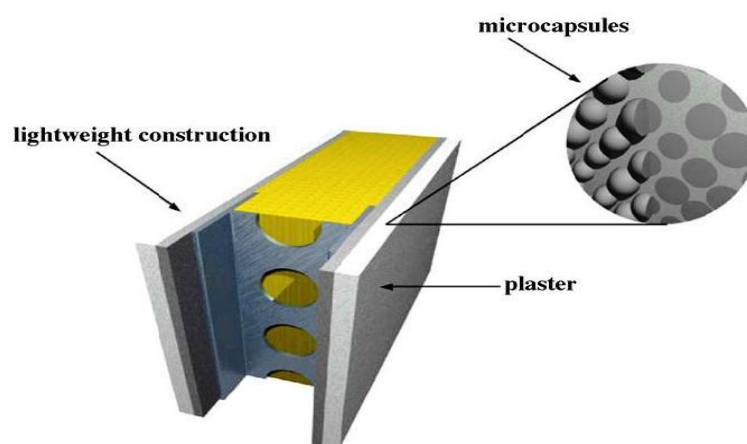


Figura 2.16 – Vista esquemática de uma parede. Microcápsulas de PCM são integradas no interior do gesso (Schossig et al. 2005)

Betão

A junção de PCM ao betão aumenta a sua capacidade de armazenamento de energia térmica. Para o caso de materiais porosos, como o betão, através da imersão em PCM derretido quente, por capilaridade o PCM fica alojado nos poros. Outra possibilidade é a incorporação de PCM através da junção aos agregados (Y. Zhang et al. 2007).

Lee et al. (2000) investigaram o desempenho térmico de 2 blocos de betão impregnados com PCMs, Butyl Stearate (Emerest 2326) e Parafina (unicere 55). A investigação consistiu no alinhamento dos blocos, formando um túnel através do qual se fazia passar o ar. Os blocos apresentavam temperatura de transição distintas, no caso do Butyl 17 - 22°C e a parafina 47 - 55°C. Foi incorporado uma percentagem de 4 - 9% de PCM. Os resultados mostraram que o impregnamento com Butyl manteve a temperatura acima de 15°C cerca de 6 horas a mais do que os convencionais. Os blocos impregnados com parafina demoraram mais 5 horas para atingir a temperatura de 60°C mas mantiveram uma temperatura de descarga superior a 22°C durante um período de 5 horas.

Persianas/cortinas

Este conceito de proteção solar, contendo PCMs é feito pelo interior ou exterior, através de uma estrutura amovível. Este sistema funciona de uma forma cíclica, ou seja, durante o dia são abertos para o exterior ficando sujeitos a exposição solar e o calor é absorvido pelo PCM. No período noturno, é fechado, e o calor contido no PCM é libertado para o ambiente interior quando a temperatura baixa. A Figura 2.17 ilustra dois exemplos de aplicação deste sistema.



Figura 2.17 – Lamelas contendo PCM: a) horizontal; b) vertical (Santos et al. 2012)

Pavimentos e teto

Pavimentos e tetos oferecem grandes áreas para trocas de calor de forma passiva, onde o armazenamento de energia térmica pode ser aumentado pela incorporação de PCMs. G. Zhou et al. (2008) analisou a performance térmica de um quarto exposto a sul, incorporado com placas de *shape-stabilized* PCM (Figura 2.18). A investigação teve em conta fatores como as propriedades termofísicas do PCM (temperatura de mudança de fase, condutividade térmica), o coeficiente de transferência de calor da superfície convectiva, a localização e espessura das placas de PCM. Os resultados mostraram que nas condições apresentadas a temperatura de mudança de fase adequada seria 20°C e o calor de fusão não inferior a 90kJ/kg; o limite de armazenamento de calor latente é limitado pela superfície interior ao invés de ser limitado pela resistência de condução interna; a localização do PCM no interior da superfície é melhor solução que no exterior; o isolamento térmico pelo exterior influencia o funcionamento das placas de PCM e da temperatura interior no inverno; as placas de *shape-stabilized* PCM concedem a construções com pouca massa térmica uma resposta de elevada massa térmica elevando a temperatura mínima interior noturna em 3°C.

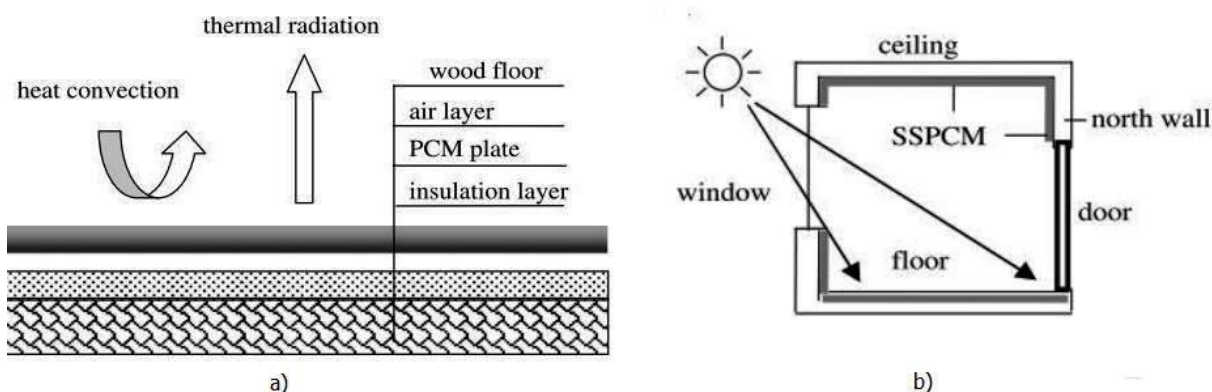


Figura 2.18 – a) Esquematização do pavimento; b) Corte do quarto com PCM (G. Zhou et al. 2008)

À semelhança dos pavimentos, a aplicação de PCMs em tetos permite tirar partido da sua capacidade de armazenamento. Vineet Veer Tyagi et al. (2007) referiu um sistema localizado no teto, baseado num espaço vazio que incorpora PCMs. São usados refletores para direcionar os raios solares que entram através das janelas para os PCMs. Os resultados mostraram que estes sistemas têm o potencial de recuperar entre 17 a 36% do calor proveniente da radiação solar que não era absorvido inicialmente.

Yahay et al.(2011) investigou o uso de painéis de gesso integrado com PCM. Os resultados mostraram que, os painéis contendo PCMs com maior intervalo de temperatura de mudança de fase e calor latente, aumentaram a eficiência energética nos edifícios. Mostrando que este tipo de estratégia pode ser prática para minimizar a dependência de sistemas de arrefecimento ativo. Foi comparada a temperatura dos tetos comuns e dos tetos com incremento de PCMs, sendo registado uma temperatura de 32.52°C nos tetos comuns e de 30.97°C no teto com PCMs, a maior redução obtida foi de 1.55°C. Os painéis de PCM absorveram o calor, reduzindo a temperatura da superfície e minimizando o fluxo de calor para o interior. Constatou-se também uma diminuição do consumo de energia para arrefecimento. (Yahay & Ahmad 2011)

Envidraçados

A incorporação de PCMs em envidraçados é uma das formas de melhorar a baixa inércia térmica dos componentes transparentes da envolvente, possibilitando um melhor controlo da temperatura na superfície interna do vidro, melhorando também significativamente o conforto térmico e a eficiência energética (Goia et al. 2013).

Os envidraçados têm um papel fundamental no conforto térmico dos ocupantes no interior dos edifícios, pois são responsáveis pelo controlo de ganhos solares. A radiação sobre

determinado vidro é refletida, absorvida e transmitida consoante as propriedades do vidro (cor, espessura, etc).

Goia et al. (2013) investigaram um protótipo de um sistema envidraçado de PCM simples (DGU_PCM) e seu comportamento em relação a vidro duplo convencional (DGU_CG), como representado na Figura 2.19. Por um período de 6 meses, as temperaturas da superfície e radiação transmitida ao protótipo, foram usadas para avaliar numericamente as condições térmicas interiores dentro de uma sala de escritório padrão. Diferentes condições fronteira foram usadas: temperaturas de inverno, de verão e meia estação.(Goia et al. 2013)



Figura 2.19 – Célula de teste, sistemas DGU_CG e DGU_PCM (Goia et al. 2013)

O protótipo teste, DGU_PCM, consiste num vidro duplo (8/15/6mm) feito de dois panos de vidro contendo uma cavidade de 15mm entre eles preenchida por cera de parafina comercial (parafina RT35). Os resultados obtidos mostraram que o acréscimo de PCM melhora significativamente o comportamento térmico dos envidraçados. Observou-se também que quanto maior a radiação solar maiores os benefícios oferecidos pelo PCM, embora seja necessário ter em consideração a temperatura de mudança de fase do PCM.

Tijolos/Blocos

Blocos, tijolos ou outro tipo de materiais impregnados ou incorporados com PCM, são usados na construção, oferecendo à estrutura uma maior inércia térmica sem ter que associar grande massa.

Silva et al. (2012) testaram um tijolo incorporado com parafina macroencapsulada (Figura 2.20). Os resultados obtidos mostraram que a incorporação dos PCMs contribuiu para a redução da amplitude térmica no interior entre 5 a 10°C, e atrasando a temperatura máxima em 3h.



Figura 2.20 – Tijolo com PCM macroencapsulado (Silva et al. 2012)

C. Zhang et al. (2011) testaram a resposta térmica de uma parede de tijolo preenchida com PCM comparativamente com uma parede de tijolo sólida. Os resultados mostraram que a capacidade de armazenamento da parede contendo PCM é superior à parede comum.

2.4.2 Sistemas ativos de armazenamento

Pavimento

A utilização de pavimento radiante é uma forma eficaz de aquecimento de espaços interiores. Um piso radiante permite ter condições homogéneas no interior, reduzindo a estratificação devido às trocas de calor com a envolvente (Causone et al. 2010).

A incorporação de PCMs neste tipo de solução aumenta a eficácia destes sistemas, devido à sua capacidade de armazenamento, possibilitando a diminuição do número de horas em que o sistema se encontra em consumo. Comparativamente com sistemas de aquecimento por ventilação tem a vantagem de menor possibilidade de poeiras no interior.

K. Lin et al. (2005) desenvolveram um pavimento radiante contendo *shape stabilized* PCM, (Figura 2.21) com temperatura de fusão igual a 52°C e calor latente de 25°kJ/kg. A célula de teste foi dotada de aquecimento elétrico de 150 W, ativo no período noturno (23-08h). A temperatura média registada no exterior foi de 13.6°C, no interior de 20°C, tendo sido registada uma amplitude térmica média diária de 12°C. Ao ser ligado o aquecimento a temperatura interior subiu para os 31°C. A estratificação de temperaturas foi de 0.5°C de entre

alturas de 0.5m e 1.5m. A energia consumida foi de 3.3 kWh correspondendo a um total de 54% do total de consumo (6.1 kWh).

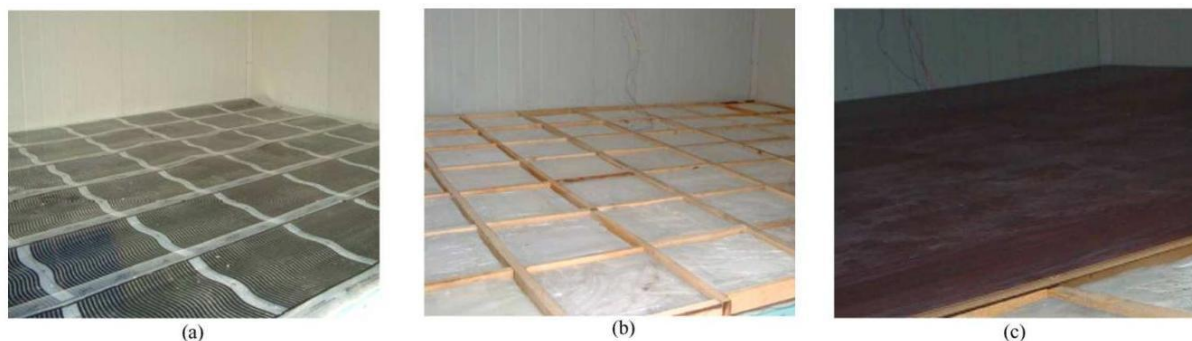


Figura 2.21 – Montagem do piso radiante com *shape stabilized* PCMs (K. Lin et al. 2005)

Tetos

Griffiths & Eames (2007) exploraram o conceito de tetos arrefecidos, sistemas com a vantagem de possibilidade de arrefecimento. O sistema usado continha um fluido de refrigeração com 40% de microcápsulas de PCM, com temperatura de mudança de fase de 18°C. Foram definidas temperaturas de entrada do fluido de 16 e 18°C. Os resultados mostraram que com o uso de PCMs tinha-se uma menor taxa de circulação de 0,25 l/s em vez de 0,75 l/s, menores consumos elétricos das bombas e elevava as temperaturas mais baixas, de 19°C, para 20 a 21°C.

2.5 Modelação energética de edifícios

Nos últimos anos surgiram muitos métodos e programas de previsão e avaliação do comportamento térmico dos edifícios. Estes métodos e programas permitem modelar edifícios, que com maior ou menor complexidade, permitem ter uma ideia relativamente precisa dos consumos de energia para aquecimento e arrefecimento de um determinado edifício e alcançar as condições de conforto ideais com o menor consumo energético associado.

Para a modelação é necessário conhecer previamente as soluções construtivas em questão, os dados climáticos, a localização do edifício, os sistemas de climatização e ventilação, a área e características dos envidraçados, iluminação, o tipo de ocupação, entre outros. A sua utilidade é também relevante para edifícios já existentes, pois permite avaliar possíveis diminuições de consumo de energia e melhorias de condições térmicas existentes.

2.5.1 Ferramentas de simulação energética de edifícios

As ferramentas de simulação energética trouxeram uma maior rapidez, eficiência e rigor, que leva a um aperfeiçoamento da solução final. Devido à grande capacidade dos computadores, é possível simular soluções mais complexas com maior rapidez, com possibilidade de testar uma vasta gama de soluções. Desta forma, é possível simular a performance energética dos edifícios de um modo mais rigoroso.

Crawley et al. (2008) fizeram um estudo comparativo com o objetivo de diferenciar vinte programas de simulação e as suas capacidades de cálculo para o desempenho energético de edifícios. Os Programas de simulação energética referidos são: BLAST, BSim, DeST, DOE-2.1E, ECOTECT, Ener-Win, Energy Express, Energy-10, EnergyPlus, eQUEST, ESP-r, HAP, HEED, IDA, IES <Virtual Environment>, PowerDomus, SUNREL, Tas, TRACE 700 e TRANSYS. (Crawley et al. 2008)

Nas ferramentas de simulação energética disponíveis, nem todas permitem a modelação de PCMs. São exemplos de programas que permitem essa modelação: O TRNSYS, ESP-R, PCM EXPRESS, EnergyPlus e DesignBuilder. O PCM Express foi desenvolvido pela Valentin Software, empresa alemã, com a colaboração do *Fraunhofer Institute for Solar Energy*, com o objetivo de modelar PCMs. Este programa fornece aos utilizadores um método simples de definir e avaliar um sistema com PCMs. (PCMExpress 2013)

Na presente dissertação foi usado o DesignBuilder v3.2.0.067, que consiste numa ferramenta de interface para o EnergyPlus. O EnergyPlus é um programa de simulação para o estudo do comportamento térmico dos edifícios que apresenta um ambiente gráfico pouco atrativo, onde os dados são inseridos pelo utilizador num editor de texto (DesignBuilder 2013).

O DesignBuilder permite uma rápida e fácil introdução da geometria arquitetónica dos edifícios, sendo possível representar em três dimensões, tornando a modelação mais fácil e intuitiva. O programa fornece resultados do comportamento energético do edifício e permite a exportação dos mesmos.

DesignBuilder v3.2.0.067

A versão utilizada possibilita inserir materiais de mudança de fase para o cálculo da simulação energética e inserir as propriedades dos PCMs dadas pelos fabricantes sob a forma de curva Temperatura-Entalpia. Para a simulação são necessárias as propriedades térmicas dos PCMs que se apresentam em seguida:

O coeficiente de temperatura para condutibilidade térmica- Este coeficiente está dependente da temperatura a que o material se encontra, ou seja, é a condutibilidade térmica

de um material para uma determinada temperatura. As unidades são $W/m-K^2$ e a condutibilidade térmica é obtida pela expressão:

$$k = k_0 + k_1 (T_i - 20) \quad (1)$$

Sendo k_0 o valor da condutibilidade térmica do material para $20^\circ C$ e k_1 a variação da condutibilidade térmica por unidade de temperatura.

A curva de Temperatura-Entalpia- Esta curva de referência é definida por um máximo de 16 pontos e um mínimo de 4, e deve abranger todo o intervalo de temperatura a que o material vai estar sujeito na simulação. É sugerido que se defina a função a partir de temperaturas baixas, $-20^\circ C$, e tenha valor máximo de $100^\circ C$ (DesignBuilder 2013).

3 CASOS DE ESTUDO

Neste capítulo, primeiramente foi seguida a norma EN 15265, com o intuito de fazer a verificação do modelo do DesignBuilder/EnergyPlus. Após garantida a validade do modelo computacional, foram realizados vários testes ao compartimento validado com a incorporação de PCMs e analisados os resultados do consumo energético e conforto térmico.

3.1 Verificação do modelo

A validação do modelo de cálculo foi feita seguindo a norma europeia EN 15265, que especifica um conjunto de pressupostos, requisitos, testes de validação e procedimentos utilizados para o cálculo das necessidades anuais de energia para aquecimento e arrefecimento, de um compartimento de um prédio onde os cálculos são feitos com um intervalo de tempo de uma hora (EN 15265 2007).



Figura 3.1 – Caso de teste (EN 15265 2007) no modelado no DesignBuilder

O principal objetivo da norma é validar e verificar a precisão do método de cálculo utilizado para obter a performance energética de um determinado compartimento (Figura 3.1). São consideradas as seguintes condições:

- O compartimento é considerado fechado e delimitado por elementos construtivos (paredes, teto e pavimento);

- A temperatura do ar é uniforme em todo o compartimento (não é considerada estratificação);
- As propriedades termofísicas de todos os materiais são constantes e isotrópicas;
- O coeficiente de transferência de calor convectivo é fixo;
- A condução de calor para cada elemento é unidimensional e as superfícies são consideradas isotérmicas;
- Pontes térmicas são representadas como elementos lineares de perda de calor, (prEN ISO 14683) ou como o elemento equivalente de construção unidimensional com massa e características térmicas derivadas do cálculo estacionário (prEN ISO 10211);
- A distribuição da radiação solar na zona das componentes das superfícies internas é fixa;
- A transferência de calor por convecção e radiativa de comprimento de onda longo, devem ser tratadas separadamente para cada elemento;
- A dependência angular das propriedades de transmissão solar nos envidraçados é contabilizada baseando-se na informação do fabricante, ou como alternativa, um fator de 0.9;
- Sombreamentos móveis e externos são considerados de acordo com a prEN ISO 13790;
- A transferência de calor pelo pavimento deve ser considerada através do cálculo dinâmico (prEN ISO 13370).

3.1.1 Descrição dos casos de teste

Foram analisados doze casos de teste, com área de referência descrita no Quadro 3.1 (áreas medidas pelo interior). O compartimento modelado conforme a EN 15265 possui uma janela de 7 m² orientada a oeste. Os dados climáticos foram os de Orly, próximo da cidade de Paris (França), conforme especificado na norma.

Quadro 3.1 – Áreas do compartimento de referência

| | Parede Exterior | Janela | Paredes internas laterais | Parede interna | Teto | Pavimento |
|------------------------|-----------------|--------|---------------------------|----------------|------|-----------|
| Área (m ²) | 3.08 | 7 | 2 x 15.4 | 10.08 | 19.8 | 19.8 |

As dimensões internas da sala são: largura de 3.6m, profundidade de 5.5m e uma altura de 2.8m. Os materiais utilizados nos casos de teste têm propriedades termofísicas apresentadas no Quadro 3.2:

Quadro 3.2 – Propriedades termofísicas dos componentes opacos

| | d (m) | λ W/(m K) | ρ kg/m ³ | c_p kJ/(kg K) |
|--------------------------------|----------|----------------------|-----------------------------|--------------------|
| Tipo1 (parede exterior) | | | | |
| camada exterior | 0.115 | 0.99 | 1800 | 0.85 |
| camada isolante | 0.06 | 0.04 | 30 | 0.85 |
| alvenaria | 0.175 | 0.79 | 1600 | 0.85 |
| reboco interno | 0.015 | 0.7 | 1400 | 0.85 |
| Tipo 2 (parede interna) | | | | |
| gesso cartonado | 0.012 | 0.21 | 900 | 0.85 |
| lã mineral | 0.1 | 0.04 | 30 | 0.85 |
| gesso | 0.012 | 0.21 | 900 | 0.85 |
| Tipo 3c (teto) | | | | |
| tela de impermeabilização | 0.04 | 0.23 | 1500 | 1.5 |
| argamassa de cimento | 0.06 | 1.4 | 2000 | 0.85 |
| lã mineral | 0.04 | 0.04 | 50 | 0.85 |
| betão | 0.18 | 2.1 | 2400 | 0.85 |
| Tipo 3f (pavimento) | | | | |
| betão | 0.18 | 2.1 | 2400 | 0.85 |
| lã mineral | 0.04 | 0.04 | 50 | 0.85 |
| argamassa de cimento | 0.06 | 1.4 | 2000 | 0.85 |
| tela de impermeabilização | 0.004 | 0.23 | 1500 | 1.5 |
| Tipo 4c (teto/telhado) | | | | |
| tela de impermeabilização | 0.004 | 0.23 | 1500 | 1.5 |
| argamassa de cimento | 0.06 | 1.4 | 2000 | 0.85 |
| lã mineral | 0.04 | 0.04 | 50 | 0.85 |
| betão | 0.18 | 2.1 | 2400 | 0.85 |
| lã mineral | 0.1 | 0.04 | 50 | 0.85 |
| placa acústica | 0.02 | 0.06 | 400 | 0.85 |
| Tipo 4f (pavimento) | | | | |
| placa acústica | 0.02 | 0.06 | 400 | 0.84 |
| lã mineral | 0.1 | 0.04 | 50 | 0.85 |
| betão | 0.18 | 2.1 | 2400 | 0.85 |
| lã mineral | 0.04 | 0.04 | 50 | 0.85 |
| argamassa de cimento | 0.06 | 1.4 | 2000 | 0.85 |
| tela de impermeabilização | 0.004 | 0.23 | 1500 | 1.5 |
| Tipo 5 (telhado) | | | | |
| tela de impermeabilização | 0.004 | 0.23 | 1500 | 1.3 |
| isolamento | 0.08 | 0.04 | 50 | 0.85 |
| betão | 0.2 | 2.1 | 2400 | 0.85 |

No Quadro 3.3 resumem-se os casos de teste descritos na norma EN 15265:

Quadro 3.3 – Resumo dos Casos de Teste

| | Parede Exterior | Envidraçados | Paredes Internas | Teto | Pavimento | Ganhos Internos | Ventilação | Controlo de temperatura |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|----------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------|
| Teste 1 - Referência | Tipo 1 | vidro duplo sombreado | Tipo 2 adiabático | Tipo 4c adiabático | Tipo 4f adiabático | 20 W/m ² convectivo 8-18h semanal | 1 rph 8-18h | Aquecimento :20°C; Arrefecimento 26°C 24h/dia |
| Teste 2 - Maior inércia | | | | Tipo 3c adiabático | | 20 W/m ² convectivo 8-18h semanal | | |
| Teste 3 - Sem ganhos internos | | | | Tipo 4c adiabático | | - | | |
| Teste 4 - Sem proteção solar | | vidro duplo | | Tipo 4c adiabático | | 20 W/m ² convectivo 8-18h semanal | | |
| Teste 5 | = Teste1 + AVAC | | | | + 8h00-18h00 Segunda a Sexta | | | |
| Teste 6 | = Teste2 (Maior Inércia) | | | | | | | |
| Teste 7 | = Teste3 (Sem Ganhos Internos) | | | | | | | |
| Teste 8 | = Teste4 (Sem Proteção Solar) | | | | | | | |
| Teste 9 | = Teste5 (Test1 + Intermitente AVAC) | | | | | + Telhado Exterior | | |
| Teste 10 | = Teste6 (Test2 (Maior Inércia) + Intermitente AVAC) | | | | | | | |
| Teste 11 | = Teste7 (Test3 (Sem Ganhos Internos) + Intermitente AVAC) | | | | | | | |
| Teste 12 | = Teste8 (Test4 (Sem Proteção Solar) + Intermitente AVAC) | | | | | | | |

rph - Renovações por hora [h⁻¹]

3.1.2 Resultados obtidos

A validação é feita com base nos resultados do consumo energético de aquecimento (Q_H) e arrefecimento (Q_C), expresso em kWh e calculados a um ano, obtidos pelo método de cálculo e comparando-os com os valores de referência da EN 15265. O erro é calculado com base nas fórmulas:

$$rQ_H = \text{abs}(Q_H - Q_{H,ref}) / Q_{tot,ref} \quad (2)$$

$$rQ_C = \text{abs}(Q_C - Q_{C,ref}) / Q_{tot,ref} \quad (3)$$

Onde, rQ_H (2) é o erro de precisão dos valores de aquecimento e rQ_C (3) é o erro de precisão dos consumos de arrefecimento. Os erros são calculados fazendo o valor absoluto da diferença entre o valor obtido pelo modelo (Q_H ou Q_C) e o valor da norma ($Q_{H,ref} + Q_{C,ref}$), dividindo pelo consumo total da norma ($Q_{tot,ref} = Q_{H,ref} + Q_{C,ref}$).

Os valores de precisão podem ser verificados com três níveis, A, B e C.

Para percentagem de erro entre 10 e 15% é atribuído nível C, entre 5 e 10% é atribuído nível B e erros menores que 5% é atribuído o nível A.

$$\text{Nível A} : rQ_H \leq 0.05 \text{ e } rQ_C \leq 0.05 \quad (4)$$

$$\text{Nível B} : rQ_H \leq 0.10 \text{ e } rQ_C \leq 0.10 \quad (5)$$

$$\text{Nível C} : rQ_H \leq 0.15 \text{ e } rQ_C \leq 0.15 \quad (6)$$

A validação dos vários testes teve resultados aceitáveis. Observando o gráfico da Figura 3.2, verifica-se que, em apenas três casos se verificou o nível B de precisão, Teste 1 e Teste 4 para o valor de arrefecimento e Teste 9 para o valor de aquecimento. Nos restantes obteve-se nível de precisão menor ou igual a 5%, nível A. O erro médio foi de 2% para aquecimento e arrefecimento (nível A). Todos os resultados são apresentados no Anexo A.

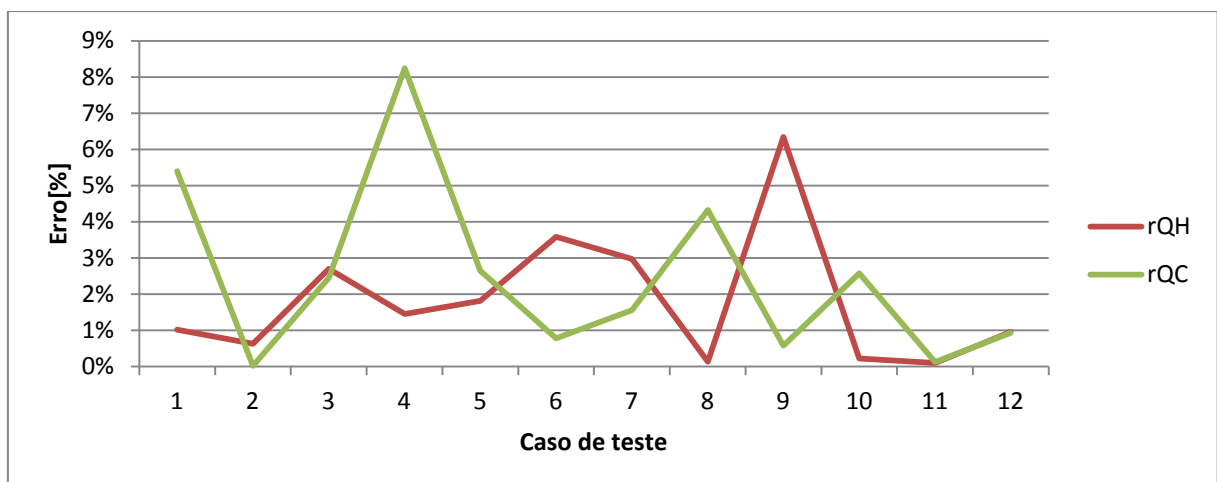


Figura 3.2 – Resultados da validação do modelo

3.2 Incorporação de PCMs

Para os 12 casos de teste anteriormente validados, foram incorporados PCMs em toda a envolvente. Foram escolhidos 2 tipos de PCMs, com as mesmas características apenas com pontos de fusão diferentes, o BioPCM M182/Q21 e Bio PCM M182/Q25 que apresentam curvas de temperatura-entalpia representadas na Figura 3.3:

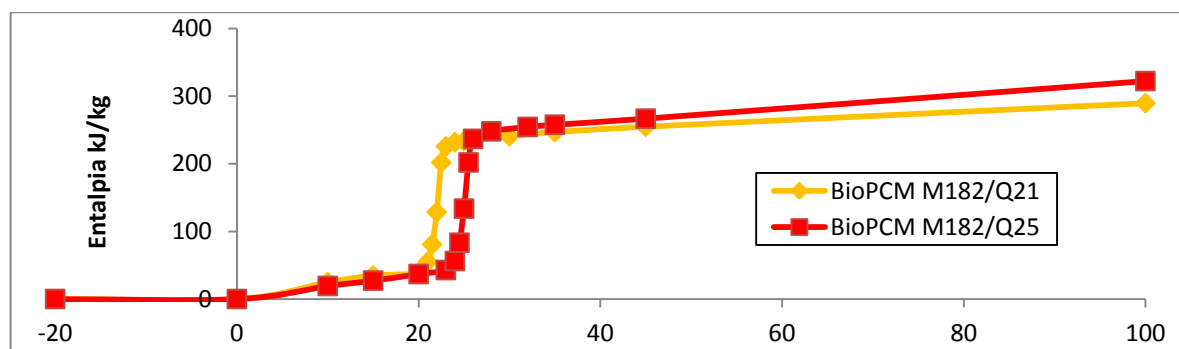


Figura 3.3 – Curvas de temperatura-entalpia dos PCMs modelados

O BioPCM foi incorporado como sendo a segunda camada a contar do interior (no pavimento, paredes e teto), à exceção dos testes 2, 6 e 9, em que no teto foi colocado como sendo a primeira camada estando em contato direto com o interior.

3.2.1 Consumos de energia

BioPCM M182/Q21

Os resultados obtidos para os testes com BioPCM M182/Q21 (Figura 3.4), mostraram que se verifica uma generalizada redução no consumo de energia. Os valores médios obtidos para a variação de consumo foram: -22.10 kWh para aquecimento (Med ΔQH), -12.32 kWh para arrefecimento (Med ΔQC) e -34.42 kWh de consumo total (Med ΔQ_{total}).

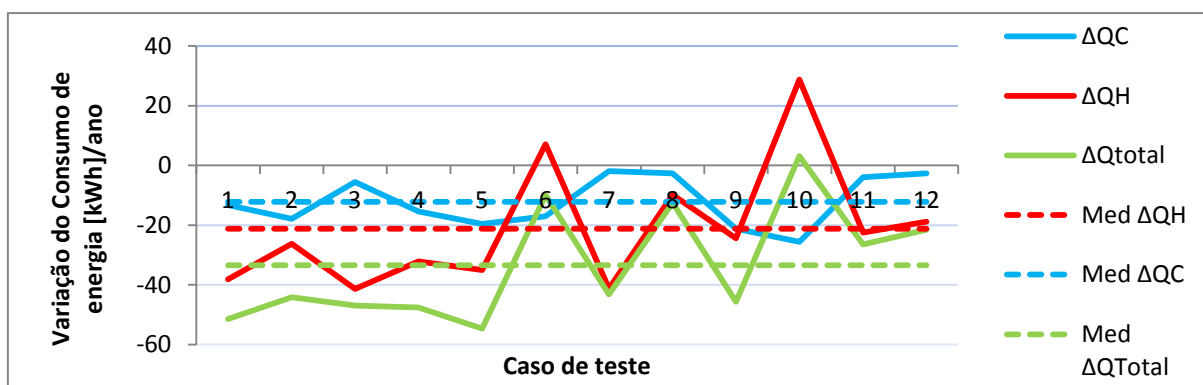


Figura 3.4 – Variação do consumo energético com a aplicação BioPCM M182/Q21

Contudo, verificou-se que o uso dos PCMs nos testes 6 e 10 (maior inércia) provoca um aumento do consumo, com o maior valor a ser registado para BioPCM M182/Q21 (Teste 10), com um aumento de 6% (+32.7 kWh). O valor médio total de variação do consumo de energia foi de -33.43 kWh, correspondendo a 63% de ganho em aquecimento e 37% em arrefecimento.

BioPCM M182/Q25

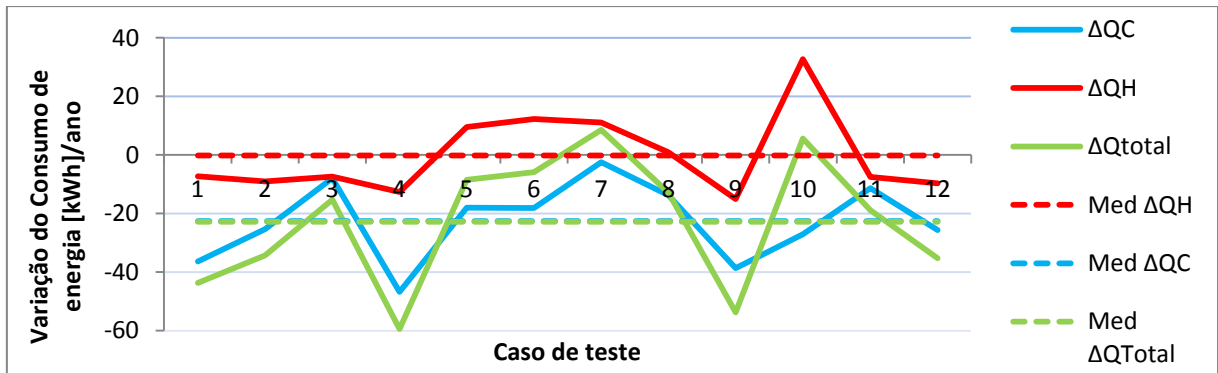


Figura 3.5 – Variação do consumo energético com a aplicação BioPCM M182/Q25

À semelhança do obtido no caso anterior, no BioPCM M182 Q25 (Figura 3.5), os valores médios de consumo anual também diminuem, com a exceção do valor médio de aquecimento que é muito próximo de zero. A variação de consumo foi de: -0.23 kWh para aquecimento (Med ΔQH), -22.63 kWh para arrefecimento (Med ΔQC) e -22.86 kWh de consumo total (Med $\Delta Qtotal$). Os testes 5, 6, 7, 8 e 10 apresentam aumento de consumo para aquecimento, sendo o maior valor registado no caso 10, de +32.71 kWh (+6%). O valor médio total de consumo foi de -22.86 kWh, correspondendo a 1% de ganho em aquecimento e 99% para arrefecimento.

Consumos totais com/sem PCMs

Analisando os consumos de energia para aquecimento (Figura 3.6), o maior decréscimo em valor absoluto ocorreu para o uso do BioPCM M182/Q21, no Teste7 (sem ganhos internos +AVAC), com uma diminuição de -41.33 kWh. O maior decréscimo em comparação com a referência, ocorreu no Teste 5 (referência + AVAC) para o BioPCM M182/Q21, onde se observou uma diminuição de 7% (-35.1 kWh).

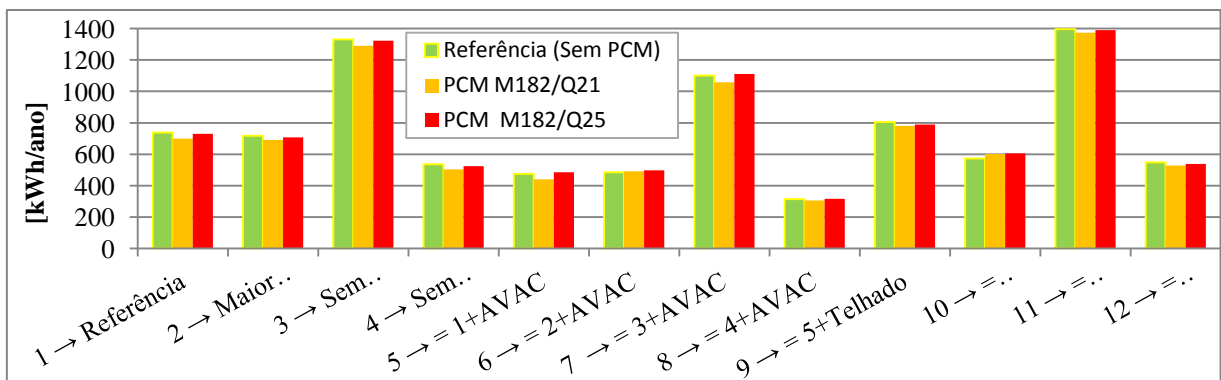


Figura 3.6 – Consumos de energia para aquecimento

Nos consumos para arrefecimento (Figura 3.7), é evidente a importância da proteção solar no consumo final. Nos testes 4, 8 e 12 obteve-se um consumo superior quando comparado com os outros testes. O maior decréscimo de consumo em valor absoluto aconteceu para o uso do BioPCM M182/Q25 (Teste 4), com uma diminuição de -46.77 kWh. O maior decréscimo, em comparação com a referência, ocorreu no Teste 7 (sem ganhos internos) para o BioPCM M182/Q25, onde se observou uma redução de 96% (-2.48 kWh). Neste caso o valor percentual é enganador, por estarmos na presença de valores de consumo muito baixos.

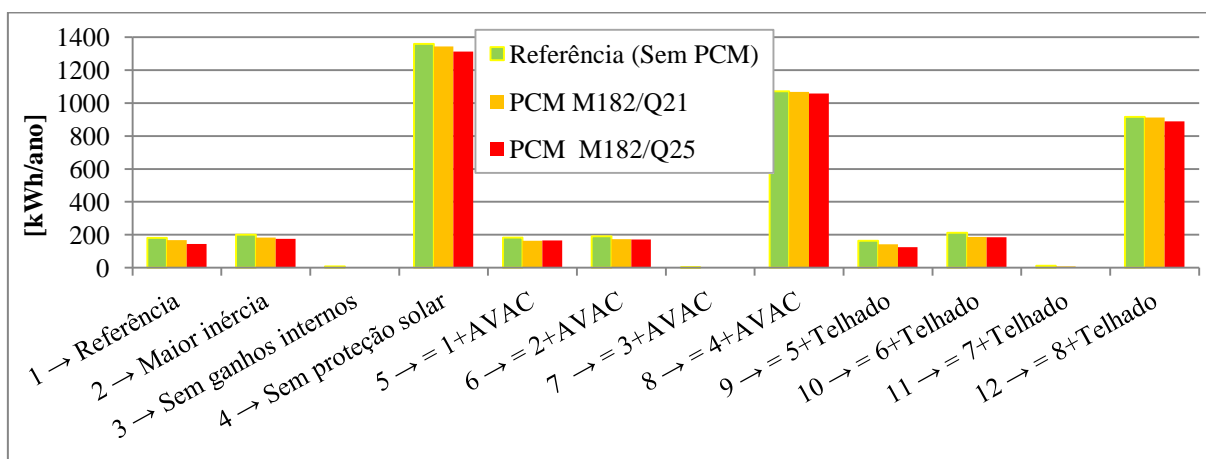


Figura 3.7 – Consumos de energia para arrefecimento

Para o consumo global (Figura 3.8), a maior redução de consumo em valor absoluto registou-se para o Teste 4 com BioPCM M182/Q25, com uma redução de -59.37 kWh. A maior diminuição em valor percentual aconteceu para o Teste 5, com o uso do BioPCM M182/Q21, com uma redução de -8%, -54.75 kWh.

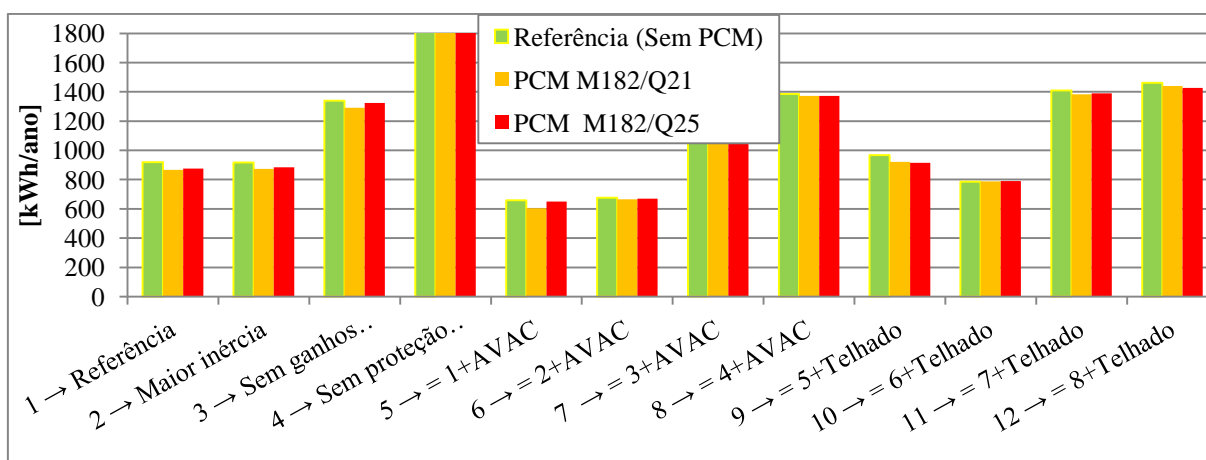


Figura 3.8 – Consumo total de energia

Todos os casos de teste sem proteção solar obtiveram maior consumo final quando comparados com os 3 antecedentes, à semelhança do que tinha acontecido nos consumos para arrefecimento. Todos os resultados são apresentados no Anexo B.

Diferenças de consumo

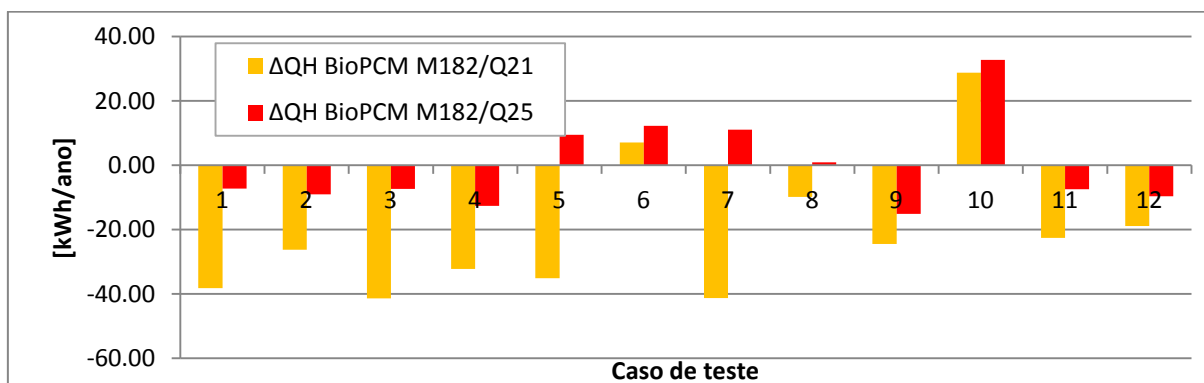


Figura 3.9 – Diferenças no consumo de energia para aquecimento

Para o modo de aquecimento obteve-se melhor desempenho para o PCM com temperatura de fusão mais baixa, BioPCM M182/Q21 (Figura 3.9).

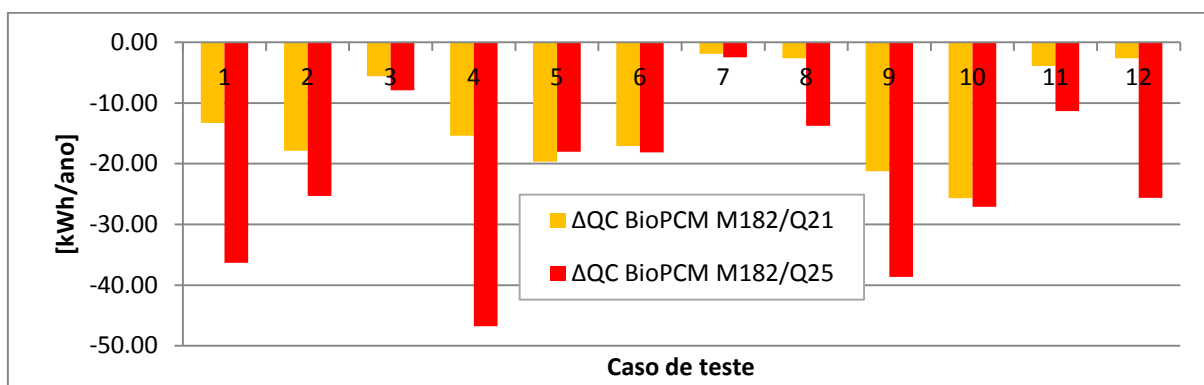


Figura 3.10 – Diferenças no consumo de energia para arrefecimento

É evidente a melhoria que os PCMs permitem obter na redução de consumos energéticos de arrefecimento (Figura 3.10), onde em todos os testes se obteve um consumo menor do que a referência. Para o modo de arrefecimento a temperatura de fusão mais eficaz é a mais elevada das duas, 25°C.

3.2.2 Influência das superfícies adiabáticas

Os casos de teste 1 a 8 têm a particularidade de ter apenas uma superfície em contacto com o exterior, nos restantes testes (9 a 12), o compartimento tem outra superfície em contacto com o exterior, o telhado.

Para analisar a influência das superfícies adiabáticas no funcionamento dos PCMs, foram comparados seis modelos (Figura 3.11). As paredes adiabáticas são paredes que separam dois compartimentos à mesma temperatura, não havendo fluxo de calor entre compartimentos, pois não existe diferença de temperatura entre compartimentos. No entanto, pode haver absorção e/ou libertação de calor.

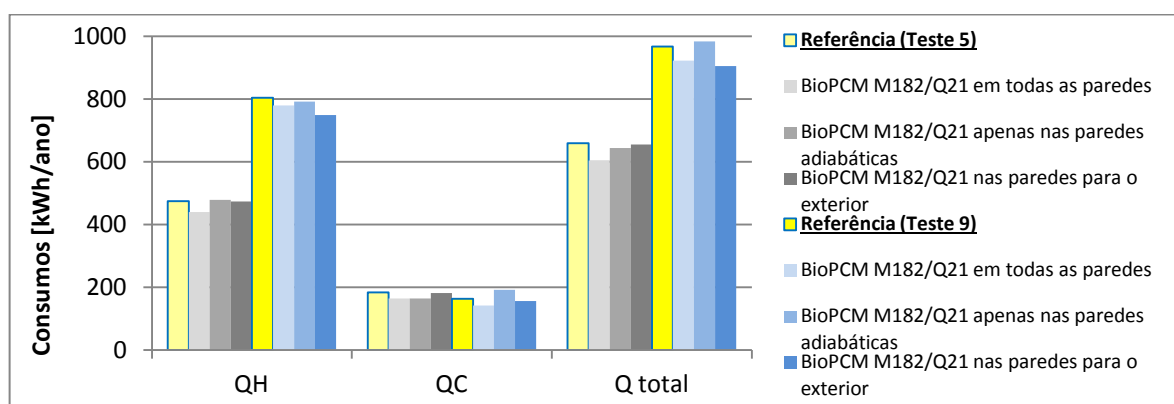


Figura 3.11 – Consumo de energia: influência das superfícies adiabáticas e não adiabáticas

No Teste 5, para consumos de aquecimento, com PCMs apenas numa superfície não adiabática (3.08 m^2), obteve-se -1.82 kWh de consumo. Comparando com a incorporação de PCMs em 5 superfícies adiabáticas (81.2 m^2) que obteve um acréscimo de 3.58 kWh .

Os resultados no Teste 5 não mostram grandes diferenças em valor absoluto, muito por causa de superfície em contacto com o exterior, de $10,08 \text{ m}^2$, que contém um envidraçado de 7 m^2 , ou seja, apenas é incorporado PCM em 3.08 m^2 da área total da superfície.

No Teste 9 é evidente a eficácia dos PCMs, pois com a incorporação de PCMs em apenas 2 superfícies em contacto com o exterior (22.88 m^2), obteve-se -55.0 kWh de consumo para aquecimento e -62.33 kWh de consumo total, comparativamente com PCMs em 4 superfícies adiabáticas (61.4 m^2) com $-12,23 \text{ kWh}$ e $+28.32 \text{ kWh}$ (pior resultado, com mais 17% de consumo energético). O conjunto total dos resultados é apresentado no Anexo C.

Verifica-se que para aquecimento e arrefecimento a eficácia dos PCMs depende muito das superfícies em contacto com o exterior, pois para menores áreas de PCMs consegue-se

melhores resultados aplicando PCMs nessas superfícies relativamente à aplicação apenas nas superfícies adiabáticas.

Os resultados mostram que a incorporação de PCMs em superfícies adiabáticas tem menor influência do que nas superfícies não adiabáticas. A justificação poderá estar na maior facilidade em atingir a temperatura de fusão do PCM quando o mesmo está aplicado em superfícies não adiabáticas em contacto com o exterior, devido às maiores flutuações de temperatura nesses elementos construtivos e consequentemente no PCM. Só assim, havendo uma mudança de fase, se consegue tirar proveito do calor latente absorvido ou libertado pelos PCMs.

3.2.3 Conforto térmico

A incorporação de PCMs, quando adequadamente selecionados e aplicados, permite não só diminuir os consumos energéticos em edifícios como também melhorar o conforto térmico dos ocupantes. Neste sentido, foram analisados os níveis de conforto térmico através dos índices PMV/PPD e observado o número de horas anuais dentro do intervalo de temperaturas de conforto (segundo RCCTE 20°C e 25°C).

As simulações anuais foram efetuadas para um período anual, para as semanas de projeto de verão e inverno, *Summer/Winter Design week*, que corresponde ao período de 27 de julho a 2 de agosto (verão) e de 22 a 28 de dezembro (Inverno). Para o caso de verão, os dias 27 e 28 de julho correspondem a sábado e domingo, no caso da semana projeto de inverno, o dia 22 de Dezembro corresponde a domingo e 28 de Dezembro corresponde a sábado.

Na tentativa de dar a conhecer melhor os benefícios do uso de PCMs para o conforto térmico, foram feitos dois tipos de análise para todos os casos de teste: Análise com os sistemas de climatização em funcionamento (BioPCM Ativo) e uma análise sem recurso a esses sistemas (BioPCM Passivo).

Análise anual de conforto térmico

Como referido anteriormente (secção 2.5.1), a escala para o índice de PMV varia de -3 a 3, sendo que quanto mais próximo de zero melhor é o conforto térmico (ocupantes sem calor ou frio). Os resultados anuais (sistema AVAC ativo) obtidos para o índice de conforto térmico segundo Fanger (Figura 3.12), não demonstraram grandes variações relativamente às soluções com e sem PCM.

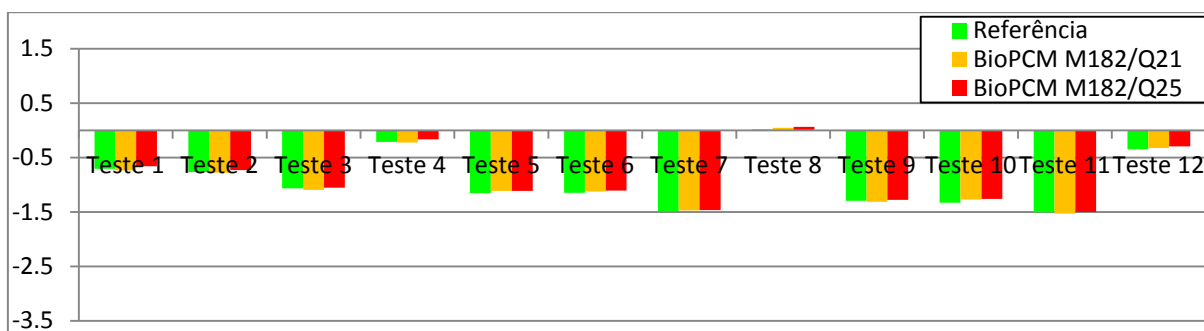


Figura 3.12 – Resultados anuais do índice PMV (BioPCM ativo)

Para os resultados da análise passiva, modelaram-se os mesmos casos de teste sem a utilização de AVAC (Figura 3.13). Os resultados obtidos, ao contrário do esperado, foram muito semelhantes aos obtidos anteriormente. Não foram encontradas diferenças significativas no índice PMV para a utilização dos PCMs relativamente à referência. No entanto, com o sistema passivo (Figura 3.13) verifica-se um maior desconforto dos ocupantes, com uma maior tendência para valores negativos (frio), à exceção de 3 casos teste (4, 8 e 12), onde a sensação de desconforto é por motivos opostos (calor).

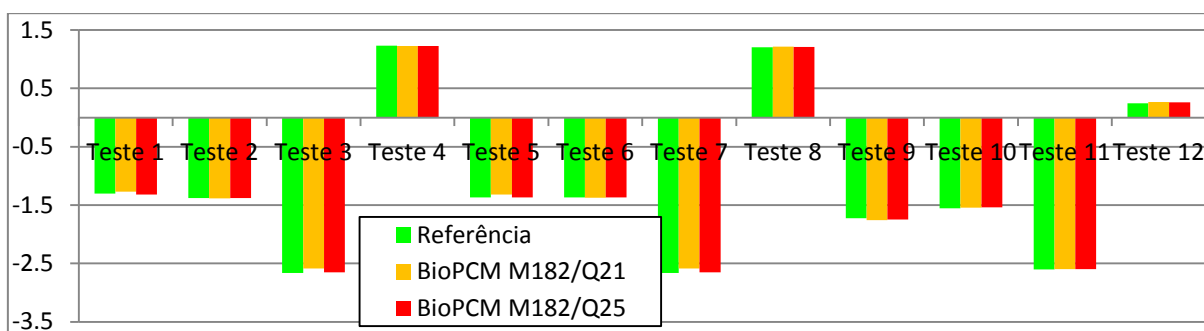


Figura 3.13 – Resultados anuais do índice PMV (BioPCM Passivo)

Valores mensais segundo Fanger

Nos resultados mensais do índice PMV (Figura 3.14), tanto para a simulação ativa como passiva, não se observaram diferenças significativas entre as referências e a incorporação dos PCMs. As curvas de PMV no caso passivo têm uma distribuição muito semelhante às curvas dos casos ativo apresentando apenas piores resultados. Há uma simetria relativamente a cada mês, sendo que, os valores do caso passivo são mais distantes de zero (grande parte situa-se fora da escala de Fanger. Todos os resultados referentes ao índice de conforto mensal encontram-se no Anexo D.

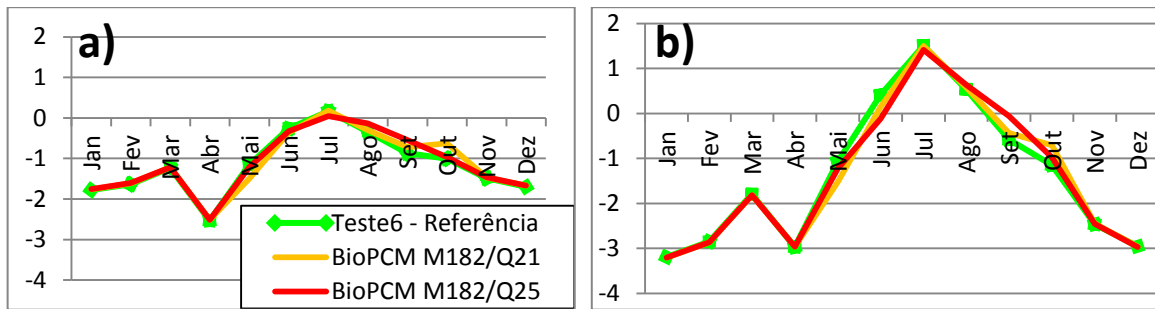


Figura 3.14 – Índice mensal de conforto térmico PMV (Teste 6): a) Ativo; b) Passivo

Análise semanal: verão/inverno

Na análise semanal para a semana de projeto de verão (Figura 3.15), para o caso ativo os resultados com ou sem PCMs têm valores muito próximos de zero (sensação de conforto neutra). Para o caso passivo, o BioPCM M182/Q25 apresenta valores do índice PMV muito próximos de zero (sensação de conforto neutra). No caso de referência e BioPCM M182/Q21 as curvas de PMV são idênticas e com valores entre 1 (quente) e 2 (ligeiramente quente).

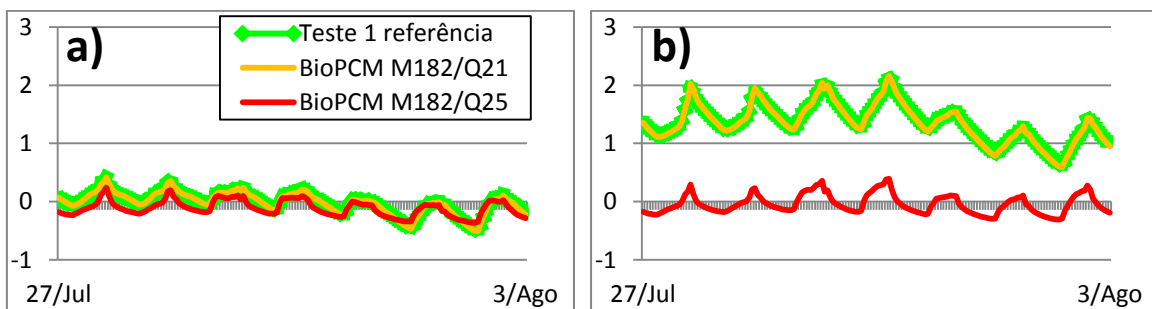


Figura 3.15 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 1): a) Ativo; b) Passivo

A possível explicação para o melhor comportamento do BioPCM M182/Q25 poderá estar no ponto de fusão do PCM. Para temperaturas de verão, um ponto de mudança de fase mais próximo das temperaturas exteriores possibilita manter as condições de conforto no interior com índice de PMV próximo de zero. A proximidade entre a temperatura de mudança de fase e a temperatura exterior permite que ocorra o processo de mudança de fase.

Para os Testes 8 e 12 (sem proteção solar), o mesmo se sucede, não existindo grandes diferenças entre referência e PCM (Figura 3.16), com a agravante de os índices obtidos serem muito elevados (grande parte muito acima da escala de Fanger).

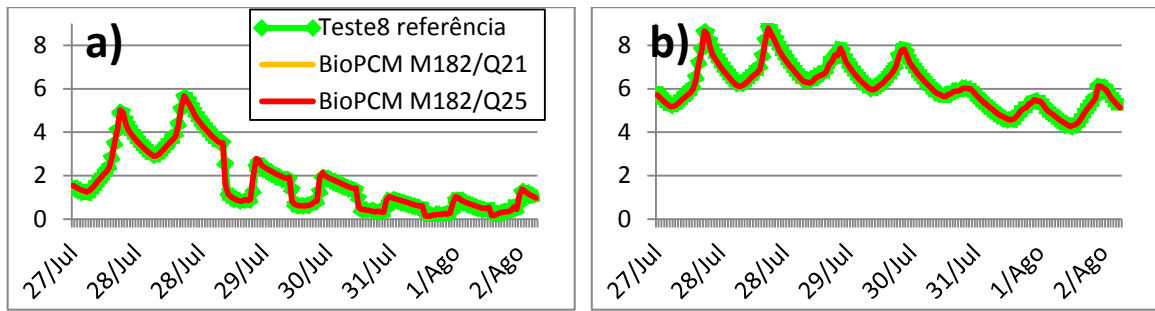


Figura 3.16 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de verão (Teste 8):
a) Ativo; b) Passivo

Para explicar a diferença de resultados nos dias 27 e 28 julho relativamente ao resto dos dias (caso ativo - semana de projeto de verão), basta pensar que se trata dos dias onde não existe funcionamento de sistemas de climatização (fim de semana). Para os testes 5 a 12 o funcionamento de AVAC é intermitente, de segunda a sexta das 8h às 18h.

Os resultados referentes ao índice PMV para a semana de projeto de verão encontram-se no Anexo E.

Relativamente à semana de projeto de inverno (Figura 3.17), para o caso ativo os testes de referência (teste 1 a 4) têm resultados muito semelhantes aos casos com PCMs. Para os restantes testes (5 a 12) com o uso do BioPCM M182/Q21 os resultados foram mais satisfatórios.

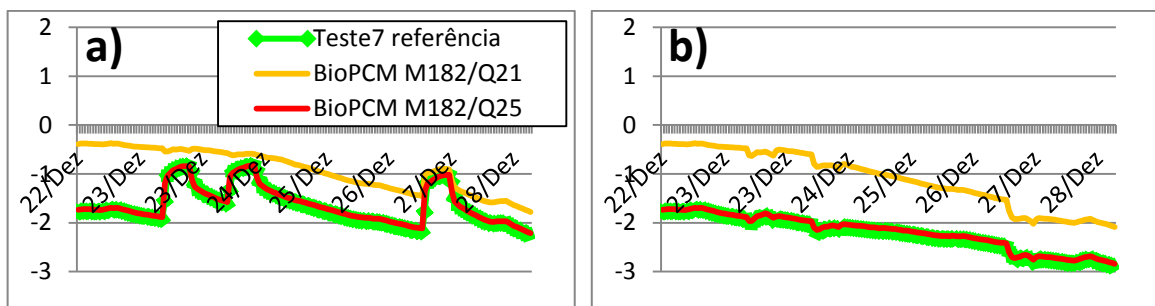


Figura 3.17 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de inverno (Teste 7):
a) Ativo; b) Passivo

Para o caso passivo, o BioPCM M182/Q21 apresentou índices de conforto próximos de 0, ao contrário da referência e do BioPCM M182/Q25 que apresentaram índices com grande parte dos valores abaixo de -2 (Frio). Para a semana de projeto de inverno o BioPCM M182/Q21 possibilita melhores valores de conforto térmico. A explicação poderá estar no ponto de fusão

do PCM, que como é mais baixo e mais perto da temperatura exterior, permite que através da mudança de fase se alcance melhores condições de conforto.

A possível explicação para o comportamento idêntico à referência do BioPCM M182/Q25, poderá ser o ponto de fusão do PCM, como é mais elevada e distante das temperaturas exteriores não chega a haver a mudança de fase.

Os resultados referentes ao índice PMV para a semana de projeto de inverno encontram-se no Anexo F.

Análise diária: verão/inverno

Para a análise diária foi escolhido o dia da semana de projeto com temperaturas mais elevadas (28 julho), na semana de verão, e o dia temperaturas mais baixas para a semana projeto de inverno (28 de dezembro).

No caso ativo (Figura 3.18 a)), não se encontram grandes diferenças entre os casos com ou sem PCMs, a explicação estará no facto de para o caso de estudo (Teste 1) o sistema de arrefecimento encontra-se em funcionamento 24h/dia.

No caso passivo (Figura 3.18 b)), já é considerável a diferença entre o uso do BioPCM M182/Q25 e os restantes casos. Com o uso do PCM com temperatura de fusão mais elevada (25°C), a sensação de conforto mantém-se neutra ao longo do dia, ao contrário o BioPCM M182/Q21 que tem um comportamento semelhante à referência. Uma possível explicação, como já foi dito anteriormente estará no ponto de fusão do PCM.

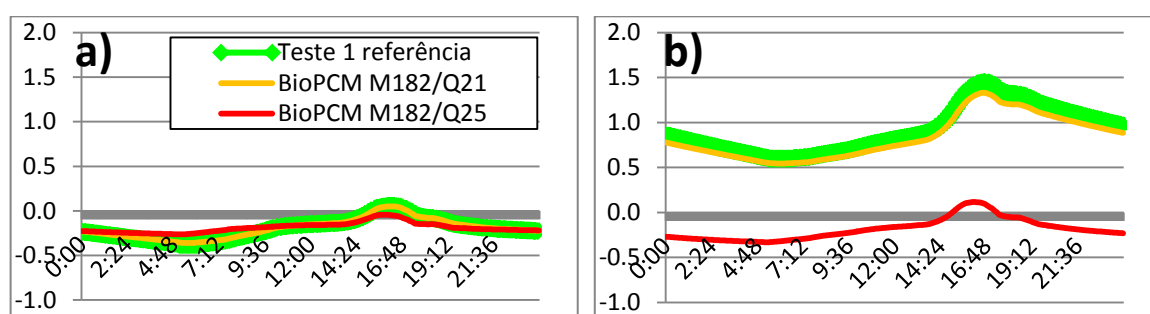


Figura 3.18 – Índice de conforto térmico PMV para o dia mais quente semana de projeto de verão (Teste 1): a) Ativo; b) Passivo

No dia mais frio para a semana de projeto de inverno (Figura 3.19), não são visíveis grandes diferenças entre a utilização ou não de PCMs. Para caso ativo e passivo as curvas de referência e dos PCMs são idênticas. Uma possível explicação será o facto de a temperatura

exterior ser muito abaixo do ponto de fusão dos PCMs. Não existe mudança de fase, ou seja, a utilização ou não dos PCMs é irrelevante.

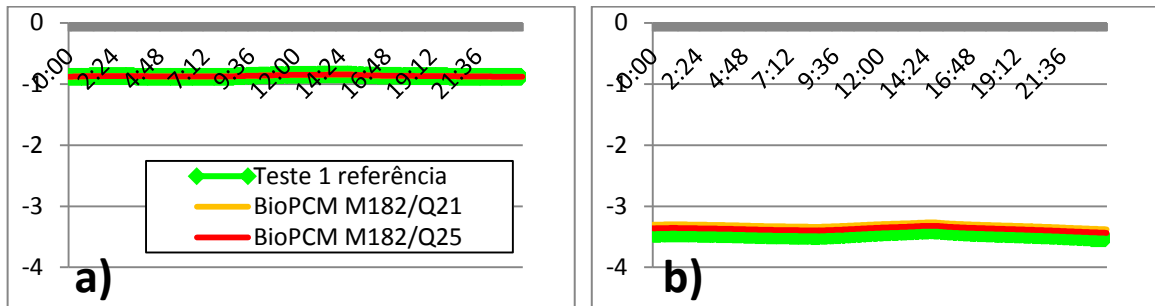


Figura 3.19 – Índice de conforto térmico PMV para o dia mais frio semana de projeto de inverno (Teste 1): a) Ativo; b) Passivo

3.2.4 Comportamento térmico

Comportamento térmico ativo

Ao analisar os resultados para os 4 casos de referência da norma EN 15265 (Figura 3.20) com BioPCM ativo, é perceptível que há predominância de maior número de horas nas temperaturas de conforto.

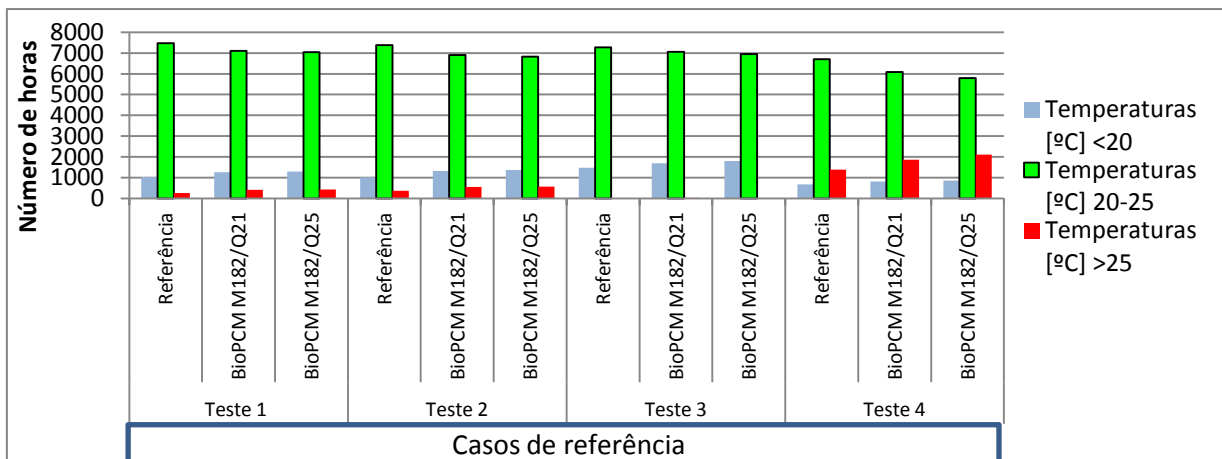


Figura 3.20 – Distribuição anual de temperaturas BioPCM Ativo (testes 1 a 4)

A incorporação de PCMs mostrou piores resultados para temperaturas abaixo dos 20°C. No Teste 3 (sem ganhos internos), com a associação do BioPCM M182/Q25 o número de horas teve o maior acréscimo de todos com um acréscimo de 323.3 horas/ano a mais que a referência.

Para o Teste 4 (sem proteção solar) incorporado com o BioPCM M182/Q25, para o intervalo de conforto observou-se uma maior perda, com uma diminuição de 905.00 horas/ano. Verificou-se para o mesmo caso o maior aumento para temperaturas acima dos 25°C, com um acréscimo de 715.4 horas/ano. Há um acréscimo de horas para as temperaturas acima de 25°C para o uso de PCMs, sendo visível o impacto negativo que a inexistência de proteção solar associada á incorporação de PCMs pode trazer.

Para os casos de referência com AVAC intermitente (Figura 3.21), é visível o acréscimo do número de horas no intervalo de conforto térmico com a incorporação de PCMs, principalmente para o BioPCM M182/Q21. Foi registado o máximo de horas com temperaturas abaixo dos 20°C, para o Teste 7 (sem ganhos internos) com 5615 horas/ano. O maior ganho aconteceu para o mesmo teste com o uso do BioPCM M182/Q21 com -948.4 horas/ano. Verificou-se também o maior número de horas para temperaturas acima dos 25°C para o Teste 8 (sem proteção solar) com BioPCM M182/Q25, registando 3799.8 horas/ano (aumento de 362.3 horas/ano).

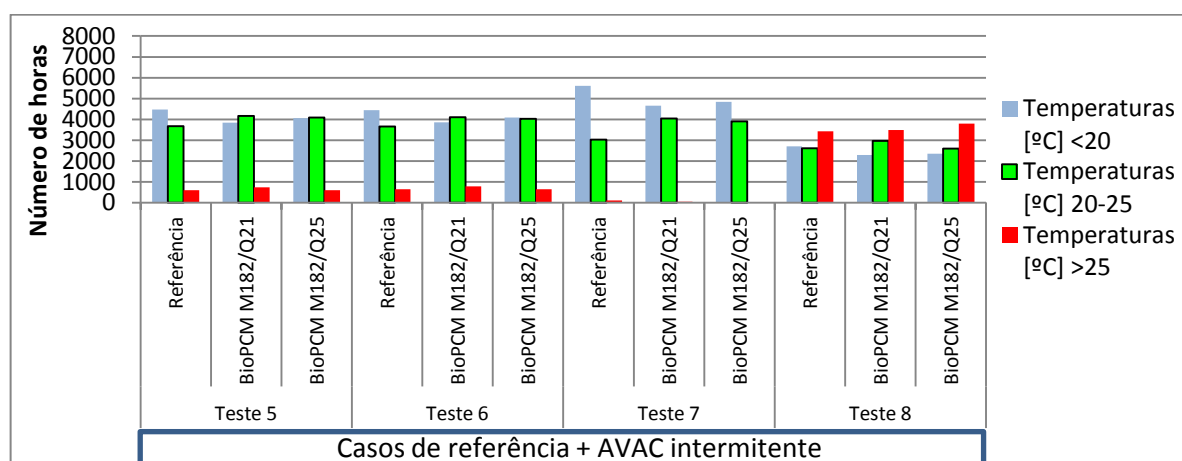


Figura 3.21 – Distribuição anual de temperaturas BioPCM Ativo (testes 5 a 8)

À semelhança dos resultados para os casos anteriores (testes 5 a 9), para os testes 9 a 12 (Figura 3.22), o número de horas no intervalo de temperaturas de conforto aumentou com a utilização dos PCMs. O maior aumento ocorreu para o Teste 11 (sem ganhos internos) com o uso do BioPCM M182/Q25, com um ganho de 1089.5 horas/ano na temperatura de conforto e uma diminuição de 338.4 horas/ano para temperaturas acima dos 25°C.

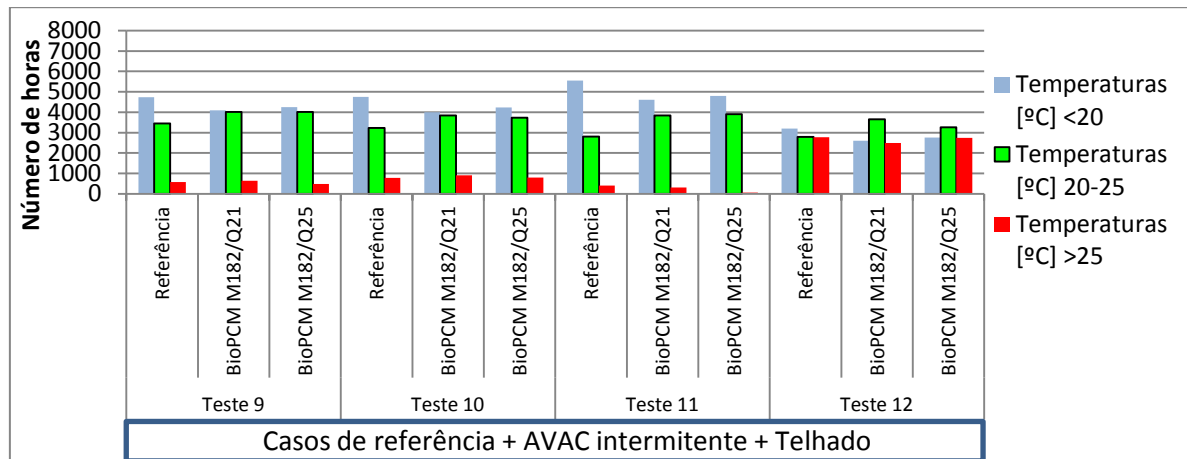


Figura 3.22 – Distribuição anual de temperaturas BioPCM Ativo (testes 9 a 12)

Analisando o conjunto de testes é evidente a importância da proteção solar (testes 4, 8 e 12), para as condições de conforto térmico, ficando o número de horas acima dos 25°C muito superior aos restantes casos. Para os casos sem ganhos internos (teste 3, 7 e 11) é também evidente a importância dos ganhos internos, pois são os que apresentam maior número de horas abaixo dos 20°C. Para os casos de teste de referência (testes 1,5 e 9) e de maior inércia (teste 2,6 e 10), é visível a diminuição do número de horas para as temperaturas abaixo dos 20°C, e de um aumento do número de horas no intervalo de conforto.

Comportamento térmico passivo

Para a análise anual dos valores de temperatura interior em funcionamento passivo do modelo com o BioPCM os casos de teste reduzem-se para 8, ao invés de 12, uma vez que a única diferença entre os testes 1 a 4 e os testes 5 a 8 é o tempo de funcionamento de AVAC. Ou seja, nos primeiros 4 casos de teste o AVAC funciona sem interrupções, enquanto que nos testes 5 a 9 o funcionamento do AVAC é intermitente. Uma vez retirado o funcionamento dos sistemas de climatização (comportamento passivo), os valores anuais obtidos para os testes 1 a 4, como seria de esperar, são iguais aos testes 5 a 9 (Figura 3.23).

Nos resultados para a distribuição anual de temperaturas, no caso passivo, é visível um decréscimo do número de horas no intervalo de conforto e um aumento significativo para temperaturas abaixo de 20°C em relação ao caso ativo. Os testes sem proteção solar, tal como para o BioPCM ativo, apresentam maior número de horas acima dos 25°C.

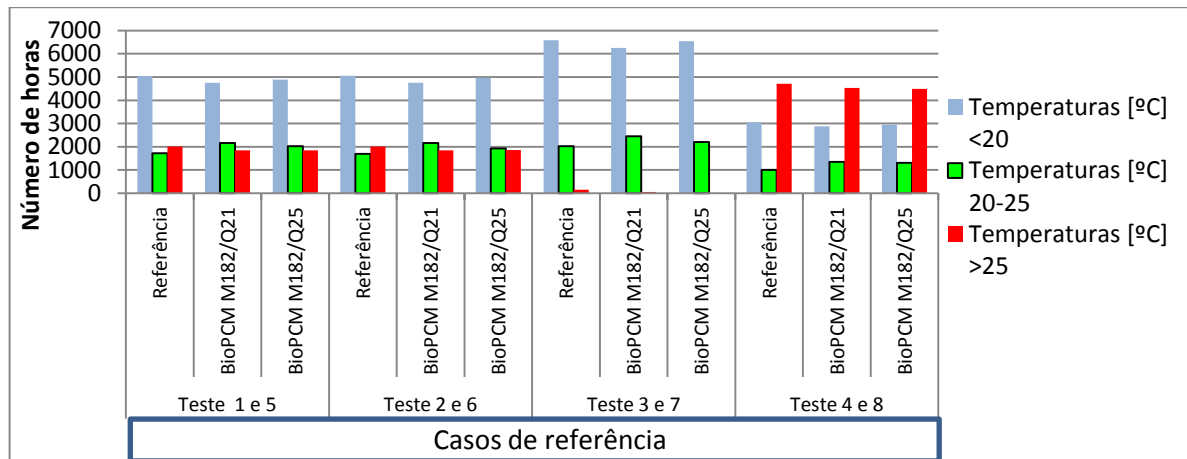


Figura 3.23 – Distribuição anual de temperaturas BioPCM Passivo (testes de referência)

Os testes 3 e 7 (sem ganhos internos, Figura 3.23) registaram a menor diminuição para temperaturas abaixo dos 20°C, com o BioPCM M182/Q25 de -39.9 horas/ano. Para o mesmo intervalo a maior diminuição aconteceu para o Teste 10 com BioPCM M82/Q25 com menos 547.6 horas/ano.

No caso das temperaturas no intervalo de conforto, o menor ganho aconteceu para o BioPCM M182/Q25 (Teste1) com apenas mais 69.6 horas/ano. O maior aumento registou-se para o BioPCM M182/Q25, teste 10 (Maior inércia) com um ganho de 665.1 horas/ano (Figura 3.24). Uma possível explicação poderá dever-se ao facto de, a inexistência de ganhos internos faz com que a temperatura interior varie entre valores próximos de 21°C, tirando assim máximo proveito do BioPCM M182/Q21.

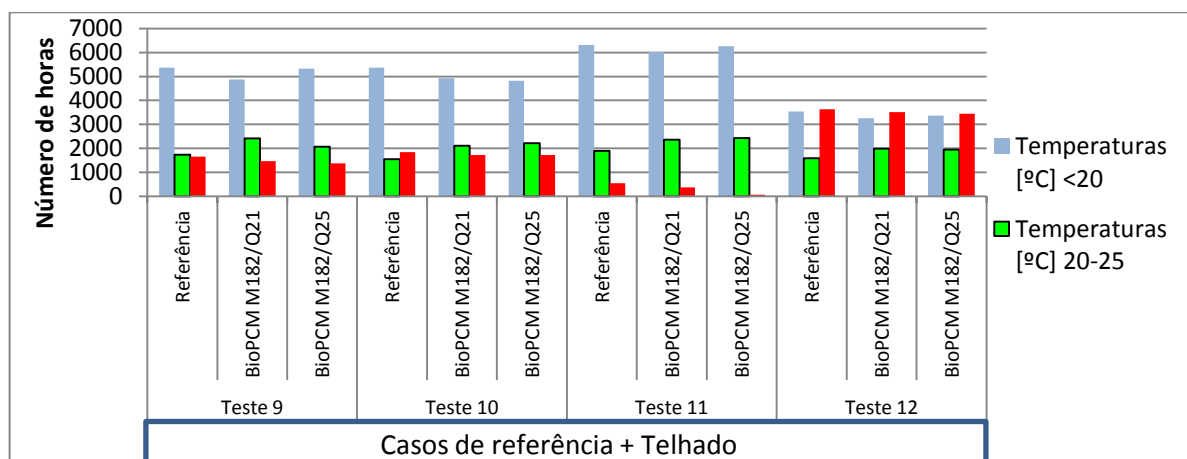


Figura 3.24 – Distribuição anual de temperaturas BioPCM Passivo (Testes de referência +Telhado)

Para as temperaturas acima de 25°C, o Teste 3 e 7 com BioPCM M182/Q21, foi registado o valor mais baixo com uma diminuição 98.5 horas/ano. O maior decréscimo verificou-se para o Teste 11 (sem ganho internos) com -480.4 horas/ano.

Para uma análise final entre BioPCM ativo e passivo (Figuras 3.20 a 3.24), os resultados mostraram que, em comparação com a referência, no BioPCM passivo os valores abaixo de 20°C e acima de 25°C foram diminuídos para todos os casos de teste, assim como o número de horas dentro do intervalo de conforto térmico aumentou. O mesmo não se verificou no caso ativo onde existiram resultados não satisfatórios com o recurso a PCMs, nos testes 1 a 4 (AVAC sempre em funcionamento).

Os resultados referentes à distribuição de temperaturas encontram-se no Anexo G.

Valores mensais da temperatura média do ar interior

Os resultados para as temperaturas do ar mensais, tanto para o BioPCM ativo como o BioPCM passivo, não demonstraram grandes diferenças entre as referências e o uso dos PCMs. Como exemplo, a Figura 3.25.

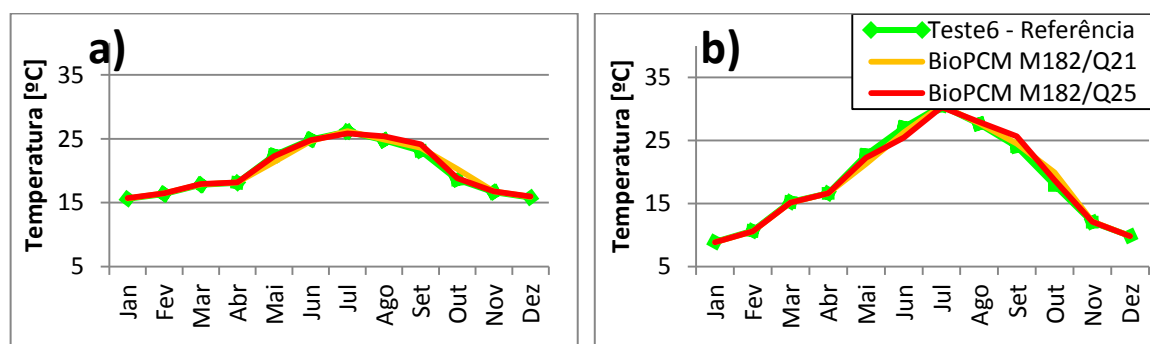


Figura 3.25 – Temperatura do ar mensal (Teste 6): a) Ativo; b) Passivo

Análise semanal: verão/inverno

Para a semana de projeto de verão (Figura 3.26), no caso ativo é perceptível que o uso do BioPCM M182/Q25 consegue melhores níveis de temperatura do ar interior. A grande diferença nos dois primeiros dias (27 e 28 julho), uma vez que se trata de um fim-de-semana, é possivelmente devido a não existir AVAC em funcionamento nesses dias, isto porque o funcionamento é intermitente das 8h às 18h de segunda a sexta.

Para o caso passivo o comportamento é idêntico, uma possível explicação para estes resultados poderá estar no ponto de fusão dos PCMs, a proximidade entre a temperatura exterior e o ponto de fusão do PCM permite que ocorra o processo de mudança de fase e que este processo seja efetivo no controlo da carga térmica.

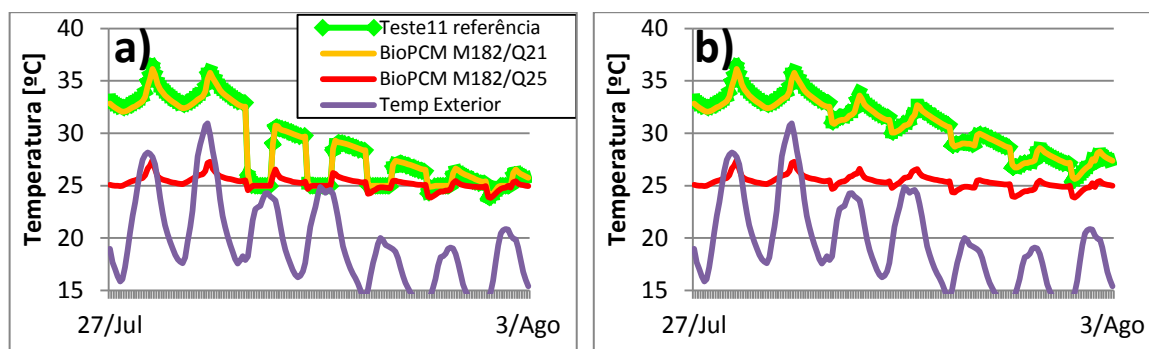


Figura 3.26 – Temperatura do ar: semana de projeto de verão (Teste 11): a) Ativo; b) Passivo

Para os casos de teste sem proteção solar, como o exemplo da Figura 3.27, os resultados mostraram que a temperatura do ar é muito superior aos 25°C de conforto. É evidente o efeito negativo da inexistência de proteção solar, pois são os casos com maiores temperaturas registadas no verão.

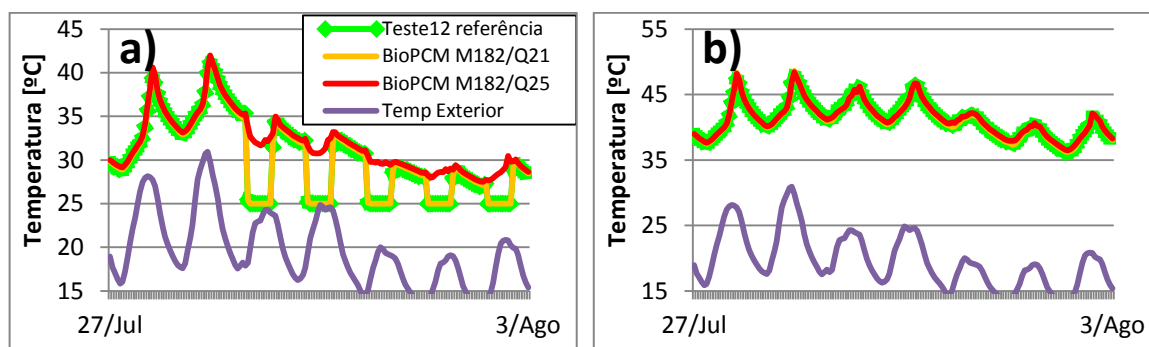


Figura 3.27 – Temperatura do ar: semana de projeto de verão (Teste 12): a) ativo; b) passivo

Os resultados referentes à temperatura do ar para a semana de projeto de verão encontram-se no Anexo H.

No caso da semana de projeto de inverno (Figura 3.28), para os testes 1 a 4 não há diferenças significativas devido à utilização 24h/dia de AVAC. Para os restantes casos, o uso do BioPCM M182/Q21 apresenta temperaturas mais próximas do intervalo de conforto, as curvas referentes ao PCM com o ponto de fusão mais baixo, manteve para todos os testes as temperaturas mais elevadas relativamente à referência e ao BioPCM M182/Q25.

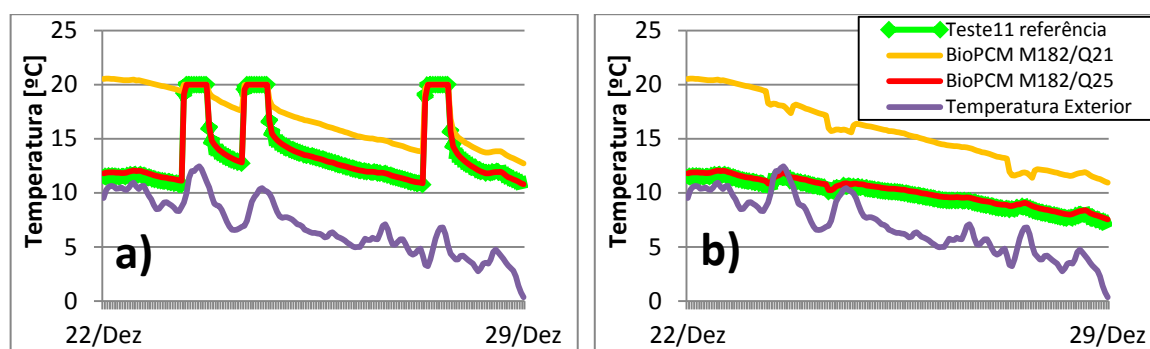


Figura 3.28 – Temperatura do ar: semana de projeto de inverno (Teste 11):
a) Ativo; b) Passivo

A explicação poderá estar no ponto de fusão do PCM, que como é mais baixo e mais perto da temperatura exterior, permite que através da mudança de fase se alcance melhores condições de conforto.

Os resultados referentes à temperatura do ar para a semana de projeto de inverno encontram-se no Anexo I.

Análise diária: verão/inverno

Na análise diária de verão (Figura 3.29), para o caso ativo não se encontram grandes diferenças entre os casos com e sem PCMs, a explicação estará no facto de para o teste em estudo (Teste 1) o sistema de arrefecimento se encontra em funcionamento 24h/dia.

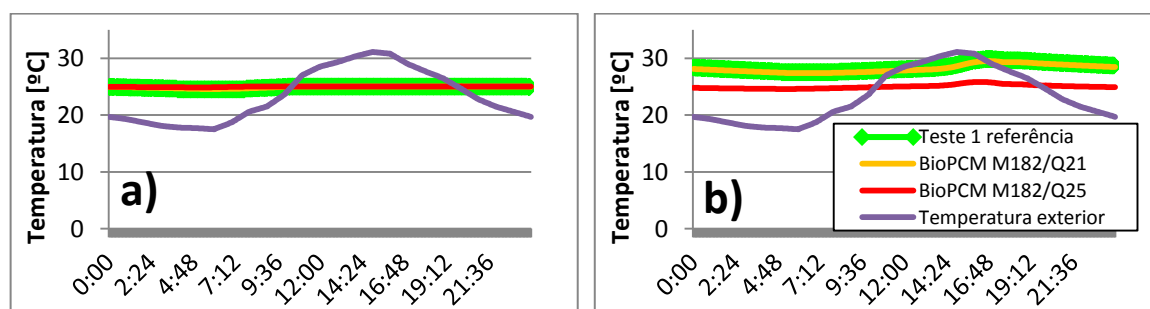


Figura 3.29 – Temperatura do ar para o dia mais quente semana de projeto de verão (Teste 1):
a) Ativo; b) Passivo

No caso passivo, o BioPCM M182/Q25 apresenta temperaturas mais próximas da temperatura de conforto e à medida que a temperatura exterior aumenta é perceptível que consegue manter essas temperaturas ao contrário da referência e do BIOPCM M182/Q21. Tal como para todos os casos anteriores a explicação poderá estar no ponto de fusão mais elevado deste PCM (25°C).

No dia mais frio, para a semana de projeto de inverno (Figura 3.30), não são visíveis grandes diferenças entre a utilização ou não de PCMs. Para o caso ativo em virtude da utilização contínua de AVAC as curvas de referência e dos PCMs são idênticas.

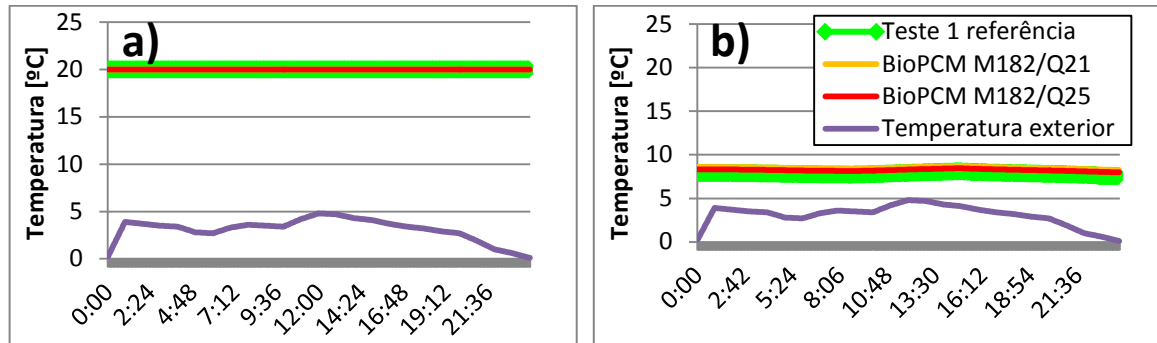


Figura 3.30 – Temperatura do ar para o dia mais frio semana de projeto de inverno (Teste 1):
a) Ativo; b) Passivo

Para o caso passivo, as temperaturas situam-se muito abaixo da temperatura de conforto e não há grandes diferenças entre utilização ou não de PCMs. Tal como enunciado anteriormente a possível explicação poderá ser o ponto de fusão dos PCMs. Neste caso a temperatura exterior é muito inferior da temperatura de fusão dos PCMs.

4 CONCLUSÕES

Apresentam-se de seguida as principais conclusões resultantes desta dissertação. Para os casos de teste com maior inércia, a incorporação de PCMs origina um maior consumo energético de aquecimento. O BioPCM M182/Q21 exhibe melhores resultados para consumos energéticos de aquecimento, sendo mais adequado quando se pretende melhorar o desempenho térmico no Inverno. Pelo contrário, o BioPCM M182/Q25 é mais adequado para minimizar o consumo de energia de arrefecimento (no verão).

Para os casos de teste com ausência de ganhos internos foram registados o maior número de horas anuais para temperaturas abaixo do intervalo de conforto, consequentemente foram os casos de teste com maiores consumos de aquecimento. O BioPCM M182/Q21 revelou-se mais eficaz para estes casos, possivelmente devido à temperatura de mudança de fase deste PCM estar mais próxima das temperaturas interiores registadas, possibilitando desta forma que ocorra a mudança de fase.

Os casos sem proteção solar tiveram maiores consumos de arrefecimento e maiores consumos totais, devido aos elevados ganhos solares no verão. Nestas circunstâncias, a utilização de PCMs não resolveu o problema das elevadas temperaturas no verão (muito acima do intervalo de conforto). A justificação poderá estar no facto das temperaturas de fusão dos PCMs serem baixas para as elevadas temperaturas interiores registadas, não permitindo assim que haja mudança de fase do material e consequentemente aproveitamento do calor latente.

Devido às respetivas temperaturas de fusão, o BioPCM M182/Q25 apresenta maior eficiência para temperaturas de verão e o BioPCM M182/Q21 para temperaturas de inverno, no clima estudado.

Pelas razões expostas anteriormente, para a seleção dos PCMs deve ter-se em conta a sua temperatura de fusão. Para temperaturas de fusão mais baixas, vão trazer melhores resultados para aquecimento e para temperaturas mais elevadas, melhores resultados para arrefecimento. Para a aplicação dos PCMs é necessário que exista uma correspondência entre a temperatura de mudança de fase e a temperatura da envolvente.

A eficiência dos PCMs aumenta quando estes são utilizados em superfícies não adiabáticas devido às maiores flutuações de temperatura nessas superfícies, aumentando assim a probabilidade de haver mudança de fase no material.

Concluindo, os PCMs com temperaturas de mudança de fase superiores são mais eficientes para temperaturas elevadas, climas mais quentes com necessidades de arrefecimento, e PCMs com mudança de fase mais baixo são mais eficientes no armazenamento de calor latente para climas mais frios.

Trabalhos futuros

Concluída a dissertação, os estudos realizados permitiram identificar diversas áreas com possível desenvolvimento futuro. Neste trabalho foi analisado um pequeno compartimento com apenas uma ou duas superfícies em contato com o exterior. Em trabalhos futuros seria interessante fazer o mesmo tipo de análise, mas para edifícios completos com um maior número de compartimentos e superfícies em contacto com o exterior.

Um outro ponto de interesse seria fazer uma análise semelhante para diferentes condições climáticas. Seria também curioso analisar o comportamento de outros tipos de PCMs e outras temperaturas de fusão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Homoud, D.M.S., 2005. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40(3), pp.353–366.
- Baetens, R., Jelle, B.P. & Gustavsen, A., 2010. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(9), pp.1361–1368.
- Causone, F. et al., 2010. Floor heating and cooling combined with displacement ventilation: Possibilities and limitations. *Energy and Buildings*, 42(12), pp.2338–2352.
- Chan, H., Riffat, S. & Zhu, J., 2010. Review of passive solar heating and cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), pp.781–789.
- Construironline, 2013. <http://construironline.dashofer.pt/?s=modulos&v=capitulo&c=2568>.
- Crawley, D.B. et al., 2008. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), pp.661–673.
- DesignBuilder, 2013. <http://www.designbuilder.co.uk/>.
- EN 15265, 2007. EN-15265 Energy performance of buildings - Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods - General criteria and validation procedures. , (november).
- Givoni, B., 2011. Indoor temperature reduction by passive cooling systems. *Solar Energy*, 85(8), pp.1692–1726.
- Goia, F., Perino, M. & Serra, V., 2013. Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems. *Energy and Buildings*, 60, pp.442–452.
- greenspec, 2013. <http://www.greenspec.co.uk/thermal-mass.php>.
- Griffiths, P.W. & Eames, P.C., 2007. Performance of chilled ceiling panels using phase change material slurries as the heat transport medium. *Applied Thermal Engineering*, 27(10), pp.1756–1760.

- Hacene, M. a B., Amara, S. & Sari, N.E.C., 2011. Thermal requirements and temperatures evolution in an ecological house. *Energy Procedia*, 6, pp.110–121.
- Hughes, B.R., Chaudhry, H.N. & Ghani, S.A., 2011. A review of sustainable cooling technologies in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), pp.3112–3120.
- Kuznik, F., Virgone, J. & Roux, J.-J., 2008. Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. *Energy and Buildings*, 40(2), pp.148–156.
- Lee, T. et al., 2000. Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 62(3), pp.217–237.
- Lin, K. et al., 2005. Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates. *Energy and Buildings*, 37(3), pp.215–220.
- Maldonato, E., 1985. Sistemas Solares Passivos.
- Muselli, M., 2010. Passive cooling for air-conditioning energy savings with new radiative low-cost coatings. *Energy and Buildings*, 42(6), pp.945–954.
- PCMExpress, 2013. <http://www.valentin.de/en/products/pcm/58/pcm-express>.
- PCSE, 2013. Phase Change Solutions <http://www.phasechange.co.za/>.
- Raj, V.A.A. & Velraj, R., 2010. Review on free cooling of buildings using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp.2819–2829.
- Rathod, M.K. & Banerjee, J., 2013. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, pp.246–258.
- RCCTE, 2006. RCCTE (Decreto-Lei nº 80/2006), Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Diário da República nº 67 – I Série – A, 4 de Abril de 2006. , pp.2468–2513.
- Rodriguez-Ubinas, E. et al., 2012. Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses. *Energy and Buildings*, 50, pp.49–62.
- Saadatian, O. et al., 2012. Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), pp.6340–6351.
- Santos, P. et al., 2011. Parametric analysis of the thermal performance of light steel residential buildings in Csb climatic regions. *Journal of Building Physics*, 35(1), pp.7–53.

- Santos, P., 2012. SUSTAINABILITY OF CONSTRUCTIONS Training course – Thermal Behaviour and Energy Efficiency in Buildings. , (October).
- Santos, P., Simoes da Silva, L. & Ungureanu, V., 2012. Energy Efficiency of Light-Weight Steel-Framed Buildings.
- Schossig, P. et al., 2005. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(2-3), pp.297–306.
- Sharma, A. et al., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), pp.318–345.
- Silva, T. et al., 2012. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution. *Energy and Buildings*, 49, pp.235–245.
- Soares, N. et al., 2013. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 59, pp.82–103.
- Stazi, F., Mastrucci, A. & Di Perna, C., 2012. The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: An experimental and numerical study. *Energy and Buildings*, 47, pp.217–229.
- Tyagi, Vineet Veer & Buddhi, D., 2007. PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), pp.1146–1166.
- Waqas, A. & Ud Din, Z., 2013. Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, pp.607–625.
- Yahay, N. a. & Ahmad, H., 2011. Numerical Investigation of Indoor Air Temperature with the Application of PCM Gypsum Board as Ceiling Panels in Buildings. *Procedia Engineering*, 20, pp.238–248.
- Zhang, Y. et al., 2007. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, 42(6), pp.2197–2209.
- Zhang, Y.P. et al., 2006. Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. *Energy and Buildings*, 38(10), pp.1262–1269.
- Zhou, D., Zhao, C.Y. & Tian, Y., 2012. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, pp.593–605.
- Zhou, G. et al., 2008. Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates. *Renewable Energy*, 33(6), pp.1228–1236.

ANEXO A – VALIDAÇÃO DO MODELO

Quadro 1 – Resultados da validação do modelo DesignBuilder/EnergyPlus

| Referências | Teste 1 | Referência | | EN 15265 Teste 1 | | |
|-------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------|----------|------------|
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 737.95 | 180.85 | 748.0 | 233.80 | 981.8 |
| | | rQH = 0.01 | 0.05 = rQC | | | |
| Referências | Teste 2 | Maior Inércia | | EN 15265 Teste 2 | | |
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 716.86 | 200.70 | 722.7 | 200.50 | 923.2 |
| | | rQH = 0.01 | 0.00 = rQC | | | |
| Referências | Teste 3 | Sem Ganhos internos | | EN 15265 Teste 3 | | |
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 1330.42 | 8.33 | 1368.5 | 43.00 | 1411.5 |
| | | rQH = 0.03 | 0.02 = rQC | | | |
| Referências | Teste 4 | Sem Protecção Solar | | EN 15265 Teste 4 | | |
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 536.91 | 1357.83 | 567.4 | 1530.90 | 2098.3 |
| | | rQH = 0.01 | 0.08 = rQC | | | |
| Referências + AVAC intermitente | Teste 5 | = Teste1 + AVAC 8h00-18h00 Segunda a Sexta | | EN 15265 Teste 5 | | |
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 475.17 | 184.10 | 463.1 | 201.70 | 664.8 |
| | | rQH = 0.02 | 0.03 = rQC | | | |
| Referências + AVAC intermitente | Teste 6 | =Teste2 (Maior Inércia) + AVAC 8h00-18h00 Segunda a Sexta | | EN 15265 Teste 6 | | |
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 484.86 | 190.50 | 509.8 | 185.10 | 694.9 |
| | | rQH = 0.04 | 0.01 = rQC | | | |
| Referências + AVAC intermitente | Teste 7 | = Teste3 (Sem Ganhos Internos) + AVAC 8h00-18h00 Segunda a Sexta | | EN 15265 Teste 7 | | |
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 1099.77 | 2.58 | 1067.4 | 19.50 | 1086.9 |
| | | rQH = 0.03 | 0.02 = rQC | | | |
| Referências + AVAC intermitente | Teste 8 | = Teste4 (Sem Protecção Solar) + AVAC 8h00-18h00 Segunda a Sexta | | EN 15265 Teste 8 | | |
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 315.15 | 1070.64 | 313.2 | 1133.20 | 1446.4 |
| | | rQH = 0.00 | 0.04 = rQC | | | |
| Referências + AVAC intermitente + Telhado | Teste 9 | = Teste5 (Test1 + Intermitente AVAC) + Telhado Exterior | | EN 15265 Teste 9 | | |
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 804.53 | 163.53 | 747.1 | 158.30 | 905.4 |
| | | rQH = 0.06 | 0.01 = rQC | | | |
| Referências + AVAC intermitente + Telhado | Teste 10 | = Teste6 (Test2 (Maior Inércia) + Intermitente AVAC) + Telhado Exterior | | EN 15265 Teste 10 | | |
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 572.50 | 212.16 | 574.2 | 192.40 | 766.6 |
| | | rQH = 0.00 | 0.03 = rQC | | | |
| Referências + AVAC intermitente + Telhado | Teste 11 | = Teste7 (Test3 (Sem Ganhos Internos) + Intermitente AVAC) + Telhado Exterior | | EN 15265 Teste 11 | | |
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 1396.47 | 12.36 | 1395.1 | 14.10 | 1409.2 |
| | | rQH = 0.00 | 0.00 = rQC | | | |
| Referências + AVAC intermitente + Telhado | Teste 12 | = Teste8 (Test4 (Sem Protecção Solar) + Intermitente AVAC) + Telhado Exterior | | EN 15265 Teste 12 | | |
| | | Aquecimento (Electricidade) [kWh] | Arrefecimento(Electricidade) [kWh] | QH,ref = | QC,ref = | QTot,ref = |
| | | 547.50 | 914.72 | 533.5 | 928.30 | 1461.8 |
| | | rQH = 0.01 | 0.01 = rQC | | | |

ANEXO B – INCORPORAÇÃO DOS PCMS

Quadro 1 – Resultados finais: incorporação PCMs

| | | Aquecimento | Arrefecimento | Total [kWh] | ΔQH | % | ΔQC | % | ΔQ_{total} | % |
|----------|-----------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-----|-------------|------|--------------------|-----|
| | | [kWh] | [kWh] | | [kWh] | | [kWh] | | [kWh] | |
| Teste 1 | Referência | 737.947 | 180.851 | 918.798 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 699.731 | 167.562 | 867.292 | -38.2163 | -5% | -13.2897 | -7% | -51.506 | -6% |
| | BioPCM M182/Q25 | 730.666 | 144.504 | 875.170 | -7.2814 | -1% | -36.3472 | -20% | -43.6286 | -5% |
| Teste 2 | Referência | 716.858 | 200.701 | 917.558 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 690.573 | 182.810 | 873.383 | -26.2849 | -4% | -17.8903 | -9% | -44.1752 | -5% |
| | BioPCM M182/Q25 | 707.851 | 175.410 | 883.261 | -9.0066 | -1% | -25.2905 | -13% | -34.2971 | -4% |
| Teste 3 | Referência | 1330.416 | 8.329 | 1338.745 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 1289.070 | 2.756 | 1291.826 | -41.346 | -3% | -5.57252 | -67% | -46.9185 | -4% |
| | BioPCM M182/Q25 | 1323.033 | 0.398 | 1323.431 | -7.383 | -1% | -7.931 | -95% | -15.314 | -1% |
| Teste 4 | Referência | 536.908 | 1357.826 | 1894.734 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 504.710 | 1342.439 | 1847.149 | -32.1978 | -6% | -15.387 | -1% | -47.5848 | -3% |
| | BioPCM M182/Q25 | 524.306 | 1311.057 | 1835.363 | -12.6019 | -2% | -46.769 | -3% | -59.3709 | -3% |
| Teste 5 | Referência | 475.165 | 184.098 | 659.263 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 440.077 | 164.448 | 604.525 | -35.0876 | -7% | -19.6503 | -11% | -54.7379 | -8% |
| | BioPCM M182/Q25 | 484.675 | 166.046 | 650.722 | 9.5102 | 2% | -18.0517 | -10% | -8.5415 | -1% |
| Teste 6 | Referência | 484.864 | 190.503 | 675.367 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 491.970 | 173.443 | 665.414 | 7.106 | 1% | -17.0595 | -9% | -9.9535 | -1% |
| | BioPCM M182/Q25 | 497.122 | 172.375 | 669.497 | 12.2579 | 3% | -18.1275 | -10% | -5.8696 | -1% |
| Teste 7 | Referência | 1099.770 | 2.583 | 1102.353 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 1058.444 | 0.677 | 1059.121 | -41.326 | -4% | -1.90551 | -74% | -43.2315 | -4% |
| | BioPCM M182/Q25 | 1110.820 | 0.095 | 1110.915 | 11.05 | 1% | -2.48757 | -96% | 8.562431 | 1% |
| Teste 8 | Referência | 315.150 | 1070.643 | 1385.793 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 305.300 | 1067.999 | 1373.299 | -9.8498 | -3% | -2.644 | 0% | -12.4938 | -1% |
| | BioPCM M182/Q25 | 316.021 | 1056.879 | 1372.900 | 0.8712 | 0% | -13.764 | -1% | -12.8928 | -1% |
| Teste 9 | Referência | 804.533 | 163.534 | 968.067 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 780.094 | 142.277 | 922.370 | -24.4395 | -3% | -21.2573 | -13% | -45.6968 | -5% |
| | BioPCM M182/Q25 | 789.450 | 124.879 | 914.328 | -15.0836 | -2% | -38.6554 | -24% | -53.739 | -6% |
| Teste 10 | Referência | 572.503 | 212.162 | 784.664 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 601.274 | 186.499 | 787.773 | 28.7714 | 5% | -25.6622 | -12% | 3.1092 | 0% |
| | BioPCM M182/Q25 | 605.209 | 185.040 | 790.249 | 32.7063 | 6% | -27.1219 | -13% | 5.5844 | 1% |
| Teste 11 | Referência | 1396.467 | 12.365 | 1408.832 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 1373.912 | 8.449 | 1382.361 | -22.555 | -2% | -3.91629 | -32% | -26.4713 | -2% |
| | BioPCM M182/Q25 | 1388.991 | 1.015 | 1390.006 | -7.476 | -1% | -11.3499 | -92% | -18.8259 | -1% |
| Teste 12 | Referência | 547.498 | 914.724 | 1462.222 | | | | | | |
| | BioPCM M182/Q21 | 528.633 | 912.082 | 1440.715 | -18.8656 | -3% | -2.6419 | 0% | -21.5075 | -1% |
| | BioPCM M182/Q25 | 537.831 | 889.085 | 1426.916 | -9.6673 | -2% | -25.639 | -3% | -35.3063 | -2% |

Quadro 2 – Valores Médios Finais

| | Média ΔQH [kWh] | % | Média ΔQC [kWh] | % | Média ΔQ_{Total} [kWh] |
|-----------------|-------------------------|-----|-------------------------|-----|--------------------------------|
| BioPCM M182/Q21 | -21.19 | 63% | -12.24 | 37% | -33.43 |
| BioPCM M182/Q25 | -0.18 | 1% | -22.63 | 99% | -22.80 |

ANEXO C – SUPERFÍCIES ADIABÁTICAS

Quadro 7.1 - Valores Finais: Superfícies adiabáticas

| Teste | QH [kWh] | QC [kWh] | Qtot [kWh] |
|------------------------------------------------|----------|----------|------------|
| Referência (Teste 5) | 475.165 | 184.098 | 659.263 |
| BioPCM M182/Q21 em todas as paredes | 440.077 | 164.448 | 604.525 |
| BioPCM M182/Q21 apenas nas paredes adiabáticas | 478.743 | 165.026 | 643.769 |
| BioPCM M182/Q21 nas paredes para o exterior | 473.349 | 181.650 | 654.999 |
| Referência (Teste 9) | 804.533 | 163.534 | 968.067 |
| BioPCM M182/Q21 em todas as paredes | 780.094 | 142.277 | 922.370 |
| BioPCM M182/Q21 apenas nas paredes adiabáticas | 792.299 | 191.851 | 984.150 |
| BioPCM M182/Q21 nas paredes para o exterior | 749.536 | 156.206 | 905.742 |

Quadro 7.2 - Valores Finais: Superfícies adiabáticas

| Teste | ΔQH [kWh] | % | ΔQC [kWh] | % | ΔQ_{total} [kWh] | % |
|------------------------------------------------|-------------------|-----|-------------------|------|--------------------------|-----|
| Referência (Teste 5) | | | | | | |
| BioPCM M182/Q21 em todas as paredes | -35.088 | -7% | -19.650 | -11% | -54.738 | -8% |
| BioPCM M182/Q21 apenas nas paredes adiabáticas | 3.578 | 1% | -19.072 | -10% | -15.494 | -2% |
| BioPCM M182/Q21 nas paredes para o exterior | -1.816 | 0% | -2.448 | -1% | -4.264 | -1% |
| Referência (Teste 9) | | | | | | |
| BioPCM M182/Q21 em todas as paredes | -24.440 | -3% | -21.257 | -13% | -45.697 | -5% |
| BioPCM M182/Q21 apenas nas paredes adiabáticas | -12.234 | -2% | 28.317 | 17% | 16.083 | 2% |
| BioPCM M182/Q21 nas paredes para o exterior | -54.997 | -7% | -7.328 | -4% | -62.326 | -6% |

ANEXO D – FANGER MENSAL

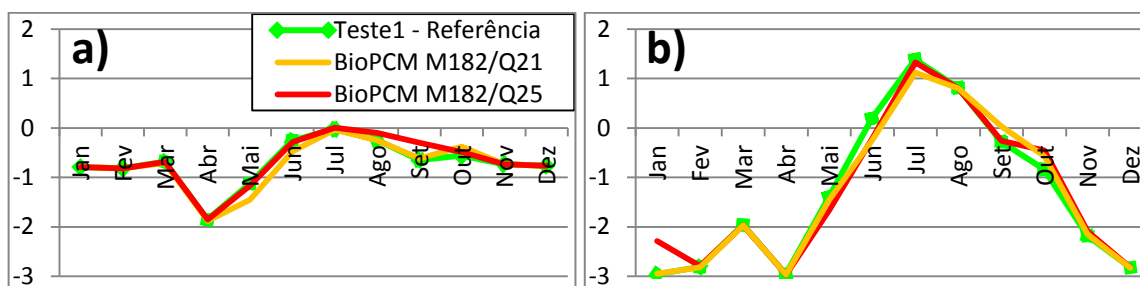


Figura 1.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 1): a) Ativo; b) Passivo

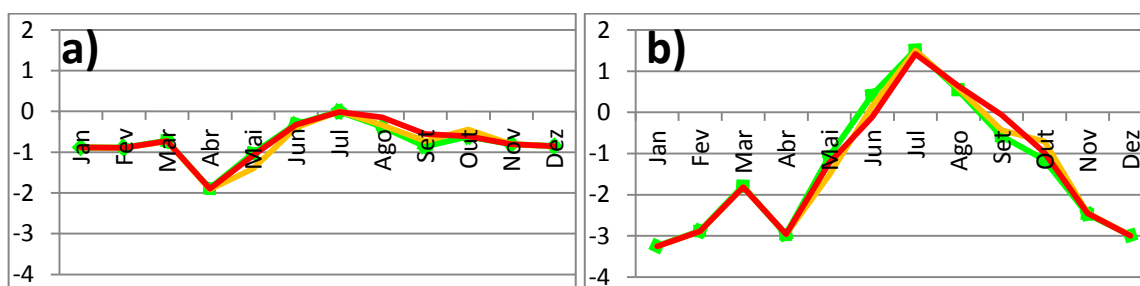


Figura 2.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 2): a) Ativo; b) Passivo

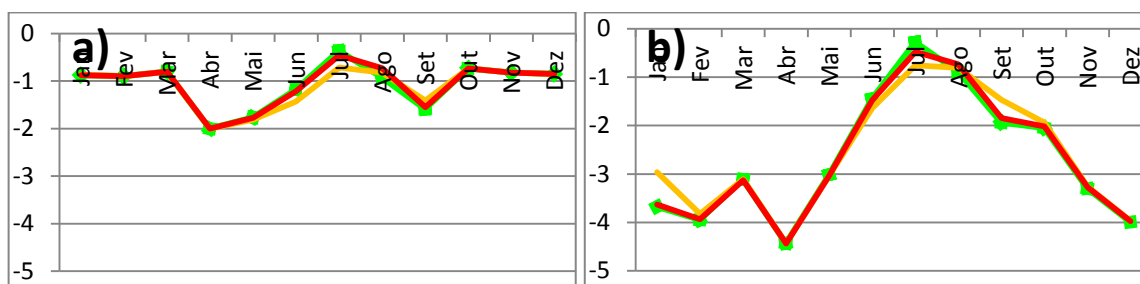


Figura 3.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 3): a) Ativo; b) Passivo

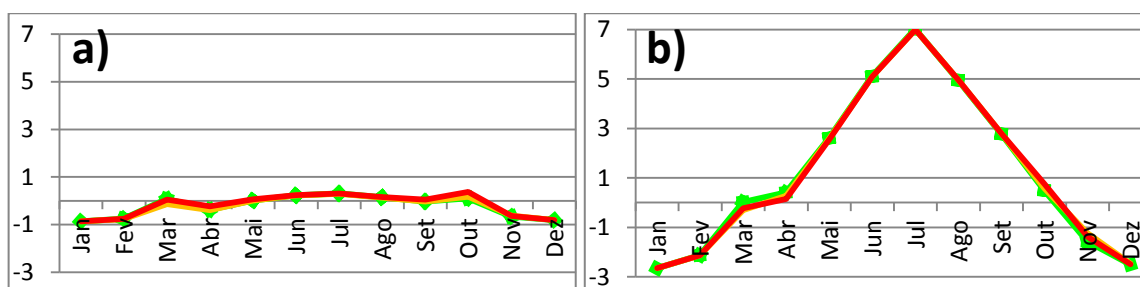


Figura 4.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 4): a) Ativo; b) Passivo

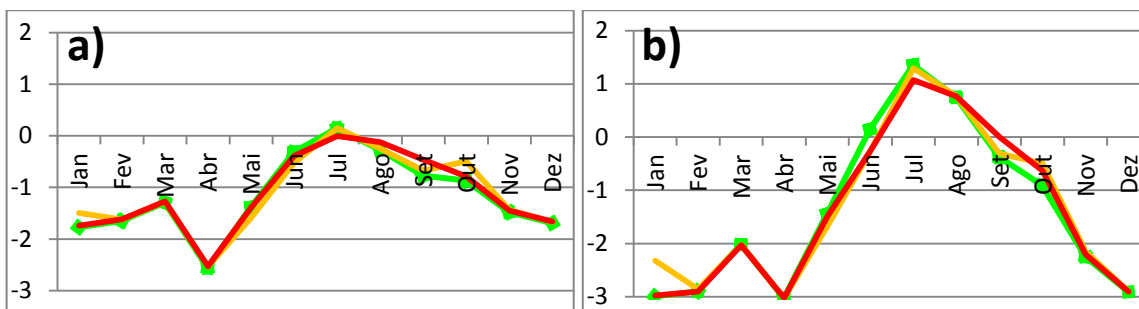


Figura 5.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 5): a) Ativo; b) Passivo

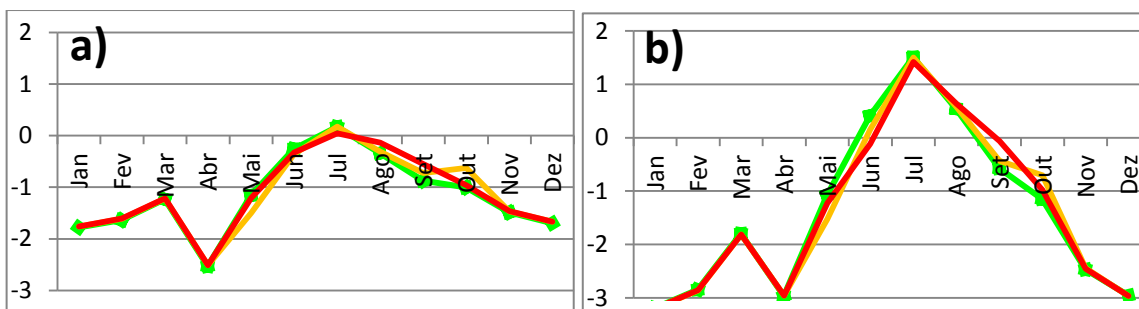


Figura 6.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 6): a) Ativo; b) Passivo

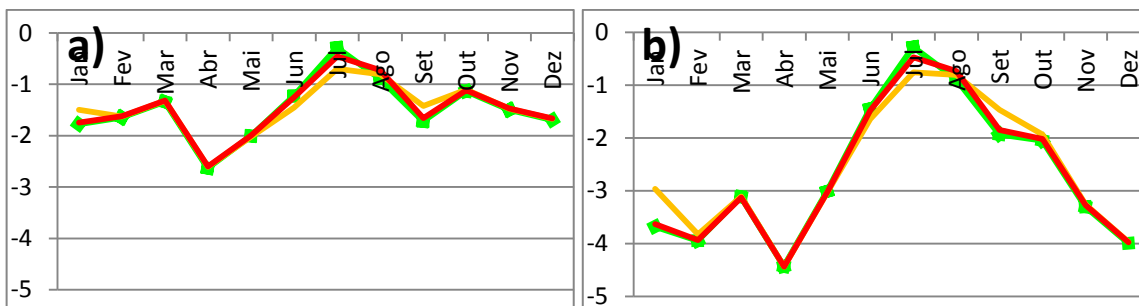


Figura 7.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 7): a) Ativo; b) Passivo

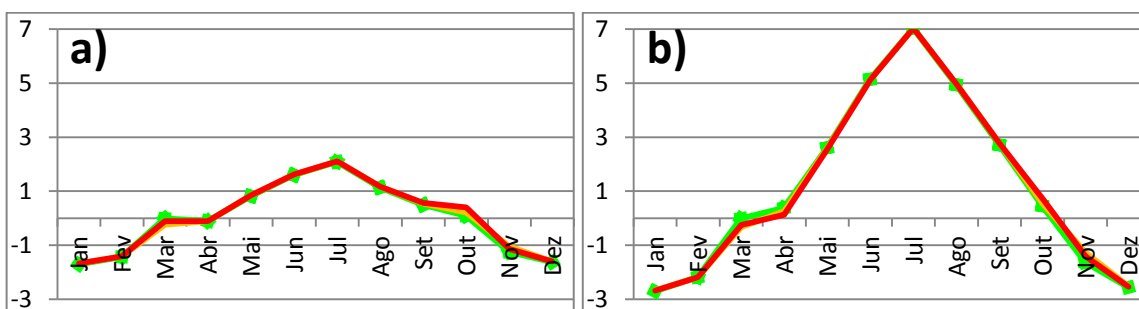


Figura 8.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 8): a) Ativo; b) Passivo

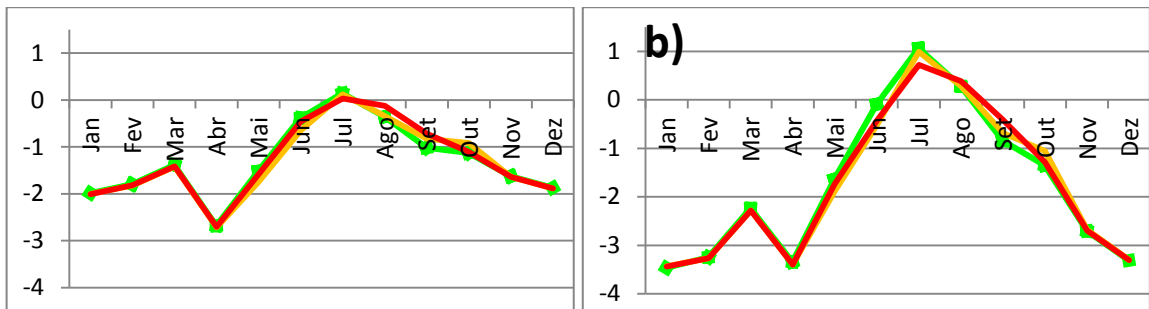


Figura 9.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 9): a) Ativo; b) Passivo

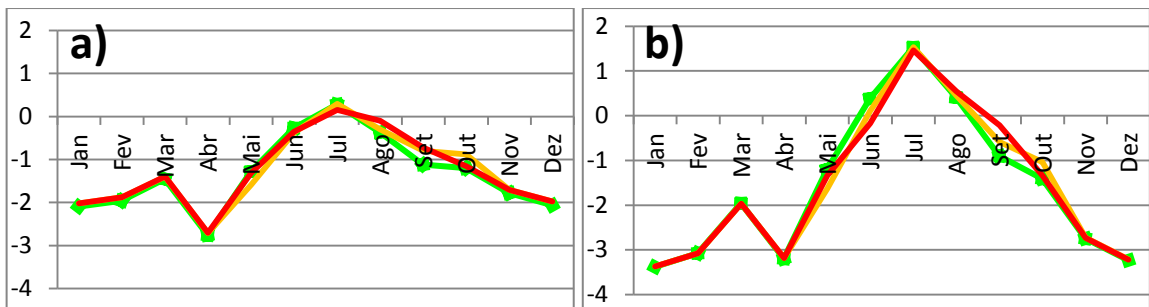


Figura 10.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 10): a) Ativo; b) Passivo

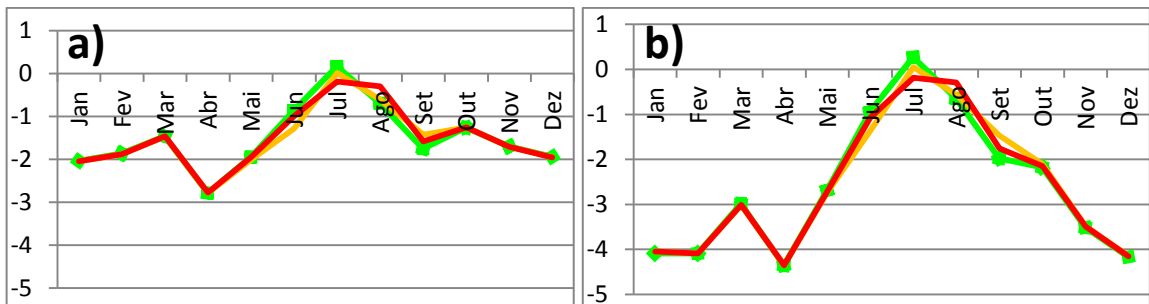


Figura 11.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 11): a) Ativo; b) Passivo

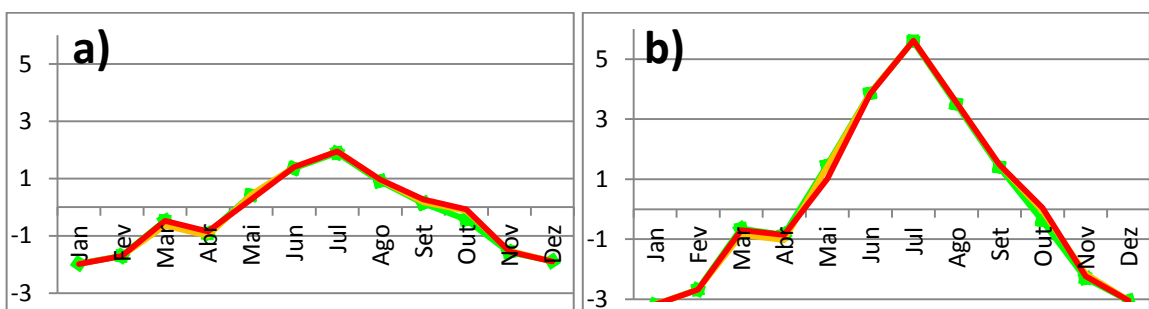


Figura 12.1 – Índice de conforto mensal segundo Fanger (Teste 12): a) Ativo; b) Passivo

ANEXO E – RESULTADOS DE PMV PARA SEMANA DE PROJETO DE VERÃO DE VERÃO

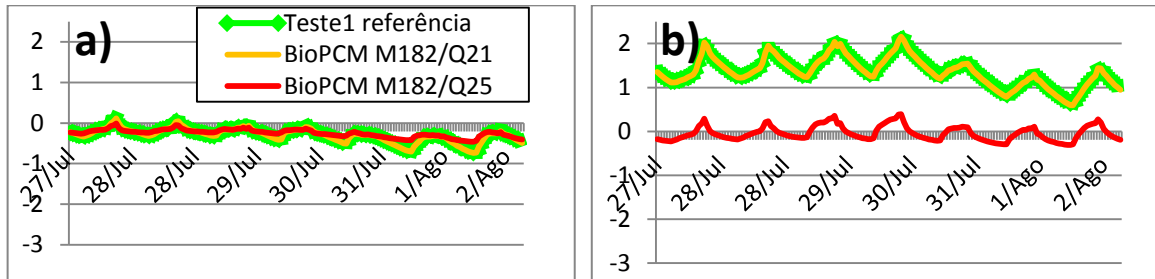


Figura 1.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 1):
a) Ativo; b) Passivo

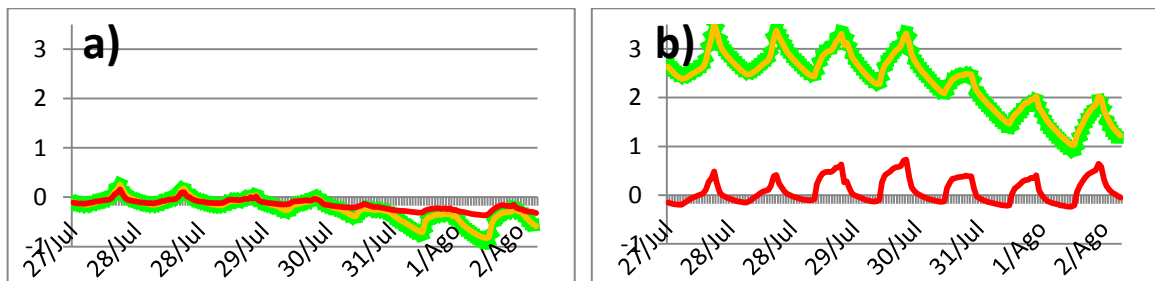


Figura 2.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 2):
a) Ativo; b) Passivo

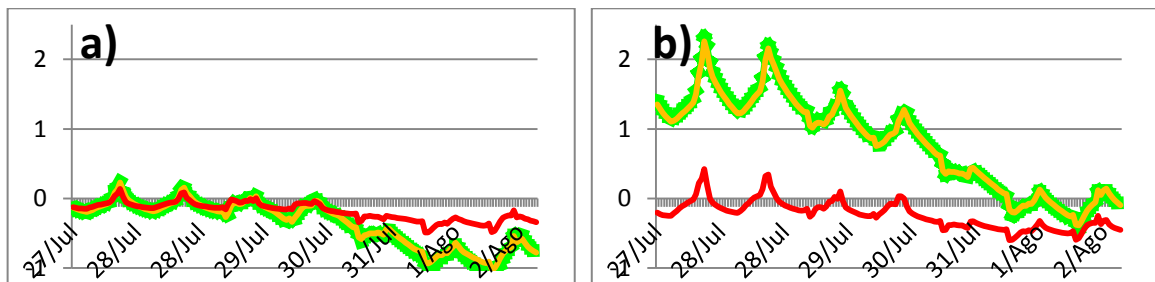


Figura 3.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 3):
a) Ativo; b) Passivo

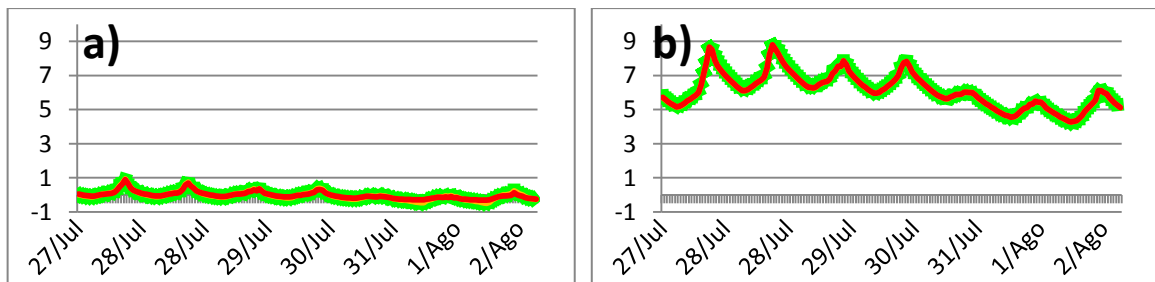


Figura 4.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 4):
a) Ativo; b) Passivo

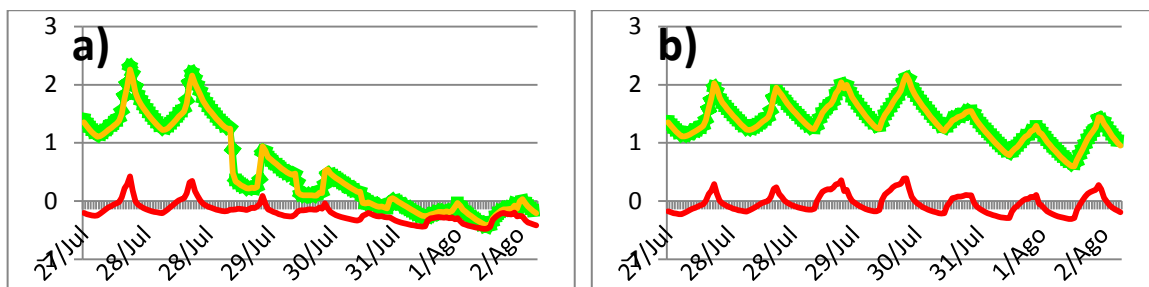


Figura 5.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 5):
a) Ativo; b) Passivo

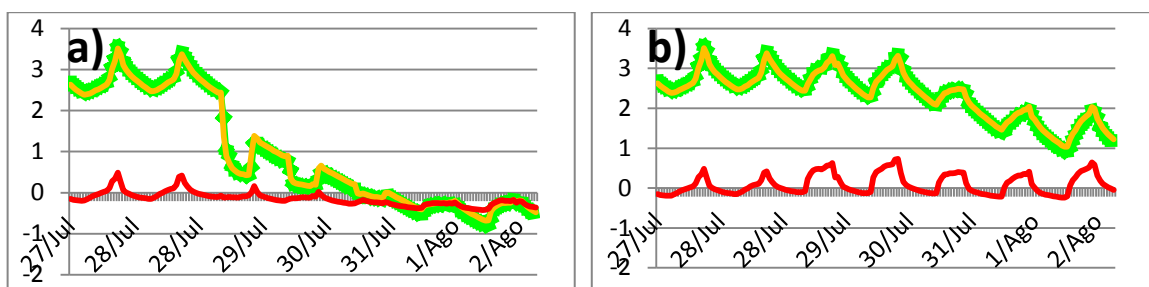


Figura 6.1 – Índice de conforto PMV para a semana projeto de verão (Teste 6):
a) Ativo; b) Passivo

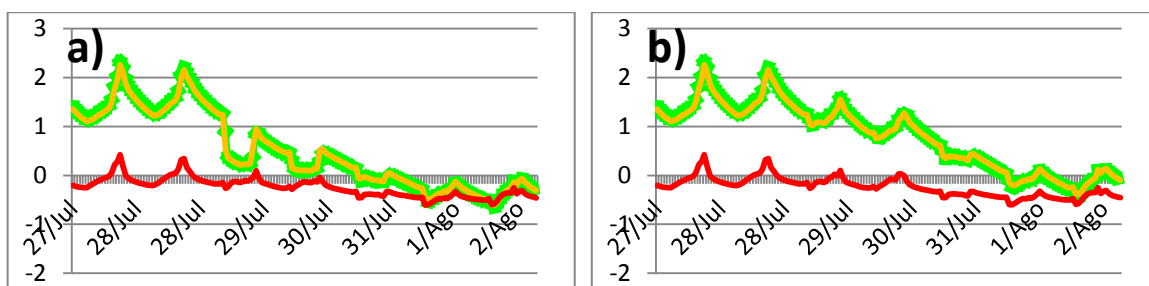


Figura 7.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 7):
a) Ativo; b) Passivo

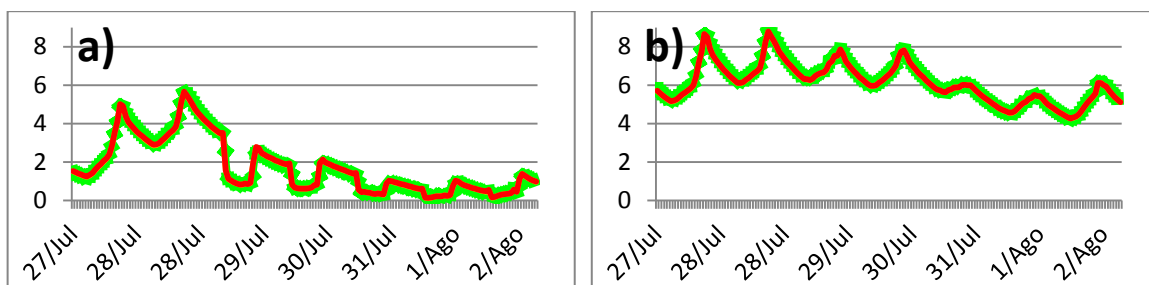


Figura 8.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 8):
a) Ativo; b) Passivo

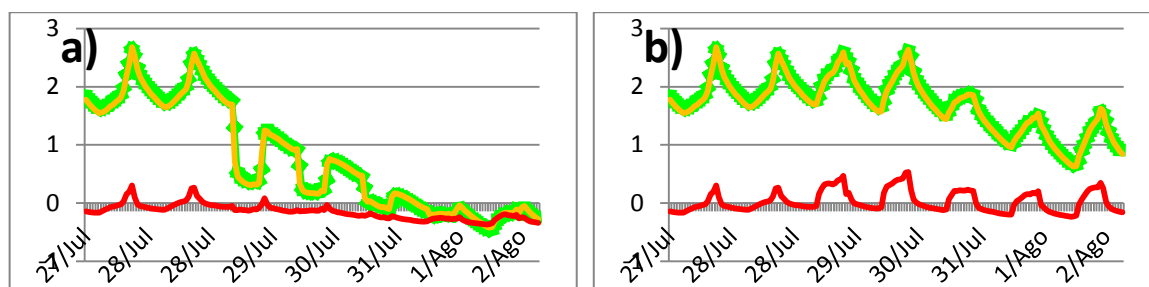


Figura 9.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 9):
a) Ativo; b) Passivo

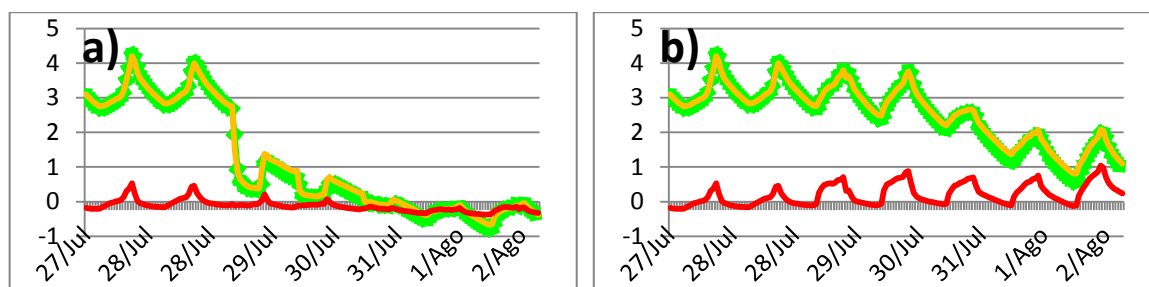


Figura 10.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 10):
a) Ativo; b) Passivo

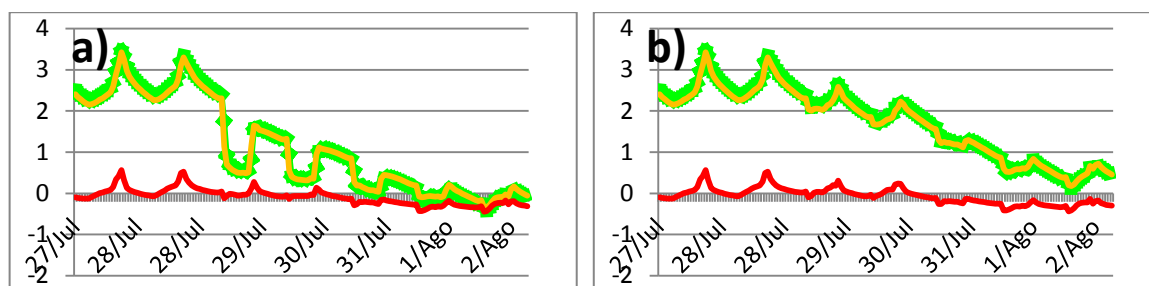


Figura 11.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 11):
a) Ativo; b) Passivo

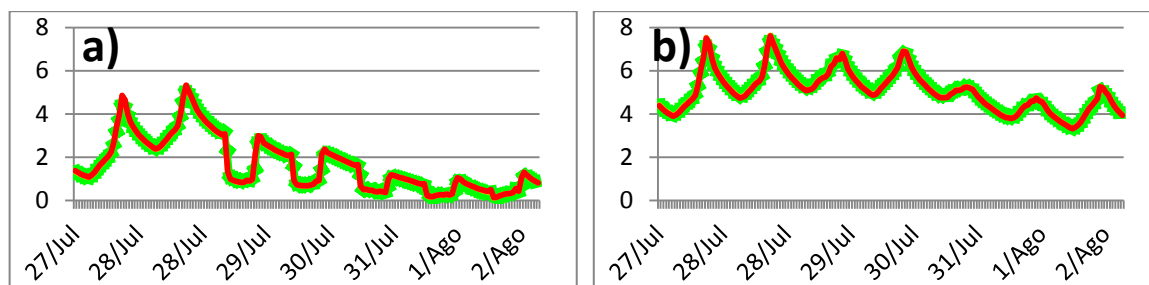


Figura 12.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana projeto de verão (Teste 12):
a) Ativo; b) Passivo

ANEXO F – RESULTADOS DE PMV PARA SEMANA DE PROJETO DE INVERNO DE INVERNO

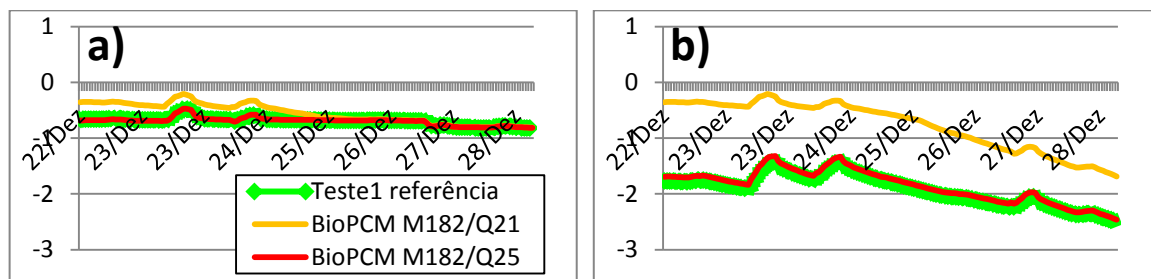


Figura 1.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno (Teste1):
a) Ativo; b) Passivo

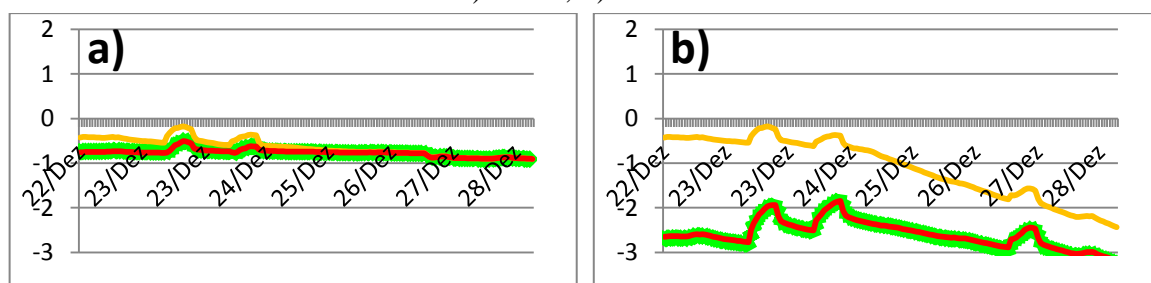


Figura 2.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno (Teste2):
a) Ativo; b) Passivo

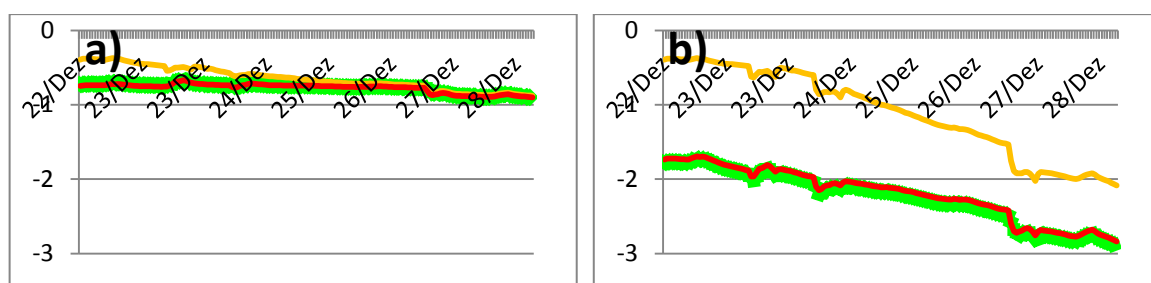


Figura 3.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno (Teste3):
a) Ativo; b) Passivo

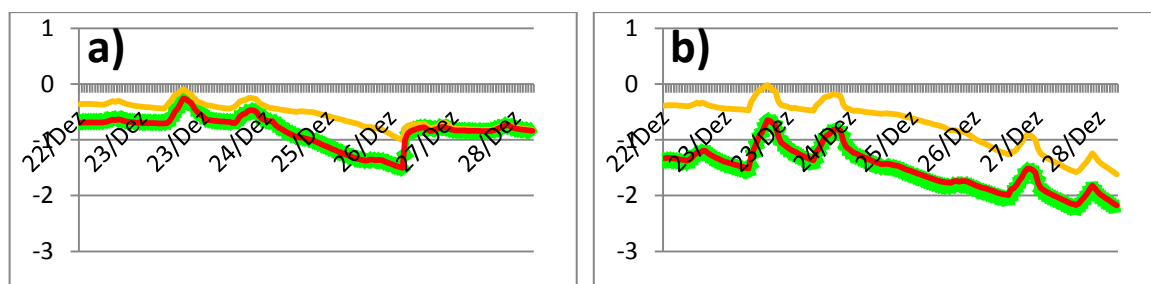


Figura 4.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno (Teste4):
a) Ativo; b) Passivo

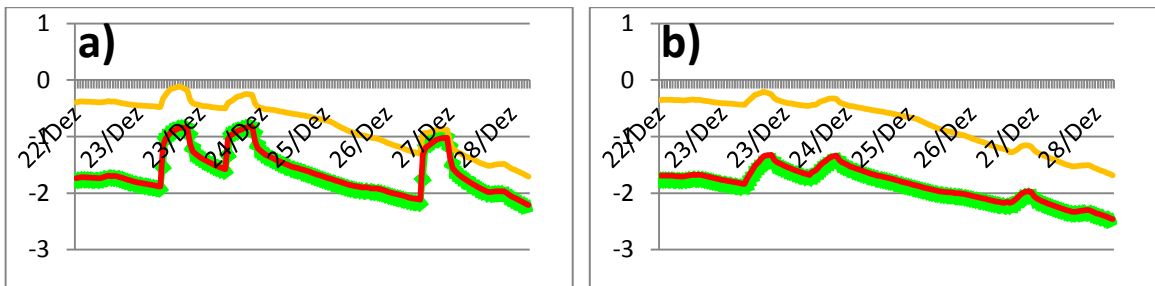


Figura 5.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno (Teste5):
a) Ativo; b) Passivo

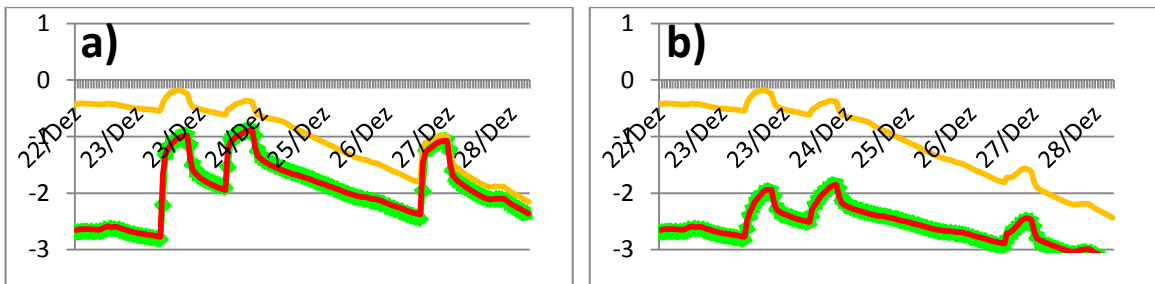


Figura 6.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno (Teste6):
a) Ativo; b) Passivo

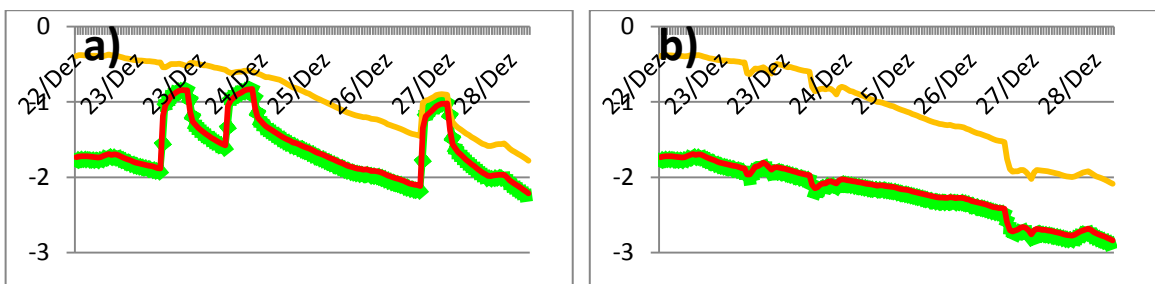


Figura 7.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno (Teste7):
a) Ativo; b) Passivo

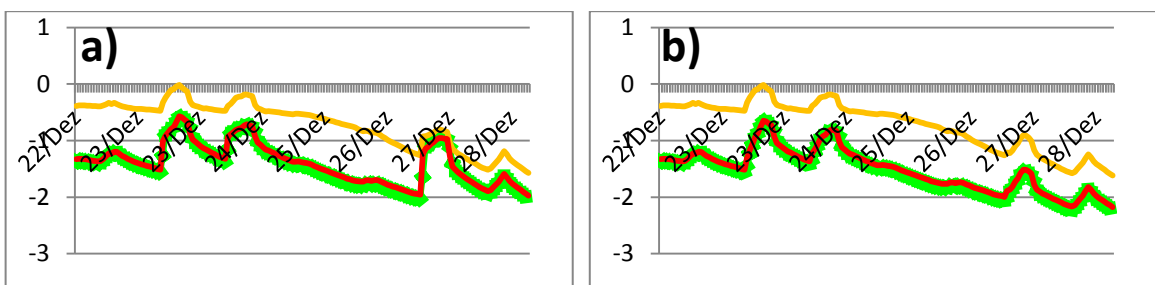


Figura 8.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno (Teste8):
a) Ativo; b) Passivo

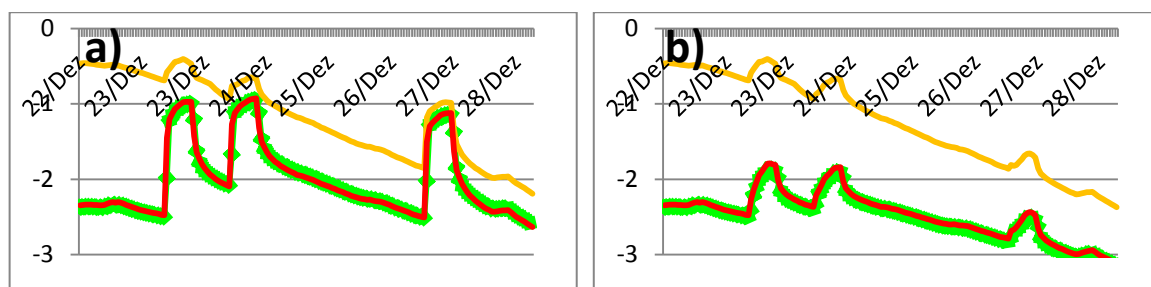


Figura 9.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno (Teste9):
a) Ativo; b) Passivo

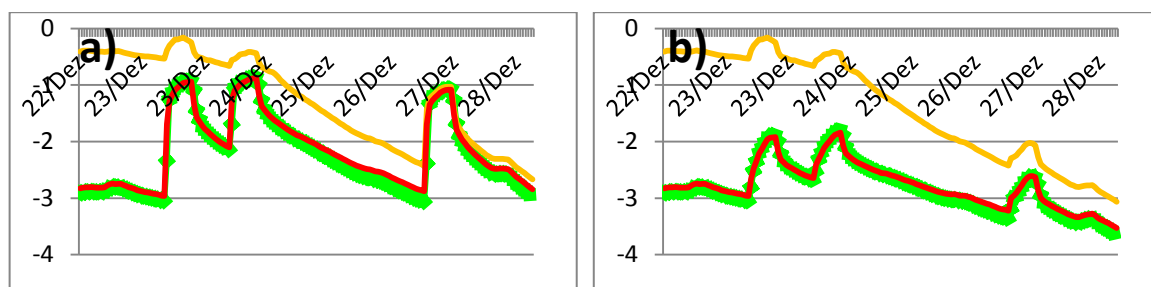


Figura 10.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno
(Teste 10): a) Ativo; b) Passivo

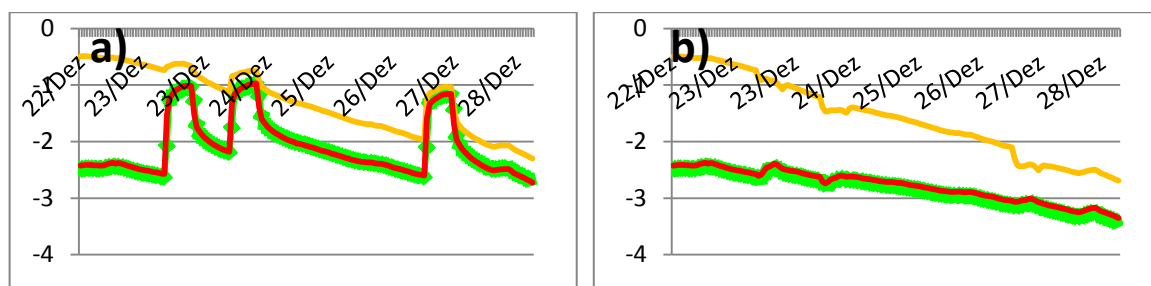


Figura 11.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno
(Teste11): a) Ativo; b) Passivo

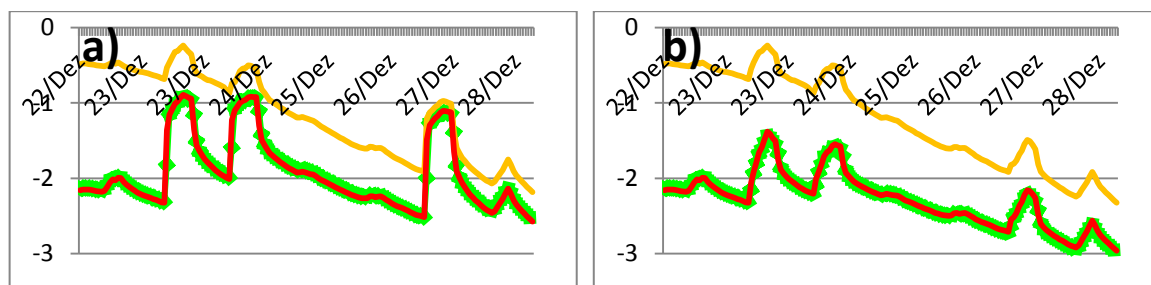


Figura 12.1 – Índice de conforto térmico PMV para a semana de projeto de inverno
(Teste12): a) Ativo; b) Passivo

ANEXO G – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS

| | | PCM Ativo | | | | | |
|----------|-----------------|-------------------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| | | Temperaturas [°C] | | | | | |
| | | <20 | Diferença | 20-25 | Diferença | >25 | Diferença |
| Teste 1 | Referência | 1022.5 | | 7473 | | 264.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 1253.2 | 230.7 | 7102.3 | -370.7 | 404.5 | 140 |
| | BioPCM M182/Q25 | 1296.8 | 274.3 | 7036.7 | -436.3 | 426.5 | 162 |
| Teste 2 | Referência | 1019.5 | | 7382.5 | | 358 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 1314.3 | 294.8 | 6902.1 | -480.4 | 543.6 | 185.6 |
| | BioPCM M182/Q25 | 1371.7 | 352.2 | 6823.8 | -558.7 | 564.5 | 206.5 |
| Teste 3 | Referência | 1474.5 | | 7268 | | 17.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 1687.5 | 213 | 7049.4 | -218.6 | 23.1 | 5.6 |
| | BioPCM M182/Q25 | 1797.8 | 323.3 | 6955.9 | -312.1 | 6.3 | -11.2 |
| Teste 4 | Referência | 670 | | 6700 | | 1390 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 807.3 | 137.3 | 6089.2 | -610.8 | 1863.5 | 473.5 |
| | BioPCM M182/Q25 | 859.6 | 189.6 | 5795 | -905 | 2105.4 | 715.4 |
| Teste 5 | Referência | 4479 | | 3675 | | 606 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 3851 | -628 | 4166.8 | 491.8 | 742.2 | 136.2 |
| | BioPCM M182/Q25 | 4055.4 | -423.6 | 4091.6 | 416.6 | 613 | 7 |
| Teste 6 | Referência | 4446 | | 3662 | | 652 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 3863 | -583 | 4104.8 | 442.8 | 792.2 | 140.2 |
| | BioPCM M182/Q25 | 4085.2 | -360.8 | 4024.4 | 362.4 | 650.4 | -1.6 |
| Teste 7 | Referência | 5615 | | 3025.5 | | 119.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 4666.6 | -948.4 | 4045.4 | 1019.9 | 48 | -71.5 |
| | BioPCM M182/Q25 | 4847.5 | -767.5 | 3903.7 | 878.2 | 8.8 | -110.7 |
| Teste 8 | Referência | 2707.5 | | 2615 | | 3437.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 2296.5 | -411 | 2977.5 | 362.5 | 3486 | 48.5 |
| | BioPCM M182/Q25 | 2352.9 | -354.6 | 2607.3 | -7.7 | 3799.8 | 362.3 |
| Teste 9 | Referência | 4740.5 | | 3442.5 | | 577 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 4097.8 | -642.7 | 4013.9 | 571.4 | 648.3 | 71.3 |
| | BioPCM M182/Q25 | 4255.2 | -485.3 | 4012.7 | 570.2 | 492.1 | -84.9 |
| Teste 10 | Referência | 4747 | | 3226 | | 787 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 4004.7 | -742.3 | 3843.6 | 617.6 | 911.7 | 124.7 |
| | BioPCM M182/Q25 | 4235.9 | -511.1 | 3726.7 | 500.7 | 797.4 | 10.4 |
| Teste 11 | Referência | 5549.5 | | 2809 | | 401.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 4605.8 | -943.7 | 3835.5 | 1026.5 | 318.7 | -82.8 |
| | BioPCM M182/Q25 | 4798.4 | -751.1 | 3898.5 | 1089.5 | 63.1 | -338.4 |
| Teste 12 | Referência | 3199 | | 2791.5 | | 2769.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 2604 | -595 | 3657.4 | 865.9 | 2498.6 | -270.9 |
| | BioPCM M182/Q25 | 2754.6 | -444.4 | 3257 | 465.5 | 2748.4 | -21.1 |

| PCM Passivo | | | | | | | |
|-------------|-----------------|-------------------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| | | Temperaturas [°C] | | | | | |
| | | <20 | Diferença | 20-25 | Diferença | >25 | Diferença |
| Teste 1 | Referência | 4750 | | 1973 | | 2037 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 4760 | 10 | 2127.3 | 154.3 | 1872.7 | -164.3 |
| | BioPCM M182/Q25 | 4898.7 | 148.7 | 2042.6 | 69.6 | 1818.7 | -218.3 |
| Teste 2 | Referência | 5056 | | 1690.5 | | 2013.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 4751.7 | -304.3 | 2164.7 | 474.2 | 1843.6 | -169.9 |
| | BioPCM M182/Q25 | 4968.4 | -87.6 | 1927.7 | 237.2 | 1863.9 | -149.6 |
| Teste 3 | Referência | 6582.5 | | 2030 | | 147.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 6258.5 | -324 | 2452.5 | 422.5 | 49 | -98.5 |
| | BioPCM M182/Q25 | 6542.6 | -39.9 | 2208.3 | 178.3 | 9.1 | -138.4 |
| Teste 4 | Referência | 3019 | | 940 | | 4801 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 2859.8 | -159.2 | 1290.7 | 350.7 | 4609.5 | -191.5 |
| | BioPCM M182/Q25 | 2935.5 | -83.5 | 1412.6 | 472.6 | 4411.9 | -389.1 |
| Teste 5 | Referência | 5035 | | 1720 | | 2005 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 4754.8 | -280.2 | 2166.2 | 446.2 | 1839 | -166 |
| | BioPCM M182/Q25 | 4895.3 | -139.7 | 2019.9 | 299.9 | 1844.8 | -160.2 |
| Teste 6 | Referência | 5056 | | 1690.5 | | 2013.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 4751.7 | -304.3 | 2164.7 | 474.2 | 1843.6 | -169.9 |
| | BioPCM M182/Q25 | 4968.4 | -87.6 | 1927.7 | 237.2 | 1863.9 | -149.6 |
| Teste 7 | Referência | 6582.5 | | 2030 | | 147.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 6258.5 | -324 | 2452.5 | 422.5 | 49 | -98.5 |
| | BioPCM M182/Q25 | 6542.6 | -39.9 | 2208.3 | 178.3 | 9.1 | -138.4 |
| Teste 8 | Referência | 3052 | | 998.5 | | 4709.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 2878 | -174 | 1350.4 | 351.9 | 4531.6 | -177.9 |
| | BioPCM M182/Q25 | 2949.4 | -102.6 | 1314.4 | 315.9 | 4496.2 | -213.3 |
| Teste 9 | Referência | 5370.5 | | 1735 | | 1654.5 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 4873.2 | -497.3 | 2418 | 683 | 1468.8 | -185.7 |
| | BioPCM M182/Q25 | 5321.9 | -48.6 | 2070 | 335 | 1368.1 | -286.4 |
| Teste 10 | Referência | 5366.5 | | 1550.5 | | 1843 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 4930.9 | -435.6 | 2109.4 | 558.9 | 1719.7 | -123.3 |
| | BioPCM M182/Q25 | 4818.9 | -547.6 | 2215.6 | 665.1 | 1725.5 | -117.5 |
| Teste 11 | Referência | 6317 | | 1892 | | 551 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 6027.2 | -289.8 | 2356.4 | 464.4 | 376.4 | -174.6 |
| | BioPCM M182/Q25 | 6265.5 | -51.5 | 2423.9 | 531.9 | 70.6 | -480.4 |
| Teste 12 | Referência | 3540.5 | | 1590.5 | | 3629 | |
| | BioPCM M182/Q21 | 3256.1 | -284.4 | 1989.4 | 398.9 | 3514.5 | -114.5 |
| | BioPCM M182/Q25 | 3364.9 | -175.6 | 1947.6 | 357.1 | 3447.5 | -181.5 |

ANEXO H – RESULTADOS DE TEMPERATURA DO AR INTERIOR PARA SEMANA PROJETO DE VERÃO

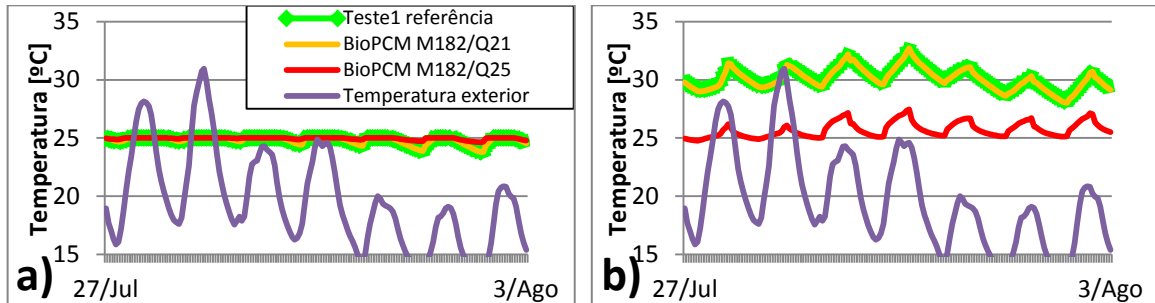


Figura 1.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste1): a) Ativo; b) Passivo

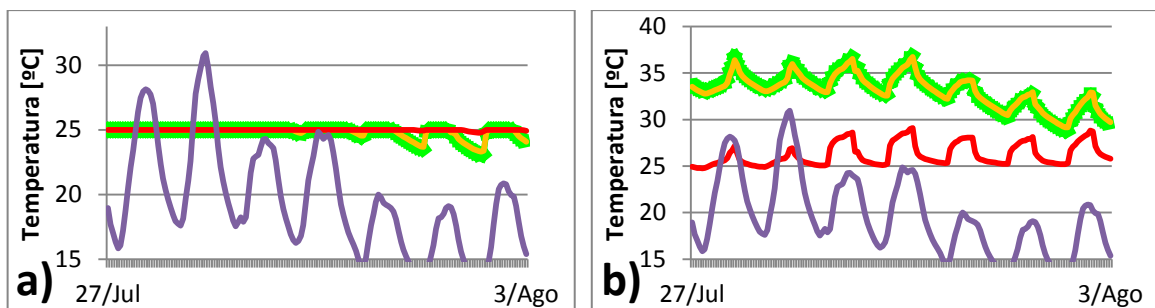


Figura 2.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste2): a) Ativo; b) Passivo

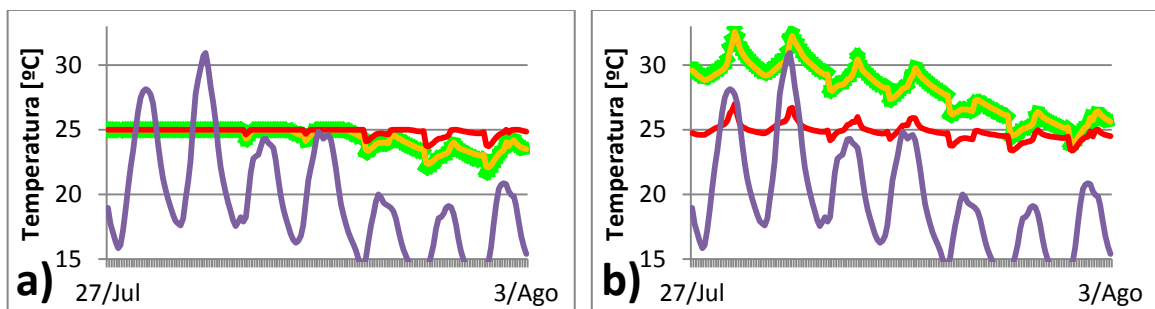


Figura 3.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste3): a) Ativo; b) Passivo

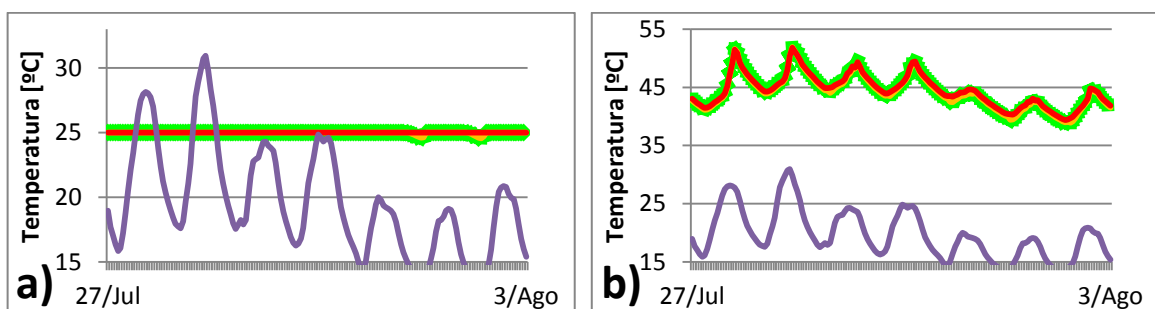


Figura 4.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste4): a) Ativo; b) Passivo

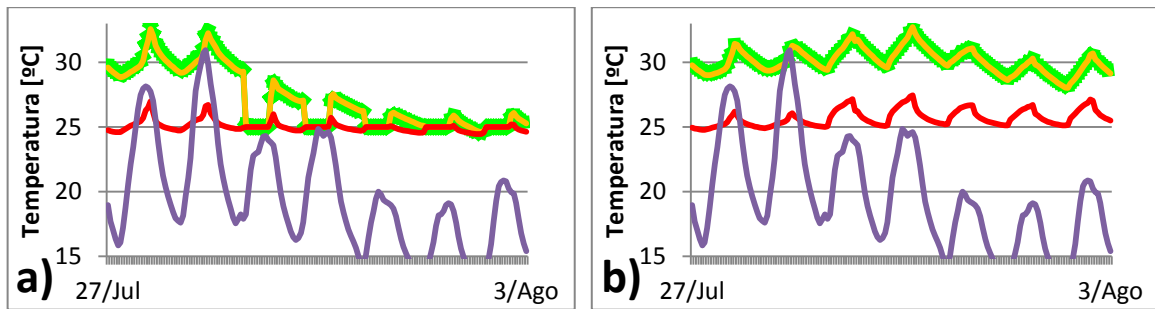


Figura 5.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste5): a) Ativo; b) Passivo

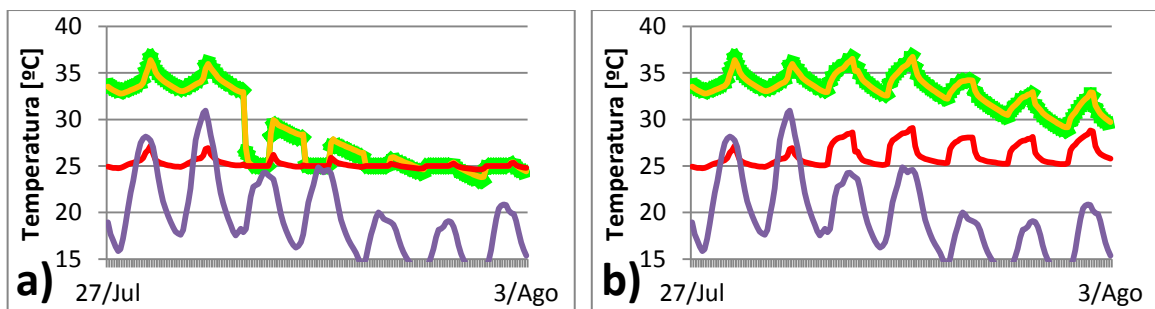


Figura 6.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste6): a) Ativo; b) Passivo

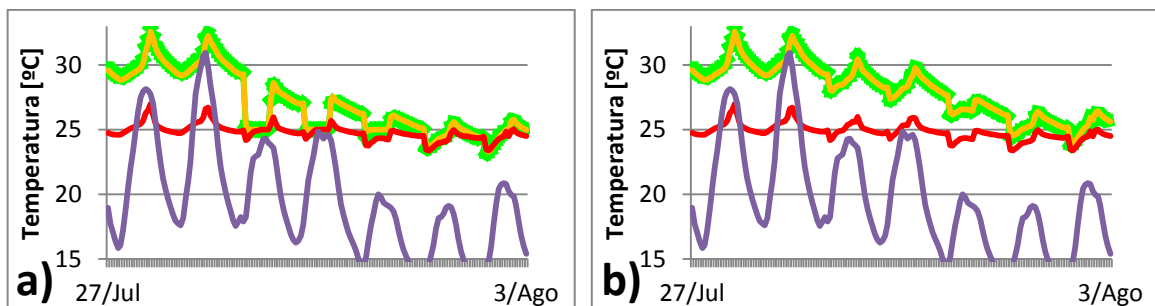


Figura 7.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste7): a) Ativo; b) Passivo

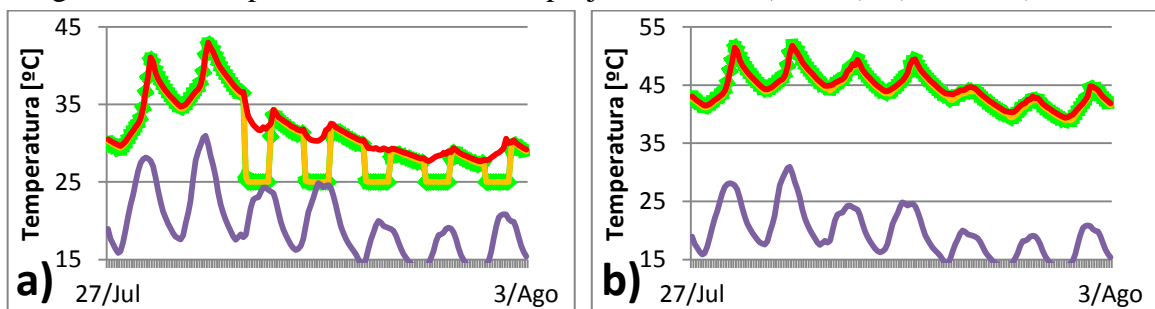


Figura 8.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste8): a) Ativo; b) Passivo

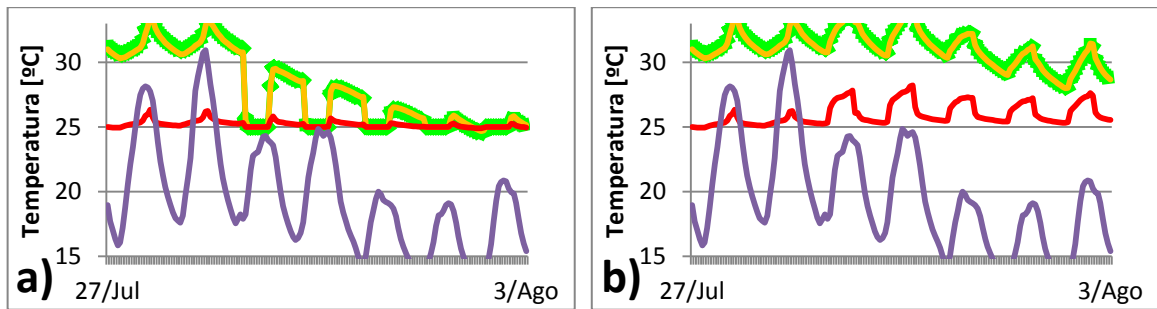


Figura 9.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste9): a) Ativo; b) Passivo

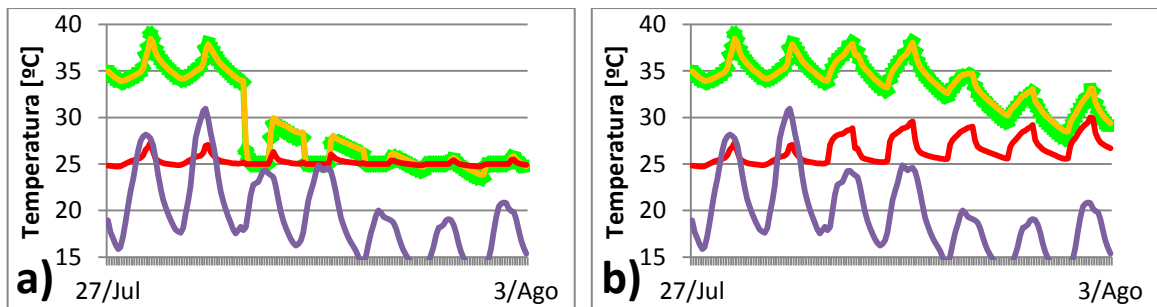


Figura 10.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste10): a) Ativo; b) Passivo

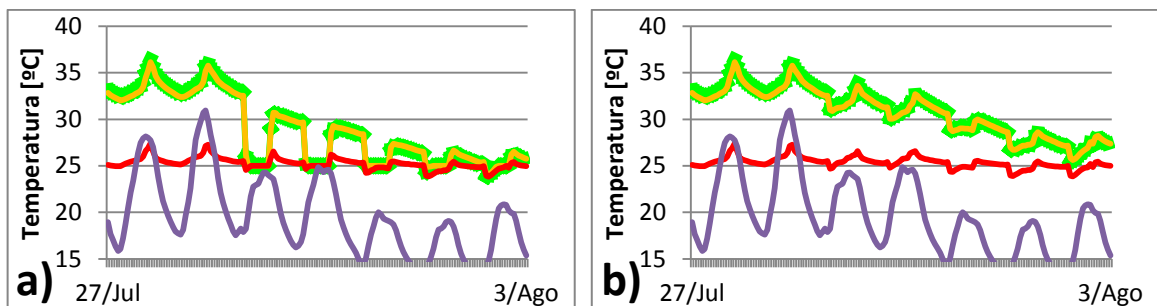


Figura 11.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste11): a) Ativo; b) Passivo

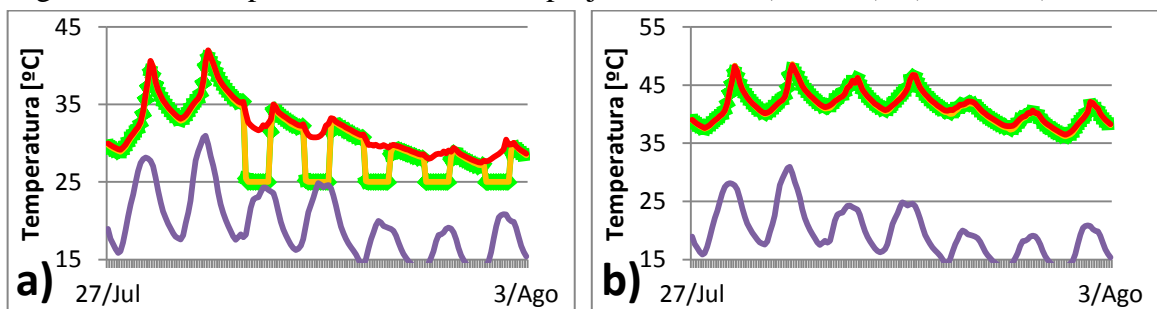


Figura 12.1 – Temperatura do ar: semana projeto de verão (Teste12): a) Ativo; b) Passivo

ANEXO I – RESULTADOS DE TEMPERATURA DO AR INTERIOR PARA SEMANA PROJETO DE INVERNO

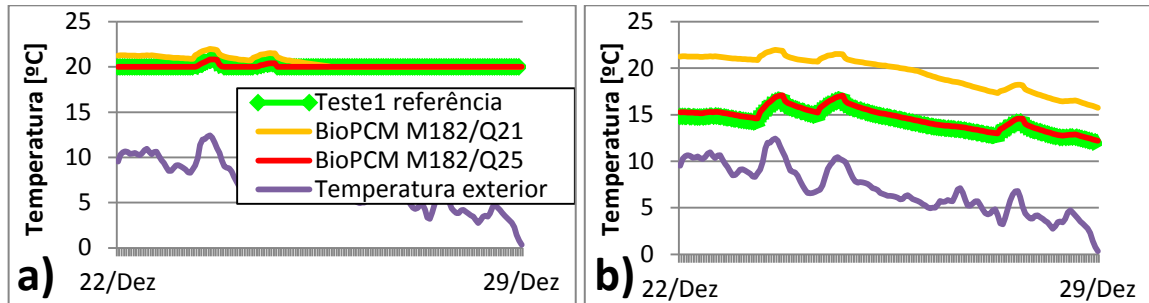


Figura 1.1 – Temperatura do ar: semana projeto de inverno (Teste1): a) Ativo; b) Passivo

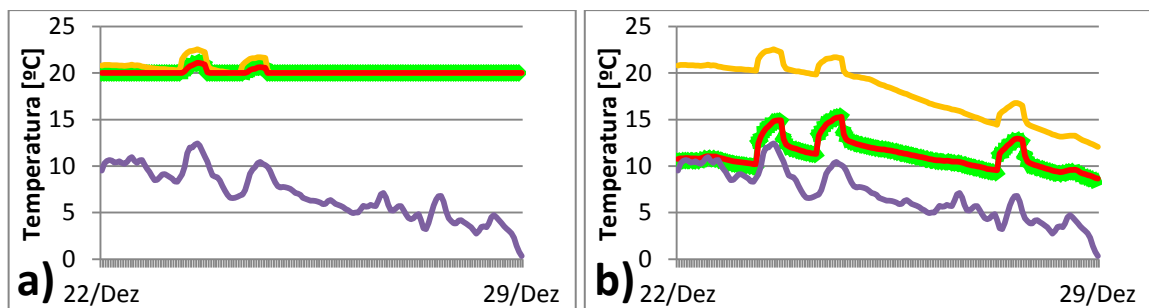


Figura 2.1 – Temperatura do ar: semana projeto de inverno (Teste2): a) Ativo; b) Passivo

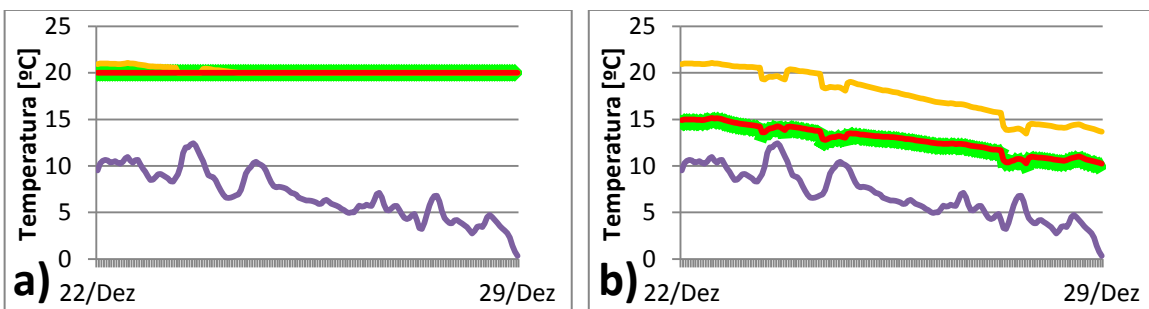


Figura 3.1 – Temperatura do ar semana projeto de inverno (Teste3): a) Ativo; b) Passivo

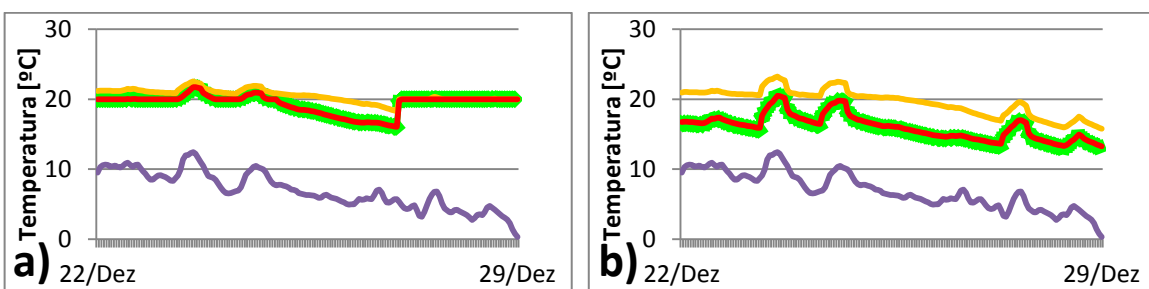


Figura 4.1 – Temperatura do ar: semana projeto de inverno (Teste4): a) Ativo; b) Passivo

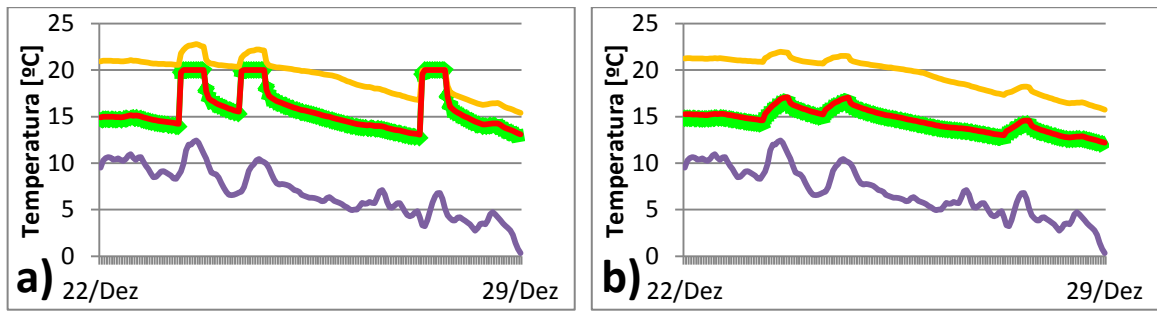


Figura 5.1 – Temperatura do ar: semana projeto de inverno (Teste5): a) Ativo; b) Passivo

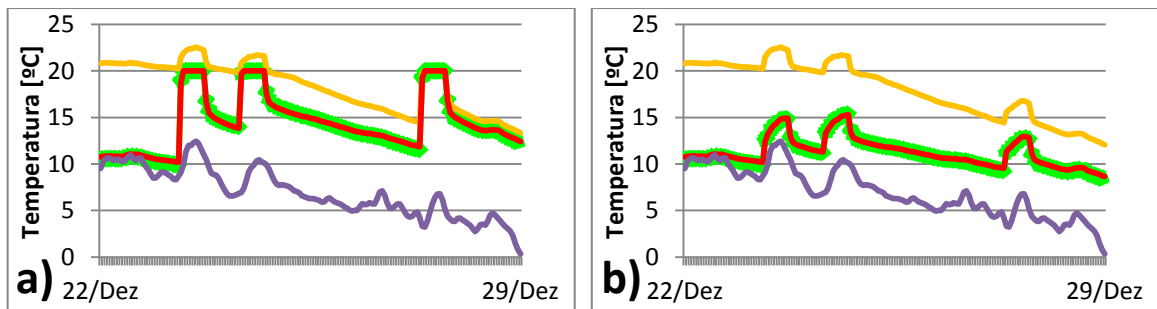


Figura 6.1 – Temperatura do ar: semana projeto de inverno (Teste6): a) Ativo; b) Passivo

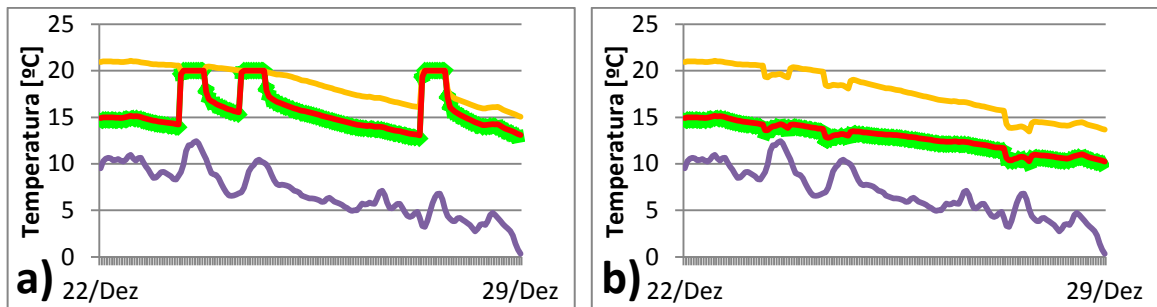


Figura 7.1 – Temperatura do ar: semana projeto de inverno (Teste7): a) Ativo; b) Passivo

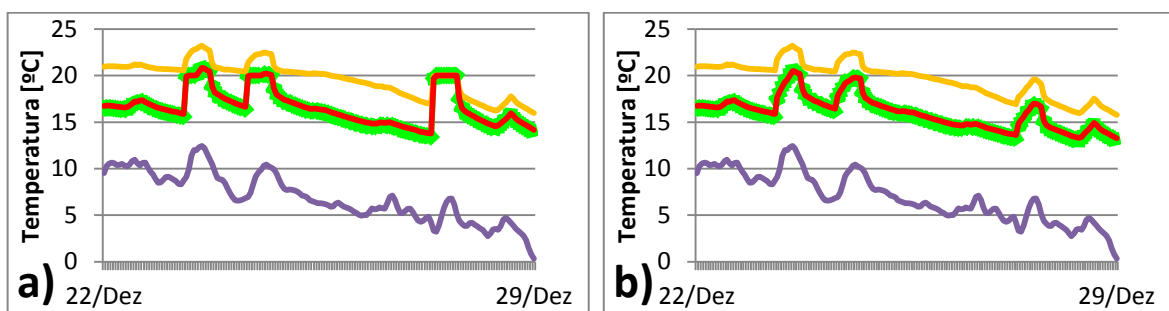


Figura 8.1 – Temperatura do ar: semana projeto de inverno (Teste8): a) Ativo; b) Passivo

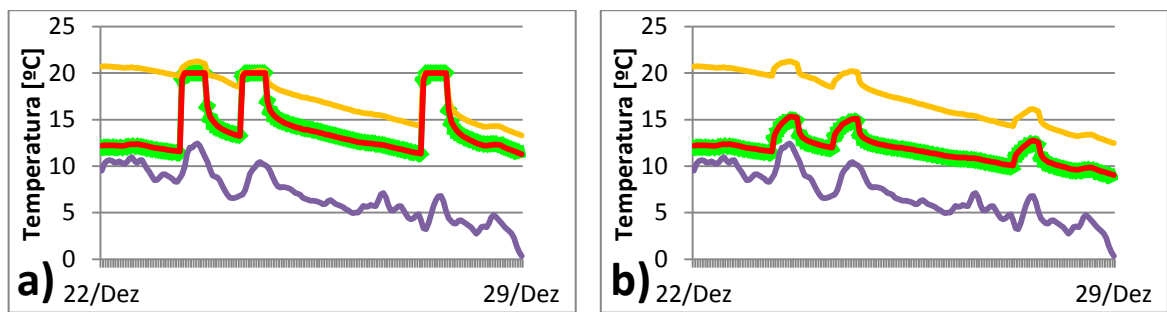


Figura 9.1 – Temperatura do ar: semana projeto de inverno (Teste9): a) Ativo; b) Passivo

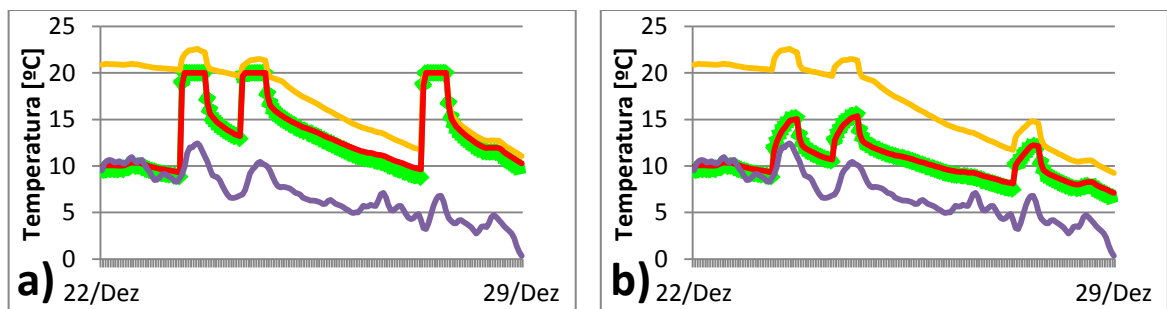


Figura 10.1 – Temperatura do ar: semana projeto de inverno (Teste10): a) Ativo; b) Passivo

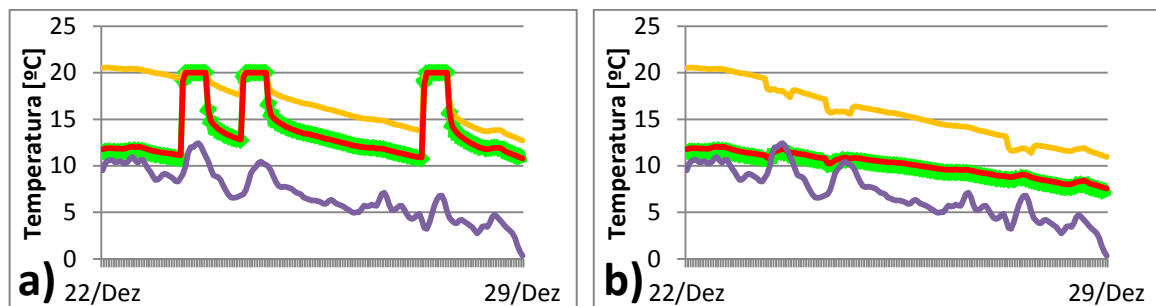


Figura 11.1 – Temperatura do ar: semana projeto de inverno (Teste11): a) Ativo; b) Passivo

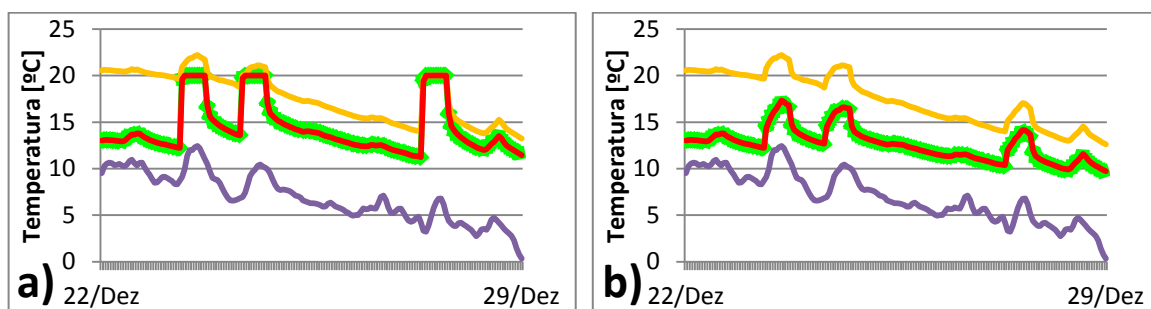


Figura 12.1 – Temperatura do ar: semana projeto de inverno (Teste12): a) Ativo; b) Passivo