

• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Estudo numérico de unidades de armazenamento de energia térmica com materiais de mudança de fase para a termorregulação de painéis fotovoltaicos**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

## **Numerical study of small thermal energy storage units filled with phase change materials for the thermal management of photovoltaics**

Autor

**Pedro Filipe Ribeiro Antunes**

Orientadores

**Professor Doutor José Joaquim da Costa**

**Doutor Nelson Miguel Lopes Soares**

Júri

Presidente

**Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar**

**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

**Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes**

**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

**Doutor Nelson Miguel Lopes Soares**

Vogais

**Investigador Pos-Doc, Associação para o Desenvolvimento da  
Aerodinâmica Industrial (ADAI)**

**Coimbra, Setembro, 2016**



*“There is no substitute for hard work”*

Thomas Edison



## Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

De forma especial, agradeço aos meus orientadores Professor Doutor José Joaquim da Costa e Doutor Nelson Miguel Lopes Soares, pela disponibilidade, atenção dispensada e espírito crítico; o meu muito obrigado.

Aos meus pais, obrigado pelo apoio, compreensão, paciência e por todos os valores que me ensinaram.

Por fim, agradeço aos meus amigos de curso pelos momentos partilhados e por tornarem inesquecível o meu percurso académico.

Esta tese foi desenvolvida no âmbito do projeto "PCMs4Buildings" - *Sistemas com cavidades retangulares com materiais de mudança de fase para o aproveitamento de energia solar térmica em edifícios*, ref. POCI-01-0145-FEDER-016750 (FEDER) | PTDC/EMS-ENE/6079/2014 (FCT), cofinanciado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização - COMPETE 2020 e por Fundos Nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia.





## Resumo

O principal objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento, validação e exploração de um modelo numérico, baseado no *método da capacidade calorífica equivalente*, para simular a transferência de calor com mudança de fase sólido-líquido em cavidades de secção retangular preenchidas com materiais de mudança de fase (PCMs) microencapsulados. Para efeitos de validação e calibração, consideram-se os resultados experimentais publicados por Soares *et al.* [1,2]. Pretende-se também avaliar numericamente a influência da incorporação de uma unidade de armazenamento de energia (UAE) com PCMs na termorregulação de um painel fotovoltaico (PV). O objetivo é melhorar a eficiência do sistema na conversão de energia solar em energia elétrica.

Usando um modelo bidimensional em regime transiente, foi simulado o aquecimento e o arrefecimento do PCM microencapsulado Micronal - Micronal DS 5001 X. Assumiu-se um modelo puramente difusivo, onde a condução é o único mecanismo de transferência de calor, associado à mudança de fase. No sentido de avaliar o efeito da incorporação de alhetas metálicas no domínio do PCM, foram consideradas UAE com 1, 5 e 15 cavidades, tendo-se calculado o tempo de fusão/solidificação e a energia armazenada/restituída pelo PCM para cada caso de estudo.

Relativamente às fases de aquecimento, verificou-se que o tempo de fusão do PCM é semelhante para as unidades de 1 e 5 cavidades. Na fase de arrefecimento, constatou-se que o tempo de solidificação diminui de forma progressiva à medida que o número de cavidades da UAE aumenta. Os resultados numéricos obtidos mostraram estar de acordo com os resultados medidos experimentalmente [1,2].

Comparando a evolução da temperatura das células PV num sistema PV convencional e num sistema PV/PCM (com PCMs), observou-se o efeito termorregulador desejado no sistema com a UAE durante as horas de maior radiação solar. Para um dia típico de Verão em Coimbra, verificou-se que a espessura ideal da cavidade retangular da UAE colocada na parte posterior do PV/PCM é de 3 cm.

**Palavras-chave:** Material de mudança de fase, PCM, Armazenamento de energia, Método da capacidade calorífica equivalente, Termorregulação de painéis fotovoltaicos.





## Abstract

This work presents the validation and use of a numerical model based on the *effective-heat capacity method*, which aims to evaluate the heat transfer with melting/solidification of a microencapsulated phase change material (PCM) contained in rectangular-section vertical cavities. For the purposes of validation and calibration of the model, the experimental results obtained by Soares *et al.* [1,2] were considered. Furthermore, the effect of inserting an energy storage unit (ESU) on the back of a photovoltaic device (PV/PCM system) was also analyzed.

The melting and solidification processes of the PCM - Micronal DS 5001 X were simulated through a bidimensional transient version of the model. Conduction was considered as the only heat transfer mechanism, associated with phase change. The effect of adding metallic fins in the PCM domain was also investigated. The time required for the PCM melting and solidification was determined for the different cases considered in the parametric study, as well as the energy absorbed/released by the PCM.

It was found that the melting time was similar for the ESUs with 1 and 5 cavities. It was observed that the time required for the solidification process is progressively reduced as the number of cavities is increased. The numerical results obtained are in good agreement with the experimental results available in the literature [1,2].

By comparing the evolution of the temperature in the PV cells of the PV/PCM and the conventional PV systems (with and without the ESU, respectively), it was observed an effective thermal regulation in the period from 9 am till 3 pm. Regarding the energy performance of the PV/PCM system in a typical summer day, considering the climatic conditions of Coimbra, it was found that the ideal thickness of the PCM module is 3 cm.

**Keywords** Phase Change material, PCM, Energy storage, Effective-heat capacity method, Thermal regulation of photovoltaics.



## Índice

|   |      |
|---|------|
| Índice de Figuras .....                                   | xi   |
| Índice de Tabelas .....                                   | xv   |
| Simbologia e Siglas .....                                 | xvii |
| Simbologia.....   | xvii |
| Siglas .....  | xix  |
| 1. INTRODUÇÃO.....  | 1    |
| 1.1. Enquadramento .....                                  | 1    |
| 1.2. Motivação .....                                      | 4    |
| 1.3. Objetivos do trabalho.....                           | 5    |
| 1.4. Revisão Bibliográfica .....                          | 5    |
| 1.4.1. PCMs .....   | 5    |
| 1.4.2. Classificação.....                                 | 6    |
| 1.4.3. Principais propriedades termofísicas.....          | 7    |
| 1.4.4. Encapsulamento e Corrosão .....                    | 8    |
| 1.4.5. Revisão de estudos numéricos e experimentais.....  | 9    |
| 1.4.6. Aplicação em painéis fotovoltaicos (PV).....       | 14   |
| 1.5. Estrutura da tese.....                               | 21   |
| 2. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO .....                     | 23   |
| 2.1. Problema físico .....                                | 23   |
| 2.2. Modelo físico .....                                  | 24   |
| 2.3. Modelo matemático .....                              | 26   |
| 2.4. Método da capacidade calorífica equivalente.....     | 27   |
| 2.4.1. Fração fundida de PCM.....                         | 31   |
| 2.4.1. Condutibilidade térmica .....                      | 32   |
| 2.5. Fluxograma .....                                     | 33   |
| 2.6. Convergência e subrelaxação.....                     | 34   |
| 3. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO .....                     | 35   |
| 3.1. Casos de estudo.....                                 | 35   |
| 3.2. Propriedades do PCM e do alumínio .....              | 36   |
| 3.3. Discretização.....                                   | 36   |
| 3.3.1. Influência da discretização espacial .....         | 38   |
| 3.3.2. Influência da discretização temporal .....         | 40   |
| 3.3.3. Escolha da malha e da discretização temporal ..... | 41   |
| 3.4. Monitorização no domínio bidimensional .....         | 42   |
| 3.5. UAE com uma só cavidade.....                         | 42   |
| 3.5.1. Fase de aquecimento.....                           | 43   |
| 3.5.2. Fase de arrefecimento.....                         | 47   |
| 3.6. UAE com 5 e 15 cavidades.....                        | 51   |
| 3.6.1. Fase de aquecimento.....                           | 51   |
| 3.6.2. Fase de arrefecimento.....                         | 55   |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.     | AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PV/PCM.....  | 59 |
| 4.1.   | Problema físico .....  | 59 |
| 4.2.   | Modelo físico e matemático.....  | 60 |
| 4.2.1. | Temperatura e radiação solar.....  | 61 |
| 4.2.2. | Coefficiente de transmissão de calor por convecção, $h_{conv1}$ .....                  | 61 |
| 4.2.3. | Superfície do PV.....  | 62 |
| 4.3.   | Resultados .....   | 63 |
| 4.3.1. | Discretização .....  | 63 |
| 4.3.2. | Monitorização.....   | 63 |
| 4.3.3. | Análise e discussão.....   | 63 |
| 5.     | CONCLUSÃO.....   | 69 |
| 5.1.   | Notas conclusivas principais.....  | 69 |
| 5.2.   | Trabalhos futuros .....  | 70 |
|        | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 71 |
|        | ANEXO A – MÉTODOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA FORNECIDA AO PCM .....         | 75 |
|        | ANEXO B – TEMPERATURA AMBIENTE E RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE DO PV .....                    | 77 |
|        | ANEXO C – LINEARIZAÇÃO DO TERMO RADIATIVO E IMPLEMENTAÇÃO DA CONDIÇÃO MULTIFLUXO ..... | 81 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Evolução da temperatura de um PCM ideal durante os ciclos de carga (fusão) e descarga (solidificação).....  | 2  |
| Figura 1.2 Comparação das curvas temperatura-armazenamento de energia térmica para PCMs ideais e comuns, durante a fase de aquecimento.....  | 6  |
| Figura 1.3 Encapsulamento de PCMs: (a) Macrocápsula retangular e tubular (adaptado de [22]); (b) Fotografia obtida por “Microscopia eletrónica de varrimento” de uma parede de betão que contém PCM microencapsulado [14]. ..... | 8  |
| Figura 1.4 Representação esquemática do fenómeno de subarrefecimento: (a) sem histerese; (b) com histerese. ....   | 10 |
| Figura 1.5 (a) Localização dos termopares no plano central da secção da cavidade retangular; (b) Evolução temporal da temperatura nos pontos monitorizados (adaptado de [7]). .....  | 11 |
| Figura 1.6 (1) Vetores-velocidade e (2) linhas de corrente no final da fase de aquecimento, em cavidades retangulares preenchidas por diferentes frações de volume de PCM (adaptado de [27]). .....                              | 13 |
| Figura 1.7 Representação de duas configurações possíveis (1 e 2) do <i>método da capacidade calorífica equivalente</i> .....   | 14 |
| Figura 1.8 Imagem dos sistemas A, B, C e D [4]. .....  | 16 |
| Figura 1.9 Regulação da temperatura do PV e aumento da sua potência devido à incorporação do PCM. Adaptado da ref. [6]. .....  | 17 |
| Figura 1.10 (a) Modelo físico do sistema PV/PCM; (b) Validação dos resultados numéricos: comparação da temperatura medida e prevista numericamente, na superfície do painel PV [9].....  | 17 |
| Figura 1.11 Campo de temperaturas e vetores-velocidade obtidos numericamente, para dois instantes de tempo diferentes [9].....   | 18 |
| Figura 1.12 Comparação das evoluções temporais da localização da interface sólido-líquido, (a) segundo a previsão numérica e (b) observada experimentalmente [9]. .....  | 19 |
| Figura 1.13 Evolução temporal da temperatura na superfície do PV, com e sem PCM, obtida por via experimental e numérica [5].....   | 20 |
| Figura 1.14 Comparação da evolução temporal da temperatura nos sistemas PV e PV/PCM para as condições climáticas da região de Dhahran, Arabia Saudita [5].....   | 20 |
| Figura 2.1 Modelo físico considerado para uma UAE com uma só cavidade retangular: dimensões, coordenadas e nodos relevantes.....   | 25 |
| Figura 2.2 Modelo físico da UAE com 5 cavidades retangulares. ....   | 25 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.3. Esquema representativo do método da capacidade calorífica equivalente com diferentes perfis: (a) quadrangular; (b) triangular. ....  | 28 |
| Figura 2.4 Representação da variação da fração fundida de PCM com a temperatura, durante a fusão e solidificação do PCM. ....  | 31 |
| Figura 2.5 Representação da variação linear da condutibilidade térmica com a temperatura e fração fundida de PCM, durante a sua fusão e solidificação. ....  | 32 |
| Figura 2.6 Fluxograma do programa de cálculo desenvolvido. ....  | 34 |
| Figura 3.1 Modelo unidimensional considerado para os testes de independência da malha e da discretização temporal. ....  | 37 |
| Figura 3.2 Evolução temporal da temperatura para as diferentes malhas consideradas. ....   | 38 |
| Figura 3.3 Evolução temporal do <i>ER</i> obtido no cálculo da temperatura para cada malha considerada. ....   | 39 |
| Figura 3.4 Evolução temporal da potência térmica transferida para o domínio do PCM, estimada na interface alumínio-PCM com as diferentes malhas. ....  | 39 |
| Figura 3.5 Evolução temporal do <i>ER</i> obtido no cálculo da potência para cada malha considerada. ....  | 39 |
| Figura 3.6 Evolução temporal da temperatura para diferentes discretizações $\Delta t$ e correspondente <i>ER</i> . ....  | 40 |
| Figura 3.7 Evolução da potência com o tempo para diferentes discretizações de tempo. ....  | 41 |
| Figura 3.8 Evolução temporal do <i>ER</i> obtido no cálculo da potência para diferentes valores de $\Delta t$ . ....   | 41 |
| Figura 3.9 Localização dos pontos de monitorização da temperatura e potências calculadas. ....   | 42 |
| Figura 3.10 Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de aquecimento com uma potência de 34 W, considerando $\Delta T_1 = \Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$ . No eixo à direita encontra-se representada a <i>FF</i> total de PCM. ....                           | 43 |
| Figura 3.11 Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de aquecimento com uma potência de 34 W, usando $\Delta T_1 = 5^\circ\text{C}$ e $\Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$ . No eixo à direita encontra-se representada a <i>FF</i> total de PCM. ....             | 44 |
| Figura 3.12 Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de aquecimento com uma potência de 68 W, para os perfis triangular e quadrangular do <i>método da capacidade calorífica equivalente</i> . No eixo à direita encontra-se representado o <i>ER</i> . .... | 45 |
| Figura 3.13 Distribuições da temperatura em $^\circ\text{C}$ aos 600, 1800, 3000, 4200 e 4800 segundos (carga a 68 W). ....  | 45 |
| Figura 3.14 Distribuições da fração fundida de PCM aos 600, 1800, 3000, 4200 e 4800 segundos (carga a 68 W). Ao centro, uma ampliação do campo de <i>FF</i> aos 3000 segundos. ....  | 46 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.15 Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de arrefecimento a 20°C, utilizando o perfil triangular no <i>método da capacidade calorífica equivalente</i> . No eixo à direita encontra-se representado o erro relativo de $T_{1num}$ . ..... | 47 |
| Figura 3.16 Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de arrefecimento a 20°C, utilizando o perfil quadrangular no <i>método da capacidade calorífica equivalente</i> . No eixo à direita encontra-se representado o <i>ER</i> de $T_{1num}$ . .....   | 48 |
| Figura 3.17 Evolução da fração fundida total ( <i>FF</i> ) de PCM para os perfis triangular e quadrangular do <i>método da capacidade calorífica equivalente</i> . .....  | 48 |
| Figura 3.18 Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de arrefecimento a 14°C. No eixo à direita encontra-se representado o <i>ER</i> de $T_{2num}$ . .....  | 49 |
| Figura 3.19 Distribuições da temperatura em °C aos 3000, 7500, 12000 e 15000 segundos (solidificação a 14 °C). .....  | 49 |
| Figura 3.20 Distribuições da fração fundida de PCM aos 3000, 7500, 12000 e 15000 segundos (solidificação a 14 °C). .....  | 50 |
| Figura 3.21 Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de 5 cavidades, durante a fase de aquecimento com uma potência de 68 W. No eixo vertical secundário encontra-se representado o <i>ER</i> de $T_{3num}$ . .....  | 52 |
| Figura 3.22 Comparação da evolução temporal de $T_{3num}$ obtida numericamente para as UAE de uma e de 5 cavidades, durante a fase de aquecimento com uma potência de 68 W. No eixo vertical secundário encontra-se representada a <i>FF</i> de PCM para ambas as UAE. .....  | 52 |
| Figura 3.23 Distribuições da temperatura em °C aos 600, 1800, 3000 e 4200 segundos (carga a 68 W na UAE de 5 cavidades). .....  | 53 |
| Figura 3.24 Distribuições da fração fundida de PCM aos 600, 1800, 3000 e 4200 segundos (carga a 68 W na UAE de 5 cavidades). .....  | 53 |
| Figura 3.25 Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de 15 cavidade, durante a fase de aquecimento com uma potência de 68W. No eixo vertical secundário encontra-se representada o <i>ER</i> de $T_{3num}$ . .....   | 54 |
| Figura 3.26 Comparação de $T_{3num}$ obtida numericamente para as UAE de 1, 5 e 15 cavidades, durante a fase de aquecimento com uma potência de 68 W. No eixo vertical secundário encontra-se representada a <i>FF</i> de PCM para as três UAE. ....  | 54 |
| Figura 3.27 Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de 5 cavidades, durante a fase de arrefecimento a 14 °C. No eixo vertical secundário encontra-se representado o <i>ER</i> de $T_{3num}$ . .....   | 55 |
| Figura 3.28 Comparação de $T_{3num}$ obtida numericamente para as UAE de 1, 5 e 15 cavidades, durante a fase de arrefecimento a 14 °C. No eixo vertical secundário encontra-se representada a <i>FF</i> de PCM para as três unidades. ....  | 56 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.29 Ampliação do campo de $FF$ de PCM na cavidade central da UAE de 5 cavidades: (a) fase de aquecimento com uma potência de 68 W aos 4200 segundos e (b) fase de arrefecimento a 14 °C aos 13200 segundos..... | 57 |
| Figura 4.1 Modelo físico considerado para o sistema PV/PCM.....   | 60 |
| Figura 4.2 Evolução temporal de $T_{PV}$ no sistema PV/PCM com diferentes espessuras de PCM.....  | 64 |
| Figura 4.3 Evolução temporal da $FF$ de PCM nos sistemas PV/PCM com diferentes espessuras de PCM.....   | 64 |
| Figura 4.4 Comparação entre a temperatura média das células fotovoltaicas obtida nos sistemas PV e PV/PCM (com 3 cm de espessura de PCM).....   | 65 |
| Figura 4.5 Temperatura ambiente e radiação incidente nos sistemas PV e PV/PCM para os dias 15 e 16 de Agosto. ....  | 65 |
| Figura 4.6 Evolução temporal da potência perdida por convecção (por metro de profundidade) na superfície dos sistemas PV e PV/PCM. ....   | 66 |
| Figura 4.7 Evolução da eficiência nos sistemas PV e PV/PCM durante o período diurno. 67   |    |
| <br>  |    |
| Figura A. 1 Método de cálculo da potência fornecida ao PCM através da ponderação da condutibilidade térmica por média harmónica. ....   | 75 |
| Figura A. 2 Método de cálculo da potência fornecida ao PCM através das resistências térmicas entre nodos. ....  | 76 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1.1 Comparação de diferentes grupos de PCMs (adaptado da ref. [19]).....  | 6  |
| Tabela 1.2 Diferentes configurações dos sistemas PV/PCM considerados por Hasan <i>et al.</i> [4]. .....  | 15 |
| Tabela 1.3 Constituição dos sistemas testados experimentalmente [6].....   | 16 |
| Tabela 2.1 Propriedades termofísicas do PCM DS 5001 X, medidas experimentalmente.  | 24 |
| Tabela 3.1 Propriedades do PCM Micronal® DS 5001 X consideradas para o estudo numérico. ....   | 36 |
| Tabela 3.2 Propriedades termofísicas do alumínio consideradas. ....  | 36 |
| Tabela 4.1 Propriedades das diferentes divisões de um painel fotovoltaico (adaptado da ref. [31]). ....  | 60 |
| Tabela 4.2 Evolução das propriedades do ar consoante o valor de $T_{med}$ . ....   | 62 |
|  |    |
| Tabela B. 1 Valores horários de $TST$ , $w_i$ , $I_0$ , $I_{0\beta}$ e $r_b$ , para o dia 15 de Agosto de 2004, em Coimbra. ....   | 78 |
| Tabela B. 2 Valores horários da temperatura e radiação global, difusa e direta numa superfície horizontal para o dia 15 de Agosto de 2004, em Coimbra (retirados do programa SOLTERM). ....            | 79 |
| Tabela B. 3 Valores horários da temperatura e radiação global, difusa, direta e refletida pelo solo numa superfície orientada a Sul e inclinada 35°, para o dia 15 de Agosto de 2004, em Coimbra. .... | 80 |



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$A$  – Área da superfície do PV [ $\text{m}^2$ ]

$C$  – Capacidade calorífica equivalente [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ]

$c_p$  – Calor específico [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ]

$D$  – Condutância [ $\text{W}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ]

$E_0$  – Factor de correcção de excentricidade [ ]

$E$  – Energia [J]

$ER$  – Erro relativo [%]

$FF$  – Fração fundida de PCM [ ]

$g$  – Aceleração da gravidade [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]

$H$  – Entalpia específica [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

$h$  – Coeficiente de transferência de calor por convecção [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ]

$I_{sc}$  – Constante solar [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$I_0$  – Radiação extraterrestre horária numa superfície horizontal [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$I_{0\beta}$  – Radiação extraterrestre horária numa superfície inclinada [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$k$  – Condutibilidade térmica [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ]

$L$  – Calor latente de fusão [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

$Nu$  – Número de Nusselt [ ]

$Pr$  – Número de Prandtl [ ]

$P$  – Potência [W]

$Ra$  – Número de Rayleigh [ ]

$r_b$  - razão entre  $I_{0\beta}$  e  $I_0$  [ ]

$TST$  – Tempo solar real [h]

$T$  – Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_i$  – Temperatura medida experimentalmente,  $i \in \{1, \dots, 5\}$  [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_{inum}$  – Temperatura obtida numericamente,  $i \in \{1, \dots, 5\}$  [ $^\circ\text{C}$ ]

$T$  – Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_f$  – Temperatura de fusão [°C]

$T_s$  – Temperatura de solidificação [°C]

$T_{sc}$  – Temperatura de subarrefecimento [°C]

$t$  – Tempo [s]

$\Delta T_f$  – Intervalo de temperaturas em que ocorre a fusão do PCM [°C]

$\Delta T_s$  – Intervalo de temperaturas em que ocorre a solidificação do PCM [°C]

$\Delta T_{hist}$  – Diferença entre  $T_f$  e  $T_s$  [°C]

$\Delta t$  – Discretização temporal [s]

$u$  – Velocidade segundo  $x$  [m.s<sup>-1</sup>]

$V$  – Volume [m<sup>3</sup>]

$v$  – Velocidade segundo  $y$  [m.s<sup>-1</sup>]

$w_i$  – Ângulo horário [°]

$\alpha$  – Difusividade térmica [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]

$\tau$  – Viscosidade cinemática [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]

$\varepsilon$  – Emissividade [ ]

$\psi$  – Latitude [rad]

$\delta$  – Declinação solar [rad]

$\gamma$  – Inclinação da superfície [rad]

$\rho$  – Massa volúmica [kg.m<sup>-3</sup>]

$\mu$  – Viscosidade dinâmica [Pa.s]

$\beta$  – Coeficiente de expansão volumétrica [K<sup>-1</sup>]

## Siglas

1D - Unidimensional

2D – Bidimensional

ARC – *Anti-reflective coating* (Revestimento anti-reflexo)

AVAC – Aquecimento, ventilação e ar condicionado

BIPV – *Building-integrated photovoltaics* (painéis PV colocados na envolvente de edifícios)

CaCl<sub>2</sub> – Cloreto de Cálcio

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DSC – Differential Scanning Calorimetry (calorimetria diferencial de varrimento)

EVA – *Ethylene Vinyl Acetate* (Espuma vinílica acetinada)

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

H<sub>2</sub>O – Água

PCM – *Phase Change Material* (Material de mudança de fase)

PV – *Photovoltaics* (painel fotovoltaico)

PV/T – Painel térmico fotovoltaico

PV/T/PCM – Painel térmico fotovoltaico com PCM incorporado

UC – Universidade de Coimbra

UAE – Unidade de armazenamento de energia

VC – Volume de Controlo



## 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é efetuada uma breve contextualização do trabalho realizado, sendo apresentados os principais objetivos e a estrutura da tese. Expõe-se também uma revisão das principais propriedades termofísicas dos materiais de mudança de fase (PCMs, do inglês *Phase Change Materials*), bem como de alguns artigos publicados a nível nacional e internacional, no âmbito do desenvolvimento de unidades de armazenamento de energia (UAE) térmica com PCMs e, particularmente, na sua aplicação em sistemas fotovoltaicos.

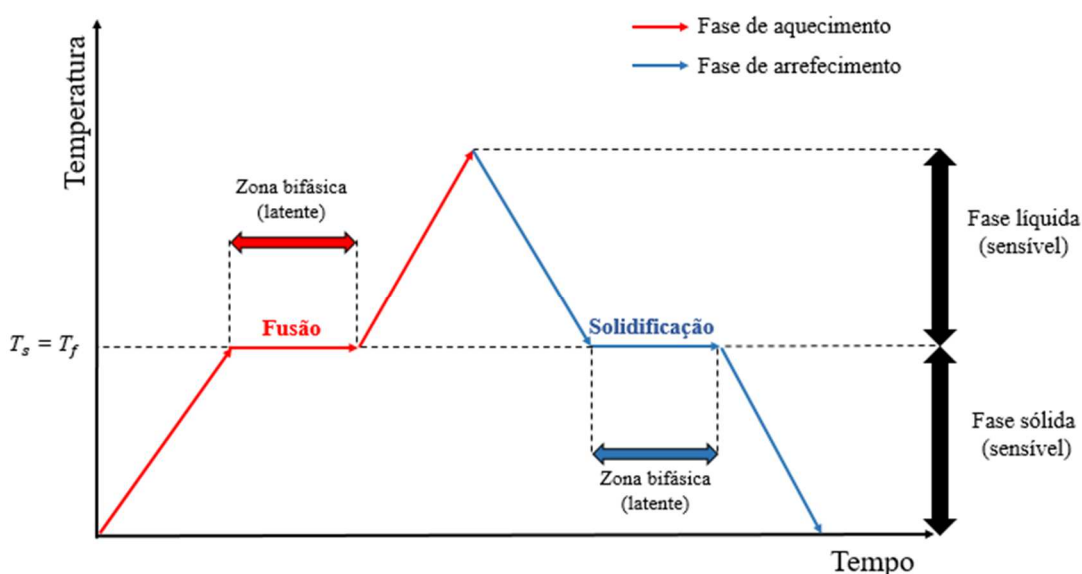
### 1.1. Enquadramento

Um painel fotovoltaico (PV, do inglês *Photovoltaic*) converte, tipicamente, cerca de 6 a 20 % da radiação solar incidente em energia elétrica, dependendo do tipo de células solares utilizadas e das condições climáticas existentes. Os restantes 80 a 94 % da radiação incidente são convertidos em calor, podendo aumentar significativamente a temperatura do módulo e reduzir a sua eficiência [3]. As células fotovoltaicas mais comuns são constituídas maioritariamente por silício, um material abundante na crosta terrestre. De acordo com Hasan *et al.* [4], os sistemas PV formados por células de silício cristalino apresentam uma redução da sua eficiência entre os 0.4 %. $^{\circ}\text{C}^{-1}$  e 0.65 %. $^{\circ}\text{C}^{-1}$ , quando operam a uma temperatura superior a 25  $^{\circ}\text{C}$ . Podem referir-se várias estratégias para prevenir o sobreaquecimento dos sistemas PV, tais como a circulação natural/forçada de ar, a refrigeração hidráulica e a refrigeração termoelétrica. Contudo, estas técnicas mais comuns apresentam alguns inconvenientes, tais como o elevado custo inicial e de manutenção, e as baixas taxas de transferência de calor verificadas [4].

Nos últimos anos, vários autores têm proposto a utilização de PCMs para a termorregulação de PVs [4-9]. Segundo Hyun *et al.* [10], um PCM é um material caracterizado por um elevado calor latente de fusão e uma temperatura de transição de fase conhecida e próxima do campo de aplicação pretendido. Em particular, no caso de um PV, se o PCM selecionado for capaz de reduzir as suas temperaturas de operação, a eficiência da conversão de energia solar para energia elétrica pode ser melhorada. Das várias técnicas para a incorporação de PCMs em sistemas PV, destaca-se a incorporação de UAE na parte

posterior do sistema. Estas unidades de armazenamento podem ser constituídas, por exemplo, por cavidades metálicas de secção retangular preenchidas com PCMs. Durante a mudança de fase, as UAE contribuirão para a termorregulação do sistema a uma temperatura próxima da temperatura de fusão do PCM, uma vez que o processo é aproximadamente isotérmico.

O funcionamento teórico de um sistema com PCMs é de fácil compreensão e está representado na Figura 1.1. Durante o período diurno, quando é atingida a temperatura de fusão do PCM, o material muda de fase (de sólido para líquido) absorvendo calor latente. Este período é chamado de fase de aquecimento ou de carga (acumulação de energia). Com a diminuição da temperatura, e quando o PCM atinge a temperatura de solidificação, é iniciada a fase de arrefecimento ou de descarga. Desta vez, o PCM solidifica e a energia térmica acumulada é libertada.



**Figura 1.1** Evolução da temperatura de um PCM ideal durante os ciclos de carga (fusão) e descarga (solidificação).

Nos últimos anos, a colocação de painéis PV na envolvente dos edifícios (BIPV, do inglês *Building-integrated photovoltaics*) e o conceito de painel térmico fotovoltaico (PV/T), que combina os benefícios de um coletor térmico e de um painel PV, têm sido alvo de muita investigação. A incorporação de PCMs nestes sistemas pode trazer várias vantagens. Desde logo, ao absorver calor durante a fase de aquecimento, ajuda a manter uma temperatura ótima de operação da placa fotovoltaica, minimizando a redução de eficiência. Durante a fase de



arrefecimento, à medida que a temperatura do painel diminui, a solidificação do PCM pode, por exemplo, fornecer calor suplementar ao edifício, no caso de um BIPV, ou permitir o pré-aquecimento de água ou de qualquer fluido circulante que faça parte do sistema integrado PV/T/PCM.

De acordo com Sharma *et al.* [11], alguns PCMs são capazes de armazenar cerca de 5 a 14 vezes mais energia térmica por unidade de volume do que os materiais geralmente utilizados para armazenar calor sensível, entre os quais se destacam a água, as paredes de alvenaria e o betão. O potencial dos PCMs é, portanto, elevadíssimo. Contudo, a criação de um modelo numérico que reproduza os fenómenos de transferência de calor envolvidos, tanto durante a fusão como na solidificação, tem-se manifestado bastante desafiante.

A grande dificuldade no estudo numérico da transferência de calor em cavidades retangulares preenchidas com PCMs surge no facto de a mudança de fase não ser iniciada uniformemente em todas as zonas do material, isto é, existe uma fronteira móvel de natureza não-linear que acompanha a mudança de fase (frente de fusão), onde as condições de conservação de massa, quantidade de movimento e energia devem ser satisfeitas. Na literatura, a fronteira móvel sólido-líquido é conhecida como “Problema de Stefan” e a sua propagação depende da velocidade a que o calor latente é absorvido ou dissipado [12]. Deve referir-se que os PCMs, particularmente as parafinas, apresentam uma baixa condutibilidade térmica, o que pode condicionar a transferência de calor durante um ciclo de carga/descarga. Várias técnicas podem ser usadas para aumentar a transferência de calor para o PCM, nomeadamente a incorporação de alhetas metálicas no seio dos PCMs.

Vários autores têm vindo a desenvolver procedimentos experimentais para avaliar a transferência de calor com mudança de fase através de cavidades retangulares preenchidas com PCMs [1,2]. Estes resultados experimentais podem posteriormente ser utilizados na validação de resultados numéricos. Tipicamente, existem algumas limitações experimentais que dificultam uma completa interpretação dos resultados, tais como o facto de a mudança de fase não ser visualizada (dada a natureza opaca do material usado como contentor) e o facto de alguma instrumentação requerida ser intrusiva, o que, no caso dos PCMs livres, pode afetar as correntes de convecção e a forma como o PCM solidifica nas cavidades.

De modo a garantir a consistência do método numérico a ser desenvolvido nesta tese, é necessária a sua validação através de resultados experimentais. Estando o modelo validado, este pode ser usado na avaliação de diferentes configurações para uma UAE com PCMs que

possa ser usada para a termorregulação de sistemas fotovoltaicos. Para o efeito, serão usados resultados experimentais previamente obtidos numa campanha experimental desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Coimbra (UC) por Soares *et al.* [1,2].

Esta tese é desenvolvida no âmbito do projeto "PCMs4Buildings" - *Sistemas com cavidades retangulares com materiais de mudança de fase para o aproveitamento de energia solar térmica em edifícios*, ref. POCI-01-0145-FEDER-016750 (FEDER) | PTDC/EMS-ENE/6079/2014 (FCT), cofinanciado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização - COMPETE 2020 e por Fundos Nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

## 1.2. Motivação

Como foi referido anteriormente, este trabalho surge no seguimento da criação de uma instalação experimental no Laboratório de Climatização e Ambiente do DEM-UC, destinada ao estudo bidimensional da transferência de calor com mudança de fase sólido-líquido através de cavidades de secção retangular preenchidas com diferentes tipos de PCMs – PCMs livres e PCMs microencapsulados [1][2]. Os PCMs livres referem-se a parafinas, em que a única forma de confinamento para evitar fugas de material líquido é a própria cavidade metálica usada como contentor. Nos PCMs microencapsulados, o PCM é revestido por uma microcápsula polimérica de reduzida dimensão, impossibilitando a criação de correntes de convecção no interior da cápsula. Nesta tese, pretende-se modelar numericamente um sistema idêntico ao avaliado experimentalmente por Soares *et al.* [1,2], tendo como finalidade a otimização de uma UAE que possa ser usada na termorregulação de um painel PV, por forma a aumentar a sua eficiência. Serão apenas avaliadas unidades preenchidas com PCMs microencapsulados. Aliado ao interesse científico do tema, o autor sentiu-se particularmente motivado devido à utilidade do código desenvolvido para futuras simulações realizadas em qualquer sistema que tenha um PCM microencapsulado como material constituinte.

### 1.3. Objetivos do trabalho

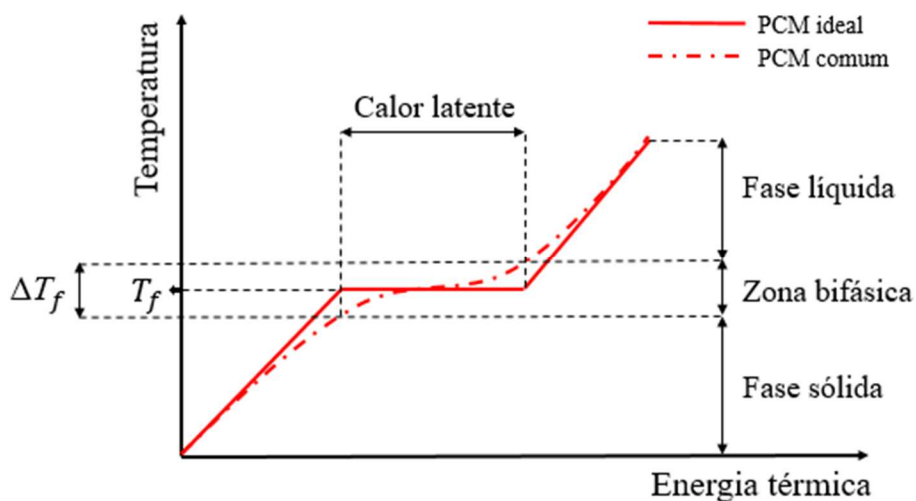
Pretende-se desenvolver, validar e testar um modelo numérico capaz de reproduzir o comportamento térmico de uma UAE em regime transiente, com mudança de fase sólido-líquido, numa cavidade de secção retangular preenchida com PCMs microencapsulados (modelo puramente difusivo). Será analisada a transferência de calor durante as fases de carga e de descarga para a determinação dos campos de temperatura e de fração fundida de PCM em todo o domínio de cálculo. Os resultados experimentais obtidos por Soares *et al.* [1,2] serão utilizados para validar e calibrar o modelo numérico. Outro objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de uma UAE que possa ser usada na termorregulação de um sistema PV. Pretende-se simular o comportamento térmico de um sistema PV/PCM e perceber em que medida o modelo proposto pode ser adequado para avaliar de que forma os PCMs podem contribuir para aumentar a eficiência de conversão de energia.

### 1.4. Revisão Bibliográfica

#### 1.4.1. PCMs

Como foi referido anteriormente, os PCMs são materiais que satisfazem duas condições: (i) elevado calor latente de fusão e (ii) mudança de fase sólido-líquido aproximadamente isotérmica, a uma temperatura conhecida. Contrariamente aos materiais ditos "sensíveis", que apenas armazenam calor sensível, os PCMs conseguem armazenar maiores quantidades de energia, devido ao calor latente envolvido na mudança de fase do material. As diferentes fases de um processo de carga de um PCM puro/ideal e não-puro (como é o caso das misturas parafínicas) estão representadas na Figura 1.2. Note-se que, no caso de PCMs não-puros, a mudança de fase não é isotérmica. Esta ocorre num intervalo de temperatura  $\Delta T_f$ .

A literatura relativa ao estudo dos PCMs é extensa (*e.g.*, [10-17]). Seguidamente serão revistos alguns tópicos como a classificação dos PCMs, as suas principais propriedades termofísicas, diferentes modos de confinamento para evitar fugas de material líquido, e a problemática dos efeitos da corrosão em contentores metálicos.



**Figura 1.2** Comparação das curvas temperatura-armazenamento de energia térmica para PCMs ideais e comuns, durante a fase de aquecimento.

### 1.4.2. Classificação

Os PCMs podem ser agrupados em três grandes grupos: (i) materiais orgânicos; (ii) inorgânicos, e (iii) misturas eutéticas [17]. Na Tabela 1.1 resumem-se algumas das propriedades dos dois primeiros. As parafinas fazem parte do primeiro grupo, sendo caracterizadas por mudanças de fase harmônicas, condutibilidades térmicas baixas e maiores variações de volume durante a mudança de fase. De uma forma geral, as parafinas não danificam o material usado para confinamento devido a efeitos corrosivos [15]. Relativamente ao segundo grupo, os PCMs podem ser divididos em sais hidratados e

**Tabela 1.1** Comparação de diferentes grupos de PCMs (adaptado da ref. [19]).

| Propriedades                                   | Orgânicos     |  | Inorgânicos                 |                |
|--|---------------|--|-----------------------------|----------------|
|  | Parafinas     | Não-parafinas                                | Sais hidratados             | Sais metálicos |
| Calor latente de fusão ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ ) | 200–280       | 90–250                                       | 60–300                      | 25–100         |
| Condutibilidade térmica                        | Muito baixa   | Baixa  | Elevada                     | Muito elevada  |
| Temperatura de fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )    | -20–100       | 5–120  | 0–100                       | 150–800        |
| Alteração de volume após mudança de fase       | Média         | Reduzida                                     | Reduzida                    | Reduzida       |
| Corrosão                                       | Não corrosivo | Médio corrosivo                              | Corrosivo                   | Corrosivo      |
| Custo  | \$\$-         | \$\$\$-\$\$\$\$                              | \$\$-                       | \$\$-\$\$\$    |
| Estabilidade térmica                           | Estável       | Alguma instabilidade a elevadas temperaturas | Instável após alguns ciclos | Estável        |
| Peso   | Médio         | Médio  | Leve                        | Pesado         |

metálicos. Os PCMs inorgânicos apresentam geralmente maior condutibilidade térmica e pontos de fusão mais precisos [10]. Contudo, alguns problemas associados à corrosão podem ser apontados. Por fim, as misturas eutéticas são formadas por dois ou mais compostos, sendo combinações dos dois grupos anteriores. Informação mais detalhada sobre cada um dos grupos identificados pode ser consultada nas refs. [11,15,16,18].

### **1.4.3. Principais propriedades termofísicas**

O número de substâncias alvo de investigação como potenciais PCMs é enorme; porém, apenas algumas foram comercializadas como tal. Numa situação ideal, um PCM deve apresentar as seguintes características [17]:

- elevados calor específico e calor latente, para um maior armazenamento de energia;
- elevada massa volúmica, garantindo um bom armazenamento por unidade de volume e poupança de material;
- temperatura de fusão dentro da gama de operação pretendida;
- elevada condutibilidade térmica para promover a transmissão de calor;
- mudança de fase congruente, sem subarrefecimento e rápida recristalização;
- variação de volume reduzida associada à mudança de fase;
- baixo custo e de fácil obtenção;
- estável quimicamente, sem riscos de corrosão, inflamabilidade e toxicidade;
- propriedades termofísicas estáveis após sucessivos ciclos de carga e descarga.

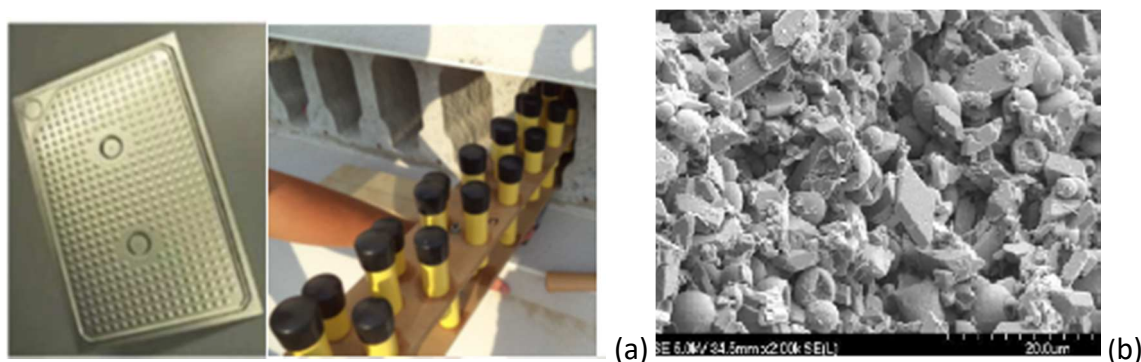
O principal problema dos PCMs que operam a temperaturas próximas da temperatura de conforto térmico reside na sua baixa condutibilidade térmica, na ordem dos  $0.2$  e  $0.7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , que implicará uma transferência de calor lenta [20]. Este “problema” transformar-se-ia numa vantagem nos casos em que os PCMs estivessem a funcionar como isolantes térmicos. Contudo, sendo o objetivo primordial o armazenamento de energia numa UAE térmica, o tempo necessário para o armazenamento e restituição de energia é crucial para a *performance* do sistema. Deve referir-se que o desempenho de armazenamento/restituição de energia só é devidamente aproveitado quando a massa de PCM for totalmente fundida e/ou solidificada durante os períodos de carga e de descarga, respetivamente. Assim, a baixa condutibilidade térmica dos PCMs deve ser compensada. A forma mais comum de superar esta questão consiste na utilização de materiais de elevada condutibilidade térmica em zonas

interiores do próprio domínio do PCM, dividindo-o em várias porções, e aumentando a taxa de transferência de calor ao funcionarem como alhetas. Um exemplo desta estratégia encontra-se descrito num artigo de Soares *et al.* [2]. O valor da condutibilidade pode também ser melhorado através da inserção de aditivos com elevado valor de  $k$  no seio do PCM. Os aditivos normalmente usados são a fibra de carbono, pó de grafite, grafeno e sais de metal [21].

A incerteza associada às principais propriedades termofísicas dos PCMs fornecidas pelas empresas que comercializam os PCMs (calor latente de fusão, calor específico das fases sólida e líquida e gama de temperaturas de mudança de fase) é considerável. Desta forma, a calorimetria diferencial de varrimento (DSC, do inglês “*Differential Scanning Calorimetry*”) e o método T-History são as duas técnicas mais usadas para obter as principais propriedades termofísicas dos PCMs.

#### 1.4.4. Encapsulamento e Corrosão

O macroencapsulamento (Figura 1.3a) consiste na utilização de um recipiente, de uma qualquer forma geométrica (esférica, tubular, prismática, entre outras), para a contenção do PCM no seu estado livre (ou eventualmente microencapsulado). Esta é a técnica mais vulgar de confinamento, sendo importante salientar que o material do recipiente deve apresentar boas propriedades condutoras, de acordo com o discutido anteriormente. Adicionalmente, é também necessário prever a possível variação volumétrica do PCM durante a mudança de fase, e a variação da pressão associada. No macroencapsulamento, os PCMs livres podem mover-se livremente no interior da cavidade devido à convecção natural.



**Figura 1.3** Encapsulamento de PCMs: (a) Macrocápsula retangular e tubular (adaptado de [22]); (b) Fotografia obtida por “Microscopia eletrónica de varrimento” de uma parede de betão que contém PCM microencapsulado [14].

Por outro lado, o microencapsulamento assenta no uso de cápsulas poliméricas de reduzida dimensão (diâmetro inferior a 1 mm), contendo cada uma delas uma pequena porção de PCM. Esta técnica é estudada detalhadamente em vários artigos [14,16,23], sendo referidas como principais vantagens o aumento da estabilidade e da transferência de calor. Ao mesmo tempo, as menores de forças de pressão no interior da macrocápsula (as pequenas variações volumétricas podem ser suportadas pela natureza das microcápsulas e pelos espaços de ar inter-microcápsulas), a redução do potencial de fugas de material líquido, e a compatibilidade dos PCMs microencapsulados com outros materiais de construção, tornam a microencapsulação indicada para o setor da construção. Em relação aos inconvenientes, revela-se o facto de a energia latente acumulada ser consideravelmente inferior à dos PCMs livres e o seu elevado custo. Nos PCMs microencapsulados pode desprezar-se o efeito da convecção natural na fase líquida.

Kuznik *et al.* [14] descrevem mais duas técnicas para a incorporação de PCMs num dado material: (i) a simples impregnação do PCM em materiais porosos, como o betão ou o gesso e, (ii) a formação de um PCM geometricamente estável (do inglês *Shape Stabilized PCM*) gerado a partir do arrefecimento de uma mistura líquida, composta pelo PCM e por um material de suporte, até que se atinja o seu ponto de transição vítrea.

A corrosão do recetáculo (geralmente metálico) que confina o PCM é também um fator importante para a correta incorporação de PCMs em sistemas de armazenamento de energia. Ferrer *et al.* [24] estudaram a aplicabilidade de cinco metais relativamente a quatro tipos de PCMs (uma mistura inorgânica, um PCM orgânico e dois ácidos gordos eutéticos). Após a imersão de amostras destes metais nos PCMs fundidos, foram analisados eventuais sinais de degradação ao longo de 12 semanas. Concluiu-se que apenas o composto orgânico era adequado para qualquer tipo de metal. Assim, percebe-se que a escolha do PCM deve ser precedida de uma verificação cuidada, garantindo níveis de corrosão insignificantes durante vários ciclos de carga/descarga.

#### **1.4.5. Revisão de estudos numéricos e experimentais**

Os modelos numéricos e experimentais sugeridos na maior parte da literatura para avaliar a transferência de calor com mudança de fase sólido-líquido em cavidades retangulares são desenvolvidos segundo duas direções: (i) orientação vertical das cavidades em que as superfícies aquecidas/arrefecidas são as paredes verticais da cavidade – fluxo de calor

horizontal; (ii) direção horizontal das cavidades em que as superfícies aquecidas/arrefecidas são a base e/ou o topo da cavidade – fluxo de calor ascendente ou descendente.

Soares *et al.* [1] avaliaram experimentalmente a transferência de calor com mudança de fase sólido-líquido através de cavidades retangulares empilhadas verticalmente e preenchidas diferentes tipos de PCMs, livres e microencapsulados, considerando as paredes verticais aquecidas/arrefecidas. Durante a fase de aquecimento dos PCMs livres verificou-se que, inicialmente, a condução é o processo de transmissão de calor dominante. Contudo, a partir de um determinado momento, a convecção natural assume um papel determinante na transferência de calor. Relativamente à fase de arrefecimento verificou-se que a transferência de calor no PCM é predominantemente por condução. Nesta fase, foi ainda comprovada a existência de subarrefecimento no PCM, responsável pela necessidade de arrefecer o material a uma temperatura ligeiramente inferior à de mudança de fase para se iniciar a sua solidificação (Figura 1.4a). Conforme se esquematiza na Figura 1.4b, o subarrefecimento pode ser responsável pela histerese da curva de evolução da entalpia com a variação da temperatura. Neste caso, o material apresenta um comportamento diferente durante as fases de carga e de descarga, podendo haver uma diferença entre as temperaturas de fusão e de solidificação. No caso dos PCMs microencapsulados, Soares *et al.* [1] verificaram que a condução é o processo de transmissão de calor dominante, quer na fase de carga, quer na descarga.

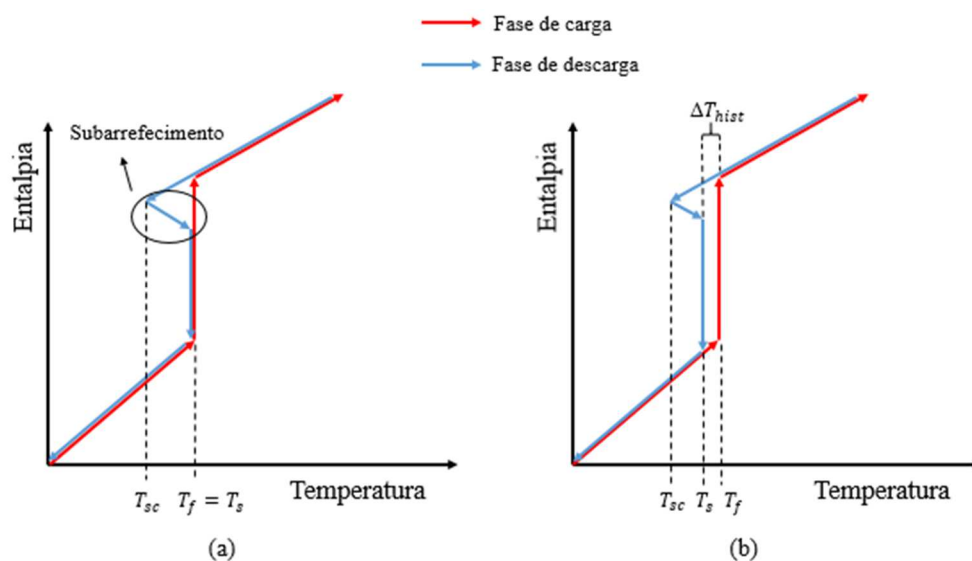
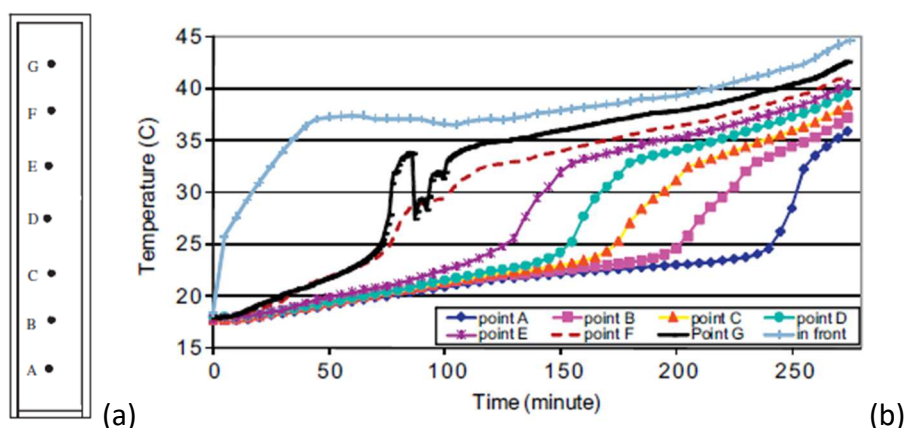


Figura 1.4 Representação esquemática do fenómeno de subarrefecimento: (a) sem histerese; (b) com histerese.



Soares *et al.* [2] avaliaram também a influência do fator de forma e do número de cavidades presentes numa UAE vertical, de altura fixa. À medida que se aumentou o número de cavidades retangulares, verificou-se uma diminuição no tempo necessário para completar a fusão do PCM livre, devido à elevada condutibilidade térmica do alumínio nas alhetas. Verificou-se ainda uma menor estratificação térmica no seio do PCM. Ou seja, o efeito da convecção natural é tanto menor quanto maior for o número de cavidades considerado e, assim, quanto menor for a sua altura. Em relação ao processo de descarga, concluiu-se que um maior número de cavidades realça o efeito de subarrefecimento, ao diminuir a temperatura necessária para se iniciar a cristalização e ao aumentar o intervalo temporal durante o qual o fenómeno ocorre.

Huang *et al.* [7] também desenvolveram uma instalação experimental para avaliar o efeito do número de alhetas em cavidades retangulares preenchidas com PCMs livres. De novo, a presença da convecção natural no processo de carga foi notória, sendo as camadas superiores de material as primeiras a fundir, como se depreende da Figura 1.5. Verificou-se também uma redução da influência da convecção natural com o aumento do número de alhetas, particularmente através da diminuição do número de Rayleigh. Contudo, o aumento do número de alhetas diminui o período de termorregulação obtido. Outra desvantagem da adição de alhetas consiste no aumento do peso da estrutura, facto que pode limitar a sua utilização em certas aplicações.

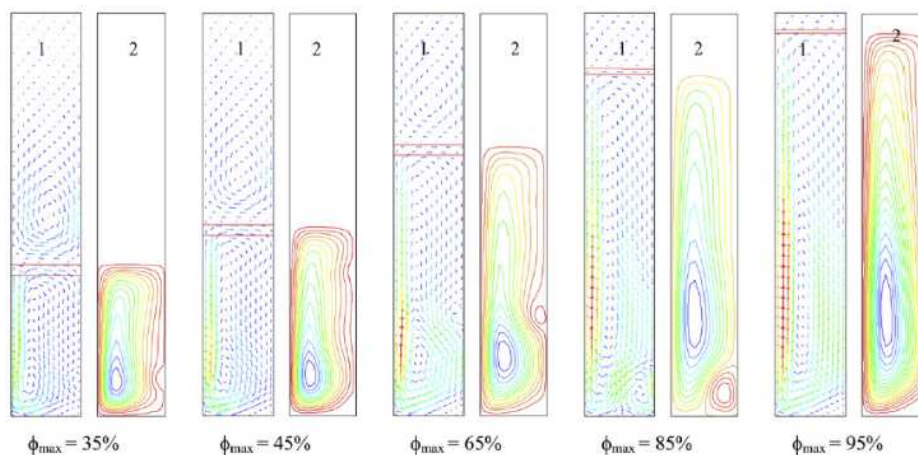


**Figura 1.5** (a) Localização dos termopares no plano central da secção da cavidade retangular; (b) Evolução temporal da temperatura nos pontos monitorizados (adaptado de [7]).

A inserção de alhetas metálicas no seio dos PCMs aumenta a taxa de transferência de calor por condução; porém, a redução da quantidade de PCM no sistema devido ao aumento do volume de material metálico reduz a potencial quantidade de energia armazenada/restituída durante um ciclo completo de carga/descarga. Para além disso, a inserção de alhetas afeta negativamente o período de termorregulação obtido. De forma a solucionar este problema, Huang *et al.* [25] testaram diferentes combinações de PCMs em cavidades triangulares e semicirculares, para aplicação num painel PV. Foram testadas 5 combinações distintas, sendo que os melhores resultados foram obtidos para a combinação dos PCMs RT21-RT27. Relativamente à influência da forma das cavidades na produção de energia elétrica, não foram detetadas diferenças significativas.

Libeer *et al.* [26] avaliaram experimentalmente a importância da convecção natural no período de fusão de um PCM livre em cavidades retangulares. De modo a reproduzir a fase de aquecimento, os autores estabeleceram uma fronteira isotérmica fria a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e outra quente a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para uma temperatura inicial do PCM de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os testes foram realizados impondo a transferência de calor mediante 3 direções: (i) sentido ascendente, (ii) da esquerda para a direita e, (iii) sentido descendente. Paralelamente, foi desenvolvido um modelo bidimensional em FORTRAN, baseado no *método da entalpia*, para simular o processo transiente de mudança de fase. Concluiu-se que o tempo necessário para fundir o PCM é muito mais longo quando este é aquecido a partir de cima, devido ao menor efeito da convecção natural.

Ye *et al.* [27] realizaram testes numéricos e experimentais com o objetivo de estudar a influência da expansão volumétrica durante a mudança de fase de PCMs em cavidades retangulares verticais. Foram simuladas cavidades preenchidas por diferentes frações de volume de PCM, entre os 35 e os 95%, seguindo-se uma interpretação dos campos de temperatura e velocidade obtidos (Figura 1.6). Além disso, parâmetros como a taxa de expansão volumétrica, o tempo total de armazenamento térmico e a fração fundida foram também avaliados no estudo numérico. Registou-se um aumento da transmissão de calor por convecção natural com o aumento de volume de PCM nas cavidades, devido à maior massa de PCM fundida próxima das superfícies quentes. Por fim, concluiu-se também que a taxa de expansão diminuiu com o aumento do volume de PCM, enquanto que o tempo para um armazenamento completo aumentou.



**Figura 1.6** (1) Vetores-velocidade e (2) linhas de corrente no final da fase de aquecimento, em cavidades retangulares preenchidas por diferentes frações de volume de PCM (adaptado de [27]).

Com base no exposto anteriormente, o desenvolvimento de um modelo numérico para simular a transferência de calor com mudança de fase sólido-líquido através de cavidades retangulares preenchidas com PCMs deve ter em consideração os seguintes fenômenos:

- variação das propriedades termofísicas do PCM com a variação da temperatura;
- subarrefecimento;
- histerese;
- convecção natural na fase fundida e variações de volume (no caso dos PCMs livres).

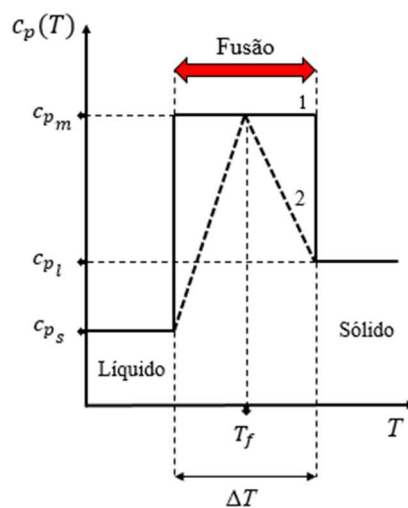
De um modo geral, qualquer que seja o método de resolução numérica escolhido (elementos finitos, diferenças finitas ou volumes finitos), é adotada uma das seguintes abordagens para simular a mudança de fase:

- *Método da entalpia* (em inglês, *enthalpy-method*)
- *Método da capacidade calorífica equivalente* (do inglês, *effective-heat capacity method*).

Utilizado por vários autores, o primeiro método introduz o calor latente de fusão através da variação da entalpia do PCM, ao longo do intervalo de temperaturas no qual ocorre a mudança de fase. Desta forma, a equação de conservação de energia é formulada considerando a entalpia como variável dependente principal. Para PCMs puros, o conhecimento do calor latente de fusão pode ser suficiente para a resolução da equação de

energia. Contudo, para PCMs não puros, a solução desta equação requer o conhecimento da variação da entalpia e da condutibilidade térmica com a temperatura,  $H(T)$  e  $k(T)$ , respetivamente. De salientar ainda que, conforme analisado anteriormente, a curva de  $H(T)$  pode ser distinta para a fusão e solidificação do PCM.

Por outro lado, o segundo método adapta o valor do calor específico do PCM de forma a estimar a energia térmica por ele armazenada/libertada ao longo de todo o intervalo de temperaturas. Resumidamente, o *método da capacidade calorífica equivalente* representa o calor latente do material através de um falso calor sensível, de valor elevado, ao considerar o calor latente de fusão como uma quantidade extra de calor sensível armazenado/restituído no (estrito) intervalo de temperatura em que ocorre a mudança de fase. Como representado nas curvas 1 e 2 da Figura 1.7, esta abordagem atribui à região bifásica um único valor ou uma gama de valores (elevados) de calor específico, respetivamente. Com este método, a temperatura é a variável dependente na equação da energia, e a localização da interface de mudança de fase pode ser determinada posteriormente, quando a distribuição do campo de temperaturas é calculada.



**Figura 1.7** Representação de duas configurações possíveis (1 e 2) do *método da capacidade calorífica equivalente*.

#### 1.4.6. Aplicação em painéis fotovoltaicos (PV)

De entre as aplicações que se podem dar aos PCMs, são frequentemente distinguidos dois grupos: (i) aplicações passivas, e (ii) aplicações ativas. As primeiras referem-se à incorporação de PCMs em sistemas em que a mudança de fase não depende do

funcionamento de nenhum equipamento mecânico. No segundo grupo é necessário o recurso a alguns dispositivos eletromecânicos (por exemplo, bombas hidráulicas, ventiladores, resistências elétricas, etc.) para controlar os ciclos de carga/descarga. Estas aplicações apresentam, por norma, maior eficiência devido ao maior controlo dos processos de carga e de descarga e à menor dependência do seu desempenho relativamente às condições meteorológicas [28].

Os PCMs podem ser incorporados em painéis solares, sistemas de refrigeração, sistemas AVAC, baterias, soluções construtivas da envolvente térmica dos edifícios, reservatórios de água, bombas e permutadores de calor e até mesmo sistemas de purificação de água [29]. Para este trabalho interessa avaliar particularmente as aplicações de PCMs em soluções passivas para aumentar a eficiência de painéis fotovoltaicos.

Hasan *et al.* [4] estudaram a capacidade termorreguladora de 5 PCMs (RT20, C-T, C-P,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  e SP22) com diferentes temperaturas de mudança de fase em quatro sistemas PV com configuração distinta, conforme apresentado na Tabela 1.2 e Figura 1.8. Ao alterar a espessura e o tipo de material envolvente, pretendeu-se avaliar a influência da massa de PCM e das propriedades do material da macrocápsula na redução do sobreaquecimento em cada sistema. A experiência foi conduzida de forma a simular três valores de exposição solar diferentes, 500, 750 e 1000  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . O sal hidratado destacou-se dos restantes PCMs ao apresentar resultados satisfatórios para os três ambientes. Por exemplo, com a irradiação de 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ , foi obtida uma redução de temperatura de 10 °C durante 5 horas. Relativamente aos sistemas PV/PCM, o sistema A revelou ser o mais adequado para os três valores de irradiação. Conclui-se assim que, apesar da menor capacidade para reter o calor no interior do sistema face ao material isolante (Perspex®), a rápida transferência de calor do PV para o PCM é essencial na *performance* destes equipamentos.

**Tabela 1.2** Diferentes configurações dos sistemas PV/PCM considerados por Hasan *et al.* [4].

|  | Sistemas PV/PCM |         |          |         |
|--|-----------------|---------|----------|---------|
|  | A               | B       | C        | D       |
| Material da macrocápsula   | Alumínio        | Perspex | Alumínio | Perspex |
| Condutibilidade térmica ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | 237             | 0.189   | 237      | 0.189   |
| Espessura da camada de PCM (cm)  | 5               | 5       | 3        | 3       |
| Espessura da parede externa (mm)   | 5               | 10      | 5        | 10      |

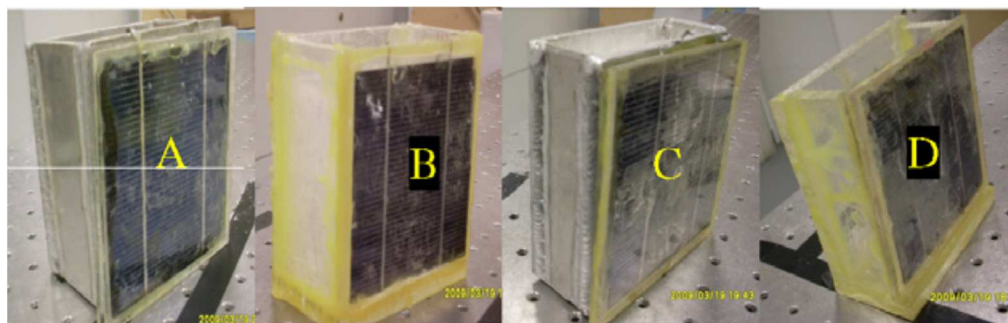
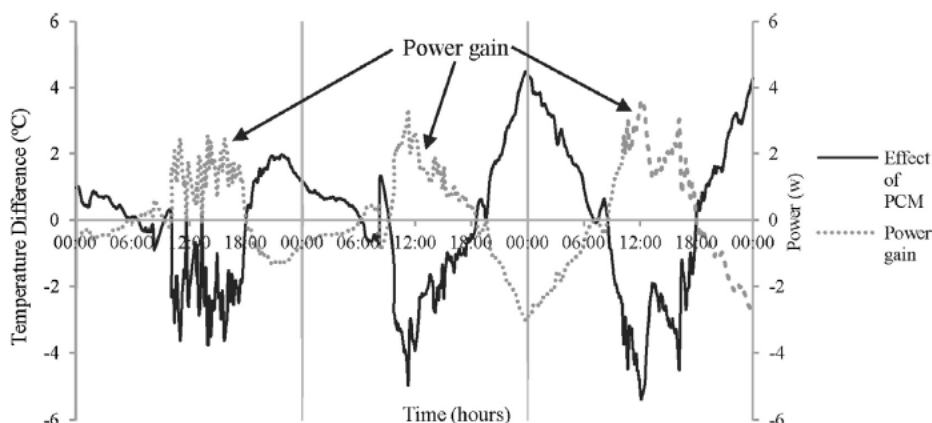


Figura 1.8 Imagem dos sistemas A, B, C e D [4].

Browne *et al.* [6] avaliaram experimentalmente o comportamento de um sistema PV/T/PCM que, além de converter energia solar em energia elétrica, armazena calor e faz o pré-aquecimento de água. O sistema combina um painel PV com um coletor térmico, onde o calor é transferido através de um permutador (com um PCM incorporado) para a água que circula numa tubagem interior ao sistema. De forma a analisar a importância de cada componente, foram analisados quatro sistemas distintos, apresentados na Tabela 1.3. Os testes tiveram lugar em Dublin, Irlanda, e foram realizados ao longo de 3 dias. Comparou-se a *performance* do sistema PV/T/PCM com a *performance* de um sistema semelhante mas sem o PCM. Os resultados apresentados na Figura 1.9 comprovaram a capacidade termorreguladora do PCM. Observa-se também alguma perda de energia elétrica devida ao PCM nos períodos em que não existe exposição solar. Contudo, estas perdas não são significativas uma vez que no período noturno não há produção de energia elétrica. Além disso, através da análise da diferença de temperaturas da água à entrada e à saída dos sistemas 1 e 2, verificou-se que o sistema PV/T/PCM conseguiu extrair 7 vezes mais energia térmica do que o sistema PV/T no último dia. Tal facto é justificado pela acumulação de energia latente durante a fase de aquecimento, sendo a mesma transferida para a água em circulação durante o ciclo de descarga (período noturno).

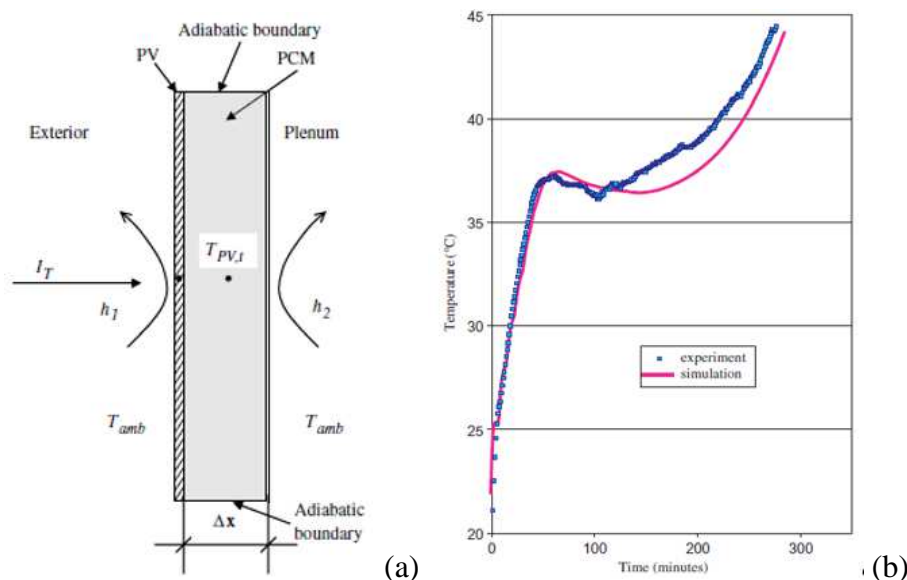
Tabela 1.3 Constituição dos sistemas testados experimentalmente [6].

| Sistema | PCM | Rede de tubagem | Macrocápsula | Painel PV |
|---------|-----|-----------------|--------------|-----------|
| 1       | Sim | Sim             | Sim          | Sim       |
| 2       | Não | Sim             | Sim          | Sim       |
| 3       | Não | Não             | Sim          | Sim       |
| 4       | Não | Não             | Não          | Sim       |



**Figura 1.9** Regulação da temperatura do PV e aumento da sua potência devido à incorporação do PCM. Adaptado da ref. [6].

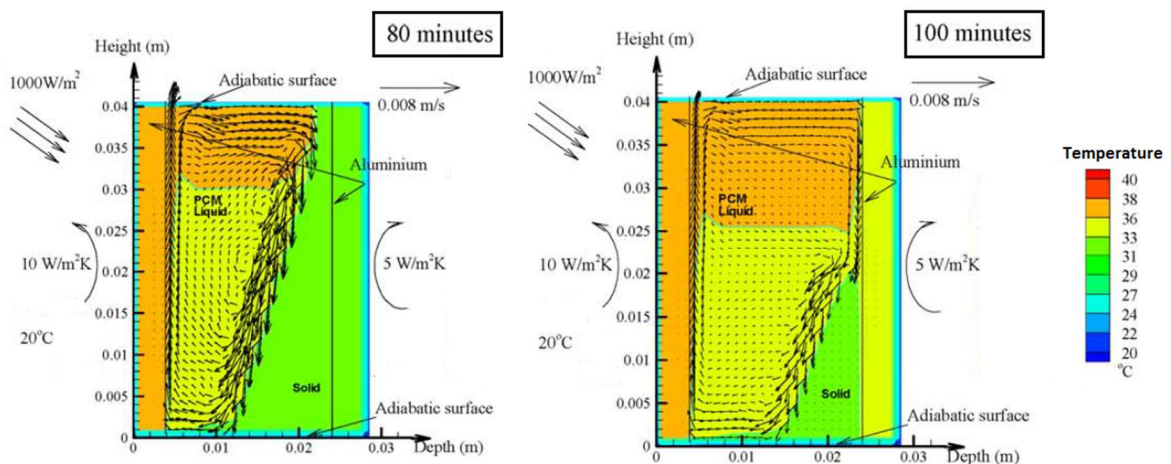
Huang *et al.* [9] estudaram numericamente um sistema PV/PCM com a geometria indicada na Figura 1.10a. O seu comportamento térmico em regime transiente foi analisado resolvendo as equações de conservação da quantidade de movimento e de energia num domínio bidimensional. O modelo foi validado através de ensaios experimentais realizados num sistema idêntico, como evidenciado na Figura 1.10b.



**Figura 1.10** (a) Modelo físico do sistema PV/PCM; (b) Validação dos resultados numéricos: comparação da temperatura medida e prevista numericamente, na superfície do painel PV [9].

De forma similar, duas adaptações do primeiro sistema foram também validadas: (i) um sistema sem o PCM e (ii) um sistema com o PCM e alhetas incorporadas. Duzentos minutos

após o início do ensaio, os resultados mostraram uma redução de  $25^{\circ}\text{C}$  na superfície do PV, no sistema com PCM relativamente ao outro. Através da interpretação dos campos de temperatura e dos vetores-velocidade, para vários instantes, os autores confirmaram a importância da convecção natural durante o ciclo de carga, como se observa na Figura 1.11. Note-se a estratificação térmica resultante da menor densidade do PCM líquido.



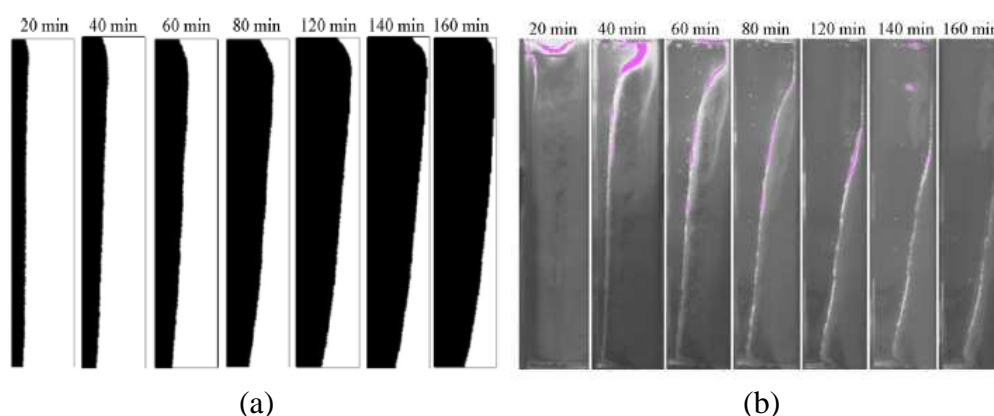
**Figura 1.11** Campo de temperaturas e vetores-velocidade obtidos numericamente, para dois instantes de tempo diferentes [9].

Os autores também avaliaram a influência da altura e profundidade do sistema e a espessura das alhetas (quando existentes). Reproduzindo as mesmas condições do dia 21 de Julho no Sudeste de Inglaterra para 3 dias consecutivos, o melhor comportamento foi obtido para o sistema com 40 mm de altura e 30 mm de profundidade, ao manter a temperatura da superfície do painel sempre abaixo dos  $35^{\circ}\text{C}$ . Para profundidades mais elevadas, o PCM não era todo fundido, resultando num menor aproveitamento do potencial calor latente. De forma a otimizar o sistema PV/PCM, mantendo a temperatura do PV a  $25^{\circ}\text{C}$  (temperatura característica), foi sugerida a utilização de um PCM com temperatura de fusão entre a temperatura ambiente e os  $25^{\circ}\text{C}$ .

Biwole *et al.* [8] investigaram um sistema PV/PCM com a mesma geometria e o mesmo PCM utilizado por Huang *et al.* [9]. No seu estudo numérico, o valor dos coeficientes de convecção e do fluxo de calor incidente na superfície do painel PV foram os mesmos que os considerados na Figura 1.10. A mudança de fase foi modelada através de uma formulação semelhante ao *método da entalpia*. Adicionalmente, o termo das forças de impulsão nas



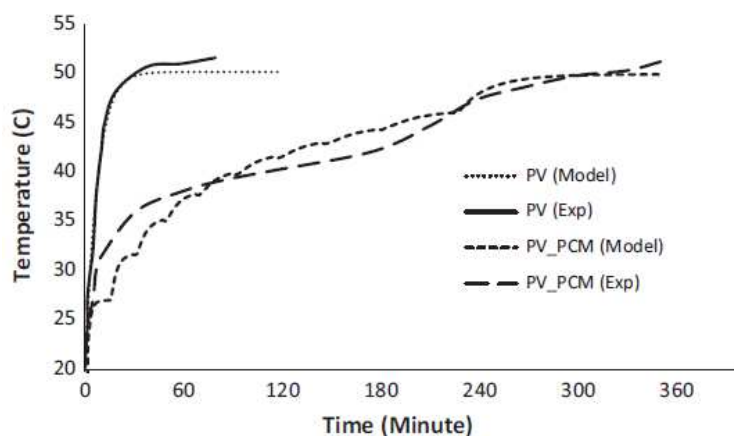
equações da conservação da quantidade de movimento foi modificado, anulando a velocidade localmente quando o PCM está sólido. A validação do método numérico foi baseada numa instalação experimental desenvolvida pelos próprios autores. Comparou-se o campo de velocidades no final do ciclo de carga, e a localização da fronteira móvel para vários instantes temporais, como mostra a Figura 1.12. Para simular a fase de carga, foram impostas temperaturas nas faces laterais da macrocápsula que contém o PCM, utilizando placas de aquecimento. O campo de velocidades experimental foi determinado através do método ótico “Velocimetria por Imagem de Partículas” (do inglês, PIV *Particle Image Velocimetry*). Relativamente à localização da fronteira móvel experimental, foram tiradas fotografias de 20 em 20 minutos. Apesar da boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, a negligência da influência da camada de ar situada acima do PCM (medida de prevenção para acomodar a expansão volumétrica) e da radiação para o “céu frio” constituem limitações do código implementado. Após validação, os autores investigaram a influência do PCM no comportamento térmico do painel PV. Verificou-se que o sistema PV/PCM permitiu registar uma temperatura inferior a 40 °C durante 80 minutos, a uma exposição solar de 1000 W/m<sup>2</sup>. O mesmo sistema sem o PCM e com o mesmo fluxo de calor aplicado, atingiu os 70 °C em menos de 20 minutos.



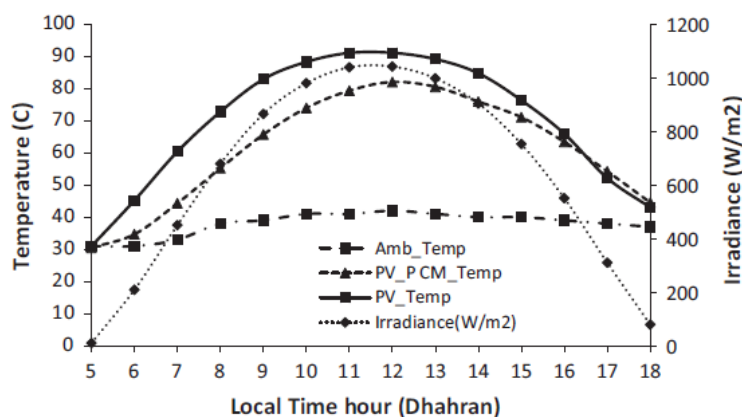
**Figura 1.12** Comparação das evoluções temporais da localização da interface sólido-líquido, (a) segundo a previsão numérica e (b) observada experimentalmente [9].

Kibria *et al.* [5] utilizaram os resultados experimentais obtidos por Hasan *et al.* [4] para validar um modelo numérico unidimensional, em regime transiente, onde não foi considerada a transferência de calor por convecção natural no seio do PCM fundido (Figura 1.13). O método da entalpia foi o escolhido para modelar a mudança de fase. Contrariamente

à grande parte dos artigos publicados sobre esta temática, o estudo desenvolvido tem em conta as várias camadas do sistema PV, atribuindo um maior realismo às suas propriedades. Foram consideradas as trocas de calor por convecção e por radiação com o meio ambiente e com o “céu frio”, respetivamente. Porém, a não consideração do efeito da convecção natural pode ser uma grande limitação do modelo, comprometendo a validação dos resultados numéricos. Os autores sugerem que a incorporação criteriosa de PCMs pode aumentar a eficiência do sistema PV/PCM até cerca de 5%. Por exemplo, para um dia típico de Verão na Arábia Saudita, com temperaturas sempre superiores a 30° C no período diurno, o PCM RT31 (com uma temperatura de fusão de 31° C) pode ser uma boa escolha. O comportamento térmico de dois sistemas PV (com e sem PCM) é mostrado na Figura 1.14. Mais uma vez, é notória a capacidade termorreguladora dos PCMs quando incorporados em sistemas PV.



**Figura 1.13** Evolução temporal da temperatura na superfície do PV, com e sem PCM, obtida por via experimental e numérica [5].



**Figura 1.14** Comparação da evolução temporal da temperatura nos sistemas PV e PV/PCM para as condições climáticas da região de Dhahran, Arabia Saudita [5].

Conforme se pode concluir da revisão bibliográfica, o estudo numérico e experimental da transferência de calor envolvendo a mudança de fase de PCMs constitui um campo bastante ativo de investigação. No que se refere à transferência de calor através de UAE preenchidas com PCMs livres, verifica-se a importante contribuição da convecção natural. Apesar da sua extrema importância, o efeito da convecção natural na mudança de fase dos PCMs livres nem sempre é considerado [5]. No caso das UAE preenchidas com PCMs microencapsulados, o efeito da convecção natural pode ser desprezado, sendo a condução o mecanismo de transferência de calor dominante durante todas as fases do ciclo de carga/descarga.

No capítulo seguinte, é proposto um modelo numérico para simular a transferência de calor com mudança de fase sólido-líquido, que tem em conta a existência de convecção natural no PCM livre fundido. O modelo permite também simular a transferência de calor puramente difusiva no caso dos PCMs microencapsulados. De facto, o modelo será usado para avaliar o comportamento térmico de um sistema PV/PCM que incorpora uma UAE preenchida com PCM microencapsulados. Pretende-se que a mudança de fase possa absorver parte da energia térmica que provoca o aumento da temperatura do painel PV e, deste modo, melhorar a sua eficiência de conversão de energia.

## **1.5. Estrutura da tese**

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, apresentados seguidamente de forma sucinta. No primeiro capítulo, aborda-se o tema em estudo e faz-se uma breve revisão das principais classificações e propriedades termofísicas dos PCMs. Apresenta-se também uma revisão de alguns estudos numéricos e experimentais realizados no âmbito das UAE com PCMs, bem como na sua aplicação em painéis PVs.

O capítulo dois introduz o problema em estudo e o modelo físico considerado. Além disso, descreve-se de forma detalhada o modelo numérico adotado para simular a mudança de fase dos PCMs.

No capítulo três, valida-se o modelo numérico. Realizam-se testes de independência da malha e da discretização temporal considerando, para isso, um modelo unidimensional.

Por fim, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, relativamente à incorporação do PCM em três configurações distintas de uma UAE.

O capítulo quatro é dedicado à aplicação do modelo numérico na avaliação do desempenho de um sistema PV/PCM.

No quinto capítulo, apresenta-se uma síntese final desta dissertação, incluindo sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, expõem-se os Anexos onde se encontram os dois métodos usados para calcular a potência fornecida ao PCM na secção 3.5. Nos Anexos, apresentam-se também os valores calculados da radiação incidente numa superfície inclinada  $35^\circ$  relativamente à horizontal.

## 2. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O problema em estudo e o modelo físico são abordados no presente capítulo. Seguidamente, descreve-se de uma forma pormenorizada o *método da capacidade calorífica equivalente*, para duas geometrias diferentes. Por fim, apresentam-se resumidamente todos os passos necessários para a simulação da transferência de calor em UAE preenchidas com PCMs.

### 2.1. Problema físico

Pretende-se avaliar numericamente a transferência de calor com mudança de fase sólido/líquido, em regime transiente, num domínio retangular referenciado em coordenadas cartesianas (estudo bidimensional). Devido a complexidades imprevistas nos testes de implementação do modelo numérico, não foi possível realizar o estudo numérico da UAE preenchida também com PCMs livres, dentro do tempo disponível para a elaboração desta tese, conforme estava previsto no plano de trabalho inicial. De facto, nesta tese, apenas é avaliada a transferência de calor através de cavidades retangulares de alumínio preenchidas com PCMs microencapsulados – Micronal® DS 5001 X. Conforme se explicou no capítulo anterior, o efeito de convecção natural pode ser desprezado durante a carga/descarga dos PCMs microencapsulados, podendo tratar-se a transferência de calor como um problema puramente difusivo. Algumas propriedades termofísicas do PCM DS 5001 X encontram-se em Soares *et al.* [1,2]. As incertezas associadas a cada uma das propriedades serão usadas futuramente na calibração do modelo, de forma a obter o melhor ajuste entre os resultados numéricos e os resultados experimentais disponíveis. Relativamente aos valores da condutibilidade térmica e da densidade para ambas as fases do PCM (dados fornecidos pelo fabricante), deve referir-se que os valores sugeridos na Tabela 2.1 podem não corresponder à realidade, devido à presença de interstícios preenchidos com ar no interior das cavidades, e às elevadas taxas de compactação a que o PCM esteve sujeito durante os ensaios experimentais. Assim, estes valores terão que ser ajustados durante a validação dos resultados numéricos.

**Tabela 2.1** Propriedades termofísicas do PCM DS 5001 X, medidas experimentalmente.

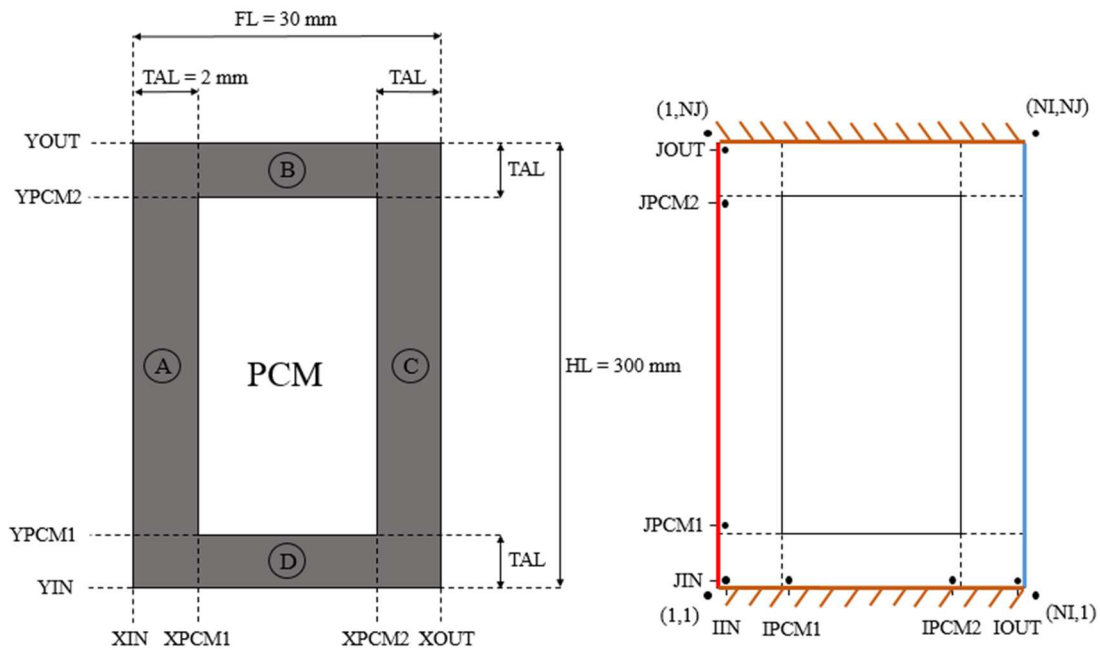
| Propriedades   | Micronal® DS 5001 X   |
|--|-----------------------|
| Temperatura de fusão (°C)  | 25.67 ± 0.07          |
| Temperatura de solidificação (°C)  | 23.56 ± 0.010         |
| Calor específico, fase sólida (J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )        | 1972 ± 276 [5-10 °C]  |
| Calor específico, fase líquida (J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )       | 1547 ± 263 [35-45 °C] |
| Condutibilidade térmica, fase sólida (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )  | 0.24                  |
| Condutibilidade térmica, fase líquida (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> ) | 0.15                  |
| Calor latente (kJ.kg <sup>-1</sup> )   | 115.0 – 142.6         |
| Densidade, para ambas as fases (kg.m <sup>-3</sup> )                         | 995 ± 3.0             |

## 2.2. Modelo físico

A Figura 2.1 representa o domínio de cálculo para o problema proposto. À esquerda, são representadas as coordenadas e as dimensões necessárias para a identificação dos principais nodos do domínio, de acordo com o Método dos Volumes Finitos proposto por Patankar [30]. É também destacado o domínio da macrocápsula de alumínio, assinalado pelos “obstáculos” A, B, C e D, e o domínio do PCM. À direita, são indicados os principais índices e nodos do problema de acordo com a mesma formulação. Apesar da maior precisão oferecida por uma malha variável no tempo (cujo refinamento acompanharia a frente de fusão), será usada uma malha fixa regular, dada a sua maior simplicidade de implementação.

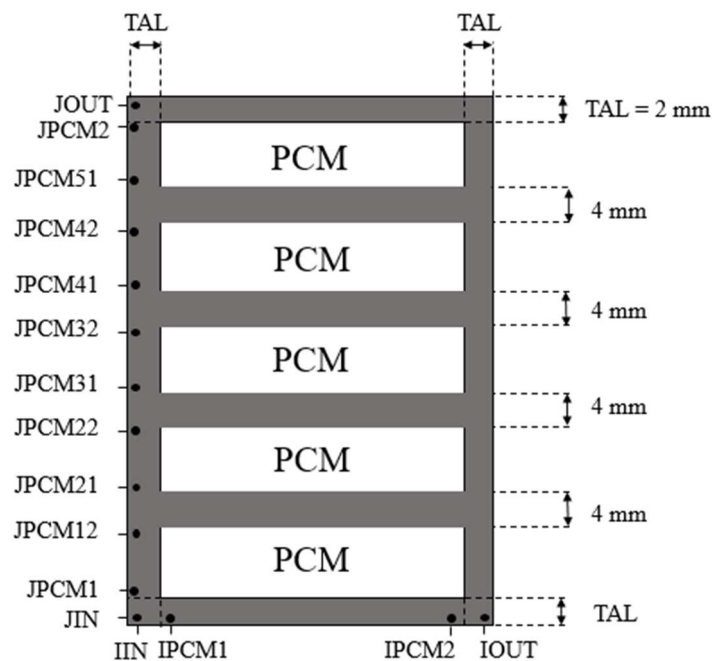
Na Figura 2.1 são também representadas as condições de fronteira impostas: (i) a castanho, encontram-se representadas as fronteiras adiabáticas; (ii) a vermelho, a fronteira quente (fronteira de temperatura conhecida e imposta), e (iii) a azul, a fronteira fria (fronteira de temperatura conhecida e imposta).

De acordo com os ensaios experimentais [1,2], as fases de carga são simuladas através do aquecimento da placa quente (fronteira quente) com potências elétricas constantes de 34 e/ou 68 W. Por outro lado, as fases de descarga decorrem da circulação de água no interior da placa fria (fronteira fria) a uma temperatura de 14 e/ou 20 °C. Através da colocação de termopares em cada superfície, foi medida a evolução das suas temperaturas a cada 30 segundos, tendo por objetivo obter dados experimentais precisos e condições de fronteira bem definidas, que servissem de referência para validação e calibração de modelos de simulação.



**Figura 2.1** Modelo físico considerado para uma UAE com uma só cavidade retangular: dimensões, coordenadas e nodos relevantes.

Serão avaliadas mais duas UAE com as mesmas dimensões globais esquematizadas na Figura 2.1, mas compostas por 5 e 15 cavidades retangulares preenchidas com o PCM microencapsulado (Figura 2.2 para a UAE de 5 cavidades), de forma a avaliar a influência da incorporação de alhetas metálicas na transferência de calor.



**Figura 2.2** Modelo físico da UAE com 5 cavidades retangulares.

### 2.3. Modelo matemático

Como referido anteriormente, o problema da simulação da mudança de fase é difícil devido à não-linearidade da frente de fusão e ao facto de o PCM apresentar propriedades termofísicas diferentes nas duas fases. Como para qualquer fenómeno de transporte de calor e/ou de massa, as equações de conservação podem ser representadas na sua forma genérica, através da *equação geral de conservação* (2.1):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = S_\phi \quad (2.1)$$

onde  $\rho$  é a massa volúmica. O significado físico de  $\Gamma_\phi$  e  $S_\phi$  depende da variável genérica,  $\phi$ , que pode corresponder a diferentes grandezas.

Ao contrário do que aconteceria num PCM livre, para um PCM microencapsulado as equações da continuidade ( $\phi = 1$ ) e da conservação de quantidade de movimento segundo  $x$  ( $\phi = u$ ) e  $y$  ( $\phi = v$ ) não são necessárias. De facto, se o PCM está microencapsulado, não são criadas correntes de convecção no interior da(s) cavidades(s), ficando o problema reduzido a fenómenos puramente difusivos. Assim, o termo advectivo da *equação geral de conservação* pode ser neutralizado. Para o PCM microencapsulado, onde a condução é o único mecanismo de transferência de calor, é então necessário resolver a equação de energia (2.2), na forma:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_H \quad (2.2)$$

onde  $S_H$  representa um termo fonte genérico. De forma a ser aplicável em cada volume de controlo (VC) elementar do domínio, a equação diferencial de conservação de energia (2.2) é integrada e convertida numa equação algébrica linear – equação de discretização (2.3), que relaciona os valores de  $T$  num dado nodo P com os valores de  $T$  nos seus nodos vizinhos:



$$a_P T_P = \sum_{viz} a_{viz} T_{viz} + b \quad (2.3)$$

Note-se que os coeficientes  $a$  representam as condutâncias térmicas entre o nodo central  $P$  e os seus vizinhos, considerando o valor da condutibilidade térmica nas interfaces do VC, por sua vez estimado pela média harmónica dos valores nodais (Patankar [30]). O coeficiente central,  $a_P$ , define-se por:

$$a_P = \sum_{viz} a_{viz} + a_P^0 - S_P \Delta V \quad (2.4)$$

Com  $a_P^0 = \rho c_p^0 \Delta V / \Delta t$ . O chamado termo “independente”,  $b$ , é definido por:

$$b = a_P^0 T_P^0 + S_U \Delta V \quad (2.5)$$

onde  $\Delta V$  é o volume do VC,  $T_P^0$  o valor “velho” de  $T_P$  (conhecido no instante precedente) e  $S_U$  a parte constante do termo fonte linearizado ( $S = S_P T_P + S_U$ ). Deve referir-se que o sistema de equações algébrico resultante, para todos os nodos do domínio, é resolvido por recurso ao algoritmo TDMA [30] (apropriado para sistemas de equações algébricas lineares).

De acordo com o *método da capacidade calorífica equivalente*, o produto de  $\rho$  pelo calor específico,  $c_p$ , é tratado de forma particular, conforme analisado na secção seguinte.

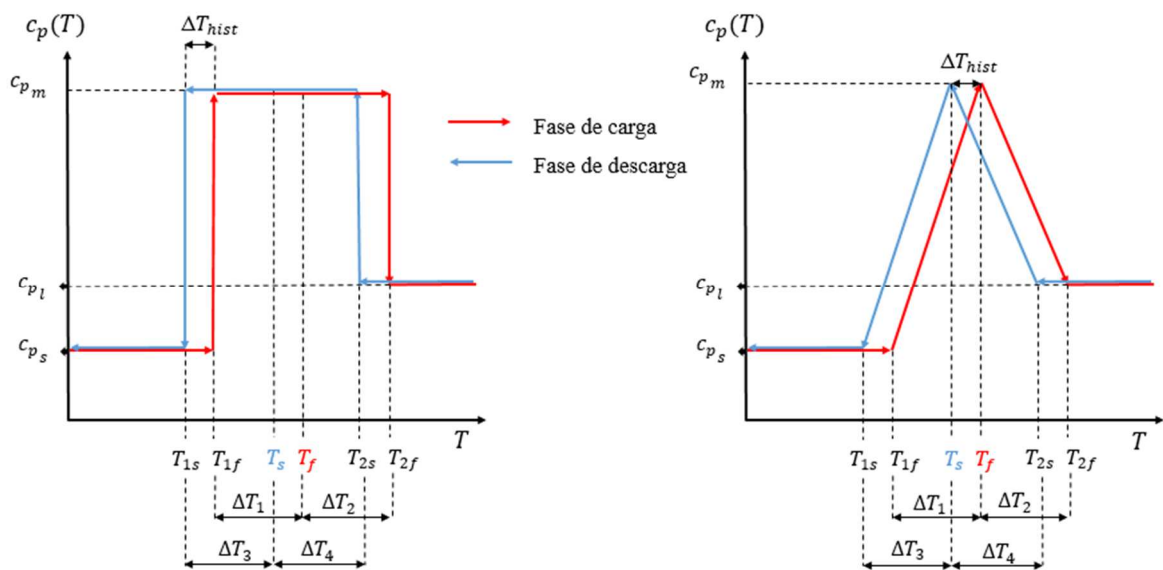
## 2.4. Método da capacidade calorífica equivalente

A capacidade calorífica é uma grandeza que relaciona a quantidade de calor sensível armazenado num corpo e a variação de temperatura que nele ocorre (por unidade de massa ou de volume). Durante a mudança de fase, a quantidade de energia latente absorvida/libertada por um PCM pode ser aproximada à mesma quantidade de energia sensível armazenada/restituída por um material com elevada capacidade calorífica. O conceito base do *método da capacidade calorífica equivalente* é precisamente este: tratar o calor latente da mudança de fase do PCM como se fosse um “falso” calor sensível, aumentando artificialmente o valor da sua capacidade calorífica na gama de temperaturas

onde se dá a mudança de fase. De acordo com o modelo desenvolvido nesta dissertação, foram considerados os seguintes pressupostos:

- as propriedades termofísicas do PCM são diferentes nas duas fases mas constantes em cada uma delas;
- a densidade do PCM é considerada igual nas duas fases;
- existência do fenómeno de histerese ( $T_f \neq T_s$ );
- o PCM funde e solidifica num intervalo de temperaturas, respetivamente,  $\Delta T_f = [T_{1f}, T_{2f}]$  e  $\Delta T_s = [T_{1s}, T_{2s}]$  (Figura 2.3);
- a condutibilidade térmica do PCM varia linearmente com a temperatura, no intervalo de mudança de fase.

A introdução do falso calor sensível no intervalo de mudança de fase permite alguma liberdade na escolha da geometria da curva  $c_p(T)$ . Normalmente, é atribuído um perfil quadrangular ou triangular a esta curva na zona de mudança de fase, como representado na Figura 2.3. Enquanto o primeiro aumenta o valor de  $c_p$  de forma brusca, a curva triangular permite o aumento linear da mesma propriedade até se atingir  $T_f$  ou  $T_s$  e, seguidamente, a diminuição do seu valor até à fase líquida ou sólida, respetivamente.



**Figura 2.3.** Esquema representativo do método da capacidade calorífica equivalente com diferentes perfis: (a) quadrangular; (b) triangular.

Adotando um perfil quadrangular, para a fase de carga do PCM, tem-se que:

$$c_p(T) = \begin{cases} c_{p_s} & ; T \leq T_{1f} \\ c_{p_m} & ; T_f < T < T_{2f} \\ c_{p_l} & ; T \geq T_{2f} \end{cases} \quad (2.6)$$

com,

$$c_{p_m} = \frac{L}{T_{2f} - T_{1f}} + \frac{c_{p_s} + c_{p_l}}{2}; T_{1f} = T_f - \Delta T_1; T_{2f} = T_f + \Delta T_2 \quad (2.7)$$

onde  $L$  representa o calor latente de fusão do PCM. Sendo a capacidade calorífica equivalente,  $C(T)$  [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ], definida como o produto da massa volúmica,  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ], por um calor específico,  $c_p(T)$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ], tem-se que:

$$C(T) = \begin{cases} C_s = \rho_{PCM_s} c_{p_s} & ; T \leq T_{1f} \\ C_m = \frac{\rho_{PCM_s} L}{T_{2f} - T_{1f}} + \frac{C_s + C_l}{2} & ; T_f < T < T_{2f} \\ C_l = \rho_{PCM_l} c_{p_l} & ; T \geq T_{2f} \end{cases} \quad (2.8)$$

onde  $C_s$  e  $C_l$  representam as capacidades caloríficas sensíveis das fases sólida e líquida, respetivamente.

Da mesma forma, para a fase de descarga, tem-se que:

$$C(T) = \begin{cases} C_s = \rho_{PCM_s} c_{p_s} & ; T \leq T_{1s} \\ C_m = \frac{\rho_{PCM_l} L}{T_{2s} - T_{1s}} + \frac{C_s + C_l}{2} & ; T_s < T < T_{2s} \\ C_l = \rho_{PCM_l} c_{p_l} & ; T \geq T_{2s} \end{cases} \quad (2.9)$$

com,

$$T_s = T_f - \Delta T_{hist}; T_{1s} = T_s - \Delta T_3; T_{2s} = T_s + \Delta T_4 \quad (2.10)$$

Por outro lado, considerando um perfil triangular para o  $c_p$  equivalente, na fase de carga do PCM, tem-se:

$$C(T) = \begin{cases} C_s & ; T \leq T_{1f} \\ C_s + \frac{C_m - C_s}{T_f - T_{1f}} (T - T_{1f}) & ; T_{1f} < T \leq T_f \\ C_m + \frac{C_l - C_m}{T_{2f} - T_f} (T - T_f) & ; T_f < T < T_{2f} \\ C_l & ; T \geq T_{2f} \end{cases} \quad (2.11)$$

Da mesma forma, para a fase de descarga, tem-se:

$$C(T) = \begin{cases} C_s & ; T \leq T_{1s} \\ C_s + \frac{C_m - C_s}{T_s - T_{1s}} (T - T_{1s}) & ; T_{1s} < T \leq T_s \\ C_m + \frac{C_l - C_m}{T_{2s} - T_s} (T - T_s) & ; T_s < T < T_{2s} \\ C_l & ; T \geq T_{2s} \end{cases} \quad (2.12)$$

onde  $C_s$ ,  $C_l$  e  $C_m$  têm os mesmo significados que o definido anteriormente.

Através da interpretação das equações expostas, pode concluir-se que o valor da capacidade calorífica equivalente  $C$ , na região de mudança de fase, aumenta com  $L$  e com a redução da gama de temperaturas em que esta ocorre. Comparativamente às capacidades caloríficas sensíveis, o valor de  $C$  na região bifásica pode chegar ser a superior em duas ordens de grandeza. Confrontando as duas curvas da Figura 2.3, é expectável que, para o mesmo intervalo de mudança de fase, a geometria quadrangular simule um fenómeno mais demorado, pois apresenta um valor constante do  $c_p$  equivalente ao longo da mudança de fase, correspondente ao valor máximo do perfil triangular. Por outras palavras, sendo a mesma a definição de  $C_m$ , a energia total necessária para fundir o PCM é maior no perfil quadrangular do que no perfil triangular.

Como referido nos pressupostos anteriores, a condutibilidade térmica varia linearmente com a temperatura, no intervalo de mudança de fase. Esta variação é dependente da fração de sólido e de líquido no domínio de PCM, para um dado intervalo de tempo. Assim, a fração fundida de PCM em cada VC,  $FF(T)$ , deve ser definida no final do cálculo do campo de temperaturas, como se explica na secção seguinte.

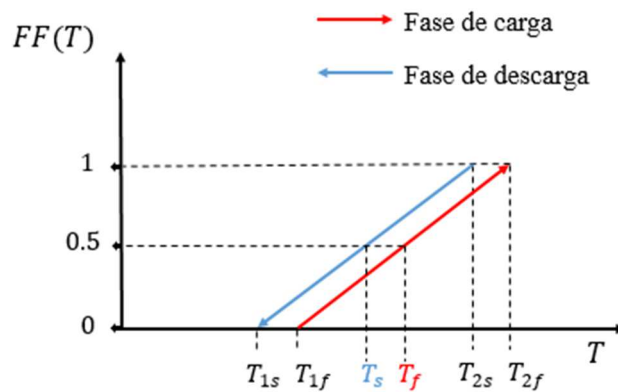
### 2.4.1. Fração fundida de PCM

À medida que se processa a mudança de fase, a fração fundida ( $FF$ ) de PCM evolui linearmente com a temperatura, de acordo com a Figura 2.4. De salientar que, por definição, o momento em que se atinge  $T_f$  ou  $T_s$  corresponde a uma  $FF$  igual a 0.5. Para a fase de aquecimento (fusão) do PCM, pode escrever-se que:

$$FF(T) = \begin{cases} 0 & ; T \leq T_{1f} \\ 0.5 \times \frac{(T - T_{1f})}{(T_f - T_{1f})} & ; T_{1f} < T \leq T_f \\ 0.5 + 0.5 \times \frac{(T - T_f)}{(T_{2f} - T_f)} & ; T_f < T < T_{2f} \\ 1 & ; T \geq T_{2f} \end{cases} \quad (2.13)$$

E, para a fase de arrefecimento (solidificação), tem-se:

$$FF(T) = \begin{cases} 0 & ; T \leq T_{1s} \\ 0.5 \times \frac{(T - T_{1s})}{(T_s - T_{1s})} & ; T_{1s} < T \leq T_s \\ 0.5 + 0.5 \times \frac{(T - T_s)}{(T_{2s} - T_s)} & ; T_s < T < T_{2s} \\ 1 & ; T \geq T_{2s} \end{cases} \quad (2.14)$$



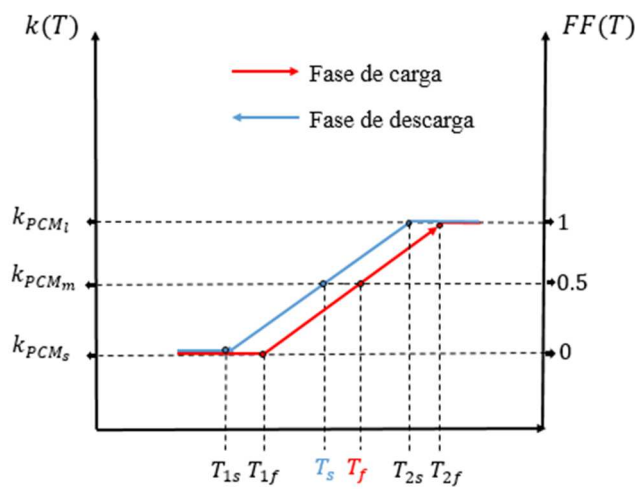
**Figura 2.4** Representação da variação da fração fundida de PCM com a temperatura, durante a fusão e solidificação do PCM.

Note-se que, tal como na definição de  $C$ , o valor local da  $FF$  de PCM depende da temperatura  $T$ . Assim, num algoritmo iterativo, o cálculo da  $FF$  e a atualização das

propriedades termofísicas em cada VC de ser feita após cada atualização do campo de temperatura.

### 2.4.1. Condutibilidade térmica

Para um determinado momento, o valor local da condutibilidade térmica do PCM é função da fração fundida ( $FF$ ) em cada VC. Como  $FF$  varia linearmente com  $T$ , o mesmo resulta para a condutibilidade térmica, como se esquematiza na Figura 2.5.



**Figura 2.5** Representação da variação linear da condutibilidade térmica com a temperatura e fração fundida de PCM, durante a sua fusão e solidificação.

Assim, para a fase de carga, tem-se:

$$k(T) = \begin{cases} k_{PCM_s} & ; T \leq T_{1f} \\ k_{PCM_s} + \frac{(T - T_{1f})}{(T_f - T_{1f})} (k_{PCM_M} - k_{PCM_s}) & ; T_{1f} < T \leq T_f \\ k_{PCM_M} + \frac{(T - T_f)}{(T_{2f} - T_f)} (k_{PCM_l} - k_{PCM_M}) & ; T_f < T < T_{2f} \\ k_{PCM_l} & ; T \geq T_{2f} \end{cases} \quad (2.15)$$

E, para a fase de descarga:

$$k(T) = \begin{cases} k_{PCM_s} & ; T \leq T_{1s} \\ k_{PCM_s} + \frac{(T - T_{1s})}{(T_s - T_{1s})} (k_{PCM_M} - k_{PCM_s}) & ; T_{1s} < T \leq T_s \\ k_{PCM_M} + \frac{(T - T_s)}{(T_{2s} - T_s)} (k_{PCM_l} - k_{PCM_M}) & ; T_s < T < T_{2s} \\ k_{PCM_l} & ; T \geq T_{2s} \end{cases} \quad (2.16)$$

com,

$$k_{PCM_M} = \frac{k_{PCM_s} + k_{PCM_l}}{2} \quad (2.17)$$

## 2.5. Fluxograma

A Figura 2.6 representa o fluxograma do programa de cálculo desenvolvido, no qual se mostram os passos para a determinação do campo de temperaturas ao longo do tempo, partindo das condições iniciais impostas na subrotina INIT. O programa foi formulado em linguagem FORTRAN, funcionando em precisão dupla. Após a definição das condições de fronteira, é determinada a distribuição do campo de temperaturas no domínio (CALCT), calculada a *FF* de PCM em cada VC (CALCF) e, de seguida, são atualizadas as propriedades nos nodos do domínio de PCM (PROPS). É na subrotina PROPS que o *método da capacidade calorífica equivalente* é implementado, sendo calculado o valor de *C* em cada nodo consoante a ocorrência de carga ou descarga do PCM e do valor da *FF* em cada VC. Após atingida a convergência para um dado instante *t*, o programa avança para o instante seguinte,  $t + \Delta t$ , armazenando antes o valor das variáveis calculadas (*T*, *FF* e *C*). As condições de fronteira são atualizadas a cada avanço no tempo, e o processo descrito anteriormente é repetido até ser simulado o período de tempo do processo pretendido.

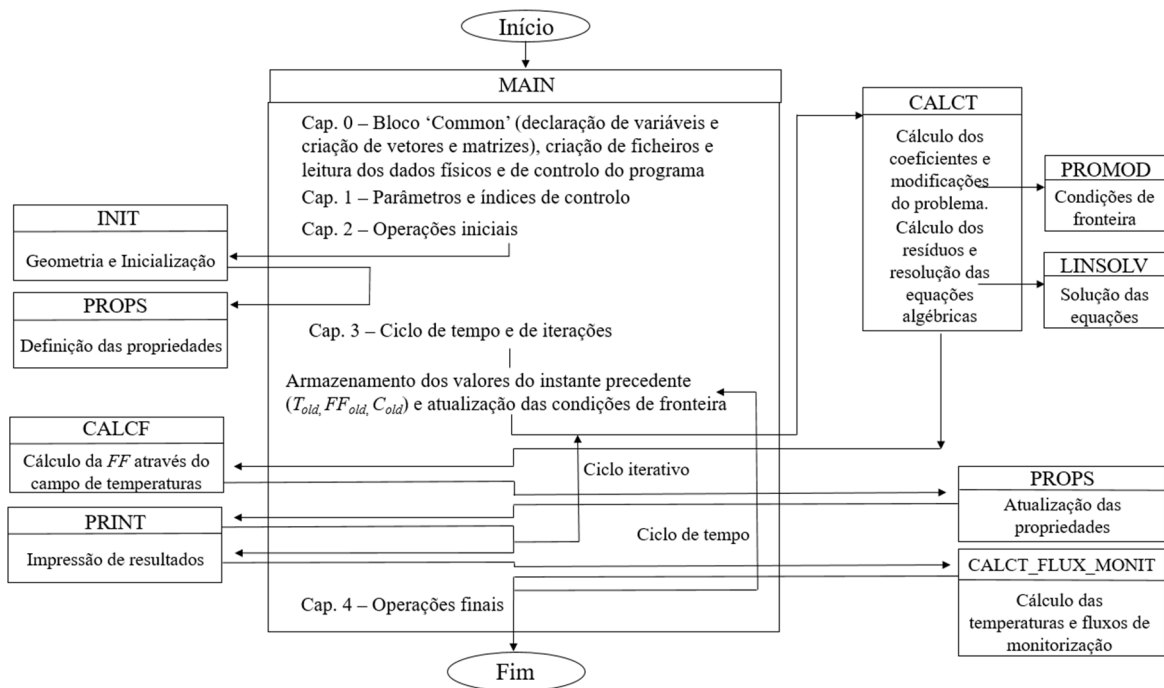


Figura 2.6 Fluxograma do programa de cálculo desenvolvido.

## 2.6. Convergência e subrelaxação

Para cada instante  $t$ , considera-se que a convergência é atingida quando a soma dos valores absolutos dos resíduos das equações de discretização (RESORT, resultante da subrotina CALCT) for inferior a  $5 \times 10^{-4}$ . A normalização dos resíduos é feita considerando o valor máximo de RESORT que ocorre nas cinco primeiras iterações. A velocidade de convergência do método irá, obviamente, ser influenciada pela escolha da malha e da discretização temporal. Desta forma, no capítulo seguinte, será feito um estudo de influência da malha e da discretização temporal nos resultados obtidos.

Quanto à subrelaxação, para as fases de carga/descarga, foi utilizado um coeficiente de 0.995 no cálculo do campo de temperaturas. O facto de ser um problema puramente difusivo torna praticamente inexistente a necessidade de subrelaxação, apesar da não-linearidade inerente à variação com  $T$  da capacidade calorífica equivalente.



### 3. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

No presente capítulo, o modelo descrito anteriormente é validado mediante a comparação dos resultados numéricos obtidos, com os resultados experimentais publicados por Soares *et al.* [1,2], para três casos de estudo. Para a configuração de uma só cavidade vertical, o fluxo de calor é essencialmente unidimensional na maior parte do domínio. Assim, foi usada uma versão unidimensional do modelo para realizar os testes de influência de malha e de discretização temporal, e avaliar a consistência dos resultados obtidos. No modelo 2D, é representada a evolução da temperatura e da *FF* de PCM para as diferentes fases de carga e de descarga. É também avaliada a influência dos perfis triangular e quadrangular do *método da capacidade calorífica equivalente* e calculada a energia armazenada/restituída pelo PCM.

#### 3.1. Casos de estudo

Os testes realizados são divididos em três grupos, conforme o número de cavidades da UAE: (i) uma só cavidade, (ii) 5 e (iii) 15 cavidades. Para cada um dos grupos, são analisadas fases de aquecimento (fusão do PCM) onde a placa quente (fronteira quente) é aquecida com potência elétrica constante de 34 e/ou 68 W, e fases de arrefecimento (solidificação do PCM) quando no interior da placa fria (fronteira fria) circula água à temperatura de 14 e/ou 20 °C [1,2]. Como referido anteriormente, nos ensaios experimentais foram colocados termopares em ambas as fronteiras, tendo sido medida a evolução das suas temperaturas a cada 30 segundos. Deste modo, as evoluções temporais da temperatura na fronteira quente,  $TH(t)$ , e na fronteira fria,  $TC(t)$ , correspondem às condições de fronteira do problema, tanto na fase de carga como na fase de descarga. Importa referir que, tal como nos ensaios experimentais, a temperatura inicial do domínio foi estabelecida a 13 °C, para os processos de carga, e a 55 °C para os de descarga. Os mesmos terminam quando forem atingidas temperaturas de 55 °C, nos testes de carga, e 14 e/ou 20 °C nos de descarga.

### 3.2. Propriedades do PCM e do alumínio

Foram consideradas as propriedades termofísicas listadas na Tabela 3.1. para o PCM Micronal® DS 5001 X. Conforme explicado anteriormente, estes valores encontram-se dentro dos limites indicados na Tabela 2.1 com exceção da densidade e da condutibilidade térmica (pelos motivos indicados na secção 2.1). Como será discutido nas próximas secções, os parâmetros  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $\Delta T_3$  e  $\Delta T_4$  são fundamentais para a aplicação do método descrito no capítulo anterior, e os resultados obtidos são bastante influenciados pelos valores que lhes são atribuídos. Deste modo, foi estabelecido  $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_3 = \Delta T_4 = 2$  °C para todos os casos de estudo.

Para o alumínio, foram consideradas as propriedades indicadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.1** Propriedades do PCM Micronal® DS 5001 X consideradas para o estudo numérico.

| Propriedades   | Micronal® DS 5001 X |
|--|---------------------|
| Temperatura de fusão (°C)  | 25.7                |
| $\Delta T_{\text{hist}}$ (°C)  | 2.0                 |
| Calor específico, fase sólida (J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )        | 2248                |
| Calor específico, fase líquida (J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )       | 1823                |
| Calor latente (kJ.kg <sup>-1</sup> )   | 127                 |
| Densidade, para ambas as fases (kg.m <sup>-3</sup> )                         | 1150                |
| Condutibilidade térmica, fase sólida (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )  | 0.10                |
| Condutibilidade térmica, fase líquida (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> ) | 0.15                |

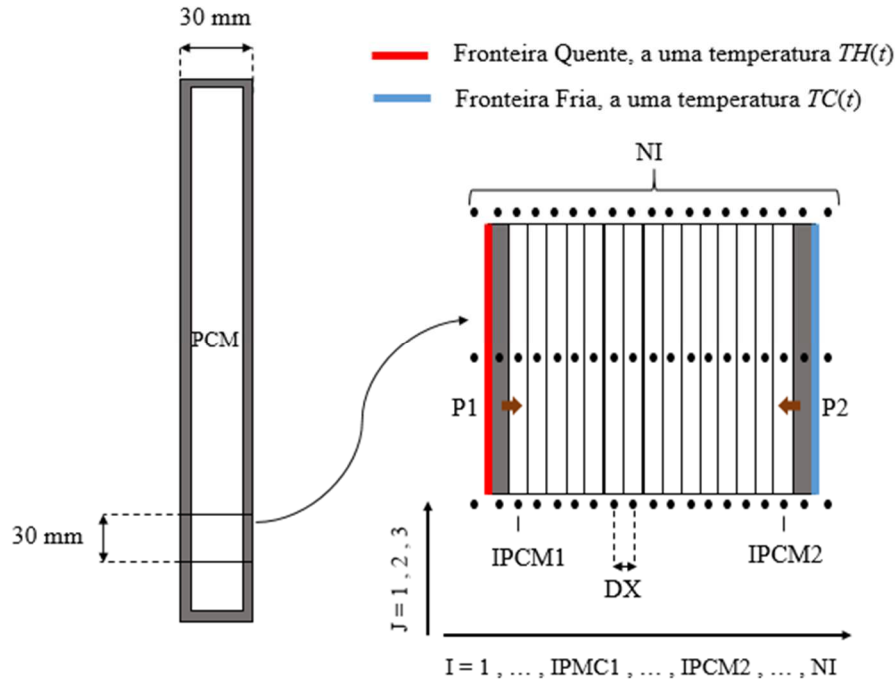
**Tabela 3.2** Propriedades termofísicas do alumínio consideradas.

| Propriedades   | Alumínio |
|--|----------|
| Densidade (kg.m <sup>-3</sup> )                              | 2707     |
| Condutividade térmica (W.m <sup>-2</sup> .°C <sup>-1</sup> ) | 204      |
| Calor específico (J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )     | 896      |

### 3.3. Discretização

A fim de obter uma maior precisão do método, é necessário garantir que a solução já não varia (ou varia muito pouco) com refinamentos adicionais, sejam da malha ou incremento de tempo. Neste sentido, devem ser realizados testes de influência de malha e de discretização temporal. Uma vez que estamos na presença de um problema típico de “condução pura”, a evolução da temperatura no PCM pode ser calculada num modelo 1D

semelhante, sem perda de realismo físico (para o caso de uma só cavidade). Assim, os testes de refinamento foram realizados no modelo exposto na Figura 3.1.



**Figura 3.1** Modelo unidimensional considerado para os testes de independência da malha e da discretização temporal.

De forma a confrontar os resultados, foi calculada a temperatura no centro da cavidade (a meia-espessura), bem como a potência fornecida ao PCM por metro de profundidade ( $\Delta z = 1$  m). Esta última corresponde à soma de  $P1$  com  $P2$ , obtidos através das equações (3.1) e (3.2) para a interface adjacente ao nodo IPCM1 e IPCM2, respetivamente.

$$P1 = \frac{T(\text{IPCM1} - 1,2) - T(\text{IPCM1},2)}{\frac{0.5 \times DX}{k(\text{IPCM1},2) \times 1 \times 0.03} + \frac{0.5 \times DX}{k(\text{IPCM1} - 1,2) \times 1 \times 0.03}} \quad (3.1)$$

$$P2 = \frac{T(\text{IPCM2} + 1,2) - T(\text{IPCM2},2)}{\frac{0.5 \times DX}{k(\text{IPCM2},2) \times 1 \times 0.03} + \frac{0.5 \times DX}{k(\text{IPCM2} + 1,2) \times 1 \times 0.03}} \quad (3.2)$$

Os testes apresentados na próxima secção foram realizados para a carga do PCM a uma potência constante de 34 W. Os valores de  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  são os referidos na secção anterior. Foi utilizado o perfil triangular para o método da *capacidade calorífica equivalente*.

### 3.3.1. Influência da discretização espacial

Os testes de refinamento de malha foram efetuados com malhas com  $NI = 17, 32, 62, 122$  e  $242$  nodos e com um intervalo de tempo,  $\Delta t$ , de 30 segundos. As curvas de evolução da temperatura e do correspondente erro relativo (tendo como referência a malha mais refinada),  $ER$ , estão expostas nas Figura 3.2 e Figura 3.3. Por sua vez, a evolução da potência fornecida ao PCM e o respetivo  $ER$  podem ser observadas nas Figura 3.4 e Figura 3.5. Através da observação destas figuras, pode concluir-se que a evolução da temperatura é bastante menos afetada pela malha do que a potência fornecida ao PCM. Esta diferença de comportamento pode ser explicada pelo facto da potência ser obtida através de uma diferença de temperaturas entre dois nodos adjacentes, tornando-a muito sensível à malha utilizada. A Figura 3.2 mostra uma sobreposição quase total para as 5 malhas, sendo que as duas malhas menos refinadas apresentam pequenos aumentos do  $ER$  quando o declive da curva aumenta, ou seja, na fase sólida e no início da fase líquida. Relativamente à Figura 3.5, observam-se valores de  $ER$  elevados no início do cálculo (chega aos 10% mesmo para a malha de 62 nodos), provenientes do aumento repentino de ambas as condições de fronteira, particularmente, da fronteira quente. Contudo, as malhas de 62 e 122 nodos estabilizam perfeitamente nos instantes seguintes, apresentando um  $ER$  médio inferior a 0.7 % ao longo de todo o ensaio.

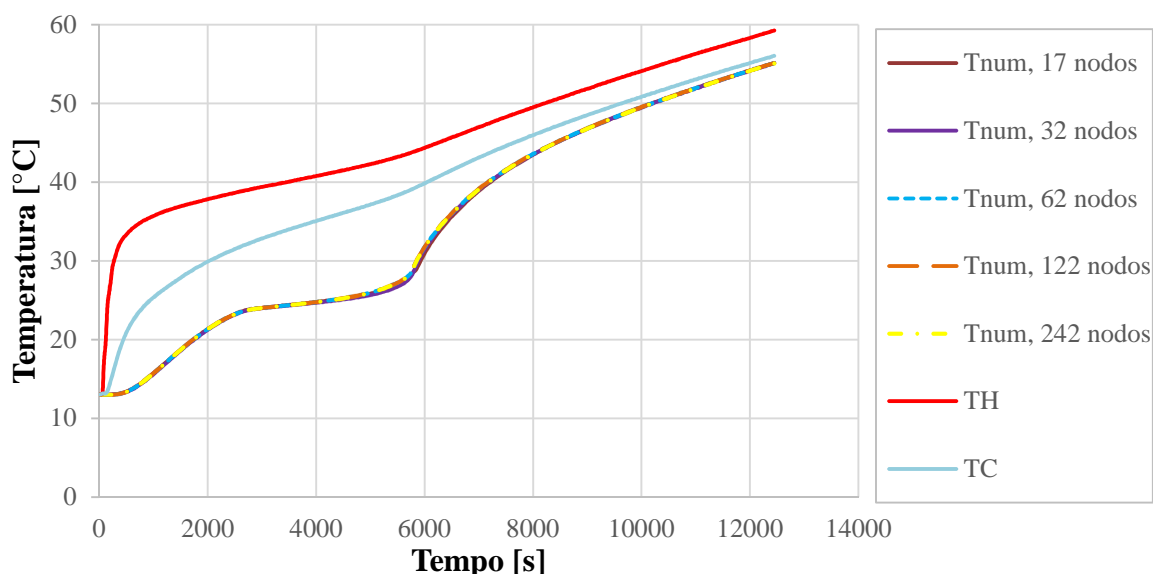


Figura 3.2 Evolução temporal da temperatura no centro da cavidade para as diferentes malhas consideradas.

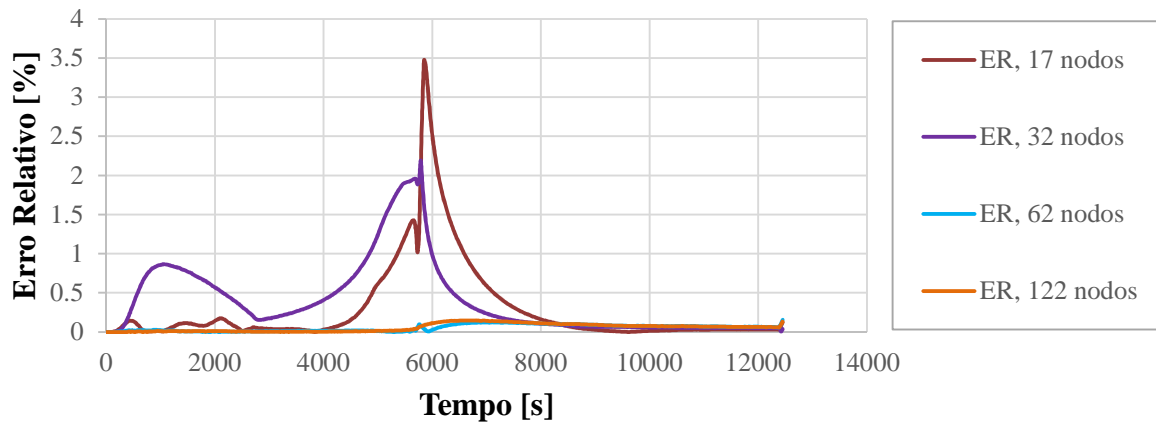


Figura 3.3 Evolução temporal do ER obtido no cálculo da temperatura para cada malha considerada.

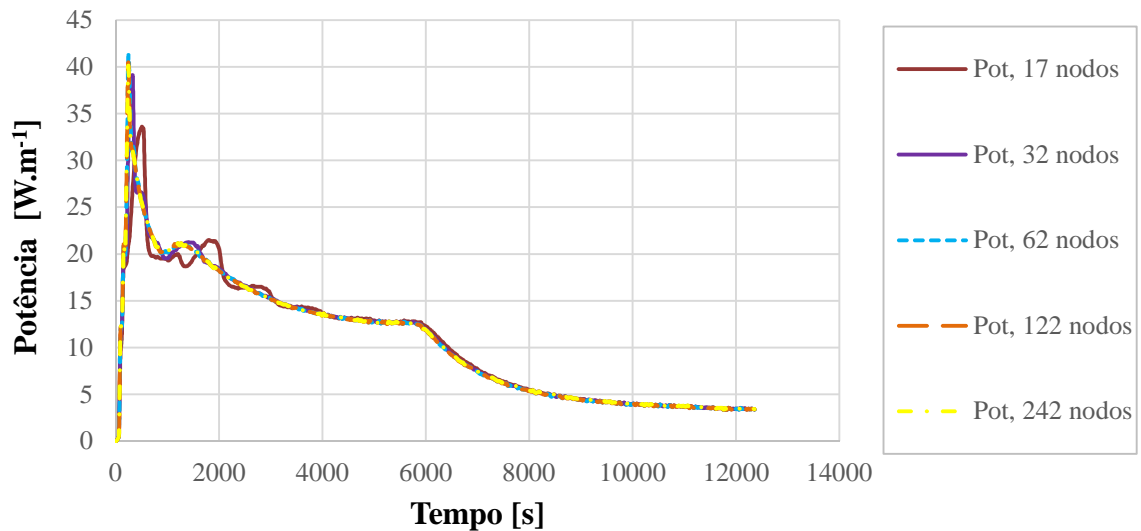


Figura 3.4 Evolução temporal da potência térmica transferida para o domínio do PCM, estimada na interface alumínio-PCM com as diferentes malhas.

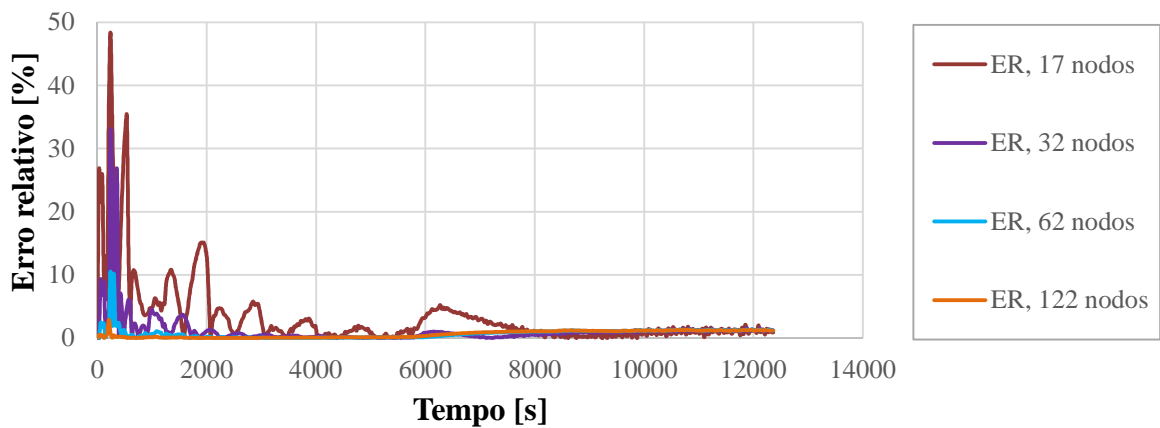


Figura 3.5 Evolução temporal do ER obtido no cálculo da potência para cada malha considerada.

### 3.3.2. Influência da discretização temporal

Os testes de discretização temporal seguiram um procedimento semelhante ao da secção anterior, sendo que, neste caso, fixou-se a malha e variou-se o valor de  $\Delta t$ . Foi escolhido um NI de 122 nodos e valores de  $\Delta t$  de 5, 10, 15, 30 e 60 segundos. Os valores de  $TH$  e  $TC$  entre os valores conhecidos a cada 30 segundos foram calculados por interpolação linear. Os resultados obtidos são expostos nas Figura 3.6, Figura 3.7 e Figura 3.8. Os pontos “críticos” (que provocam aumento do  $ER$ ) são os mesmos das figuras apresentadas na secção anterior. Note-se uma maior influência do refinamento da malha relativamente à discretização temporal nos 6000 segundos iniciais (Figura 3.5 e Figura 3.8). A partir desse instante (fusão completa do PCM), a discretização temporal assume uma maior importância. O  $ER$  médio obtido foi sempre inferior a 1%, exceto no cálculo da potência para  $\Delta t = 60$  segundos, onde este valor foi de 1.95 %.

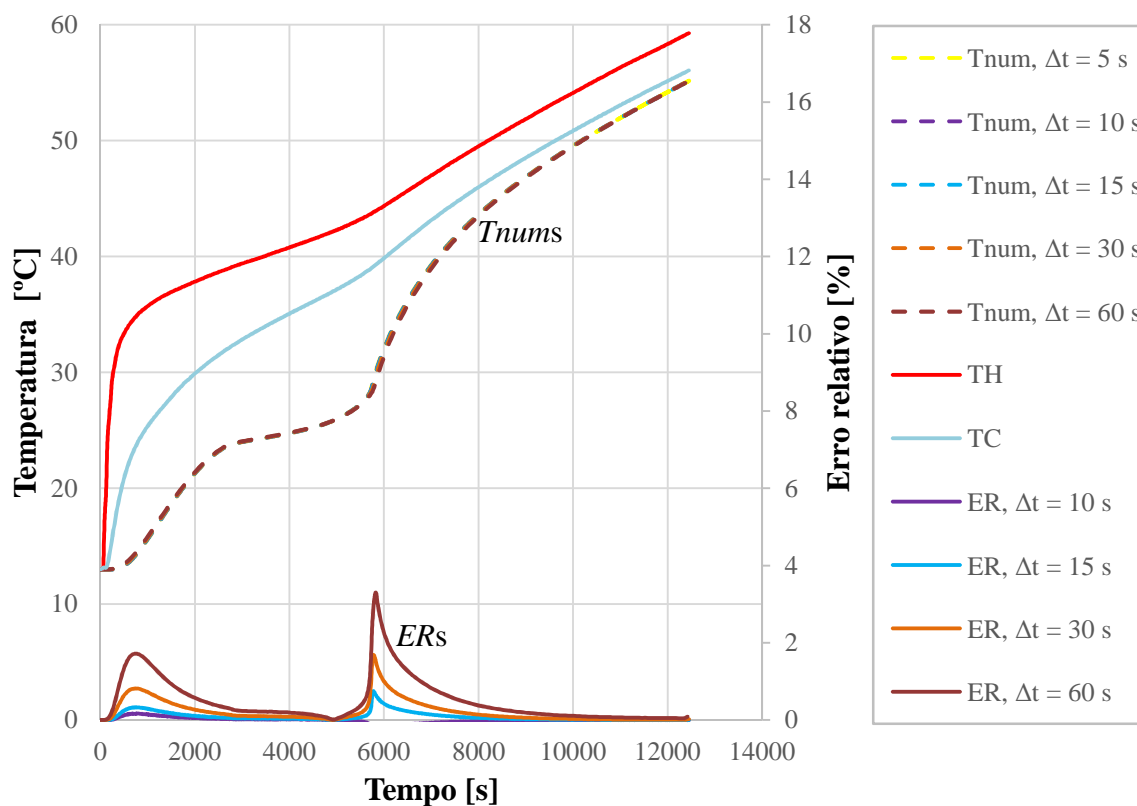


Figura 3.6 Evolução temporal da temperatura no centro da cavidade para diferentes discretizações  $\Delta t$  e correspondente  $ER$ .

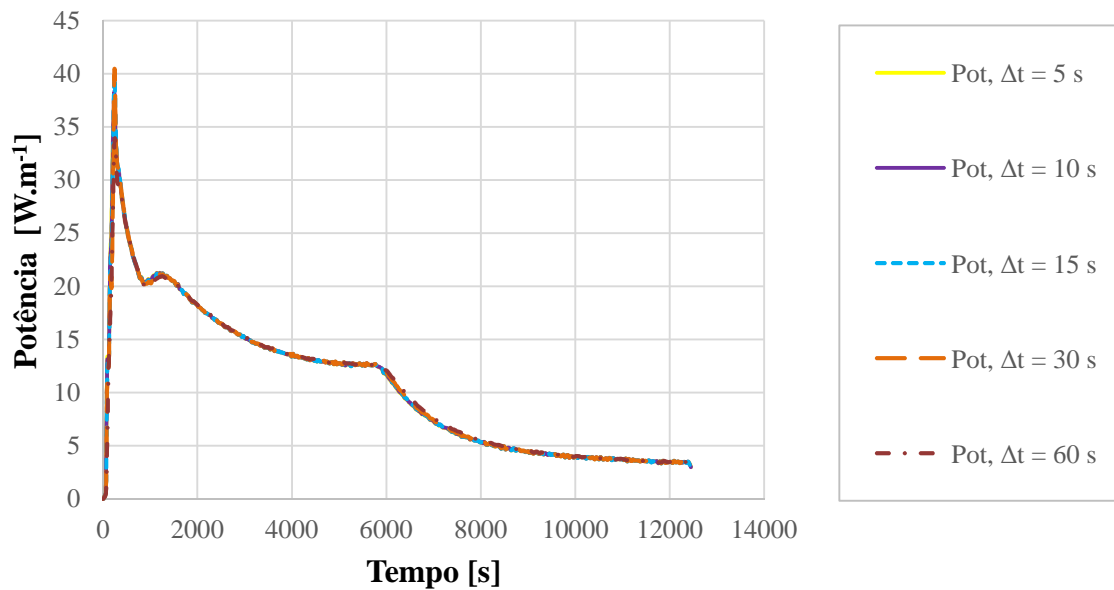


Figura 3.7 Evolução da potência com o tempo para diferentes discretizações de tempo.

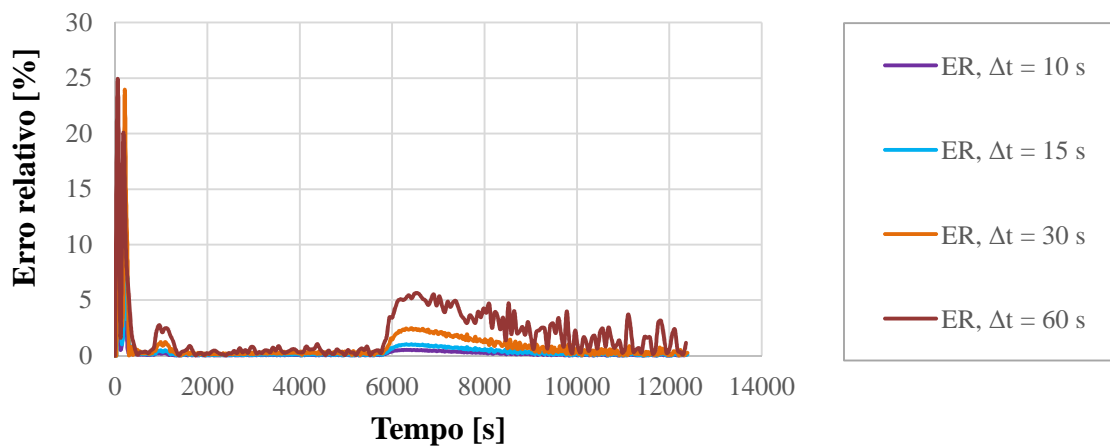


Figura 3.8 Evolução temporal do ER obtido no cálculo da potência para diferentes valores de  $\Delta t$ .

### 3.3.3. Escolha da malha e da discretização temporal

Tendo em conta as figuras analisadas nas secções 3.3.1 e 3.3.2, considerou-se adequada uma malha de 62 nodos e um  $\Delta t$  de 30 segundos. Desta forma, para a cavidade retangular que se pretende estudar, será utilizada uma malha de  $62 \times 602$  (VC de  $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ).

### 3.4. Monitorização no domínio bidimensional

De forma a comparar os resultados numéricos e experimentais, foi calculada a evolução das temperaturas  $T_{1num}$ ,  $T_{2num}$ ,  $T_{3num}$ ,  $T_{4num}$  e  $T_{5num}$ , conforme esquematizado na Figura 3.9. Será também calculada a potência fornecida ao PCM,  $P_{TOT}$ , na interface PCM-alumínio. Este valor é particularmente interessante, pois a sua integração ao longo do tempo permitirá quantificar a energia armazenada pelo PCM durante a carga, ou a restituída durante a descarga. O seu cálculo é efetuado de duas formas diferentes: (i) através de uma ponderação da condutibilidade térmica na interface por média harmónica, e (ii) através do cálculo das resistências térmicas entre nodos (de VCs de materiais diferentes). Os dois métodos de cálculo referidos encontram-se descritos no ANEXO A.

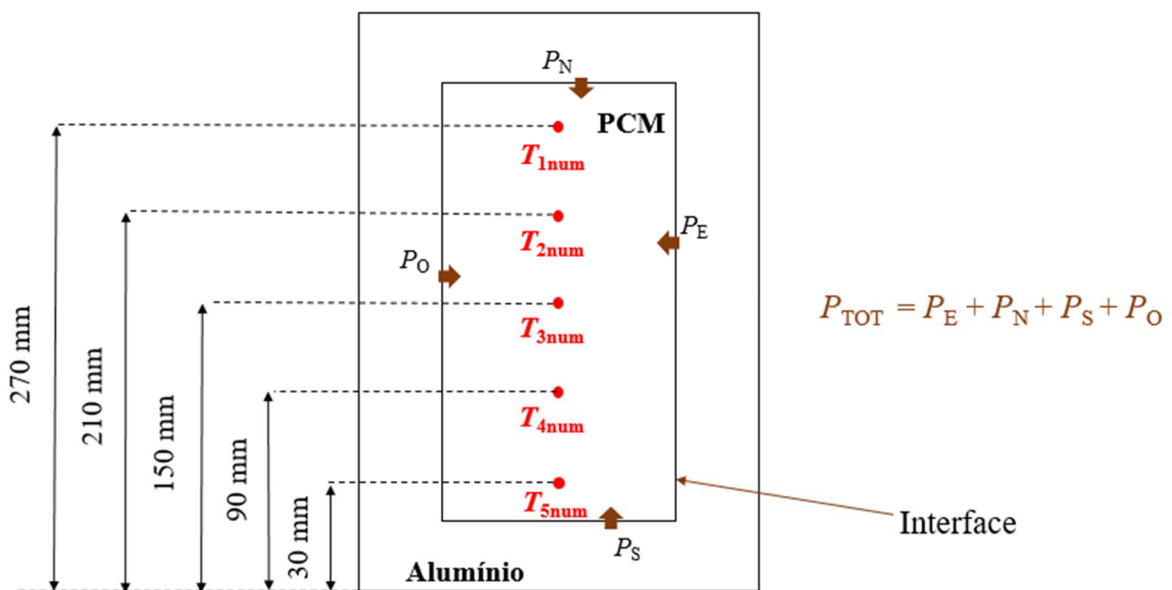


Figura 3.9 Localização dos pontos de monitorização da temperatura e potências calculadas.

### 3.5. UAE com uma só cavidade

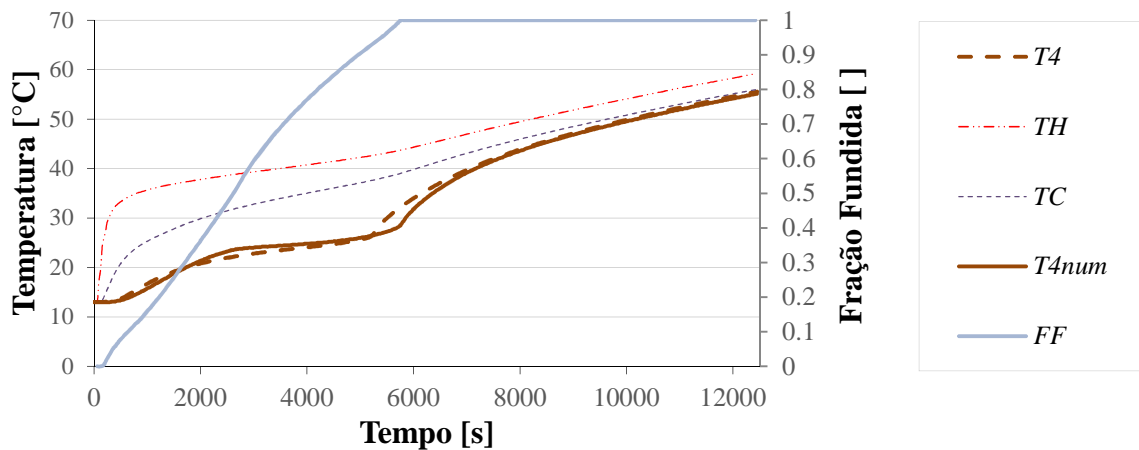
Foram simulados testes experimentais de aquecimento com potências constantes de 34 e 68 W, e testes de arrefecimento a 14 e 20 °C. Por motivos de simplificação gráfica, irá apenas ser apresentada a temperatura obtida numericamente que apresenta o maior *ER* médio, tendo como referência a temperatura medida nos ensaios experimentais, para a mesma localização.



Importa referir que foi utilizado o perfil triangular para o método da *capacidade calorífica equivalente*, exceto quando indicado o contrário.

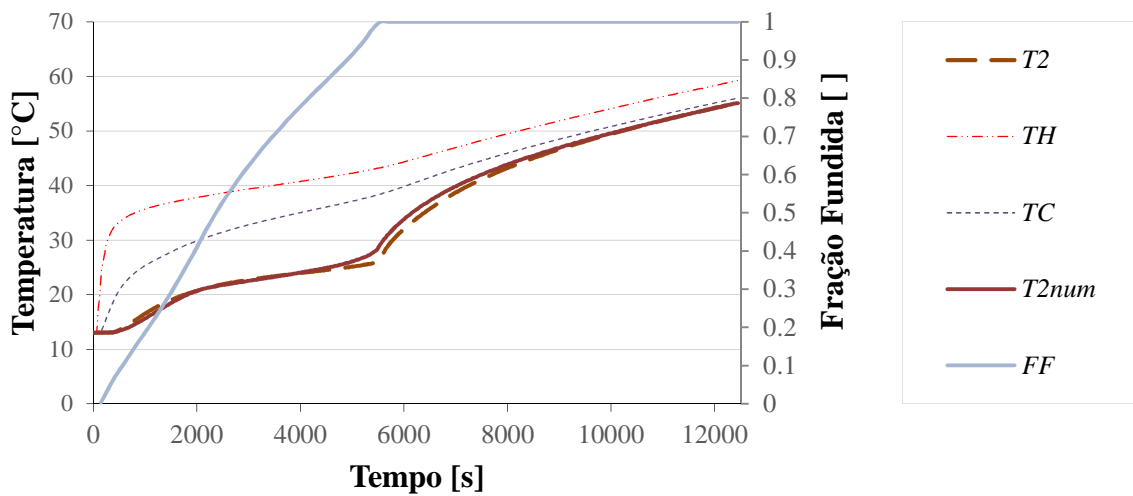
### 3.5.1. Fase de aquecimento

Os resultados numéricos e experimentais para a carga do PCM com uma potência constante de 34 W podem ser consultados na Figura 3.10. Note-se a representação da fração fundida total (*FF*) no eixo vertical da direita. Tal como esperado, a evolução de  $T_{3num}$  (não apresentada) coincide perfeitamente com a temperatura calculada através do modelo unidimensional utilizado na secção 3.3 (erro absoluto máximo de 0.075 °C), perspetivando uma boa representação do problema em futuras simulações por um modelo 1D.



**Figura 3.10** Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de aquecimento com uma potência de 34 W, considerando  $\Delta T_1 = \Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$ . No eixo à direita encontra-se representada a  $FF$  total de PCM.

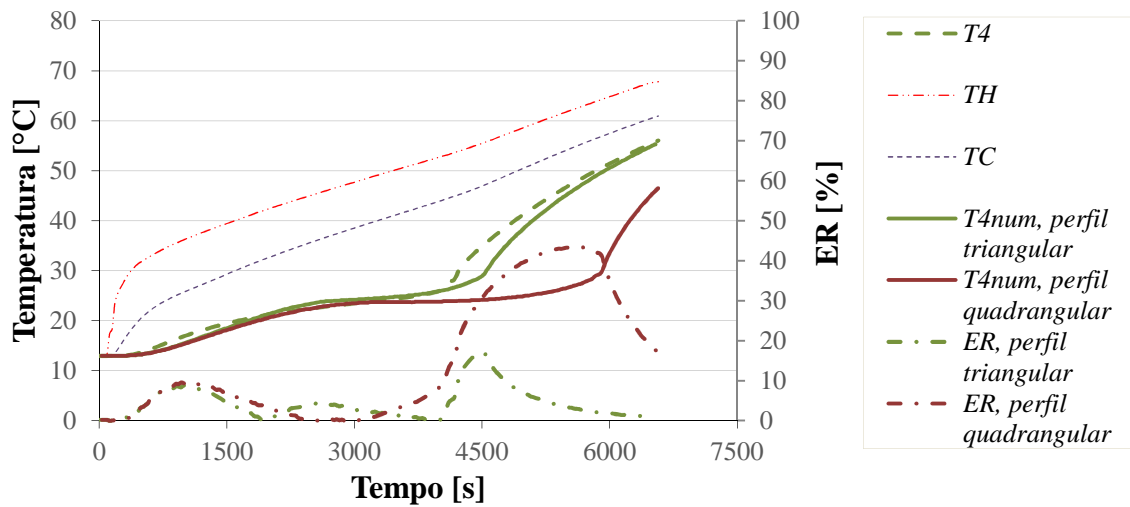
Pela observação da Figura 3.10, compreende-se que a mudança de fase na localização monitorizada é iniciada mais tarde no estudo numérico. Da mesma forma, o momento em que o PCM funde por completo (próximo dos 6000 segundos) está ligeiramente atrasado face ao ensaio experimental, atingindo-se uma diferença máxima de 3.75 °C aos 5730 segundos. Para  $T_{4num}$ , o  $ER$  médio calculado entre os 2000 e os 6000 segundos foi de 4.42 %. O motivo para tal desvio deve-se à escolha de  $\Delta T_1$ , que pode ser otimizada aumentando o seu valor para 5°C, neste caso em particular (Figura 3.11).



**Figura 3.11** Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de aquecimento com uma potência de 34 W, usando  $\Delta T_1 = 5^\circ\text{C}$  e  $\Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$ . No eixo à direita encontra-se representada a  $FF$  total de PCM.

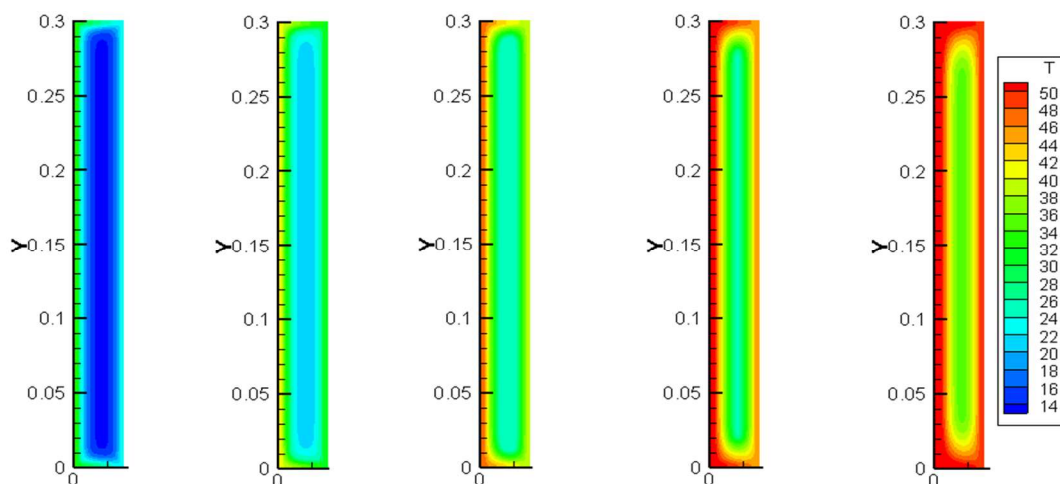
O  $ER$  para  $T_{2num}$  no intervalo referido anteriormente foi de 2.27 % e o PCM fundiu completamente cerca de 250 segundos antes do verificado na Figura 3.10. Ao aumentar  $\Delta T_1$ , a variação de  $C$  é introduzida de forma mais suave e precoce, aproximando melhor as curvas numérica e experimental. Contudo, para a fase de descarga, um  $\Delta T_1$  elevado prolonga demasiado a mudança de fase e não é possível obter a convergência desejada. De salientar ainda que, para ambas as figuras, verificou-se algum desfasamento no início do ensaio, que pode ser explicado pela incerteza no valor de  $k$  da fase sólida do PCM.

Em relação ao ensaio para uma potência de 68 W, os resultados obtidos são apresentados na Figura 3.12. Para este caso, optou-se por representar o  $ER$  no eixo secundário, de forma a comparar os dois perfis do *método da capacidade calorífica equivalente*. É fácil constatar que a forma quadrangular prolonga em demasia a mudança de fase do PCM, obtendo-se valores de  $ER$  muito elevados. Como referido na secção 2.4, para a mesma combinação de  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$ , a energia necessária para fundir o PCM é superior quando se usa o perfil quadrangular, simulando-se uma mudança de fase mais demorada e que, para as propriedades termofísicas consideradas, não vai de acordo com os resultados experimentais. Deste modo, conclui-se que o perfil de  $c_p$  equivalente que melhor se adapta ao problema em estudo é o triangular.

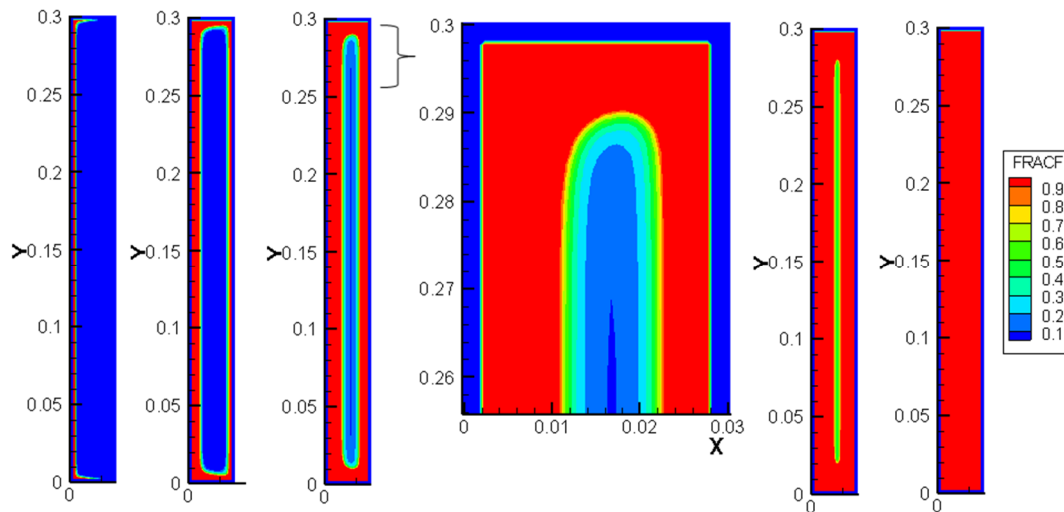


**Figura 3.12** Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de aquecimento com uma potência de 68 W, para os perfis triangular e quadrangular do método da capacidade calorífica equivalente. No eixo à direita encontra-se representado o ER.

Nas Figura 3.13 e Figura 3.14, mostram-se, respetivamente, a evolução das distribuições de temperatura ( $T$ ) e da fração fundida ( $FF$ ) de PCM até ao momento em que se atinge por completo a fase líquida, para o ensaio a uma potência de 68 W. Aos 600 segundos, é visível que a fusão se inicia nas zonas mais próximas da fronteira quente, como seria de esperar. No lado oposto, a fusão começa e avança de forma mais lenta, sendo o material localizado perto da zona central (um pouco mais próximo da fronteira fria) o último a fundir. Note-se ainda a influência da parede de alumínio no topo e na zona inferior – fusão rápida do material que lhe é adjacente.



**Figura 3.13** Distribuições da temperatura em °C aos 600, 1800, 3000, 4200 e 4800 segundos (carga a 68 W).



**Figura 3.14** Distribuições da fração fundida de PCM aos 600, 1800, 3000, 4200 e 4800 segundos (carga a 68 W). Ao centro, uma ampliação do campo de FF aos 3000 segundos.

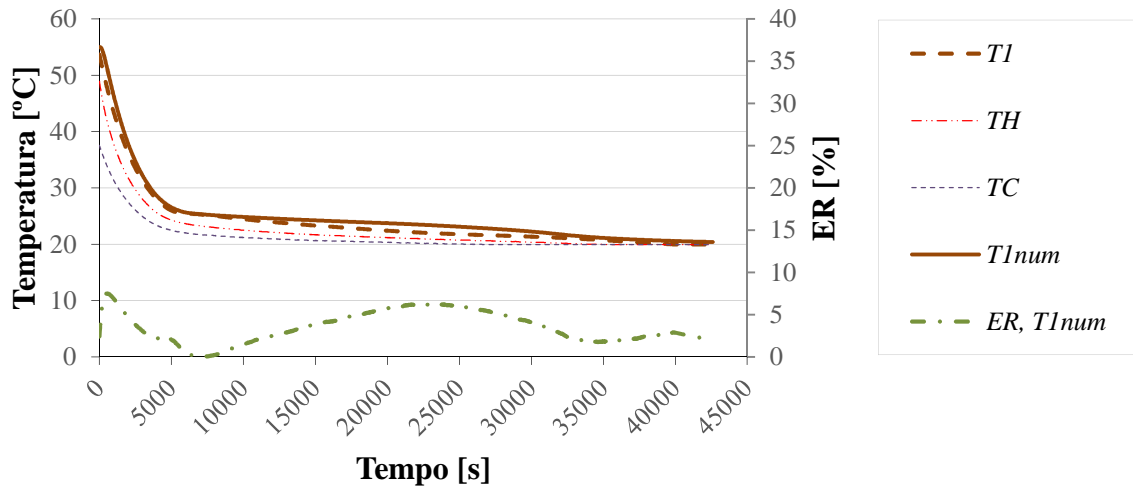
Relativamente à potência que atravessa a interface alumínio-PCM concluiu-se que são obtidos os mesmos resultados utilizando os dois métodos de cálculo descritos no ANEXO A. De forma a integrar a potência ao longo do tempo, utilizou-se a regra do ponto médio, tendo-se obtido valores de energia armazenada de 387.8 kJ, para a carga de 34 W, e 417.4 kJ, para a carga a 68 W. Contudo, estes valores não estão de acordo com o valor teórico (547.4 kJ), obtido através da equação (3.3), onde  $T_{início}$  e  $T_{fim}$  correspondem às temperaturas de início e do final de ensaio, respetivamente.

$$E = \rho_{PCM} V_{PCM} [c_{p_s} (T_f - T_{início}) + L + c_{p_l} (T_{fim} - T_f)] \quad (3.3)$$

De facto, para o perfil triangular, o calor sensível equivalente introduzido no intervalo de mudança de fase transporta consigo um défice de energia inerente à própria geometria da curva, uma vez que parte da energia necessária para fundir o PCM não é considerada. Apesar de não reproduzir a correta cinética do problema, o perfil quadrangular apresenta um maior realismo nos valores de energia armazenada do que a geometria triangular, tendo-se obtido 550.5 kJ, para a carga a 34 W, e 544.4 kJ, para a carga a 68 W. Assim, as energias calculadas usando o perfil triangular terão de ser corrigidas por uma parcela de correção.

### 3.5.2. Fase de arrefecimento

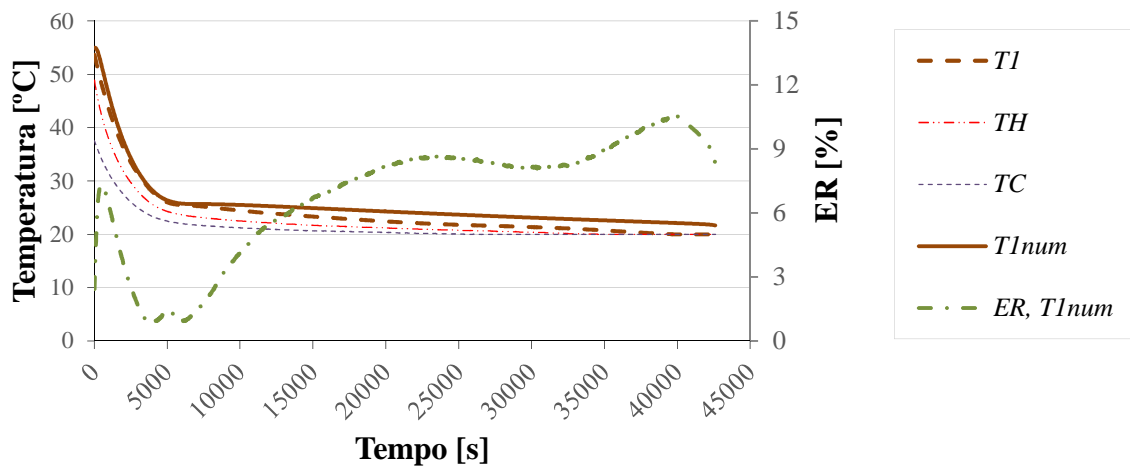
Para os ciclos de descarga foram realizados testes em que o PCM é arrefecido até aos 20 °C e 14 °C. Em relação ao primeiro estudo, os resultados são expostos na Figura 3.15.



**Figura 3.15** Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de arrefecimento a 20°C, utilizando o perfil triangular no método da capacidade calorífica equivalente. No eixo à direita encontra-se representado o erro relativo de  $T_{1num}$ .

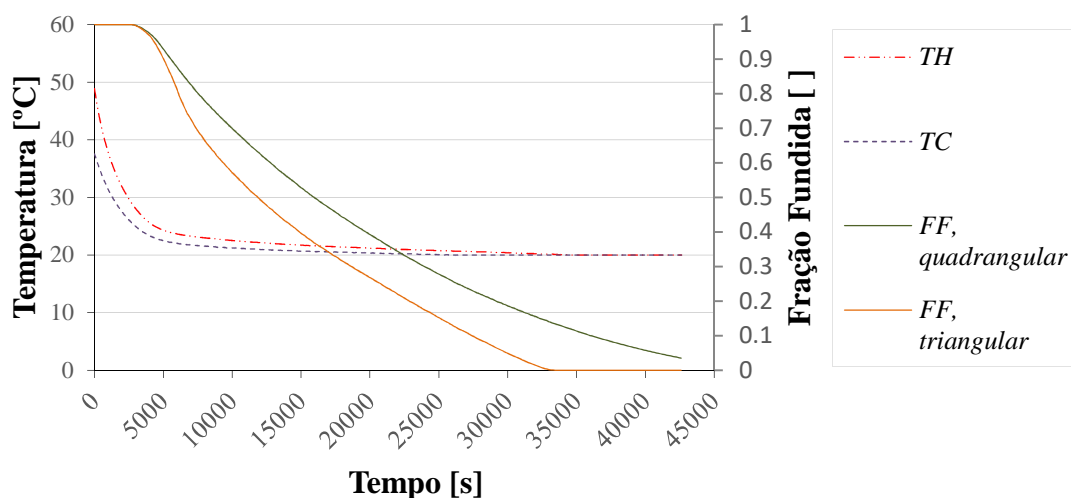
O erro relativo ( $ER$ ) obtido ao longo de quase todo o período é aceitável, mostrando uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Desprezando os instantes iniciais, observa-se que o período crítico ( $ER$  máximo de 6,46 %) coincide com a gama de temperaturas de mudança de fase, o que indica que alguns ajustes nas temperaturas  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  seriam favoráveis. Alternativamente, poderia ser reduzido o calor latente do PCM.

De forma a comparar novamente a influência da forma do perfil da capacidade calorífica equivalente, o teste anterior foi repetido. Obtiveram-se resultados bastante menos próximos dos experimentais (Figura 3.16), tendo-se calculado um  $ER$  médio de 6,87 %, cerca de duas vezes superior ao anterior. É notório que o aumento do  $ER$  coincide com o início da solidificação, permanecendo elevado durante o resto do ensaio.



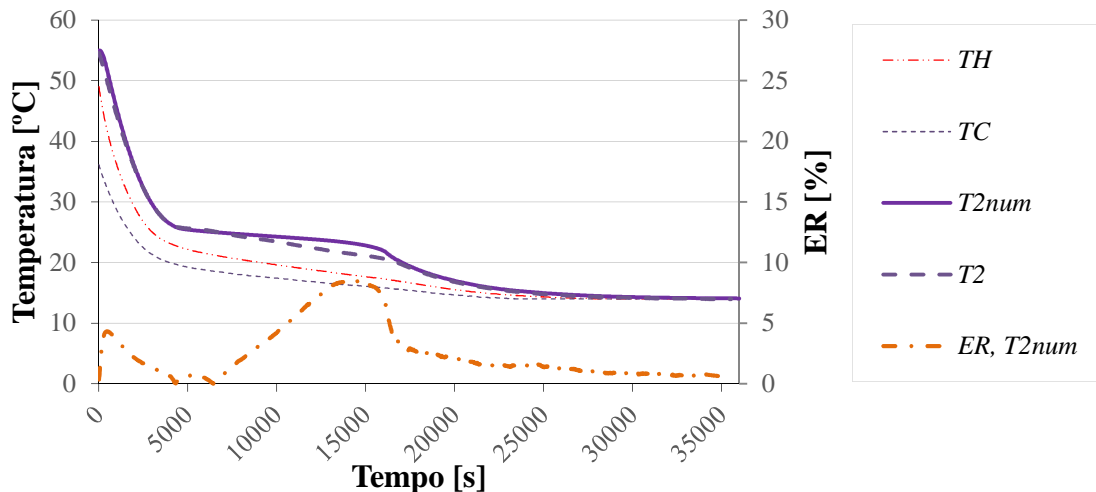
**Figura 3.16** Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de arrefecimento a 20°C, utilizando o perfil quadrangular no método da capacidade calorífica equivalente. No eixo à direita encontra-se representado o ER de  $T_{I\text{num}}$ .

Na Figura 3.17, é comparada a evolução da fração fundida total de PCM para cada um dos perfis. No caso do perfil triangular, o PCM solidifica bem antes do final do ensaio; contudo, para o perfil quadrangular, o material não chega a solidificar por completo, o que leva à obtenção de resultados indesejáveis. De novo, o perfil triangular revela-se o mais indicada na simulação da mudança de fase do PCM.



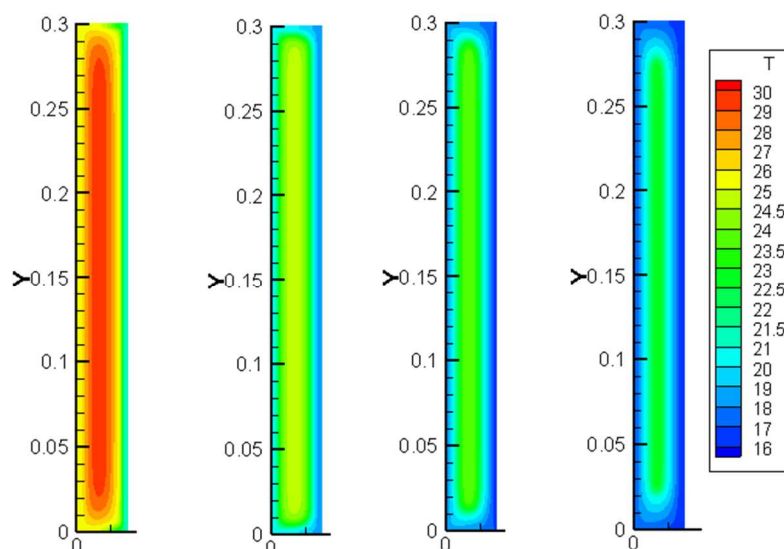
**Figura 3.17** Evolução da fração fundida total (FF) de PCM para os perfis triangular e quadrangular do método da capacidade calorífica equivalente.

Relativamente à solidificação a 14 °C, os resultados apresentam-se na Figura 3.18. O período crítico coincide novamente com o fim da mudança de fase; contudo, observam-se resultados numéricos satisfatórios em grande parte do período de teste ( $ER$  médio de 2.24 %). A diminuição do  $ER$  médio relativamente ao ensaio a 20 °C é justificada pelo menor tempo necessário para que se dê a mudança de fase.



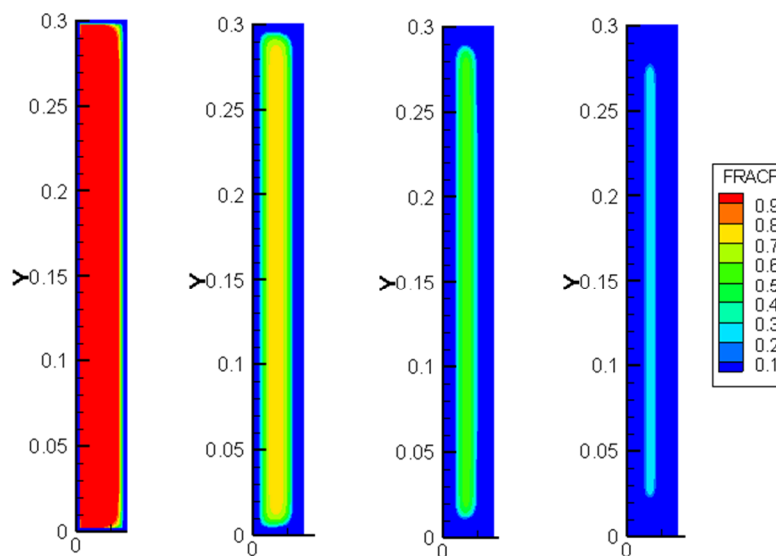
**Figura 3.18** Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de uma só cavidade, durante a fase de arrefecimento a 14°C. No eixo à direita encontra-se representado o  $ER$  de  $T_{2num}$ .

Nas Figura 3.19 e Figura 3.20, são mostradas as evoluções de  $T$  e  $FF$  até ao momento em que o PCM solidifica totalmente.



**Figura 3.19** Distribuições da temperatura em °C aos 3000, 7500, 12000 e 15000 segundos (solidificação a 14 °C).

É notório o princípio da solidificação na camada de PCM mais próxima da fronteira fria. De modo análogo à fase de aquecimento, no lado oposto à fronteira fria a mudança de fase é iniciada mais tarde, sendo o material localizado perto da zona central (um pouco mais próximo da fronteira quente) o último a solidificar. O desvio desta camada relativamente ao eixo vertical é cerca de 1.25 mm, ligeiramente inferior ao verificado na secção anterior (1.8 mm). Esta diferença de valores deve-se à maior semelhança das evoluções temporais de  $TH$  e  $TC$ , permitindo taxas de transferência de calor mais próximas em ambas as superfícies laterais.



**Figura 3.20** Distribuições da fração fundida de PCM aos 3000, 7500, 12000 e 15000 segundos (solidificação a 14 °C).

A partir da equação (3.4), onde  $T_{fim}$  assume o valor de 14 ou 20° C, calculou-se o valor teórico da energia restituída para os dois casos, obtendo-se o valor de 541.6 kJ e 506.2 kJ, respetivamente.

$$E = \rho_{PCM} V_{PCM} [c_{p_s} (T_f - T_{fim}) + L + c_{p_l} (T_{inicio} - T_f)] \quad (3.4)$$

Pelo motivo indicado anteriormente, os valores de energia restituída obtidos pelo perfil triangular estão subavaliados (434 kJ, para a solidificação a 14 °C, e 402.1 kJ, para a



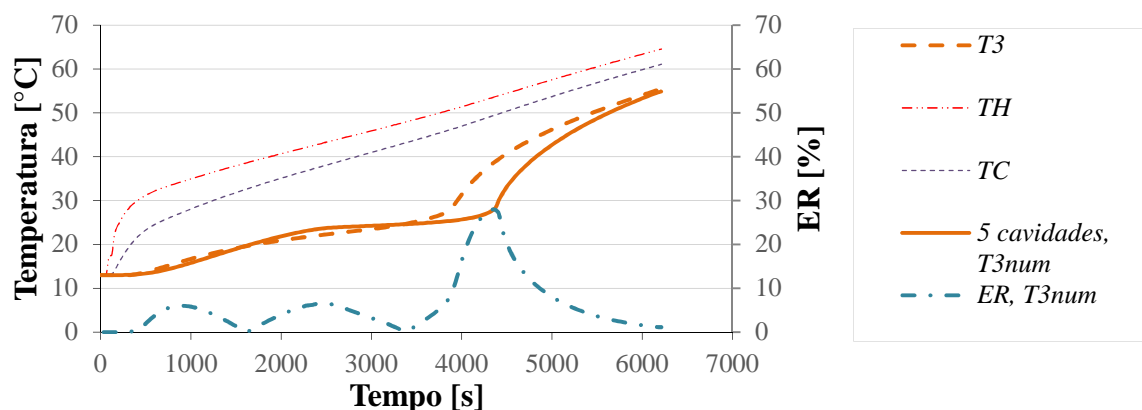
solidificação a 20 °C). De novo, o perfil quadrangular apresenta valores mais próximos dos reais – 570.1 kJ, quando  $T_{\text{fim}} = 14$  °C, e 482.0 kJ, quando  $T_{\text{fim}} = 20$  °C.

### 3.6. UAE com 5 e 15 cavidades

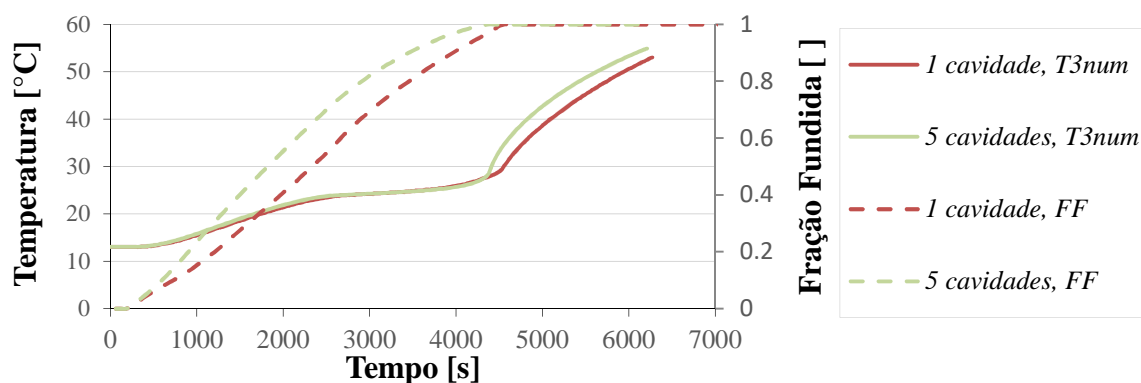
Para as UAE de 5 e 15 cavidades, realizou-se apenas uma simulação da fase de aquecimento, com uma potência de 68 W, e outra da fase de arrefecimento, a 14 °C. Os valores numéricos das temperaturas de monitorização nas duas simulações permitiu identificar uma grande semelhança nos valores calculados (diferença máxima de 0.05 °C). Por esse motivo, irá apenas ser apresentada a temperatura na cavidade central,  $T_3$ .

#### 3.6.1. Fase de aquecimento

Os resultados obtidos para a carga do PCM a 68 W são apresentados na Figura 3.21. Note-se o atraso acentuado da mudança de fase na previsão numérica face à observação experimental, que pode ser explicado pela sensibilidade aos parâmetros  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$ , mas também pela incerteza das propriedades termofísicas do PCM consideradas (em particular, a condutibilidade térmica da fase líquida e o calor latente de fusão). Ao mesmo tempo, é importante não esquecer que os próprios ensaios experimentais têm erros associados, nomeadamente, a pouca precisão da localização dos termopares no interior das cavidades. A interpretação das curvas permite retirar uma conclusão bastante óbvia: a divisão do PCM em 5 cavidades (inserção de 4 alhetas metálicas) teve maior influência na evolução das temperaturas monitorizadas para o estudo experimental do que para o numérico. De facto, através da Figura 3.22, que compara as unidades de armazenamento com e sem alhetas, verifica-se que apesar dos maiores valores de  $FF$  de PCM desde o início do ensaio, a redução do tempo de fusão é de apenas 200 segundos, sensivelmente. Deve ter-se em conta que, se a potência de aquecimento é a mesma para as duas unidades, o tempo necessário para a fusão total de PCM não deve ser muito diferente, exceto pela menor massa de PCM presente, devido ao espaço ocupado pelas alhetas. Com as 4 alhetas inseridas, o volume total de PCM foi reduzido 5.4 %, o que aparenta não ter grande influência no tempo de fusão.

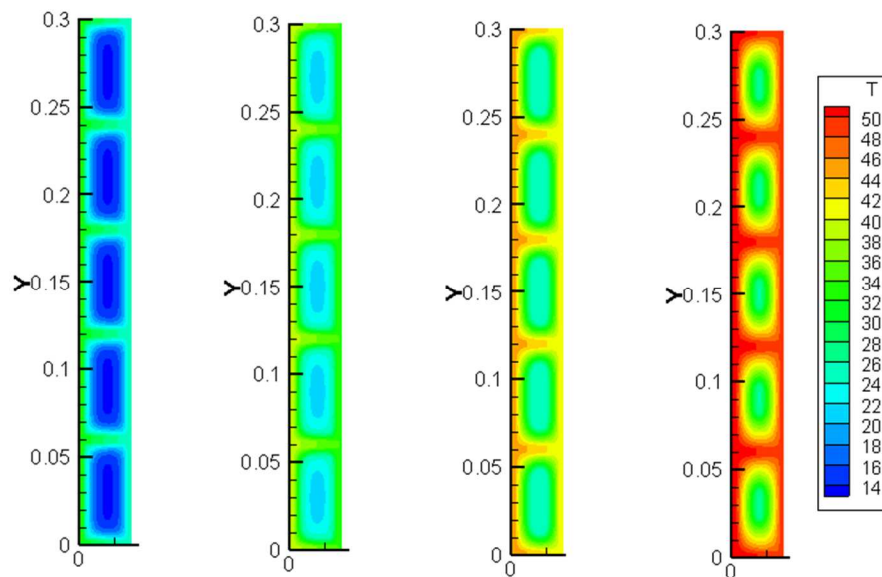


**Figura 3.21** Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de 5 cavidades, durante a fase de aquecimento com uma potência de 68 W. No eixo vertical secundário encontra-se representado o ER de  $T_{3num}$ .

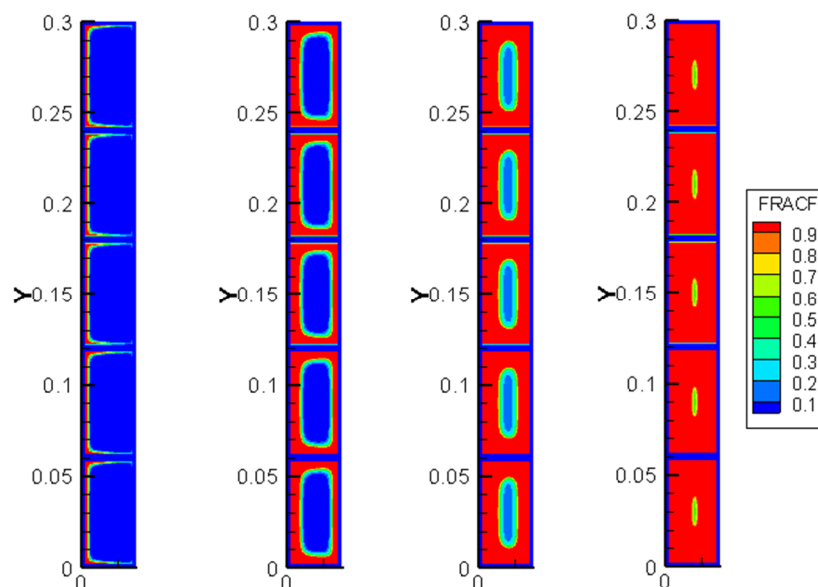


**Figura 3.22** Comparação da evolução temporal de  $T_{3num}$  obtida numericamente para as UAE de uma e de 5 cavidades, durante a fase de aquecimento com uma potência de 68 W. No eixo vertical secundário encontra-se representada a FF de PCM para ambas as UAE.

Nas Figura 3.23 e Figura 3.24, são exibidas as evoluções de  $T$  e  $FF$ , respetivamente, até ao momento em que o PCM funde completamente. Pode comprovar-se a grande semelhança dos campos de  $T$  e  $FF$  de PCM em cada cavidade, confirmada pela perfeita coincidência das 5 temperaturas de monitorização. Embora de forma menos evidente do que na primeira configuração estudada, a fusão dá-se mais rapidamente da esquerda para a direita do que no sentido inverso. De facto, a última camada a fundir está mais próxima do centro de cada cavidade do que o verificado na secção 3.5.1, apresentando um desvio de apenas 1 mm relativamente ao eixo vertical. A explicação é simples: com a inserção de alhetas metálicas, há uma maior homogeneização da temperatura no alumínio, promovendo um avanço idêntico das frentes de fusão laterais.



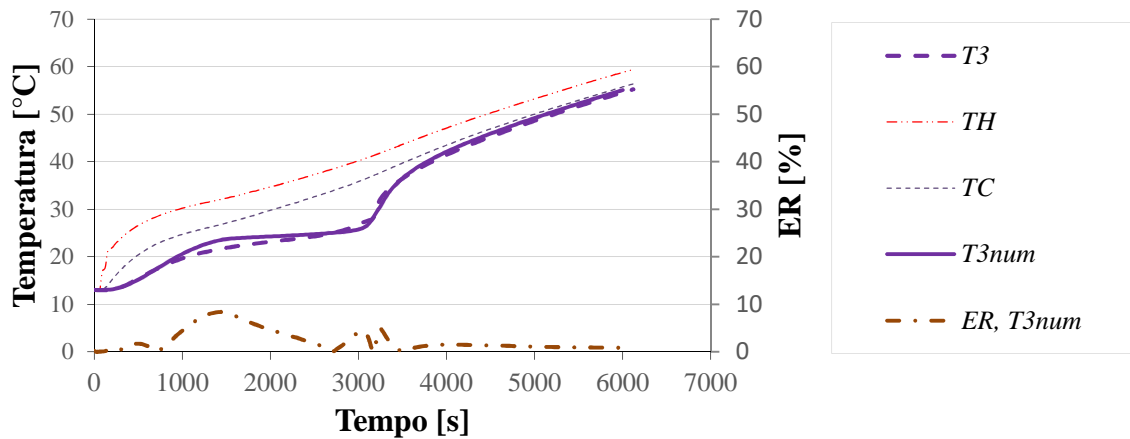
**Figura 3.23** Distribuições da temperatura em °C aos 600, 1800, 3000 e 4200 segundos (carga a 68 W na UAE de 5 cavidades).



**Figura 3.24** Distribuições da fração fundida de PCM aos 600, 1800, 3000 e 4200 segundos (carga a 68 W na UAE de 5 cavidades).

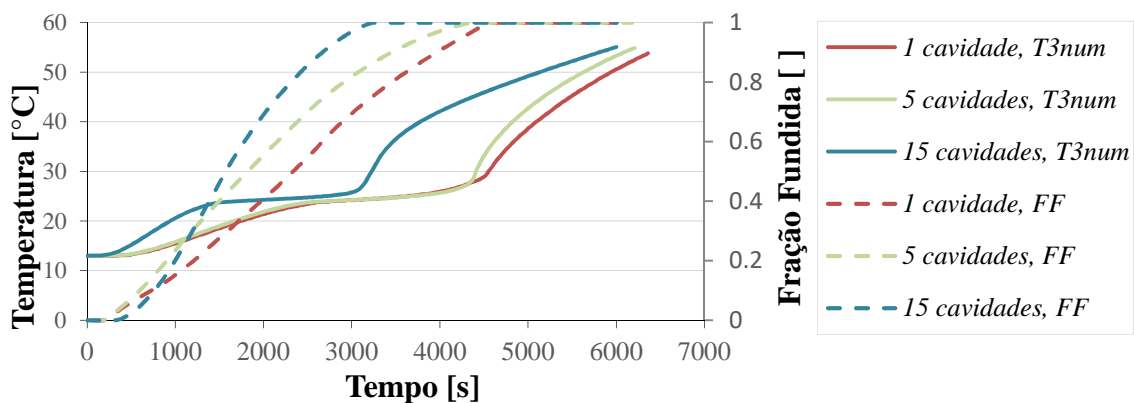
Com o intuito de obter uma redução considerável do tempo de fusão para a mesma fase de aquecimento (potência constante de 68W), foram obtidos resultados para uma UAE com 15 cavidades (Figura 3.25), que representa uma redução de volume de PCM de 18.9 % relativamente à UAE de apenas uma cavidade. Note-se o bom comportamento da curva ao

longo de todo o período de teste, sendo o instante dos 1400 segundos o que apresenta o maior  $ER$  registado (coincidente com o início da fusão na localização monitorizada).



**Figura 3.25** Evolução temporal da temperatura obtida numericamente e experimentalmente na UAE de 15 cavidades, durante a fase de aquecimento com uma potência de 68W. No eixo vertical secundário encontra-se representada a  $ER$  de  $T_{3num}$ .

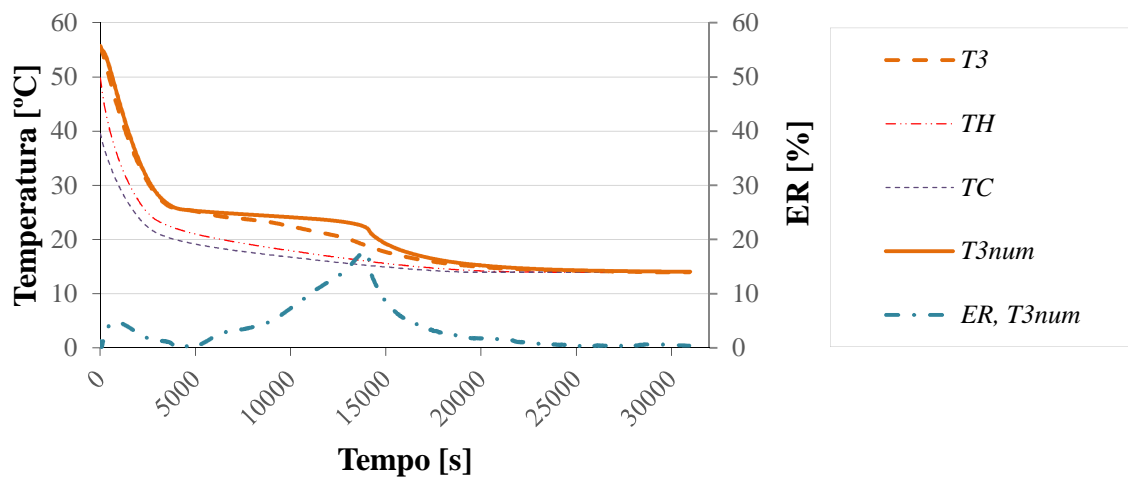
A evolução da temperatura  $T_{3num}$  e de  $FF$  de PCM para os três sistemas estudados é comparada na Figura 3.26. Pode observar-se uma diferença clara da evolução de  $T_{3num}$  no sistema de 15 cavidades, face aos outros dois sistemas. A inserção de 14 alhetas permitiu reduzir o tempo de fusão em 1320 segundos relativamente à UAE de uma cavidade, cerca de 6.5 vezes mais do que o sistema de 4 alhetas. Deste modo, numa aplicação em que o tempo de fusão é um parâmetro determinante, o sistema de 15 cavidades é o mais indicado.



**Figura 3.26** Comparação de  $T_{3num}$  obtida numericamente para as UAE de 1, 5 e 15 cavidades, durante a fase de aquecimento com uma potência de 68 W. No eixo vertical secundário encontra-se representada a  $FF$  de PCM para as três UAE.

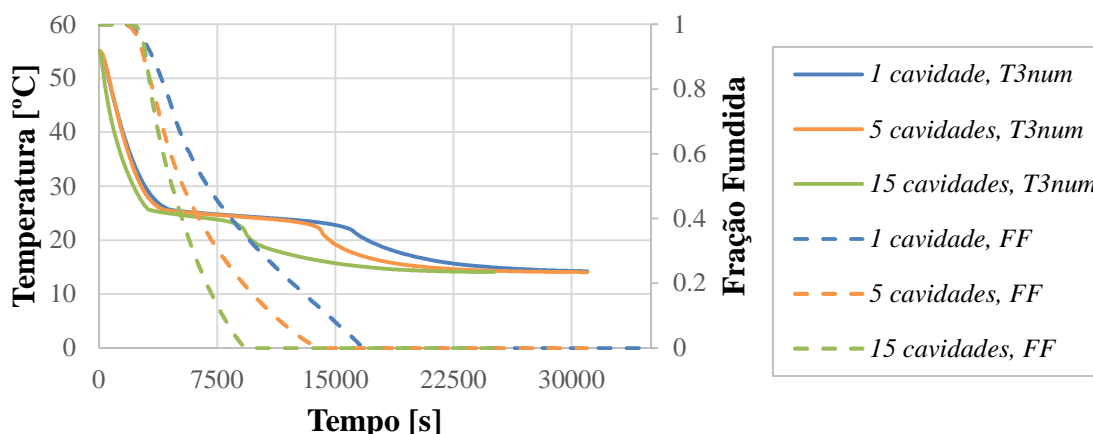
### 3.6.2. Fase de arrefecimento

Na Figura 3.27 é feita uma comparação entre os resultados numéricos e experimentais ao longo do ensaio de arrefecimento a 14 °C, na UAE de 5 cavidades. De novo, verificam-se valores de *ER* bastante superiores quando comparados com os obtidos na UAE de uma só cavidade, particularmente nos instantes finais da mudança de fase. Devido à evolução mais suave das temperaturas, os valores de *ER* atingidos ao longo de toda a simulação não são tão elevados como na secção anterior (para a mesma UAE), e há uma maior proximidade dos resultados numéricos obtidos com os experimentais.



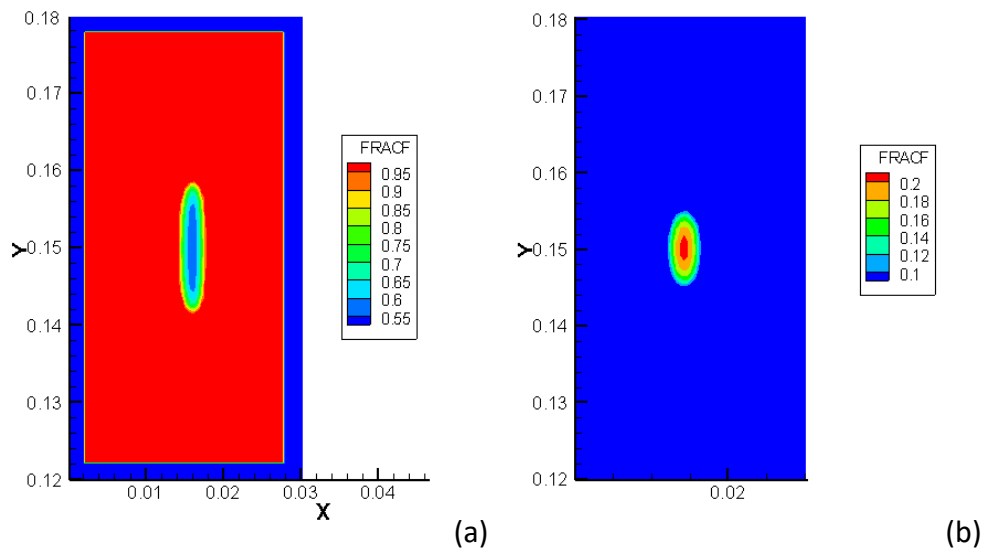
**Figura 3.27** Evolução temporal da temperatura obtida numérica e experimentalmente na UAE de 5 cavidades, durante a fase de arrefecimento a 14 °C. No eixo vertical secundário encontra-se representado o *ER* de  $T_{3num}$ .

Através da Figura 3.28, pode ser analisada a influência da inserção de alhetas no tempo de solidificação do PCM e na temperatura  $T_{3num}$ . É notória a redução do tempo de solidificação (diminui 2700 segundos para a UAE de 5 cavidades e 7560 segundos para a UAE de 15 cavidades), bem como a menor semelhança entre as curvas de  $T_{3num}$  para as unidades de uma e de 5 cavidades, face ao obtido na fase de aquecimento (Figura 3.22).



**Figura 3.28** Comparação de  $T_{3num}$  obtida numericamente para as UAE de 1, 5 e 15 cavidades, durante a fase de arrefecimento a 14 °C. No eixo vertical secundário encontra-se representada a FF de PCM para as três unidades.

A Figura 3.29 mostra a principal diferença entre os fenómenos de fusão e de solidificação ocorridos na UAE de 5 cavidades. Para a fase de aquecimento (Figura 3.29a), a forma extremamente oval da fração de PCM por fundir indica que a altura da cavidade ainda é demasiado elevada para as condições de fronteira impostas. De facto, devido à maior celeridade do ensaio de aquecimento (evolução rápida de  $TH$  e  $TC$ ), o efeito de alheta não condiciona a fusão da última fração de PCM por fundir e, por isso, as temperaturas de monitorização calculadas nas UAE de 1 e de 5 cavidades não são muito diferentes (Figura 3.22). Para a fase de arrefecimento (Figura 3.29b), a forma quase circular da última fração de PCM a solidificar aponta para um bom compromisso entre as dimensões da cavidade. Deste modo, pode concluir-se que nos ensaios realizados por Soares *et al.* [1,2], a incorporação de 4 alhetas é mais favorável na fase de arrefecimento do que na fase de aquecimento.



**Figura 3.29** Ampliação do campo de *FF* de PCM na cavidade central da UAE de 5 cavidades: (a) fase de aquecimento com uma potência de 68 W aos 4200 segundos e (b) fase de arrefecimento a 14 °C aos 13200 segundos.





## 4. AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PV/PCM

Nas próximas secções, o modelo numérico validado anteriormente é usado na avaliação de um sistema PV/PCM. Utilizando um modelo 1D, comparam-se os sistemas PV e PV/PCM através da monitorização da evolução da temperatura nas células fotovoltaicas. É determinada a espessura ótima de PCM num dia típico de Verão, para as condições climáticas de Coimbra. É também avaliado o efeito termorregulador da UAE e a sua influência na eficiência do sistema PV/PCM.

### 4.1. Problema físico

Pretende-se avaliar numericamente a influência da incorporação de uma UAE na parte posterior de um PV orientado a Sul e inclinado  $35^\circ$  relativamente à horizontal, através do modelo validado anteriormente. A simulação é realizada para um dia típico de Verão em Coimbra. Com a utilização de um sistema PV/PCM prevê-se a redução da temperatura de operação das células fotovoltaicas (quando comparado com um sistema PV convencional) e, conseqüentemente, o aumento da eficiência da conversão de energia solar em energia elétrica. Uma vez que a espessura de PCM apresenta um valor ideal para diferentes condições climáticas, pretende-se efetuar um estudo para avaliar a influência deste parâmetro, no sentido de aproveitar todo o calor latente do PCM (fusão completa do material) sem comprometer a sua fase de arrefecimento (descarga completa no período noturno).

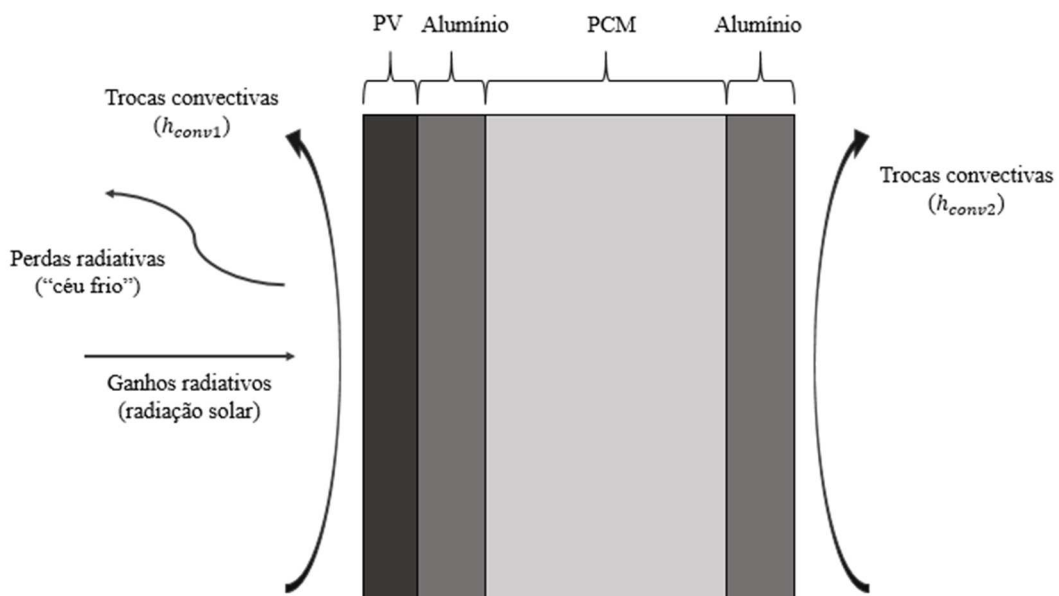
No presente estudo, serão consideradas as propriedades termofísicas do PCM DS 5001 X e do alumínio apresentadas na secção 3.2. Em relação ao PV, seguiu-se a constituição proposta por Armstrong e Hurley [31], exposta na Tabela 4.1. Devido às baixas resistências térmicas que apresentam as camadas de ARC e de contacto traseiro (elevado valor de  $k$  e reduzida espessura), estas foram desprezadas.

**Tabela 4.1** Propriedades das diferentes divisões de um painel fotovoltaico (adaptado da ref. [31]).

| Camada            | Espessura (m)      | $k$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ) | $\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | $c_p$ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ) |
|-------------------|--------------------|---|--|--|
| Vidro             | $3 \times 10^{-3}$ | 1.8   | 3000                                     | 500  |
| ARC               | $1 \times 10^{-7}$ | 32  | 2400                                     | 691  |
| Células PV        | $2 \times 10^{-4}$ | 148   | 2300                                     | 677  |
| EVA               | $5 \times 10^{-4}$ | 0.35  | 960                                      | 2090   |
| Contacto traseiro | $1 \times 10^{-7}$ | 237   | 2700                                     | 900  |
| Tedlar            | $1 \times 10^{-4}$ | 0.2   | 1200                                     | 1250   |

## 4.2. Modelo físico e matemático

Os resultados obtidos no capítulo 3 evidenciaram o excelente comportamento do modelo 1D na reprodução da mudança de fase do PCM para a UAE de uma só cavidade. Deste modo, optou-se por avaliar a influência dos PCMs na termorregulação de um sistema PV através de um domínio 1D (Figura 4.1). A altura do modelo é de 0.1 m, como sugere Hasan *et al.* [4] para uma célula PV policristalina de silício. A espessura do alumínio considerada foi de 5 mm.



**Figura 4.1** Modelo físico considerado para o sistema PV/PCM.

Tal como indica a Figura 4.1, na fronteira à esquerda considerou-se a existência de ganhos por radiação solar e perdas radiativas para o céu. Consideraram-se também trocas convectivas nas duas fronteiras laterais. Na superfície do PV, admitiu-se um coeficiente de

transferência de calor por convecção (natural),  $h_{conv1}$ , variável ao longo do dia, como descrito mais à frente na secção 4.2.2. Relativamente à superfície oposta, considerou-se um coeficiente de transferência de calor por convecção,  $h_{conv2}$ , fixo e igual a  $4 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ . Além disso, as superfícies superior e inferior foram consideradas adiabáticas.

#### 4.2.1. Temperatura e radiação solar

Para o dia 15 de Agosto, em Coimbra, a evolução horária da temperatura ambiente característica,  $T_{amb}$ , foi recolhida diretamente do programa SOLTERM. Contudo, a obtenção dos valores horários da radiação solar global numa superfície orientada a Sul e inclinada  $35^\circ$  envolveu algum tratamento matemático, uma vez que o programa apenas disponibiliza a radiação horária global e difusa numa superfície horizontal (a radiação direta horária pode ser obtida pela diferença entre a radiação global horária e a radiação difusa horária). Os valores horários de  $T_{amb}$  e da radiação global numa superfície inclinada a  $35^\circ$ , bem como todo o processo de cálculo, podem ser consultados no ANEXO B.

#### 4.2.2. Coeficiente de transmissão de calor por convecção, $h_{conv1}$

De forma a ter em conta a convecção natural do ar na superfície do PV, considerou-se o coeficiente  $h_{conv1}$  definido pela equação (4.1).  $Nu$  corresponde ao número de Nusselt e  $L_{PV}$  à altura da superfície do PV. O cálculo de  $Nu$  foi efetuado através da correlação empírica apresentada na equação (4.2), aplicável para qualquer valor do número de Rayleigh,  $Ra$ .

$$h_{conv1} = \frac{Nu k_{ar}}{L_{PV}} \quad (4.1)$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \times Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (4.2)$$

Por sua vez, o número de Prandtl do ar,  $Pr$ , e  $Ra$  são definidos pelas equações (4.3) e (4.4), respetivamente:

$$Pr = \frac{c_{p_{ar}} \mu_{ar}}{k_{ar}} \quad (4.3)$$

$$Ra = \frac{g \cos(90 - \gamma) \beta_{ar} (T_{sup} - T_{amb}) L_{PV}^3}{\tau_{ar} \alpha_{ar}} \quad (4.4)$$

onde  $g$  é a aceleração gravítica,  $\beta$  o coeficiente de expansão volumétrica,  $T_{sup}$  a temperatura na superfície do PV,  $\tau$  a viscosidade cinemática e  $\alpha$  a difusibilidade térmica. Tal como proposto por Kibria *et al.* [5], as propriedades do ar são definidas para quatro intervalos de temperatura diferentes, consoante a temperatura média entre  $T_{sup}$  e  $T_{amb}$ , dada por  $T_{med}$  (Tabela 4.2).

**Tabela 4.2** Evolução das propriedades do ar consoante o valor de  $T_{med}$ .

| Propriedades                                  | $T_{med}$ (10 - 20 °C) | $T_{med}$ (20 - 40 °C) | $T_{med}$ (40 - 60 °C) | $T_{med} > 60$ °C |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| $\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )                  | 1.293                  | 1.205                  | 1.127                  | 1.067             |
| $c_p$ (J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> ) | 1005                   | 1005                   | 1005                   | 1009              |
| $k$ (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )    | 0.0243                 | 0.0257                 | 0.0271                 | 0.0285            |
| $\tau$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )     | 0.00001330             | 0.00001511             | 0.00001697             | 0.0000189         |
| $\beta$ (K <sup>-1</sup> )                    | 0.0035                 | 0.0033                 | 0.0031                 | 0.0029            |

### 4.2.3. Superfície do PV

O balanço de energia na superfície do PV é exposto na equação (4.5), onde  $\varepsilon$  representa a emissividade do vidro (considerada igual a 0.9),  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann,  $I_{sol}$  a radiação solar na superfície do PV (que já tem em conta o factor de absorção e a transmissividade do vidro),  $T_{i,j}$  a temperatura do primeiro nodo do PV,  $\Delta x$  a distância do primeiro nodo do PV até à superfície e  $A$  a área de superfície do PV (para o modelo 1D, o valor da profundidade é unitário). Importa referir que todas as temperaturas devem estar convertidas em graus Kelvin. A temperatura do céu,  $T_{céu}$  (em Kelvin), é definida de acordo com Swinbank [32], pela equação (4.6). Uma vez que  $T_{sup}$  é desconhecida e as trocas radiativas com o céu são representadas por um polinómio do 4º grau, há necessidade de linearizar o termo radiativo, como indicado no ANEXO C.

$$h_{conv1}A(T_{amb} - T_{sup}) + I_{sol}A + \varepsilon\sigma A(T_{céu}^4 - T_{sup}^4) = k_{vidro}A \frac{(T_{sup} - T_{i,j})}{\Delta x} \quad (4.5)$$

$$T_{\text{céu}} = 0.037536 \times T_{\text{amb}}^{1.5} + 0.03 \times T_{\text{amb}} \quad (4.6)$$

### 4.3. Resultados

#### 4.3.1. Discretização

A discretização temporal adotada foi a mesma que a utilizada no capítulo anterior, isto é, 30 segundos. Os valores de temperatura e radiação incidente na superfície do PV a cada 30 segundos foram obtidos por interpolação linear. Em relação ao refinamento da malha, foi considerada uma discretização de 0.1 mm, que corresponde ao valor da espessura da subcamada do PV mais fina considerada (Tedlar).

#### 4.3.2. Monitorização

No sentido de avaliar a influência do PCM na *performance* do sistema, calculou-se a temperatura média nas células fotovoltaicas dos sistemas PV “normal”,  $T_{PV}$ , e PV/PCM,  $T_{PV/PCM}$ . Como referem Dubey *et al.* [3], a eficiência de um PV,  $\eta$ , pode ser calculada através da equação (4.7), onde,  $\eta_{ref}$ ,  $\xi_{ref}$  e  $T_{ref}$ , assumem os valores de 0.12, 0.0045 °C<sup>-1</sup> e 25 °C. Obtendo o valor de  $\eta$  para cada caso, pode ser aferido o aumento da eficiência proveniente da incorporação da UAE na parte posterior do PV. Além disso, uma vez que  $T_{sup}$  e  $h_{conv1}$  são monitorizados para cada “*time step*”, calculou-se a potência perdida por convecção (por metro de profundidade) em cada sistema, na superfície do PV.

$$\eta = \eta_{ref}[1 - \xi_{ref}(T_{PV} - T_{ref})] \quad (4.7)$$

#### 4.3.3. Análise e discussão

Consideraram-se espessuras de PCM a variar entre 2 e 4.5 cm, conforme indicado na Figura 4.2. Note-se que foi também simulada a evolução temporal de  $T_{PV}$  para o início do dia 16 de Agosto (até às 6 da manhã), de forma a verificar a descarga total do PCM. Como expectável, observa-se uma maior termorregulação dos sistemas PV/PCM à medida que a espessura de PCM aumenta (maior energia armazenada). Contudo, na Figura 4.3, onde se expõe a evolução temporal de  $FF$ , constata-se que a reduzida condutibilidade térmica do PCM

impossibilita a sua completa solidificação nos sistemas com espessura superior a 3 cm. Deste modo, conclui-se que a espessura ideal de PCM é de 3 cm.

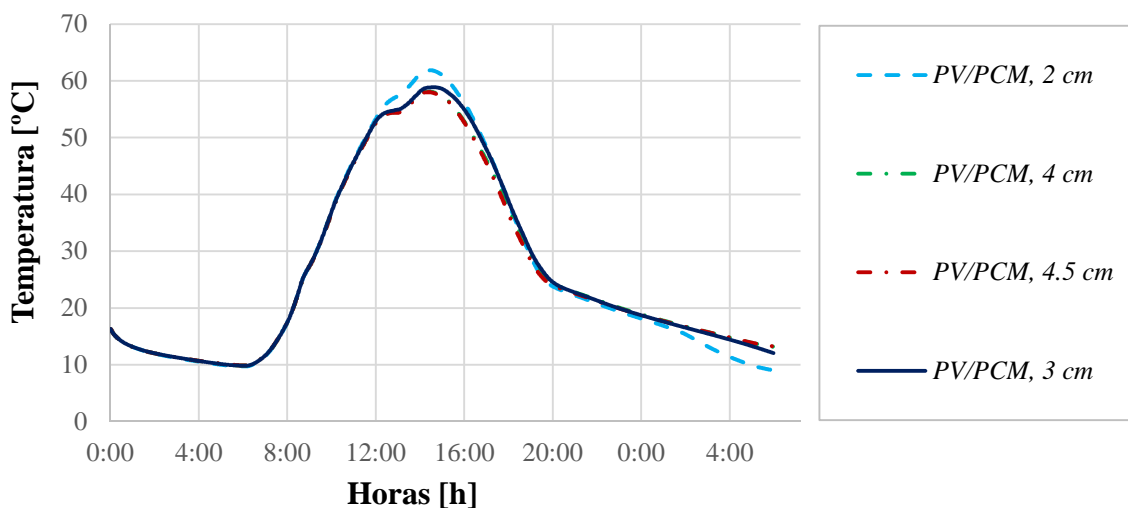


Figura 4.2 Evolução temporal de  $T_{PV}$  no sistema PV/PCM com diferentes espessuras de PCM.

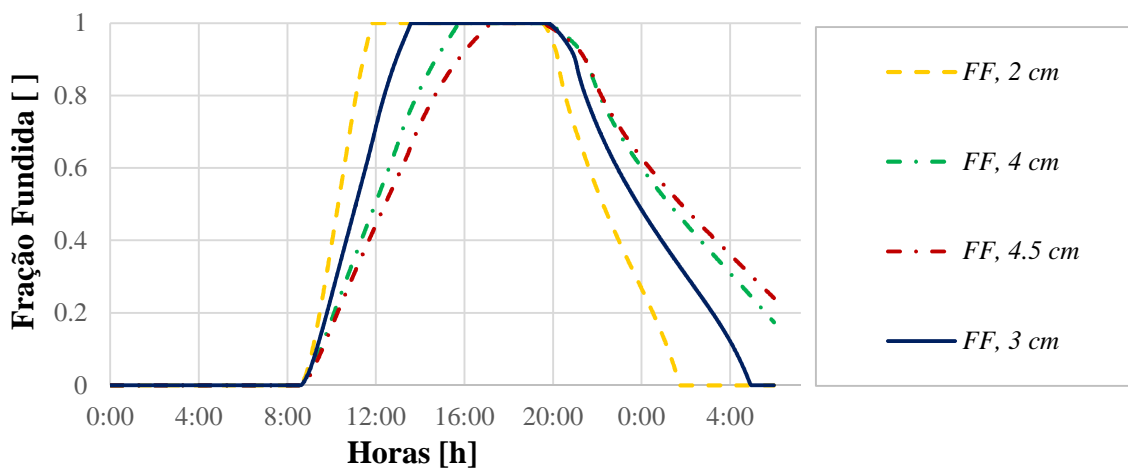


Figura 4.3 Evolução temporal da FF de PCM nos sistemas PV/PCM com diferentes espessuras de PCM.

Na Figura 4.4 é apresentada uma comparação entre o sistema PV convencional e o sistema PV/PCM (com 3 cm de espessura de PCM). Note-se o efeito da UAE na redução da temperatura das células fotovoltaicas até às 15 horas, atingindo-se uma redução superior a 10 °C entre as 9 horas e as 11:30. Contudo, a inércia térmica do PCM manifesta-se a partir das 15 horas, momento em que a  $T_{PV}$  se torna inferior a  $T_{PV/PCM}$ . A comparação da Figura

4.4 com a Figura 4.5 permite concluir que a evolução da temperatura das células PV é governada pela radiação solar. O mesmo se aplica à potência perdida por metro de profundidade, que depende diretamente de  $T_{sup}$ , por sua vez muito influenciada pela radiação incidente no PV (Figura 4.6).

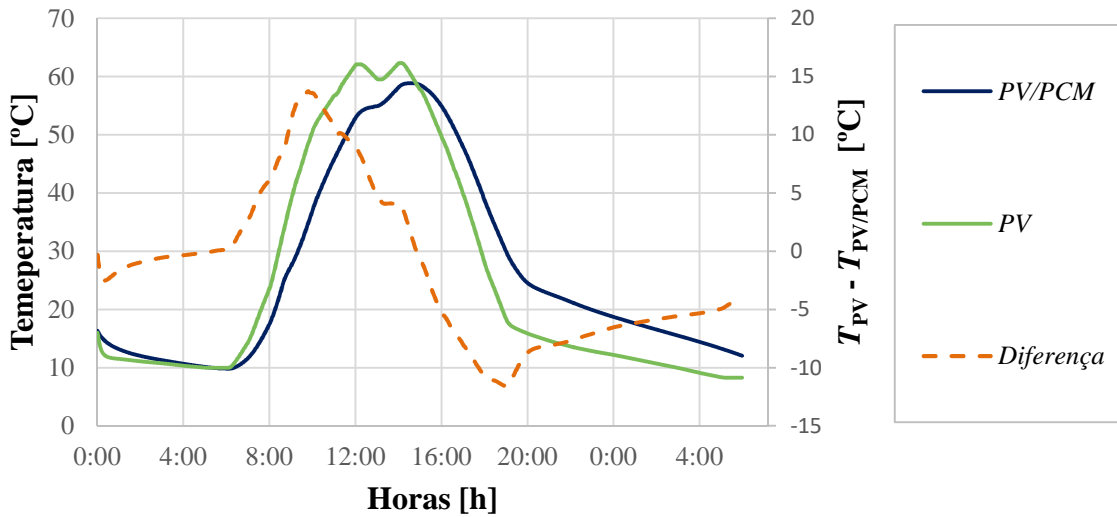


Figura 4.4 Comparação entre a temperatura média das células fotovoltaicas obtida nos sistemas PV e PV/PCM (com 3 cm de espessura de PCM).

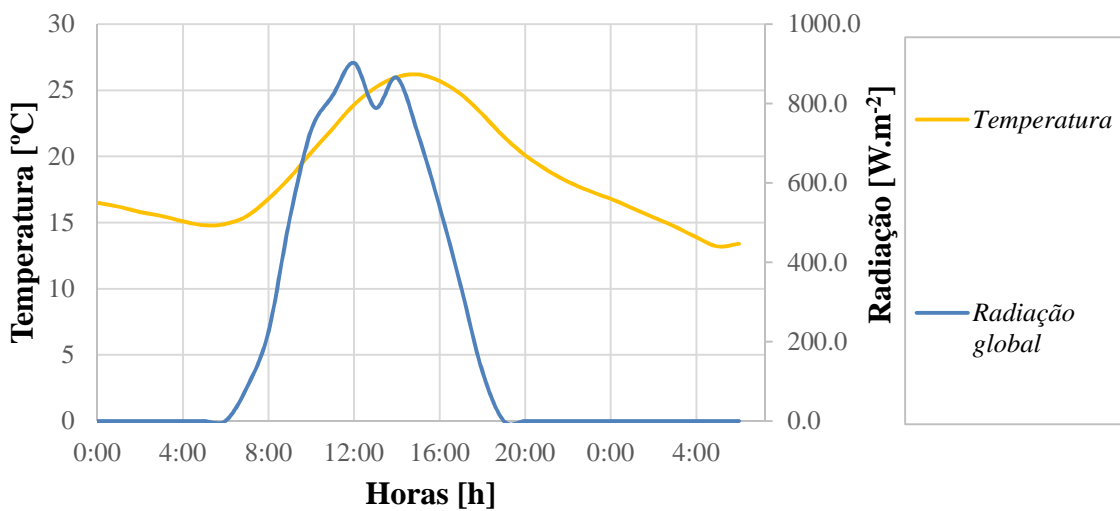


Figura 4.5 Temperatura ambiente e radiação incidente nos sistemas PV e PV/PCM para os dias 15 e 16 de Agosto.

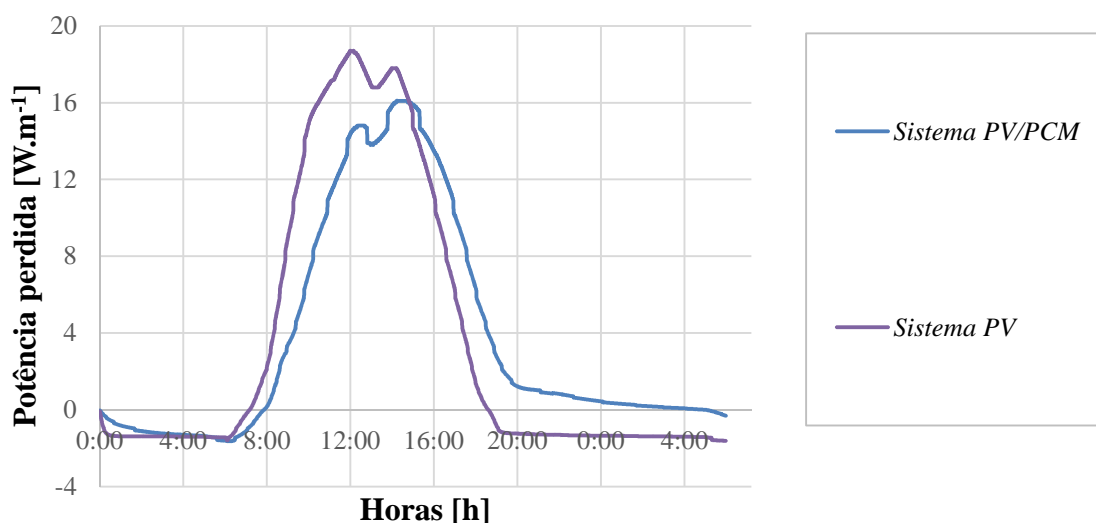


Figura 4.6 Evolução temporal da potência perdida por convecção (por metro de profundidade) na superfície dos sistemas PV e PV/PCM.

Através da aplicação da equação (4.7), que determina  $\eta$  em função da temperatura das células PV, obteve-se a Figura 4.7. Note-se que foi apenas avaliada a evolução de  $\eta$  durante o período diurno (entre as 6 e as 19 h), onde a radiação solar é convertida em energia elétrica. Das 6 às 15 h, a UAE influencia de forma favorável a eficiência do sistema PV/PCM, atingindo uma diferença máxima (face ao sistema PV) de 0.8 %, às 10h. De facto, a partir deste instante, a taxa de aumento da radiação solar reduz sensivelmente (Figura 4.5), permitindo um aumento menos acentuado da temperatura das células fotovoltaicas no sistema PV, contrariamente ao que sucede no sistema PV/PCM. Às 12h, devido à diminuição temporária dos valores de radiação global, a temperatura das células fotovoltaicas nos dois sistemas aproxima-se (elevada inércia térmica do sistema PV/PCM). Depois das 15h, o sistema PV revela-se mais eficiente, pois liberta a energia acumulada mais rapidamente que o sistema PV/PCM.



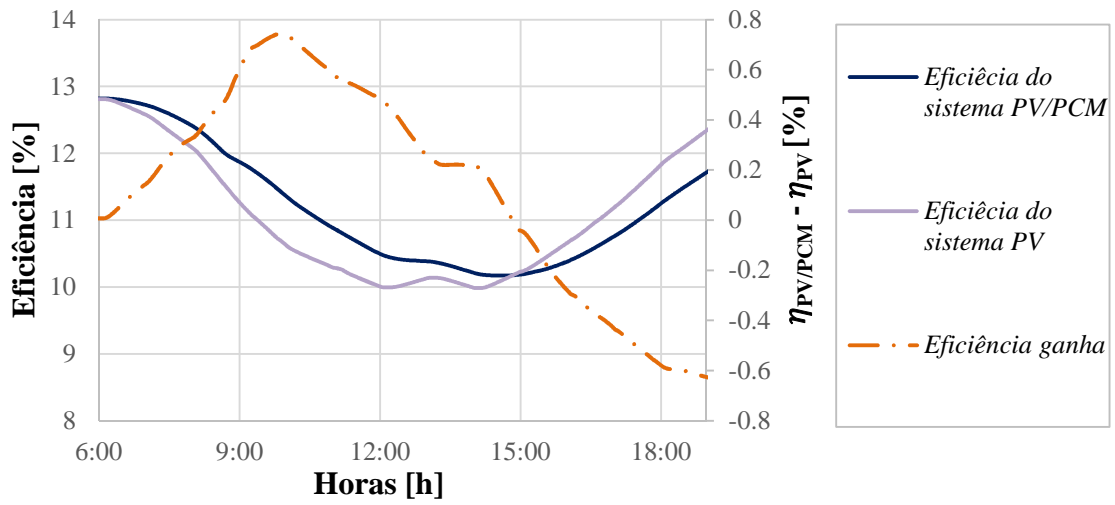


Figura 4.7 Evolução da eficiência nos sistemas PV e PV/PCM durante o período diurno.



## 5. CONCLUSÃO

### 5.1. Notas conclusivas principais

Nesta tese foi desenvolvido um modelo numérico baseado no *método da capacidade calorífica equivalente* para estudar o comportamento térmico de PCMs microencapsulados inseridos numa UAE com cavidades retangulares de alumínio. O modelo foi validado através dos resultados experimentais obtidos por Soares *et al.* [1,2], tendo sido calculado o *ER* dos resultados numéricos durante as fases de aquecimento e de arrefecimento nas UAE de 1, 5 e 15 cavidades internas. Posteriormente, avaliou-se o poder termorregulador dos PCMs num sistema PV, assim como o aumento de eficiência do sistema decorrente da sua aplicação.

Através de um modelo bidimensional em regime transiente, onde a condução é o único mecanismo de transferência de calor, concluiu-se que a incorporação do PCM – DS 5001 X em 1 só ou em 5 cavidades não afeta de forma significativa o tempo de fusão do PCM. Contudo, se o número de cavidades aumentar para 15, o tempo de fusão reduz cerca 1320 segundos, relativamente à UAE de uma só cavidade. Para os ciclos de descarga, constatou-se uma diminuição progressiva do tempo de solidificação do PCM à medida que se aumenta o número de alhetas (redução de 2700 segundos para a UAE de 5 cavidades e de 7560 segundos para a UAE de 15 cavidades). De uma forma geral, a concordância entre os resultados numéricos e experimentais propostos por Soares *et al.* [1,2] foi satisfatória.

Relativamente à incorporação de uma UAE preenchida com PCMs microencapsulados na parte posterior de um PV, concluiu-se que a espessura ótima da cavidade é de 3 cm, para um dia típico de Verão em Coimbra. A comparação da eficiência do sistema PV/PCM com o sistema PV convencional permitiu também concluir que, apesar dos resultados satisfatórios obtidos durante grande parte do período diurno, a elevada inércia térmica dos PCMs compromete a conversão de energia solar em energia elétrica quando a radiação incidente começa a diminuir (a partir das 15h).

## 5.2. Trabalhos futuros

Nesta dissertação foi apenas simulado o comportamento térmico de PCMs microencapsulados em UAE com cavidades retangulares de alumínio, onde a condução é o mecanismo de transferência de calor dominante. No sentido de avaliar os efeitos da convecção natural na fusão e solidificação de PCMs livres, deverá ser realizado um estudo numérico que simule o escoamento da fase líquida de PCMs livres no interior da macrocápsula de alumínio.

Outra questão que poderá ser avaliada num estudo futuro é a influência da forma das cavidades no tempo de fusão/solidificação dos PCMs. Uma vez que o modelo está validado, poderá testar-se qualquer configuração da macrocápsula e das cavidades.

Futuramente, deverá testar-se a aplicação da UAE num sistema PV térmico (PV/T/PCM), de forma a libertar mais rapidamente a energia armazenada durante as horas de maior radiação solar.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Soares, A. R. Gaspar, P. Santos and J. J. Costa, Experimental study of the heat transfer through a vertical stack of rectangular cavities filled with phase change materials, *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 192–205, 2015.
- [2] N. Soares, A. R. Gaspar, P. Santos and J. J. Costa, Experimental evaluation of the heat transfer through small PCM-based thermal energy storage units for building applications, *Energy Build.*, vol. 116, pp. 18–34, 2016.
- [3] S. Dubey, J. N. Sarvaiya and B. Seshadri, Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world: a review, *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 311–321, 2013.
- [4] A. Hasan, S. J. McCormack, M. J. Huang and B. Norton, Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics, *Sol. Energy*, vol. 84, no. 9, pp. 1601–1612, 2010.
- [5] M. A. Kibria, R. Saidur, F. A. Al-sulaiman and M. A. Aziz, Development of a thermal model for a hybrid photovoltaic module and phase change materials storage integrated in buildings, *Sol. Energy*, vol. 124, pp. 114–123, 2016.
- [6] M. C. Browne, B. Norton and S. J. McCormack, Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with PCM, *Sol. Energy*, vol. 133, pp. 533–548, 2016.
- [7] M. J. Huang, P. C. Eames, B. Norton and N. J. Hewitt, Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 7, pp. 1598–1603, 2011.
- [8] P. Biwole, P. Eclache and F. Kuznik, Phase-change materials to improve solar panel 's performance, *Energy Build.*, vol. 62, pp. 59–67, 2013.
- [9] M. J. Huang, P. C. Eames and B. Norton, Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, pp. 2715–2733, 2004.
- [10] D. C. Hyun, N. S. Levinson, U. Jeong and Y. Xia, Emerging applications of Phase-Change Materials (PCMs): teaching an old dog new tricks, *Angewandte Chemie International Edition* 53, pp. 3780–3795, 2014.

- [11] A. Sharma, V. V Tyagi, C. R. Chen and D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, pp. 318–345, 2009.
- [12] Z. Belén, J. Marín, L. F. Cabeza and H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, pp. 251-283, 2003.
- [13] R. Baetens, B. P. Jelle and A. Gustavsen, Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review, *Energy Build.*, vol. 42, no. 9, pp. 1361–1368, 2010.
- [14] D. David, K. Johannes and J. Roux, A review on phase change materials integrated in building walls, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, pp. 379–391, 2011.
- [15] V. V. Tyagi and D. A. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: a state of art, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, pp. 1146–1166, 2007.
- [16] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. Ali and K. Razack, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, pp. 1597–1615, 2004.
- [17] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. De Gracia and A. I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, 2011.
- [18] M. K. A. and K. Mahkamov, Solar energy storage using phase change materials, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. June 2005, pp. 1913–1965, 2007.
- [19] P. Ritt and J. Weyant, Phase Change Material (PCM) heat sinks: fundamentals of operation and real world applications, in: Live Presentation, March, 2016, <https://event.webcasts.com/starthere.jsp?ei=1092251>.
- [20] Y. Tian and C. Y. Zhao, A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications, *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 538–553, 2013.
- [21] L. Liu, D. Su, Y. Tang and G. Fang, Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 305–317, 2016.
- [22] L. Navarro, A. De Gracia, A. Castell, S. Álvarez and L. F. Cabeza, PCM incorporation in a concrete core slab as a thermal storage and supply system: proof of concept, *Energy Build.*, vol. 103, pp. 70–82, 2015.

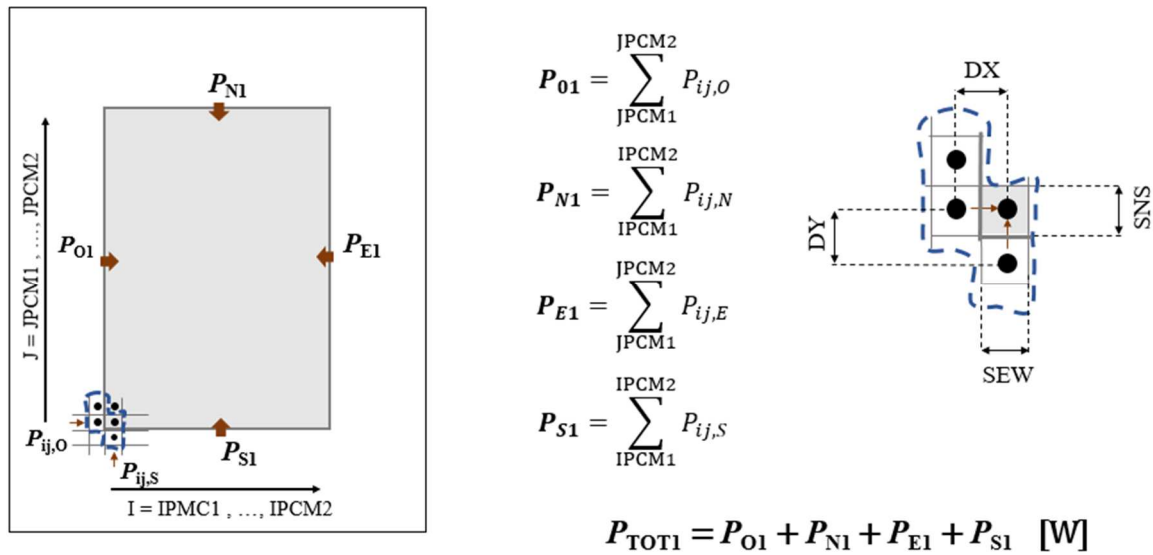
- 
- [23] P. Schossig, H. Henning and S. Gschwander, Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 89, pp. 297–306, 2005.
- [24] C. Barreneche, I. Martorell, G. Ferrer, A. Sol and L. F. Cabeza, Corrosion of metal containers for use in PCM energy storage, *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 465–469, 2015.
- [25] M. J. Huang, The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 3, pp. 957–963, 2011.
- [26] W. Libeer, F. Ramos, C. Newton, M. Alipanahrostami, C. Depcik and X. Li, Two-phase heat and mass transfer of phase change materials in thermal management systems, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 100, pp. 215–223, 2016.
- [27] W. Ye, D. Zhu and N. Wang, Fluid flow and heat transfer in a latent thermal energy unit with different phase change material (PCM) cavity volume fractions, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 42, pp. 49–57, 2012.
- [28] E. Rodriguez-ubinas, L. Ruiz-valero, S. Vega and J. Neila, Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses, *Energy Build.*, vol. 50, pp. 49–62, 2012.
- [29] A. E. Kabeel and M. Abdelgaied, Improving the performance of solar still by using PCM as a thermal storage medium under Egyptian conditions, *DES*, vol. 383, pp. 22–28, 2016.
- [30] S. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, *CRC Press*, 1980.
- [31] S. Armstrong and W. G. Hurley, A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 11–12, pp. 1488–1495, 2010.
- [32] W. C. Swinbank, Long-wave radiation from clear skies, *Q. J. R. Meteorological Society*, vol. 89, pp. 339–348, 1963.





## ANEXO A – MÉTODOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA FORNECIDA AO PCM

As figuras expostas de seguida representam os dois métodos utilizados para calcular a potência térmica fornecida ao PCM. O primeiro utiliza a ponderação da condutibilidade térmica na interface dos VCs por média harmónica.



**Figura A. 1** Método de cálculo da potência fornecida ao PCM através da ponderação da condutibilidade térmica por média harmónica.

De acordo com a Figura A. 1, para as interfaces Oeste e Sul, pode escrever-se, respetivamente:

$$P_{ij,O} = \frac{(T(IPCM1 - 1, J) - T(IPCM1, J)) \times GAMO \times (SNS \times 1)}{DX} \quad (A. 1)$$

$$P_{ij,S} = \frac{(T(I, JPCM1 - 1) - T(I, JPCM1)) \times GAMS \times (SEW \times 1)}{DY} \quad (A. 2)$$

onde GAMO e GAMS representam as condutibilidades térmicas ponderadas por média harmónica, na interface Oeste e Sul, respetivamente.

Por outro lado, o segundo método obtém o valor da potência calculando as resistências térmicas entre nodos, como indicado na Figura A. 2 e nas equações (A. 3) e (A. 4), para as interfaces Oeste e Sul, respetivamente.

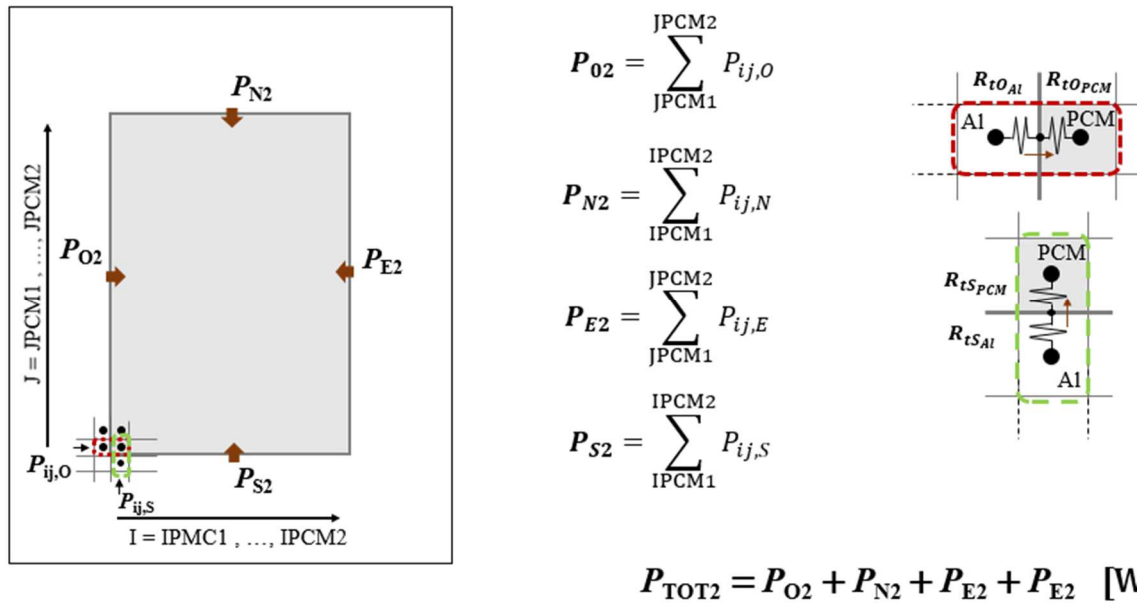


Figura A. 2 Método de cálculo da potência fornecida ao PCM através das resistências térmicas entre nodos.

$$P_{ij,o} = \frac{T(IPCM1 - 1, J) - T(IPCM1, J)}{\frac{0.5 \times DX}{k(IPCM1 - 1, J) \times SNS \times 1} + \frac{0.5 \times DX}{k(IPCM1, J) \times SNS \times 1}} \quad (A. 3)$$

$$P_{ij,s} = \frac{T(I, JPCM1 - 1) - T(I, JPCM1)}{\frac{0.5 \times DY}{k(I, JPCM1 - 1) \times SEW \times 1} + \frac{0.5 \times DY}{k(I, JPCM1) \times SEW \times 1}} \quad (A. 4)$$

## ANEXO B – TEMPERATURA AMBIENTE E RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE DO PV

Como referido na secção 4.1, pretende-se estudar um PV orientado a Sul e inclinado  $35^\circ$  relativamente à horizontal. Neste sentido, é necessário proceder ao cálculo do coeficiente  $r_b$  (razão entre a radiação incidente numa superfície inclinada e numa superfície horizontal), para cada hora do dia. O ângulo horário,  $w_i$ , correspondente a cada hora do dia, é obtido pela equação (B. 1):

$$w_i = 15 \times (12 - TST) \quad (\text{B. 1})$$

onde  $TST$  corresponde ao tempo solar real (do inglês, *True Solar Time*), que depende do dia e da localização considerada. Tendo  $w_i$ , pode calcular-se a radiação extraterrestre horária numa superfície horizontal,  $I_0$ , e a radiação extraterrestre horária numa superfície inclinada orientada a Sul,  $I_{0\beta}$ , ambas centradas em  $w_i$ , de acordo com as equações (B. 2) e (B. 3), respetivamente:

$$I_0 = I_{SC} E_0 (\sin\delta \sin\psi + \cos\delta \cos\psi \cos w_i) \quad (\text{B. 2})$$

$$I_{0\beta} = I_{SC} E_0 (\sin\delta \sin(\psi - \gamma) + \cos\delta \cos(\psi - \gamma) \cos w_i) \quad (\text{B. 3})$$

onde  $I_{sc}$  é a constante solar,  $E_0$  o fator de correção de excentricidade (depende do dia do ano),  $\delta$  a declinação solar (depende do dia do ano),  $\psi$  a latitude (depende da localização) e  $\gamma$  a inclinação da superfície (inclinação do PV). Como referido anteriormente, pode obter-se o valor de  $r_b$  para cada hora, dividindo  $I_{0\beta}$  por  $I_0$  (Tabela B. 1).

**Tabela B. 1** Valores horários de  $TST$ ,  $w_i$ ,  $I_o$ ,  $I_{o\beta}$  e  $r_b$ , para o dia 15 de Agosto de 2004, em Coimbra.

| Horas (h) | $TST$ (h) | $w_i$ (°) | $I_{o\beta}$ (kJ.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> ) | $I_o$ (kJ.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> ) | $r_b$ |
|-----------|-----------|-----------|---|--|-------|
| 0         | -0.63     | 189.43    | 0   | 0  | 0     |
| 1         | 0.37      | 174.43    | 0   | 0  | 0     |
| 2         | 1.37      | 159.43    | 0   | 0  | 0     |
| 3         | 2.37      | 144.43    | 0   | 0  | 0     |
| 4         | 3.37      | 129.43    | 0   | 0  | 0     |
| 5         | 4.37      | 114.43    | 0   | 0  | 0     |
| 6         | 5.37      | 99.43     | 0   | 180.70                                       | 0     |
| 7         | 6.37      | 84.43     | 556.69  | 1106.65                                      | 0.50  |
| 8         | 7.37      | 69.43     | 1733.48   | 2009.11                                      | 0.86  |
| 9         | 8.37      | 54.43     | 2799.43   | 2826.57                                      | 0.99  |
| 10        | 9.37      | 39.43     | 3681.90   | 3503.32                                      | 1.05  |
| 11        | 10.37     | 24.43     | 4320.76   | 3993.25                                      | 1.08  |
| 12        | 11.37     | 9.43      | 4672.47   | 4262.96                                      | 1.10  |
| 13        | 12.37     | -5.57     | 4713.05   | 4294.08                                      | 1.10  |
| 14        | 13.37     | -20.58    | 4439.74   | 4084.49                                      | 1.09  |
| 15        | 14.37     | -35.58    | 3871.17   | 3648.47                                      | 1.06  |
| 16        | 15.37     | -50.58    | 3046.09   | 3015.73                                      | 1.01  |
| 17        | 16.37     | -65.58    | 2020.72   | 2229.39                                      | 0.91  |
| 18        | 17.37     | -80.58    | 864.94  | 1343.04                                      | 0.64  |
| 19        | 18.37     | -95.58    | 0   | 417.09                                       | 0     |
| 20        | 19.37     | -110.58   | 0   | 0  | 0     |
| 21        | 20.37     | -125.58   | 0   | 0  | 0     |
| 22        | 21.37     | -140.58   | 0   | 0  | 0     |
| 23        | 22.37     | -155.58   | 0   | 0  | 0     |
| 24        | 23.37     | -170.58   | 0   | 0  | 0     |

Através dos valores de  $r_b$  e da aplicação do modelo circunsolar, para a radiação difusa, e do modelo anisotrópico, para a radiação refletida pelo solo (considerando um albedo de 0.2), calcularam-se as componentes horárias difusas e refletidas numa superfície inclinada (Tabela B. 3), partindo das mesmas numa superfície horizontal (Tabela B. 2). Note-se que os modelos aplicados são adequados à condição de céu limpo, própria de um dia típico de Verão.

**Tabela B. 2** Valores horários da temperatura e radiação global, difusa e direta numa superfície horizontal para o dia 15 de Agosto de 2004, em Coimbra (retirados do programa SOLTERM).

| Horas (h) | Temperatura ambiente (°C) | Radiação horária global (W.m <sup>-2</sup> ) | Radiação horária difusa (W.m <sup>-2</sup> ) | Radiação horária direta (W.m <sup>-2</sup> ) |
|-----------|---------------------------|--|--|--|
| 0         | 16.5                      | 0  | 0  | 0  |
| 1         | 16.2                      | 0  | 0  | 0  |
| 2         | 15.8                      | 0  | 0  | 0  |
| 3         | 15.5                      | 0  | 0  | 0  |
| 4         | 15.1                      | 0  | 0  | 0  |
| 5         | 14.8                      | 0  | 0  | 0  |
| 6         | 14.9                      | 35   | 30   | 5  |
| 7         | 15.5                      | 164  | 118  | 46   |
| 8         | 16.8                      | 255  | 210  | 45   |
| 9         | 18.4                      | 506  | 192  | 314  |
| 10        | 20.3                      | 686  | 163  | 523  |
| 11        | 22.1                      | 745  | 218  | 527  |
| 12        | 23.9                      | 810  | 208  | 602  |
| 13        | 25.2                      | 707  | 316  | 391  |
| 14        | 26                        | 783  | 175  | 608  |
| 15        | 26.2                      | 669  | 182  | 487  |
| 16        | 25.7                      | 526  | 171  | 355  |
| 17        | 24.7                      | 367  | 139  | 228  |
| 18        | 23.2                      | 190  | 101  | 89   |
| 19        | 21.5                      | 37   | 31   | 6  |
| 20        | 20.1                      | 0  | 0  | 0  |
| 21        | 19                        | 0  | 0  | 0  |
| 22        | 18.1                      | 0  | 0  | 0  |
| 23        | 17.4                      | 0  | 0  | 0  |

Por fim, deve referir-se que os valores horários de radiação solar global na superfície do PV (orientada a Sul e com uma inclinação de 35°) foram afetados pelo fator de absorção e pela transmissividade do vidro, considerados 0.8 e 0.9, respetivamente, como considerado por Kibria *et al.* [5].

**Tabela B. 3** Valores horários da temperatura e radiação global, difusa, direta e refletida pelo solo numa superfície orientada a Sul e inclinada 35°, para o dia 15 de Agosto de 2004, em Coimbra.

| Horas (h) | Temperatura ambiente (°C) | Radiação horária global (W.m <sup>-2</sup> ) | Radiação horária difusa (W.m <sup>-2</sup> ) | Radiação horária direta (W.m <sup>-2</sup> ) | Radiação horária refletida pelo solo (W.m <sup>-2</sup> ) |
|-----------|---------------------------|--|--|--|---|
| 0         | 16.5                      | 0  | 0  | 0  | 0   |
| 1         | 16.2                      | 0  | 0  | 0  | 0   |
| 2         | 15.8                      | 0  | 0  | 0  | 0   |
| 3         | 15.5                      | 0  | 0  | 0  | 0   |
| 4         | 15.1                      | 0  | 0  | 0  | 0   |
| 5         | 14.8                      | 0  | 0  | 0  | 0   |
| 6         | 14.9                      | 1.13   | 0.00   | 0.00   | 1.13  |
| 7         | 15.5                      | 87.80  | 59.36  | 23.14  | 5.31  |
| 8         | 16.8                      | 228.17                                       | 181.19                                       | 38.83  | 8.15  |
| 9         | 18.4                      | 516.90                                       | 190.16                                       | 310.99                                       | 15.75   |
| 10        | 20.3                      | 741.51                                       | 171.31                                       | 549.66                                       | 20.54   |
| 11        | 22.1                      | 827.30                                       | 235.88                                       | 570.22                                       | 21.20   |
| 12        | 23.9                      | 909.51                                       | 227.98                                       | 659.83                                       | 21.70   |
| 13        | 25.2                      | 793.68                                       | 346.83                                       | 429.15                                       | 17.70   |
| 14        | 26                        | 869.38                                       | 190.22                                       | 660.88                                       | 18.27   |
| 15        | 26.2                      | 724.42                                       | 193.11                                       | 516.73                                       | 14.58   |
| 16        | 25.7                      | 542.09                                       | 172.72                                       | 358.57                                       | 10.79   |
| 17        | 24.7                      | 339.84                                       | 125.99                                       | 206.66                                       | 7.19  |
| 18        | 23.2                      | 125.99                                       | 65.05  | 57.32  | 3.63  |
| 19        | 21.5                      | 0.70   | 0.00   | 0.00   | 0.70  |
| 20        | 20.1                      | 0  | 0  | 0  | 0   |
| 21        | 19                        | 0  | 0  | 0  | 0   |
| 22        | 18.1                      | 0  | 0  | 0  | 0   |
| 23        | 17.4                      | 0  | 0  | 0  | 0   |

## ANEXO C – LINEARIZAÇÃO DO TERMO RADIATIVO E IMPLEMENTAÇÃO DA CONDIÇÃO MULTIFLUXO

A linearização do termo radiativo é apresentada na equação (C. 1). Deve referir-se que  $T_{sup}$  é calculada com base no valor “velho” de  $T_{i,j}$ , correspondente à última iteração.  $D_{conv}$ ,  $D_{cond}$  e  $D_{rad}$  correspondem às condutâncias térmicas convectivas, condutivas e radiativas, respetivamente.

$$\begin{aligned}
 D_{conv}(T_{amb} - T_{sup}) + I_{sol}A + \varepsilon\sigma A(T_{c\acute{e}u}^2 + T_{sup}^2)(T_{c\acute{e}u} + T_{sup})(T_{c\acute{e}u} - T_{sup}) &= D_{cond}(T_{sup} - T_{i,j}) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow D_{conv}(T_{amb} - T_{sup}) + I_{sol}A + D_{rad}(T_{c\acute{e}u} - T_{sup}) &= D_{cond}(T_{sup} - T_{i,j}) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow T_{sup} &= \frac{D_{conv}T_{amb} + D_{cond}T_{i,j} + I_{sol}A + D_{rad}T_{c\acute{e}u}}{D_{conv} + D_{cond} + D_{rad}} \quad (C. 1)
 \end{aligned}$$

$D_{rad}$  é dependente de  $T_{sup}$ , o seu valor para uma dada iteração será, de forma análoga a  $T_{i,j}$ , o valor da iteração anterior. Apresentando a potência fornecida ao PV,  $P_{PV}$ , sob a forma linearizada do termo fonte, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 P_{PV} &= D_{cond}(T_{sup} - T_{i,j}) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow P_{PV} &= D_{cond}T_{sup} - D_{cond}T_{i,j} \quad (C. 2)
 \end{aligned}$$

onde o primeiro termo deve ser incrementado a  $S_U$ , parte constante do termo fonte, e  $S_P$  (coeficiente da parte variável do termo fonte) subtraído por  $D_{cond}$ .

