

Vera Domingues Lourenço

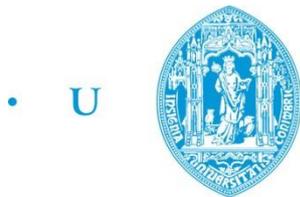
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM UNIDADES DE ARMAZENAMENTO DE CALOR AMOVÍVEIS

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Energia e Ambiente

setembro/2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM UNIDADES DE ARMAZENAMENTO DE CALOR AMOVÍVEIS

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

**Experimental evaluation of the performance of
photovoltaic panels with movable thermal energy storage
units**

Autor

Vera Domingues Lourenço

Orientadores

Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Professor Doutor Nelson Miguel Lopes Soares

Júri

Presidente Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogal Professor João Alexandre Dias Carrilho
Professor Investigador da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2018

“A felicidade não depende do que nos falta, mas do bom uso do que temos.”

[Thomas Hardy]

Aos meus pais

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.

Em primeiro lugar agradeço aos meus orientadores Professor Doutor Adélio Rodrigues Gaspar e Professor Doutor Nelson Soares, pela constante disponibilidade e pela preciosa ajuda, o meu muito obrigada.

Ao Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, na pessoa do Eng. Pedro Cardoso, por toda a disponibilidade prestada e pelo empréstimo de algum equipamento imprescindível para a implementação do meu plano de trabalhos.

Aos meus amigos, pelo companheirismo, força e apoio. À Carolina Domingues e ao André Loureiro um agradecimento especial.

Por fim, não poderia deixar de agradecer a toda a minha família. Aos meus pais, ao meu irmão e à minha avó um agradecimento de coração, pelo seu apoio incondicional, encorajamento, afeto e paciência.

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 | PTDC/EMS-ENE/6079/2014, 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 é avaliar experimentalmente, o aumento da eficiência das células fotovoltaicas na conversão de energia solar em energia elétrica quando se utilizam abordagens passivas de refrigeração dos painéis fotovoltaicos (PV). Face à necessidade de melhorar tal eficiência, é feita uma avaliação da transferência de calor através das unidades de armazenamento de energia (UAE) amovíveis, contendo PCMs no seu interior, com o objetivo de perceber o seu efeito de termorregulação de painéis PV. Foi usado o PCM RT22HC da *Rubitherm Technologies GmbH* que apresenta uma temperatura de fusão de aproximadamente 22 °C.

Este estudo tem como ponto de partida uma instalação desenvolvida no plano de trabalhos do Professor Doutor Nelson Soares, no terraço da cobertura do edifício da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI).

O sistema de monitorização e aquisição de dados é constituído por um programa desenvolvido em *LabView*TM, por fluxímetros, termopares devidamente calibrados, um piranómetro e ainda por equipamento de medição da curva característica de painéis PV (PVPM2540C). A instalação experimental é constituída por três painéis PV monitorizados individualmente e instalados em paralelo.

Mediante os objetivos traçados, numa primeira fase, levou-se a cabo a calibração dos painéis PV. Com recurso ao equipamento de medição PVPM2540C, com condições climáticas de céu limpo, foram obtidos os principais valores das curvas características de cada painel PV. De modo a levar a cabo a validação do programa desenvolvido em *LabView*TM, foram registadas durante três dias consecutivos as curvas da tensão e da corrente para posteriores comparações.

Como o grande objetivo deste trabalho é perceber em que medida as UAE amovíveis preenchidas com PCMs podem ser usadas para a termorregulação de painéis PV sem apoio de outros dispositivos para auxiliar os processos de mudança de fase dos PCMs, numa segunda fase e com recurso ao programa desenvolvido em *LabView*TM, foram registadas durante seis dias consecutivos as curvas da corrente e da tensão de cada painel PV (para posterior cálculo da potência elétrica e da energia produzida). No decorrer desta etapa um dos painéis é considerado como o painel de referência, e os outros dois funcionam como

sistemas PV/PCM. A um deles é anexada uma UAE com cavidades horizontais e ao outro uma UAE com cavidades verticais. As condições meteorológicas foram devidamente monitorizadas, assim como a evolução da temperatura na parte frontal e posterior dos painéis PV e das UAE. Foi ainda registada a evolução dos fluxos de calor nas superfícies frontal e posterior das UAE.

Depois de analisados os resultados obtidos, concluiu-se que o PCM utilizado possui uma temperatura de mudança de fase muito baixa para potenciar a termorregulação dos painéis PV para as condições meteorológicas registadas durante o período de análise (16 a 21 de agosto). Isto deve-se ao fato de o PCM não solidificar durante o período noturno, uma vez que a temperatura ambiente é muito próxima da temperatura de mudança de fase do PCM.

Posteriormente, no final de agosto, as temperaturas registadas em Coimbra durante o período noturno baixaram alguns graus. Voltou-se a montar toda a instalação e a analisar os resultados obtidos, concluindo-se que o painel PV1 continua a ser o que possui temperaturas operativas mais baixas, ou seja, o painel sem qualquer UAE, onde a refrigeração é feita por convecção natural.

Palavras-chave: Painel fotovoltaico, PV, Material de mudança de fase, PCM, Termorregulação, Eficiência de conversão, Corrente elétrica, Tensão elétrica.

Abstract

The main objective of this work is to evaluate experimentally the increasing efficiency of PV cells, using passive cooling systems to minimize heat absorption from PV panel without additional power consumption. In view of the need to improve such efficiency, an evaluation of the heat transfer through the mobile energy storage units containing PCMs is made, in order to understand its thermoregulation effect on the PV panels. The PCM used is a paraffinic organic type RT22HC of *Rubitherm Technologies GmbH* with a phase change between solid and liquid at 22°C.

This study has as its starting point an installation developed in the work plan of Professor Nelson Soares, on the roof terrace of the building of the Association for the Development of Industrial Aerodynamics (ADAI).

The monitoring and data acquisition system is composed of a LabView developed program, heat flux sensors, thermocouples properly calibrated, a pyranometer and also by measuring equipment of the characteristic curve of PV panels (PVPM2540C). The experimental setup is made up of three PV panels, connected in parallel and individually monitored.

Through the goals outlined, in a first phase, the calibration of the PV panels was carried out. Using the measuring equipment PVPM2540C, with clean sky conditions, the main values of the characteristic curves of each PV panel were obtained. In order to carry out the validation of the program developed in *LabView*, the voltage and current curves for subsequent comparisons were recorded for three consecutive days.

As the big goal of this work is to understand the extent to which the movable UAE filled with PCMs can be used for the thermoregulation of PV panels without the additional devices to assist the phase change processes of the PCMs, in a second phase using the program in *LabView*, the current and voltage curves of each PV panel (for later calculation of the power and energy produced) were recorded for six consecutive days. During this stage, one of the panels is considered as the reference panel, and the other two work as PV / PCM systems. A UAE with horizontal cavities is annexed to one of them and to the other is annexed a UAE with vertical cavities. The weather conditions were monitored

as well as the temperature evolution on the front and back of the PV and UAE panels. The evolution of the heat fluxes on the front and back surfaces of the UAE were also recorded.

After studying the obtained results, it was concluded that the PCM used has a very low phase change temperature to enhance the thermoregulation of the PV panels to the weather conditions registered during the period of analysis (16-21 august). This is due to the fact that the PCM does not solidify during the night time, since the ambient temperature is very close to the phase change temperature of the PCM.

Afterward, at the end of august, temperatures recorded in Coimbra during the night period dropped a few degrees. The entire installation was set up and the results obtained were examined. It was concluded that the PV1 panel continues to be the one with the lowest operating temperatures, that is, the panel without any UAE, where the cooling is done by natural convection.

Keywords Photovoltaic panel, PV, Phase change material, PCM, Thermoregulation, Conversion efficiency, electric current, electric voltage.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	3
1.3. Objetivos do trabalho.....	3
1.4. Estrutura da dissertação	4
2. Revisão bibliográfica.....	5
2.1. Células fotovoltaicas.....	5
2.1.1. Efeito de dopagem.....	5
2.1.2. Tipos de células fotovoltaicas	6
2.2. Efeito fotovoltaico	7
2.3. Impacto da temperatura na eficiência das células fotovoltaicas.....	9
2.4. Métodos para regulação térmica com PCMs	13
2.4.1. Abordagens passivas	14
2.4.2. Avaliação da transferência de calor em elementos com PCMs.....	17
2.4.3. Efeito da temperatura de transição de diferentes tipos de PCMs na eficiência dos sistemas PV.....	20
2.5. Sistemas PV	22
3. Instalação experimental.....	25
3.1. Descrição global	25
3.1.1. Estrutura de suporte.....	26
3.1.2. Unidades de armazenamento de energia (UAE).....	27
3.1.3. PCM utilizado.....	28
3.1.4. Enchimento e selagem das UAE	29
3.1.5. Instrumentação.....	29
3.1.6. Microinversor	34
3.1.7. Estação meteorológica.....	35
4. Protocolo experimental.....	37
4.1. Disposição e fixação dos termopares e dos sensores de fluxo de calor na instalação experimental	37
4.2. Energia elétrica gerada pelos painéis PVs	38
4.2.1. Medição da tensão elétrica e da corrente elétrica	38
4.3. Calibração	39
4.3.1. Calibração do piranómetro	39

Avaliação experimental do desempenho de painéis fotovoltaicos com unidades de armazenamento de calor amovíveis

4.3.2.	Análise dos dados obtidos pelo equipamento PVPM2540C e pelo sistema de aquisição desenvolvido em <i>LabView</i> TM	39
4.3.3.	Preparação das UAE.....	41
5.	Resultados e Conclusões	43
5.1.	Calibração	43
5.1.1.	Calibração do piranómetro	43
5.1.2.	Análise dos dados obtidos pelo equipamento PVPM2540C e pelo sistema de aquisição desenvolvido em <i>LabView</i> TM	44
5.2.	Estudo do efeito termorregulador das UAE	50
6.	Notas Conclusivas	59
6.1.	Conclusões.....	59
6.2.	Trabalhos futuros.....	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	APÊNDICE - Calibração	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolução mundial da capacidade de energias renováveis instalada. Figura adaptada da ref. [2].	2
Figura 2.1. Espectro da radiação solar em função do comprimento de onda. Figura adaptada da ref. [8].	6
Figura 2.2. Representação da junção $p-n$ indicando-se a região de depleção junto da junção $p-n$. Figura adaptada da ref. [7].	7
Figura 2.3. Circuito equivalente de uma célula PV. Figura adaptada da ref. [6].	8
Figura 2.4. Representação da estrutura típica de uma célula de silício cristalino: 1- Contactos metálicos; 2-Recombinação; 3-Separação da carga; 4-Energia do fóton não utilizada; 5-Reflexão. Figura adaptada da ref. [1].	8
Figura 2.5. Representação esquemática das curvas características de um módulo PV.	10
Figura 2.6. Variação da tensão em circuito aberto em função da temperatura da junção $p-n$ de uma célula PV. Figura adaptada da ref. [5].	11
Figura 2.7. Curvas Características (a) $V-P$ e (b) $V-I$ dos painéis PVs usados na instalação experimental. Figura retirada do catálogo do fornecedor - modelo RSM60-6-250P da Risen [9].	11
Figura 2.8. Potência de uma célula PV de silício cristalino para diferentes temperaturas de operação. Figura adaptada da ref. [5].	12
Figura 2.9. Comparação do desempenho de um painel fotovoltaico convencional e de um sistema PV/PCM durante um ano. (a) Produção de energia elétrica; (b) eficiência de produção de energia elétrica. Figuras adaptadas da ref. [10].	13
Figura 2.10. Curvas teóricas que representam o armazenamento e a dissipação de energia térmica na fase de aquecimento e arrefecimento de um PCM. Figuras adaptadas da ref. [12].	15
Figura 2.11. Curva teórica da relação temperatura – armazenamento de energia térmica no caso de PCMs comerciais. Figura retirada da ref. [12].	16
Figura 2.12. Unidade de armazenamento de calor latente. Figura adaptada da ref. [15].	18
Figura 2.13. Configurações dos sistemas fotovoltaicos: (a) sistema PV/PCM sem alhetas (PV2/PCM); (b) sistema PV/PCM com alhetas (PV3/PCM). Figuras retiradas da ref. [17].	19
Figura 2.14. Resultados obtidos e sua validação. (a) sistema PV (PV1); (b) sistema PV/PCM sem alhetas (PV2/PCM). Figuras retiradas da ref. [17].	20
Figura 2.15. Temperatura na superfície frontal do sistema PV/PCM no dia (a) (b) (c) e (d). Figura retirada da ref. [18].	21

Avaliação experimental do desempenho de painéis fotovoltaicos com unidades de armazenamento de calor amovíveis

Figura 2.16. Características meteorológicas para dois casos de estudo: (a) Paquistão; (b) Irlanda. Figuras adaptadas da ref. [3].....	22
Figura 3.1. Representação esquemática da instalação experimental piloto com os principais instrumentos/equipamentos usados.....	25
Figura 3.2. Instalação experimental – disposição dos painéis PV.	26
Figura 3.3. Dimensões dos perfis da Extrusal usados no fabrico das UAE. Imagem adaptada do catálogo da Extrusal.....	27
Figura 3.4. UAE com: (a) 19 cavidades na vertical; (b) 32 cavidades na horizontal.....	28
Figura 3.5. (a) Enchimento das cavidades das UAE com o PCM no estado líquido; (b) selagem das cavidades de forma a evitar a fuga de PCM líquido.....	29
Figura 3.6. Calibração dos 126 termopares.....	31
Figura 3.7. Equipamento PVPM2540C utilizado para a caracterização dos painéis PVs utilizados.	34
Figura 4.1. Distribuição dos sensores de temperatura e de fluxo de calor nos 3 painéis PV e nas duas UAE utilizados.	37
Figura 4.2. (a) Câmara climática instalada no LAI; (b) UAE no interior da câmara climática.	41
Figura 5.1. Evolução da radiação solar numa superfície horizontal ao longo de um dia (2 de agosto de 2018).	44
Figura 5.2. Características meteorológicas dos dias avaliados (19 a 21 de maio de 2018). 45	
Figura 5.3. Valores de potência obtidos pelos três painéis PV durante três dias consecutivos.	46
Figura 5.4. Produção de energia elétrica diária por cada painel PV nos diferentes dias e percentagens relativas ao PV1.	47
Figura 5.5. Condições meteorológicas de ensaio – 14 a 19 de agosto de 2018.	50
Figura 5.6. Variação da temperatura nas superfícies frontal e posterior de cada painel PV ao longo dos dias consecutivos de análise.	51
Figura 5.7. Fluxo de calor ao longo dos dias na parte posterior dos painéis PV.	52
Figura 5.8. Evolução da temperatura ao longo dos dias no sistema PV/PCM3.....	53
Figura 5.9. Fluxos de calor nas superfícies do sistema PV/PCM3.	54
Figura 5.10. Produção de energia elétrica diária por cada painel PV nos diferentes dias de análise e percentagens relativas ao PV1.	55
Figura 5.11. Comparação das características meteorológicas de três dias de estudo em maio (19 20 e 21) com três dias de estudo em agosto (14 15 e 16).	55
Figura 5.12. Condições meteorológicas e evolução da temperatura nas superfícies posteriores dos painéis PV ao longo dos dias em análise (28 a 30 de agosto de 2018).	56

Figura 5.13. Características meteorológicas e evolução das temperaturas nas superfícies do sistema PV/PCM2 ao longo dos dias em análise. 57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Principais características das UAE.	27
Tabela 3.2. Propriedades termofísicas do PCM RT22HC. Características retiradas da ficha técnica [19].	28
Tabela 3.3. Características técnicas do banho termostatizado DBT KB21. Dados retirados da ficha técnica do modelo usado.	31
Tabela 3.4. Características técnicas do piranómetro CM 11. Dados retirados da ficha técnica do piranómetro da <i>Kipp & Zonen</i> modelo CM11 [19].	31
Tabela 3.5. Características técnicas dos sensores de fluxo de calor HFS-4. Dados retirados da ficha técnica do modelo aplicado [20].	32
Tabela 3.6. Características técnicas do <i>Pico TC-08</i> . Dados retirados da ficha técnica do modelo utilizado [20].	33
Tabela 3.7. Características técnicas do equipamento <i>PVPM2540C</i> . Dados retirados do catálogo da PVE®.	34
Tabela 3.8. Características técnicas dos microinversores utilizados. Dados retirados da ficha técnica do microinversor da BeOn2 [22].	35
Tabela 4.1. Características dos painéis fotovoltaicos utilizados. Dados retirados da ficha técnica do modelo RSM-60-6-250P da Risen [9].	40
Tabela 5.1. Valor de máxima potência registado nos três dias consecutivos.	46
Tabela 5.2. Dados característicos do painel PV 1 obtidos a partir do equipamento PVPM2540C.	47
Tabela 5.3. Dados característicos do painel PV2 obtidos a partir do equipamento PVPM2540C.	48
Tabela 5.4. Dados característicos do painel PV3 obtidos a partir do equipamento PVPM2540C.	48
Tabela 5.5. Comparação da produção de energia elétrica.	56
Tabela 0.1. Média da temperatura registada pelos termopares utilizados.	63
Tabela 0.2. Fatores de sensibilidade dos diferentes sensores de fluxo de calor HFS-4 utilizados.	63

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

E_{eff}	Radiação solar [W/m^2]
E_r	Erro relativo [%]
FF	Fator adimensional
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2K]
I	Corrente elétrica [A]
$I_{P\ máx}$	Corrente no ponto de potência máxima [A]
$I_{Piranómetro}$	Radiação solar medida pelo piranómetro [W/m^2]
I_{PVPM}	Radiação solar medida pelo equipamento PVPM2540C [W/m^2]
I_{SC}	Corrente em curto-circuito [A]
P	Potência [W]
$P_{máx}$	Potência máxima [W]
P_{Pk}	Potência máxima nas condições STC [W]
T_{mod}	Temperatura medida pelo equipamento PVPM2540C [$^{\circ}C$]
T_f	Temperatura de fusão [$^{\circ}C$]
T_s	Temperatura de solidificação [$^{\circ}C$]
T_{sup}	Temperatura na superfície [$^{\circ}C$]
T_m	Temperatura de mudança de fase em PCMs ideais [$^{\circ}C$]
ΔT_m	Intervalo de tempo de mudança de fase [s]
R	Resistência [Ω]
V	Tensão elétrica [V]
$V_{P\ máx}$	Tensão no ponto de potência máxima [V]
V_{OC}	Tensão em curto-circuito [V]

Siglas

3D	Tridimensional
AC	Corrente Alternada (do inglês “ <i>Alternate Current</i> ”)
ADAI	Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial
CAD	Desenho assistido por computador (do inglês “ <i>Computer Aided Design</i> ”)
CTCV	Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro
DC	Corrente Contínua (do inglês “ <i>Direct Current</i> ”)
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
PCM	Material de mudança de fase (do inglês “ <i>Phase Change Materials</i> ”)
PV	Fotovoltaico
STC	Condições nominais de teste (do inglês “ <i>Standard Test Conditions</i> ”)
UAE	Unidade de armazenamento de energia

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Na sociedade atual, o consumo de energia é essencial para todos os setores da atividade económica. Num mundo em permanente evolução, a energia é um recurso imprescindível que leva à grande procura dos combustíveis fósseis. A queima destes combustíveis gera altos índices de poluição atmosférica, sendo os grandes responsáveis pelo efeito de estufa e pelo aquecimento global. Deve ser adotado o conceito de desenvolvimento sustentável visto que este se refere a um modelo de desenvolvimento capaz de responder às necessidades do presente, preservando simultaneamente o meio envolvente a curto, médio e longo prazo. Exige-se assim um uso mais racional da energia e o recurso a fontes de energia renováveis. Por definição, uma fonte de energia é dita renovável quando não é possível determinar o fim da sua existência. É o caso, por exemplo, da energia solar e da energia eólica. De facto, a quantidade de energia solar que atinge a superfície da terra corresponde, aproximadamente, a dez mil vezes a procura global de energia [1].

Os sistemas fotovoltaicos (PV – do Inglês *photovoltaics*) convertem a energia da luz do sol em energia elétrica. Nos últimos anos, muita investigação tem sido desenvolvida no sentido de aumentar a eficiência de painéis PV e de diminuir os seus custos de produção e manutenção. A Figura 1.1 mostra a evolução mundial da capacidade de energia renovável instalada na última década. Conforme se pode verificar, a energia fotovoltaica contribui de forma significativa para o total da capacidade instalada, sendo a tipologia de energia que cresceu a uma taxa mais acentuada nos últimos anos. Assim, o desenvolvimento de tecnologias que permitam aumentar a eficiência dos painéis PV é vista como uma área de investigação bastante ativa.

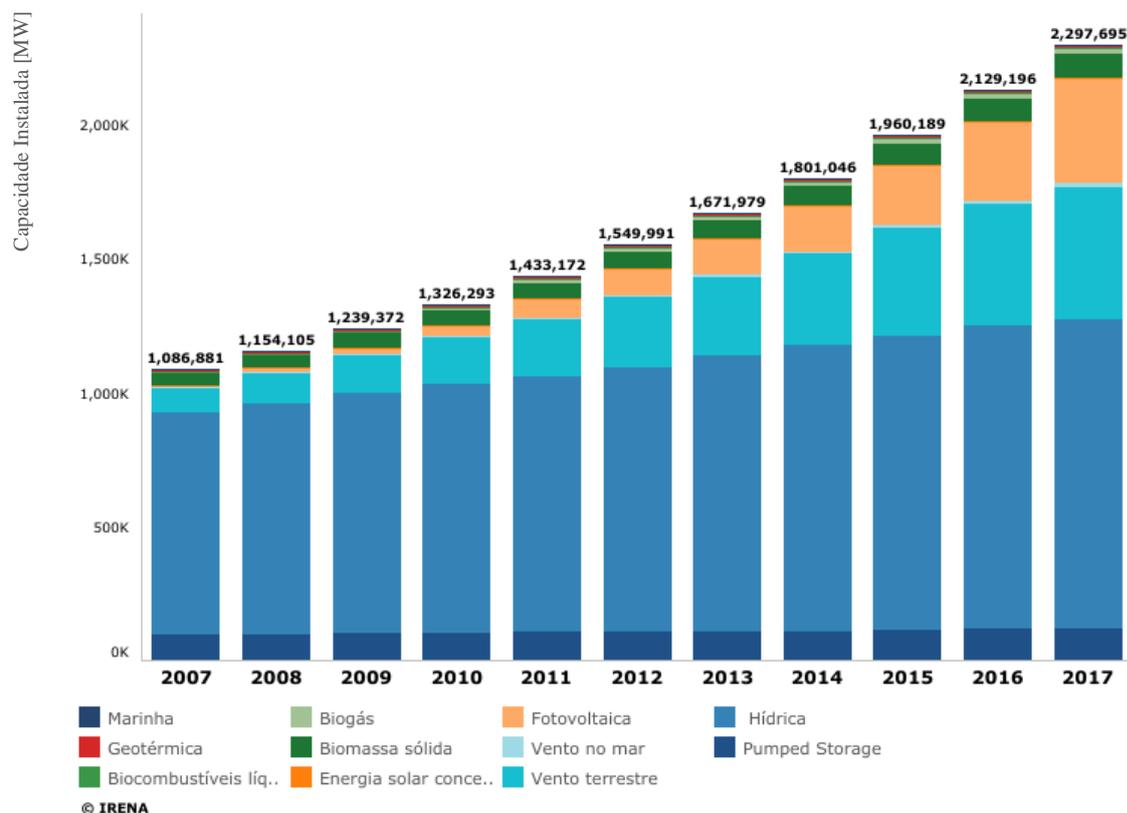


Figura 1.1. Evolução mundial da capacidade de energias renováveis instalada. Figura adaptada da ref. [2].

Vários autores têm proposto a utilização de materiais de mudança de fase (PCMs – do Inglês *phase change materials*) para a termorregulação de painéis PV. Se o PCM selecionado for capaz de reduzir a temperatura operativa do painel PV, a eficiência na conversão de energia solar em energia elétrica nas células fotovoltaicas será aumentada. Na literatura são descritas várias técnicas para a inclusão de PCMs em sistemas PV, por exemplo, através da acoplação na parte posterior do painel de unidades de armazenamento de energia (UAE) metálicas com cavidades de secção retangular preenchidas com PCMs [3],[4]. As UAE preenchidas com PCMs contribuem para a termorregulação do sistema a uma temperatura próxima da temperatura de fusão do(s) PCM(s) selecionado(s). Os PCMs absorvem grandes quantidades de calor (calor latente) quando mudam de fase de sólido para líquido e, da mesma maneira, libertam esse calor quando mudam de fase de líquido para sólido (durante a mudança de fase, a temperatura do PCM é aproximadamente constante). Conclui-se assim que o uso de UAE preenchidas com PCMs poderá aumentar significativamente a eficiência de sistemas PV.

1.2. Motivação

Os sistemas PV constituídos por células de silício cristalino apresentam uma redução da sua eficiência quando operam a uma temperatura superior a 25 °C [5]. Na literatura são descritas várias estratégias para prevenir o sobreaquecimento dos sistemas PV, tais como a circulação natural/forçada de ar, a refrigeração hidráulica, a refrigeração termoelétrica e a utilização de PCMs para a sua termorregulação [4], [6]. Os PCMs são materiais com elevado calor latente de fusão e uma temperatura de transição de fase conhecida e próxima do campo de aplicação desejado. No caso de um sistema PV, se o PCM selecionado for capaz de reduzir a sua temperatura de operação, a eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica poderá ser melhorada [3].

A principal motivação para a elaboração desta tese é contribuir para o avanço da ciência nesta área de investigação, e perceber em que medida diferentes UAE amovíveis preenchidas com PCMs podem ser usadas para a termorregulação de painéis PV de forma passiva, ou seja, sem apoio de outros dispositivos para auxiliar os processos de mudança de fase dos PCMs. Outra motivação inerente à execução desta tese é a de poder contribuir para a proliferação do uso da energia fotovoltaica.

1.3. Objetivos do trabalho

Esta dissertação tem como objetivo principal a execução de ensaios experimentais para quantificar o impacto do efeito termorregulador proporcionado pelos PCMs no desempenho de painéis PV comerciais. A partir de uma instalação experimental piloto instalada na cobertura do edifício da ADAI, em Coimbra, será desenvolvido um estudo paramétrico que tem como principal objetivo avaliar o aumento da eficiência das células fotovoltaicas na conversão de radiação solar em energia elétrica, considerando UAE com diferentes configurações e preenchidas com um PCM livre. O termo "livre" significa que o contentor metálico será a única forma de confinamento para se evitarem fugas de material líquido. Assim, o PCM líquido pode mover-se "livremente" dentro das cavidades devido ao fenómeno de convecção natural.

As UAE serão acopladas à superfície posterior dos painéis PV a serem monitorizados. Um dos três painéis da instalação piloto (instalados em paralelo) é tratado

como o painel de referência, ou seja, não lhe será acoplada nenhuma UAE. As UAE são constituídas por um arranjo de cápsulas de alumínio de secção retangular preenchidas com o PCM.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por 6 capítulos e um apêndice. No primeiro capítulo, procura-se justificar a relevância do tema desenvolvido, faz-se o enquadramento da temática e apresentam-se os principais objetivos do trabalho. No segundo capítulo, faz-se a revisão bibliográfica. São revistos diferentes conceitos, tais como: o funcionamento das células fotovoltaicas, como é que o efeito fotovoltaico leva ao aparecimento de corrente elétrica e como é que a temperatura operativa das células fotovoltaicas altera o seu desempenho. São também apresentadas algumas técnicas para evitar o aumento da temperatura operativa dos painéis PV e revistos alguns trabalhos realizados anteriormente por diversos autores, no campo do armazenamento de energia térmica com PCMs. O capítulo três apresenta uma descrição detalhada da instalação experimental piloto. Descrevem-se todos os componentes da instalação e todos os equipamentos utilizados na realização do trabalho experimental. No capítulo quatro é apresentado o protocolo experimental, assim como a instrumentação e operacionalização do sistema de aquisição de dados. O quinto capítulo é dedicado à apresentação e discussão dos principais resultados experimentais obtidos.

No capítulo seis apresenta-se a síntese conclusiva desta dissertação e sugerem-se alguns trabalhos futuros. Os resultados da calibração dos termopares e os fatores de sensibilidade dos diferentes sensores de fluxo de calor são apresentados no apêndice.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas configuram a unidade de produção de energia elétrica. De facto, uma célula fotovoltaica tem o objetivo de converter a luz solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. As células são constituídas por materiais semicondutores sendo o silício (bastante abundante na crosta terrestre) o mais utilizado. Os semicondutores são materiais cujas condutividades elétricas se situam entre as dos metais (bons condutores) e as dos isolantes (maus condutores) [7]. O silício puro é um material semicondutor intrínseco. Este elemento tem uma estrutura com ligações covalentes fortemente direcionais [7]. Recorre-se ao efeito de dopagem para que este material possa ser utilizado como gerador elétrico.

2.1.1. Efeito de dopagem

O efeito de dopagem consiste na incorporação intencional de átomos de outros elementos na rede cristalina pura do silício. O funcionamento das células fotovoltaicas é baseado nas propriedades da fronteira entre materiais do tipo p e do tipo n . O semicondutor extrínseco tipo n surge quando um átomo de impureza de um elemento do grupo 15 (por exemplo o fósforo) substitui um átomo de silício resultando num eletrão em excesso para além dos quatro necessários para estabelecer as ligações covalentes tetraédricas da rede do silício [7]. Este eletrão extra encontra-se fracamente ligado ao núcleo de fósforo. Sob a ação de um campo elétrico, o eletrão extra transforma-se num eletrão livre, capaz de conduzir corrente. O átomo de fósforo fica ionizado adquirindo carga positiva. O semicondutor extrínseco tipo p surge quando um elemento do grupo 13 (por exemplo o Boro) é introduzido na rede de ligações tetraédricas do silício, ficando a faltar um eletrão nas orbitais ligantes, resultando numa lacuna na estrutura de ligação do silício [7]. Se se aplicar um campo elétrico exterior ao cristal de silício, um dos eletrões vizinhos pode adquirir energia suficiente para se libertar da respetiva ligação, deslocando-se para a ligação em falta (lacuna) do átomo de

Boro. Quando a lacuna é preenchida pelo elétron de um átomo de silício vizinho, o átomo de Boro fica ionizado e adquire uma carga negativa. [7]

2.1.2. Tipos de células fotovoltaicas

Na Figura 2.1 representa-se o espectro da radiação solar em função do comprimento de onda. Verifica-se que a gama de radiação visível é a que contém valores mais altos de densidade de energia. Por este motivo, as células fotovoltaicas devem ser constituídas por materiais com capacidade de absorver energia na gama visível [8].

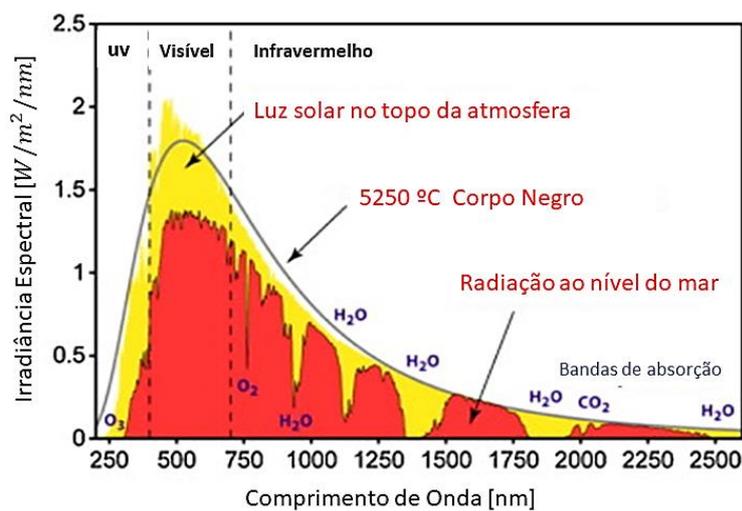


Figura 2.1. Espectro da radiação solar em função do comprimento de onda. Figura adaptada da ref. [8].

Existem três tipos de células mais comuns provenientes do silício: (i) silício monocristalino, (ii) silício policristalino, e (iii) as células de silício amorfo. As primeiras utilizam materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita. As segundas são constituídas por pequenos cristais de espessura milimétrica. Finalmente as células de silício amorfo possuem uma estrutura não cristalina e por isso apresentam eficiências de conversão mais baixas que as células cristalinas. Porém o seu processo de fabrico é mais barato e apresentam como grande vantagem o seu peso e versatilidade.

2.2. Efeito fotovoltaico

Um raio luminoso que incida numa célula fotovoltaica pode sofrer três fenómenos físicos, reflexão, refração e absorção. Da energia recebida à superfície da terra, apenas parte do espectro solar é captado pelas células fotovoltaicas. Estas absorvem até 80% da radiação solar incidente, no entanto apenas uma pequena parte da energia absorvida é convertida em eletricidade [5]. A percentagem de energia absorvida convertida em eletricidade depende da eficiência da célula fotovoltaica. Esta, por sua vez, depende do tipo de material com que a célula foi produzida, da intensidade da radiação solar, de fatores como a acumulação de poeiras à superfície da célula e da temperatura de operação [5].

O efeito fotovoltaico consiste na transformação da energia proveniente dos fótons (partículas de luz) incidentes na célula fotovoltaica, em eletricidade. No caso dos semicondutores intrínsecos – cristal de silício a zero Kelvin – a banda de valência está completamente cheia e a banda de condução está completamente vazia. Com o aumento da temperatura, alguns eletrões de valência são excitados até à banda de condução originando os pares eletrão-lacuna – processo de autocondução [7]. O processo de autocondução não é suficiente para gerar energia, para que o material de silício funcione como gerador recorre-se ao processo de dopagem.

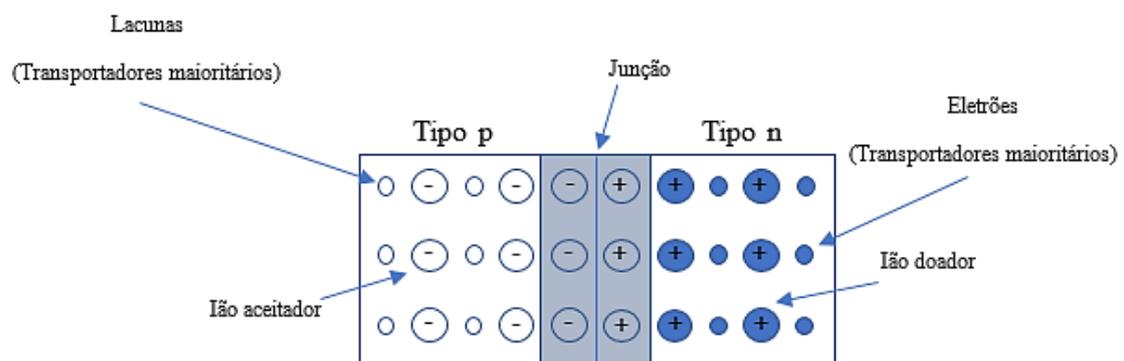


Figura 2.2. Representação da junção $p-n$ indicando-se a região de depleção junto da junção $p-n$. Figura adaptada da ref. [7].

Após a junção dos materiais tipo p e tipo n , os transportadores majoritários na junção, ou próximo dela, difundem-se através da junção. Isto é, os eletrões livres do material tipo n passam para o lado do material tipo p onde encontram as lacunas que os capturam

tornando-o negativamente carregado. A redução de elétrons no material tipo n torna-o positivamente carregado (ver Figura 2.2). É então criado um campo elétrico na junção $p-n$ que se mantém contrário ao movimento dos portadores de carga.

Quando uma célula PV é exposta à radiação solar, os fótons são absorvidos pela junção $p-n$ surgindo uma diferença de potencial. Os portadores de carga começam a fluir dando origem à corrente fotovoltaica (I_{PV}) paralela ao díodo da junção $p-n$ (ver Figura 2.3) [6].

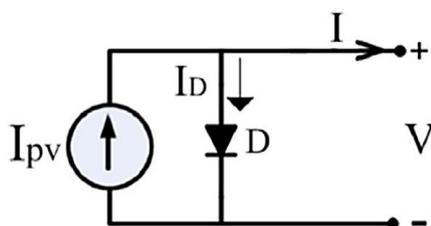


Figura 2.3. Circuito equivalente de uma célula PV. Figura adaptada da ref. [6].

Uma célula clássica de silício é composta por duas camadas de material, tipo n e tipo p . A camada orientada para o sol é a do tipo n . Com o intuito de gerar eletricidade, são introduzidos contactos metálicos na superfície frontal e posterior da célula. Na Figura 2.4 estão indicados os contactos metálicos (nº 1). Os contactos metálicos frontais devem causar as menores perdas possíveis por sombreamento. Cada célula gera uma determinada tensão elétrica. As células podem ser ligadas em série passando a fazer parte de um módulo que exhibe uma maior tensão [1].

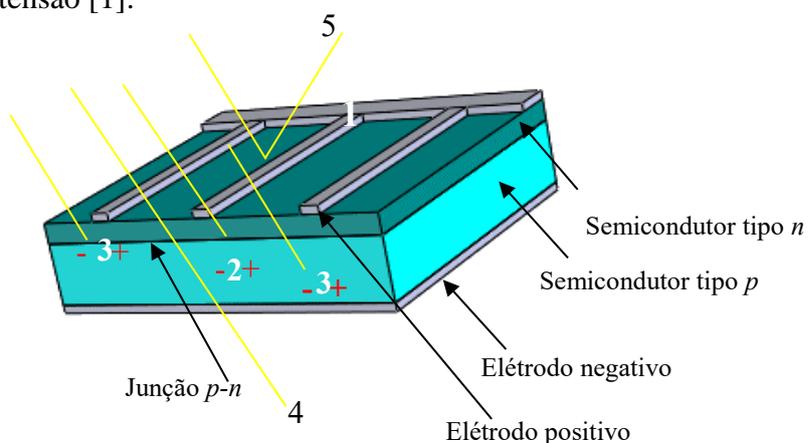


Figura 2.4. Representação da estrutura típica de uma célula de silício cristalino: 1- Contactos metálicos; 2- Recombinação; 3-Separação da carga; 4-Energia do fóton não utilizada; 5-Reflexão. Figura adaptada da ref. [1].

2.3. Impacto da temperatura na eficiência das células fotovoltaicas

Uma célula fotovoltaica apenas absorve radiação com comprimento de onda inferior a um valor determinado pela banda de energia intrínseca (*band-gap*) do semicondutor. No entanto, se este for inferior a 400 nm, o vidro que protege a célula acaba por absorver tal radiação. Quando a energia do fóton é inferior ao valor determinado pela banda de energia intrínseca do semicondutor, estes fótons não são absorvidos, passando pela célula como se esta fosse transparente [7]. No entanto, quando a energia do fóton é elevada e muito superior ao valor determinado pela banda de energia intrínseca do semicondutor, os fótons são fortemente absorvidos. Assim a energia acima da banda de energia intrínseca do semicondutor é libertada sob a forma de calor. Apenas quando a energia do fóton é igual a um valor determinado pela banda de energia intrínseca do semicondutor, o fóton tem a energia exata para criar um par elétron-lacuna, sendo por isso nesta situação que se observa uma máxima eficiência [4].

A eficiência de conversão de radiação solar em energia elétrica decresce com o aumento da temperatura da célula fotovoltaica. Vários estudos foram realizados para avaliar o impacto do aumento da temperatura operativa no desempenho de uma célula fotovoltaica. Estes mostram que, com o aumento da temperatura de uma típica célula de silício cristalino, a sua eficiência pode decrescer 0.3–0.65%/K [4]. A eficiência de uma célula fotovoltaica é definida como a razão entre a energia elétrica produzida e a energia solar fornecida à célula [1].

Os parâmetros que habitualmente são utilizados para caracterizar uma célula fotovoltaica são a corrente em curto-circuito (I_{SC}), a tensão em circuito aberto (V_{oc}) e o ponto de potência máxima ($P_{otMáx}$), conforme esquematizado na Figura 2.5. A corrente em curto-circuito representa o valor máximo da corrente no circuito (igual à corrente gerada pelo efeito fotovoltaico). Neste caso, a tensão é nula e, conseqüentemente, a potência também. A tensão em circuito aberto corresponde à tensão máxima nos terminais da célula. Tal acontece quando nenhuma carga está ligada aos terminais e, portanto, a corrente que flui é nula e, conseqüentemente, a potência é nula. O ponto de potência máxima é o ponto de funcionamento ótimo – valor máximo de potência que o painel pode produzir.

Os parâmetros fundamentais que caracterizam um painel fotovoltaico (curvas V-I e V-P esquematizadas na Figura 2.5 são geralmente fornecidos pelo fabricante, para determinadas condições de temperatura e irradiância normalizadas (ISO9001 e ISO14001). Os sistemas fotovoltaicos raramente trabalham em condições nominais de funcionamento. Eles trabalham tipicamente em regime de carga parcial [1], apresentando uma eficiência inferior à discriminada na ficha técnica do produto para condições nominais. Assim, o desempenho e as curvas características dos módulos PV comerciais, dependem da temperatura das células e da intensidade da radiação solar incidente.

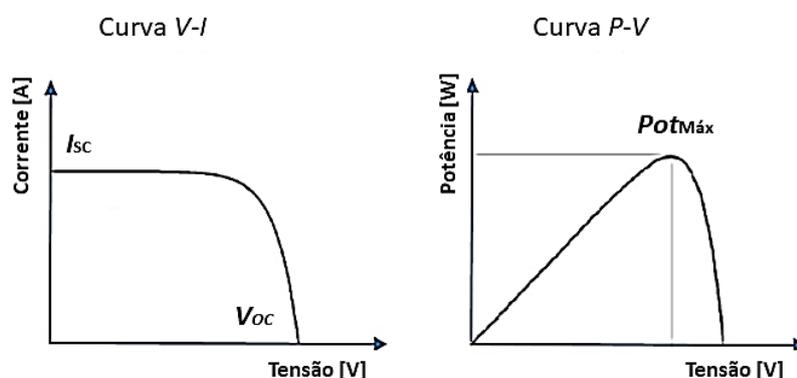


Figura 2.5. Representação esquemática das curvas características de um módulo PV.

A Figura 2.6 mostra a variação da tensão em circuito aberto com o aumento da temperatura da célula para diferentes valores de radiação solar incidente. Os dados que serviram de base para o presente gráfico foram obtidos experimentalmente por Huang [5]. O valor da tensão em circuito aberto mantém-se relativamente constante com o aumento da radiação solar incidente na célula, apenas quando a irradiância desce abaixo dos 400 W/m^2 , a tensão sofre uma maior queda. À medida que a temperatura da célula aumenta, o valor da tensão em circuito aberto decresce. Assim, a tensão em circuito aberto é maioritariamente afetada pela temperatura da célula. Por sua vez, a corrente em curto-circuito aumenta linearmente com o aumento da radiação solar incidente na célula [1] (ver Figura 2.7).

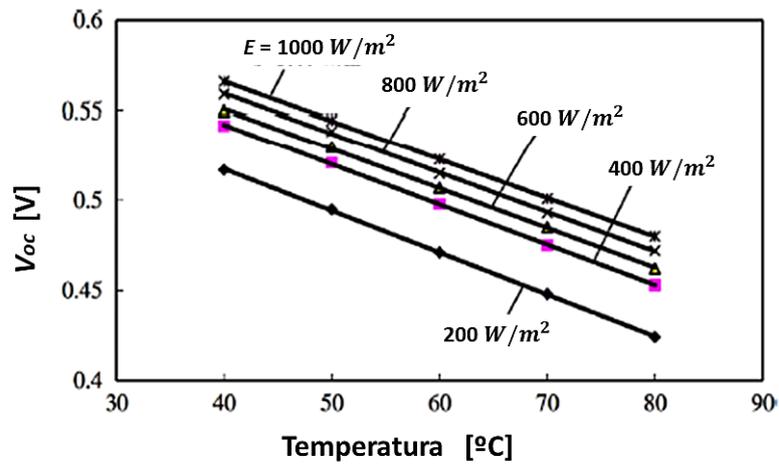


Figura 2.6. Variação da tensão em circuito aberto em função da temperatura da junção $p-n$ de uma célula PV. Figura adaptada da ref. [5].

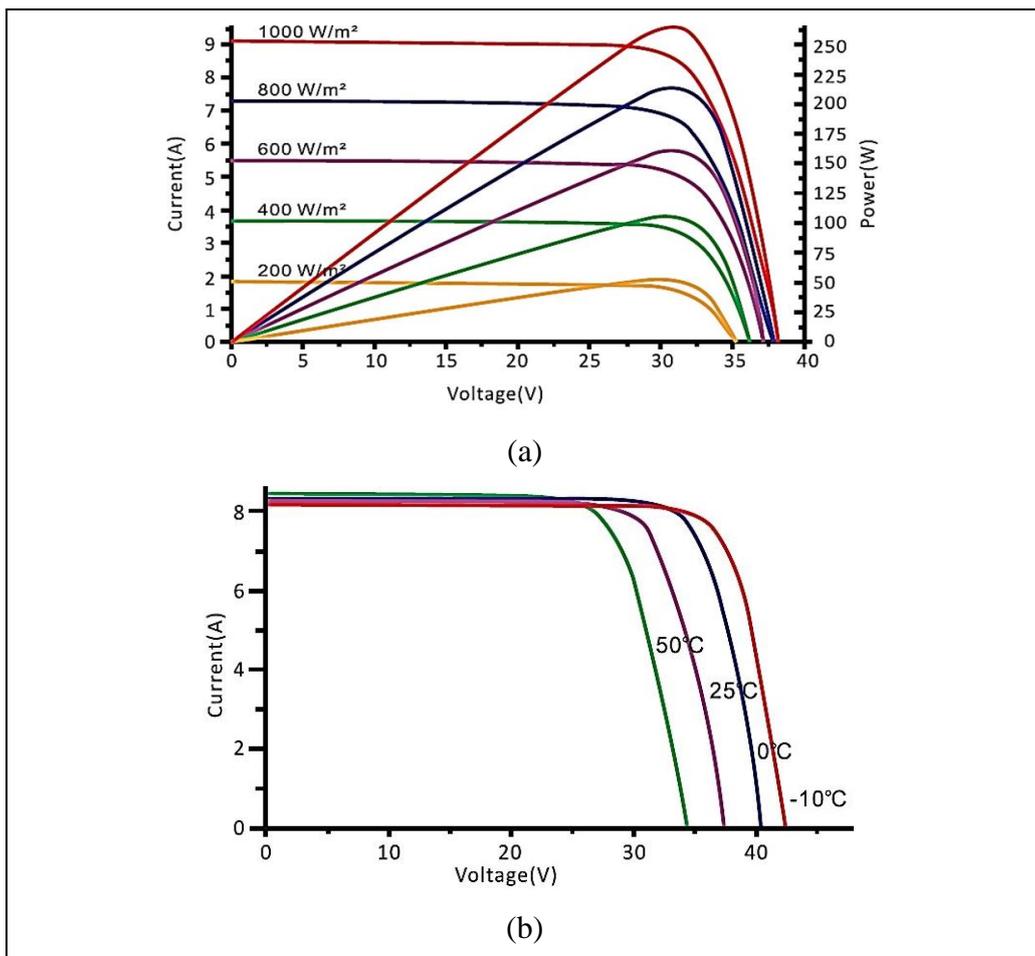


Figura 2.7. Curvas Características (a) $V-P$ e (b) $V-I$ dos painéis PVs usados na instalação experimental. Figura retirada do catálogo do fornecedor - modelo RSM60-6-250P da Risen [9].

Avaliação experimental do desempenho de painéis fotovoltaicos com unidades de armazenamento de calor amovíveis

No Verão, o aumento da temperatura da célula leva à redução da potência do módulo. Apesar do ligeiro aumento da corrente em curto-circuito, um maior decréscimo da tensão em circuito aberto conduz à redução da potência máxima do módulo tal como se pode verificar na Figura 2.8 [5].

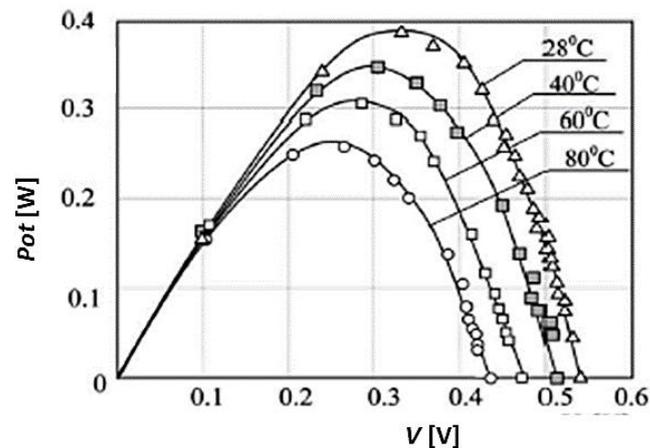


Figura 2.8. Potência de uma célula PV de silício cristalino para diferentes temperaturas de operação. Figura adaptada da ref. [5].

Nesta dissertação, a denominação "sistema PV/PCM" refere-se a um qualquer sistema PV convencional melhorado com a incorporação de PCMs para potenciar a termorregulação dos painéis. Na Figura 2.9 são comparadas as produções de energia elétrica mensais a partir de um painel PV convencional e de um sistema PV/PCM. Os dados da Figura 2.9 foram obtidos por Stropnik *et al.* [10]. Verifica-se uma maior eficiência de conversão de radiação solar em eletricidade nos meses de inverno, meses em que se geram menos kWh de eletricidade. Nos meses de verão, a radiação solar é mais elevada (o que leva a uma maior produção de energia) mas a temperatura ambiente é também superior, o que leva ao aumento da temperatura de operação das células fotovoltaicas e à consequente diminuição da eficiência do sistema.

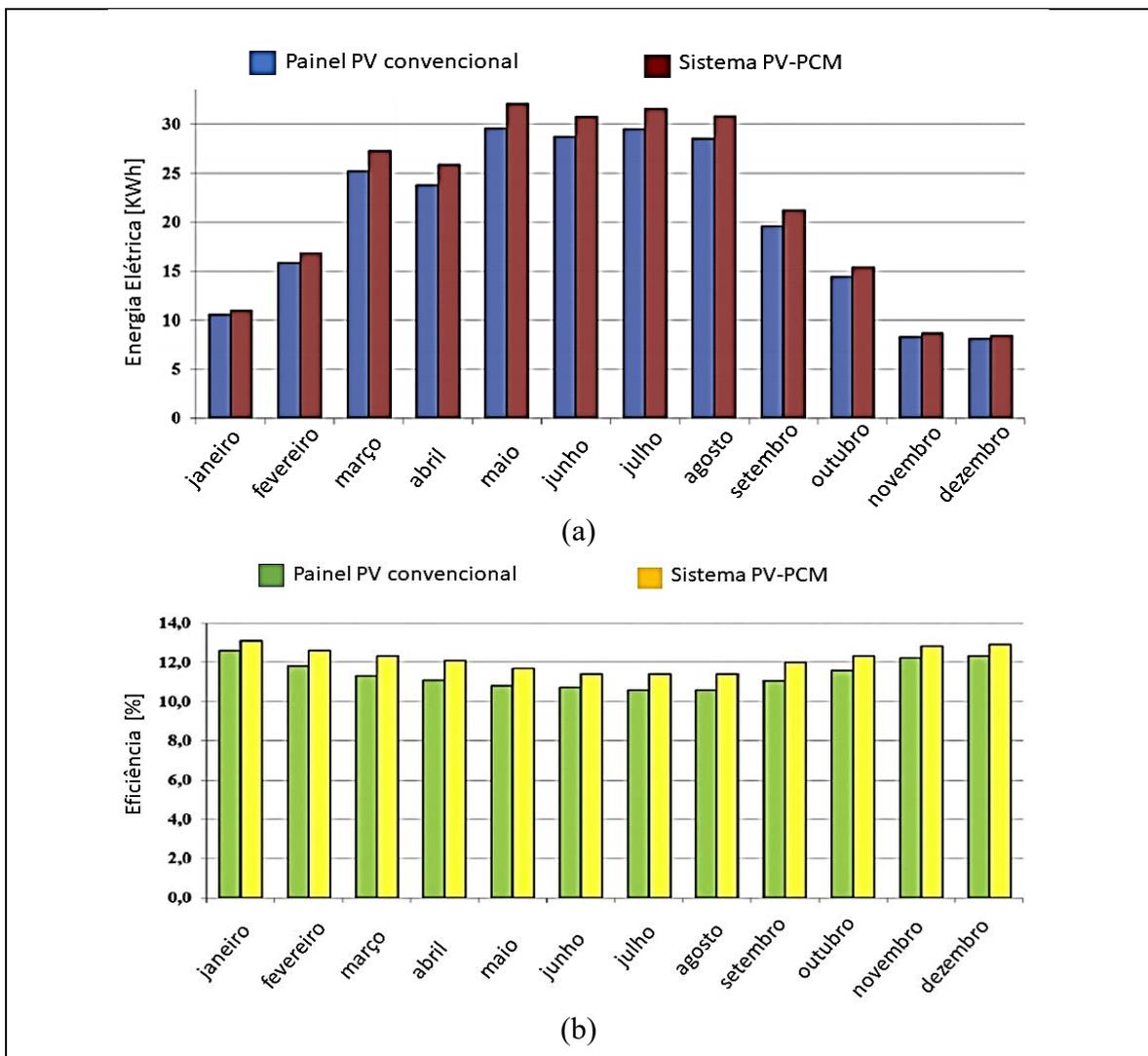


Figura 2.9. Comparação do desempenho de um painel fotovoltaico convencional e de um sistema PV/PCM durante um ano. (a) Produção de energia elétrica; (b) eficiência de produção de energia elétrica. Figuras adaptadas da ref. [10].

2.4. Métodos para regulação térmica com PCMs

O aumento da temperatura dos painéis PV não só afeta a eficiência de produção de energia, como também causa uma maior degradação dos sistemas a longo prazo. Em geral, as técnicas de regulação térmica dos painéis PV com PCMs podem ser classificadas como abordagens passivas ou abordagens ativas [4]. A escolha da técnica de refrigeração é altamente dependente dos requisitos do projeto e das condições de funcionamento do sistema [5]. O excesso de calor pode ser simplesmente dissipado para o meio ambiente (como no

caso desta dissertação), ou aproveitado para outros fins – sistemas híbridos PVT (do inglês “*Hybrid photovoltaic-thermal*”).

2.4.1. Abordagens passivas

Os mecanismos de refrigeração passiva referem-se a tecnologias utilizadas para extrair ou minimizar o calor absorvido sem consumo de energia. Dependem dos três mecanismos básicos de transferência de calor: convecção, condução e radiação [4]. O modo de transferência de calor por convecção ocorre principalmente através do movimento de um fluido selecionado (*e.g.* ar ou água). Por sua vez o mecanismo de transferência de calor por condução ocorre devido à diferença de temperatura entre partículas que estão em contacto físico direto. A transferência de calor através da radiação processa-se sob a forma de ondas eletromagnéticas [11].

2.4.1.1. Transferência de calor de uma superfície para o meio envolvente

São várias as abordagens de refrigeração passiva, as mais simples técnicas de remoção de calor do painel PV envolvem a incorporação de placas de materiais com alta condutividade térmica como o alumínio e o cobre, na parte traseira do painel. A taxa de transferência de calor de uma superfície para o meio envolvente (fluido) pode ser descrita através da equação 2.1.

$$q''_{conv} = h \cdot (T_{SUP} - T_{\infty}) \quad (2.1)$$

onde, q''_{conv} representa o fluxo de calor por convecção (W/m^2), proporcional à diferença entre a temperatura da superfície e a do fluido, T_{SUP} e T_{∞} , respetivamente. O parâmetro h [$W/(m^2.K)$] é o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Quando a temperatura da superfície e do fluido envolvente apresentam valores fixos, podem referir-se dois métodos principais para aumentar a taxa de transferência de calor: (i) aumentar o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, (ii) aumentar a área de superfície. O aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção pode requerer a instalação de bombas ou ventiladores, ou a substituição de

equipamentos já existentes por outros mais potentes. Estas medidas podem ser dispendiosas e/ou impraticáveis e tipicamente necessitam do uso de energia elétrica para a utilização dos equipamentos. A solução de aumentar a área de superfície de transferência de calor através da fixação de alhetas, constituídas por materiais bons condutores, pode revelar-se menos dispendiosa. No entanto, o aumento do peso da estrutura deve ser considerado.

2.4.1.2. Uso de PCMs

Os PCMs caracterizam-se por exibir uma alta entalpia de fusão, providenciando uma solução promissora na termorregulação dos painéis PV visto que com pequenos volumes de material é possível armazenar, ou libertar, uma grande quantidade de energia a uma temperatura aproximadamente constante, durante os processos de mudança de fase solido-líquido do material. A transição de sólido para líquido (fusão) ou de líquido para sólido (solidificação), permite o armazenamento (processo endotérmico) ou a libertação (processo exotérmico) de calor latente (ver Figura 2.10). Como se mostra na Figura 2.11, nos PCMs comerciais a mudança de fase não é isotérmica. Esta processa-se num intervalo de temperaturas, ΔT_m .

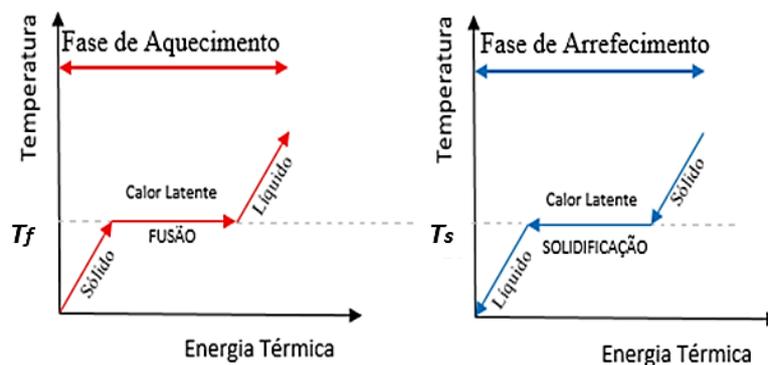


Figura 2.10. Curvas teóricas que representam o armazenamento e a dissipação de energia térmica na fase de aquecimento e arrefecimento de um PCM. Figuras adaptadas da ref. [12].

Avaliação experimental do desempenho de painéis fotovoltaicos com unidades de armazenamento de calor amovíveis

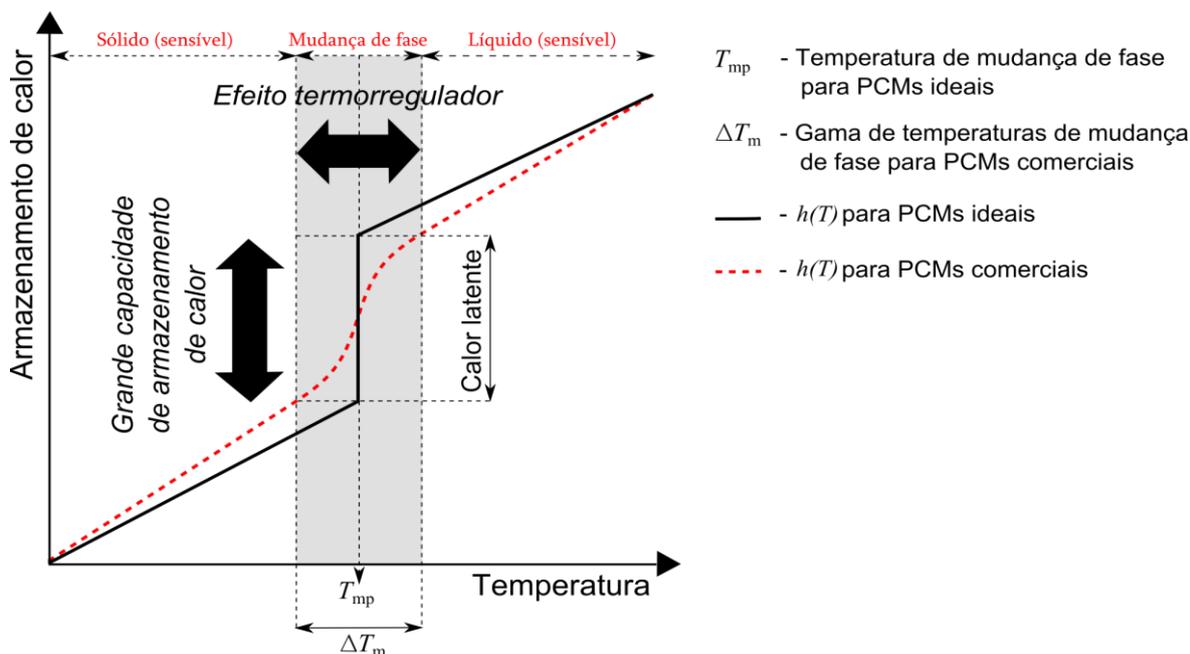


Figura 2.11. Curva teórica da relação temperatura – armazenamento de energia térmica no caso de PCMs comerciais. Figura retirada da ref. [12].

Os materiais de mudança de fase são classificados como orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas. Os PCM orgânicos são divididos em duas classes distintas, parafínicos e não parafínicos. Os PCMs inorgânicos são largamente descritos como sais hidratados e/ou metais [13]. Os materiais de mudança de fase ditos eutéticos são divididos em três grupos: orgânico-orgânico, orgânico-inorgânico e inorgânico-inorgânico. Um material eutético caracteriza-se por ser constituído por dois ou mais componentes que fundem e solidificam congruentemente, formando uma mistura de cristais dos diferentes componentes aquando da cristalização [13].

Para a regulação térmica dos painéis PV são desejadas determinadas características dos PCMs. Quanto às propriedades térmicas estes devem possuir elevada capacidade para armazenamento de calor latente, boa condutibilidade térmica para uma melhor transferência de calor nos ciclos de carga e de descarga e devem ter um comportamento consistente. A temperatura de mudança de fase deve estar situada no intervalo de temperaturas de operação desejadas. Por sua vez, quanto às propriedades físicas, os PCMs devem apresentar baixa variação de volume na mudança de fase, estabilidade de fase durante a solidificação e fusão e alta densidade, permitindo a utilização de recipientes mais pequenos e a redução de problemas de armazenamento. Uma eficiente taxa de

cristalização de modo a obter uma rápida solidificação com subarrefecimento limitado ou inexistente é também desejável. Os PCMs devem ter uma estabilidade química que lhes permita lidar com grandes oscilações de temperatura e sucessivos ciclos de carga e descarga sem haver degradação e/ou alteração das suas propriedades. Devem ser não tóxicos, não explosivos, não inflamáveis e não corrosivos. Do ponto de vista económico, os PCMs devem ter um baixo custo e grande disponibilidade. Do ponto de vista ambiental, os PCMs devem ser recicláveis/reutilizáveis e não conter odor [4].

2.4.2. Avaliação da transferência de calor em elementos com PCMs

Os PCMs apresentam tipicamente uma baixa condutibilidade térmica, o que pode condicionar os processos de transferência de calor com mudança de fase. Quando se pretende acelerar as trocas de calor com o PCM pode ser importante a integração deste material em contentores feitos de materiais com elevada condutibilidade térmica. O uso de alhetas metálicas no seio dos PCMs é outra técnica vulgarmente utilizada para acelerar os processos de fusão e solidificação do PCM. Quanto maior for a área de contacto entre os dois materiais maior será o desempenho do sistema durante um ciclo de carga e descarga.

Tao *et al.* [14] avaliaram a influência da convecção natural durante a fusão e solidificação de um PCM contido numa UAE. Os autores concluíram que durante a carga, a convecção natural contribui para que o tempo de fusão seja reduzido e para que a taxa de armazenamento de calor latente aumente comparativamente a quando a convecção natural não é considerada. Durante a fusão a transferência de calor dá-se essencialmente por convecção. Pelo contrário, na solidificação, o PCM junto da interface solidifica em primeiro lugar, sendo que a transferência de calor para o material mais interior se dá essencialmente por condução. O aumento do número de cavidades inibe de forma significativa o efeito da convecção natural.

Ye *et al.* [15] efetuaram um estudo numérico de modo a analisar o efeito provocado pela alteração do volume de PCM numa cavidade retangular de uma UAE. O esquema da UAE está representado na Figura 2.12. Foram feitas diferentes simulações considerando diferentes quantidades de PCM nas cavidades e analisados diferentes parâmetros, tais como a taxa de expansão volumétrica, o fluxo de calor, a fração de líquido e os campos de velocidade e de temperatura. Os autores concluíram que a convecção natural

aumenta com o aumento do volume de parafina nas cavidades. Eles verificaram que com uma fração de 85% de parafina na cavidade, surgiam vórtices na parte inferior que melhoravam significativamente a taxa de transferência de calor. Além disso, ainda verificaram que a velocidade de expansão diminuiu com o aumento da fração de PCM.

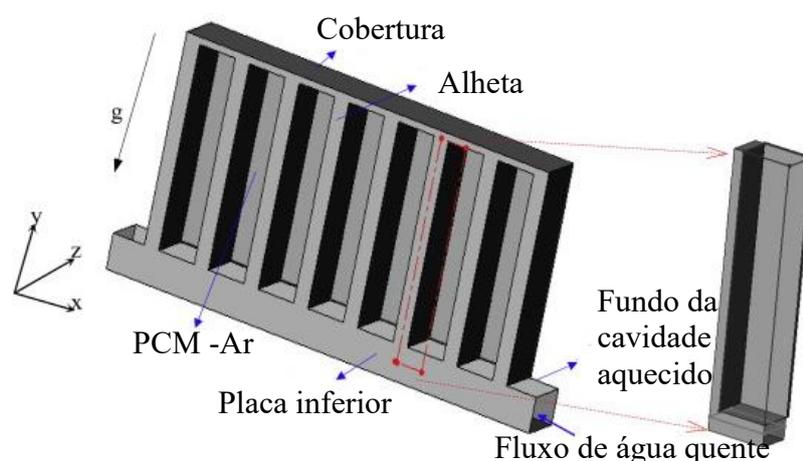


Figura 2.12. Unidade de armazenamento de calor latente. Figura adaptada da ref. [15].

Hasan *et al.* [16] também desenvolveram uma instalação experimental para avaliarem a capacidade termorreguladora de cinco PCMs em quatro sistemas PV/PCMs com diferentes configurações. Durante o estudo fez-se variar a irradiância de três formas distintas (500, 750 e 100 W/m²) usando um simulador solar. De acordo com os resultados obtidos foi possível concluir que o desempenho na regulação térmica dos painéis depende da quantidade de PCM, bem como da capacidade de conduzir calor de todo o sistema.

Huang *et al.* [17] avaliaram experimentalmente os fenômenos de transferência de calor no interior de UAE em sistemas PV/PCM. Os autores consideraram três configurações diferentes. O sistema PV1 era apenas constituído pelo painel PV, no sistema PV₂/PCM, o contentor de alumínio acoplado à parte traseira do painel não tinha alhetas, mas continha PCM no seu interior, por fim, no sistema PV₃/PCM, o contentor continha alhetas e PCM (ver Figura 2.13). Na Figura 2.14 estão expostos dois gráficos que representam a variação da temperatura ao longo do tempo para as diferentes configurações. A validação dos resultados foi feita por comparação direta com os valores obtidos numericamente. Por análise dos resultados obtidos os autores concluíram que o uso de alhetas permite uma

distribuição de temperatura mais uniforme dentro do sistema PV/PCM, no entanto, tem que se ter em atenção o número de alhetas pois um número de alhetas superior pode limitar o movimento do PCM fundido.

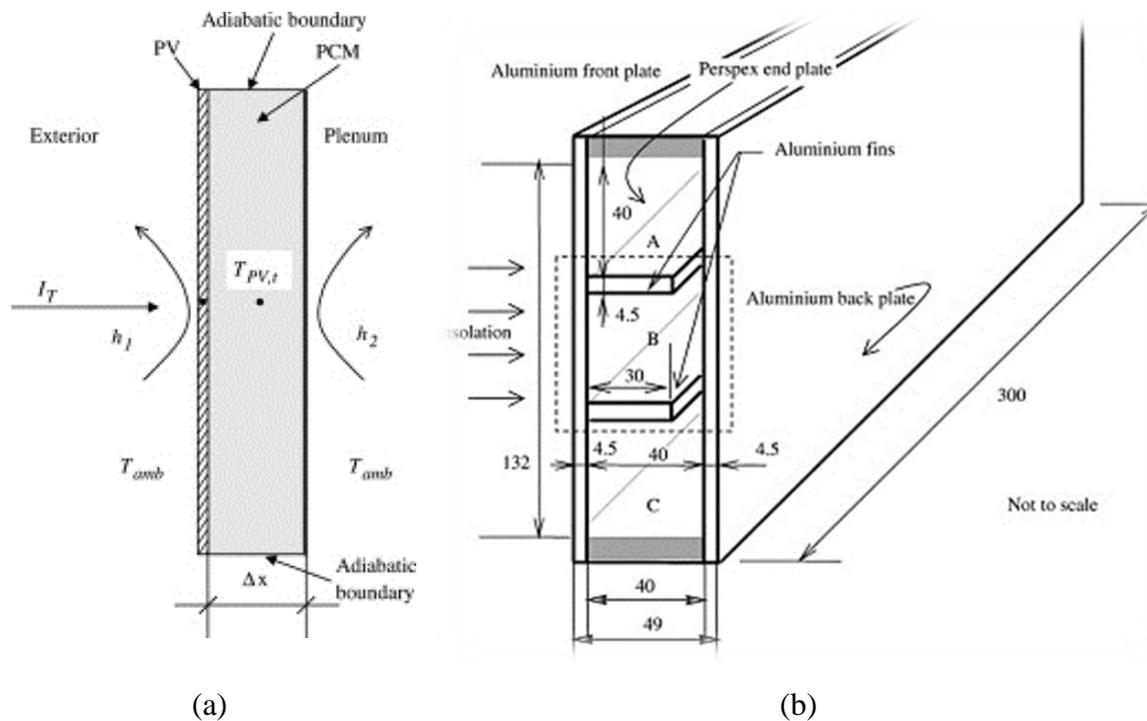


Figura 2.13. Configurações dos sistemas fotovoltaicos: (a) sistema PV/PCM sem alhetas (PV2/PCM); (b) sistema PV/PCM com alhetas (PV3/PCM). Figuras retiradas da ref. [17].

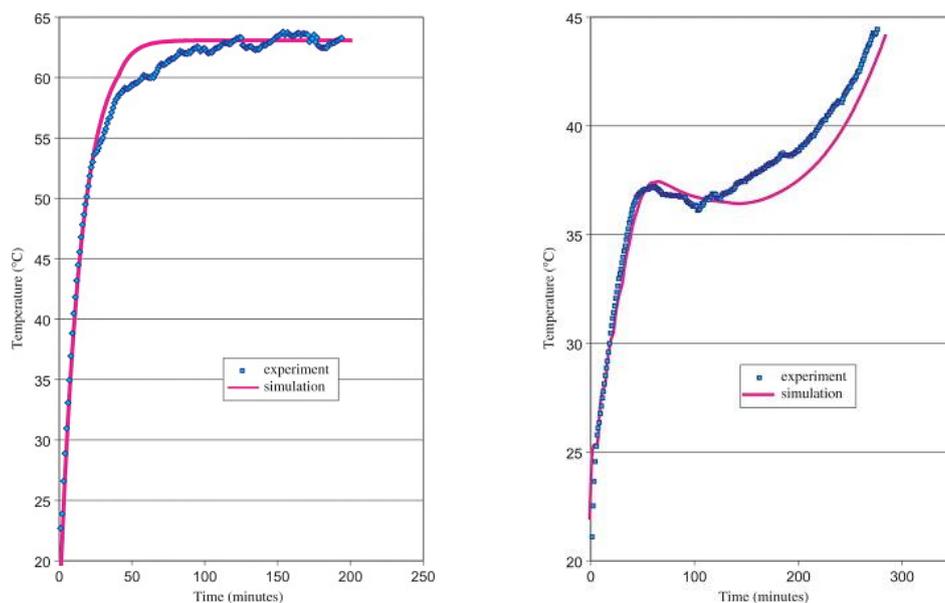


Figura 2.14. Resultados obtidos e sua validação. (a) sistema PV (PV1); (b) sistema PV/PCM sem alhetas (PV2/PCM). Figuras retiradas da ref. [17].

2.4.3. Efeito da temperatura de transição de diferentes tipos de PCMs na eficiência dos sistemas PV

Para que a eficiência dos painéis não diminua de forma tão acentuada com o aumento da temperatura da célula, Machniewicz *et al.* [18] investigaram a diminuição da temperatura de um painel quando se utilizam diferentes tipos de PCMs nos sistemas PV durante 4 dias, para iguais condições climáticas. Os autores concluíram que a escolha do PCM deve ser feita considerando os dados climáticos característicos para a localização onde será montado o sistema. A eficiência dos painéis PV aumenta quando a temperatura de operação destes diminui. Assim, a temperatura do PCM deve ser mais baixa quanto possível. No entanto, quando a temperatura de transição do material é demasiado baixa comparativamente às flutuações de temperatura externa, o PCM pode não exercer a sua função. Quando a temperatura de transição é demasiado alta, o material necessita de elevadas temperaturas para mudar de fase, o que leva a que o painel se mantenha a temperaturas operativas mais elevadas. Com base nos resultados obtidos (ver Figura 2.15) os autores concluíram que cada caso contribui para um aumento temporário da eficiência. Em contrapartida, podem causar a diminuição da produção de energia em períodos específicos de tempo.

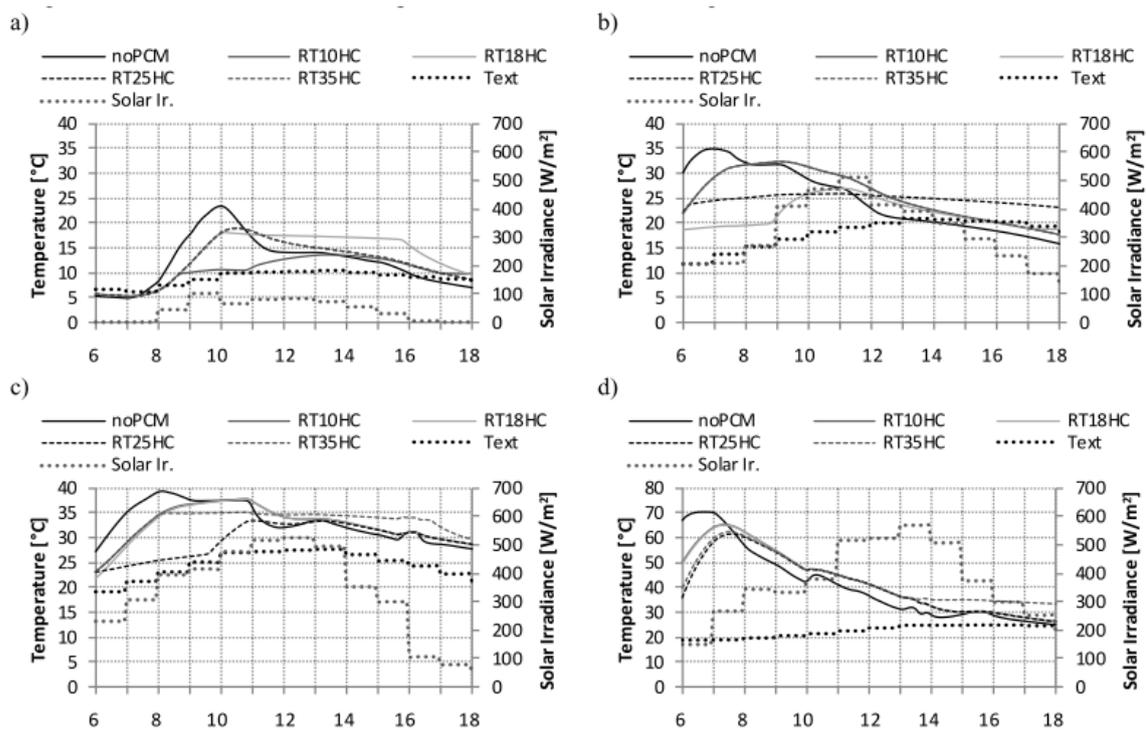
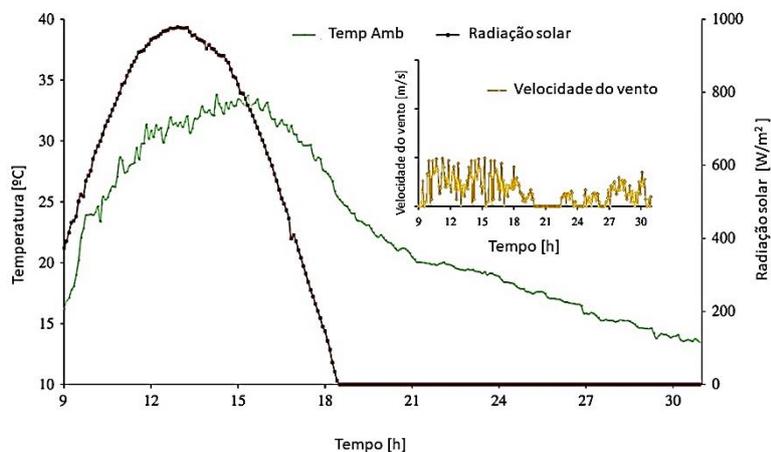


Figura 2.15. Temperatura na superfície frontal do sistema PV/PCM no dia (a) (b) (c) e (d). Figura retirada da ref. [18].

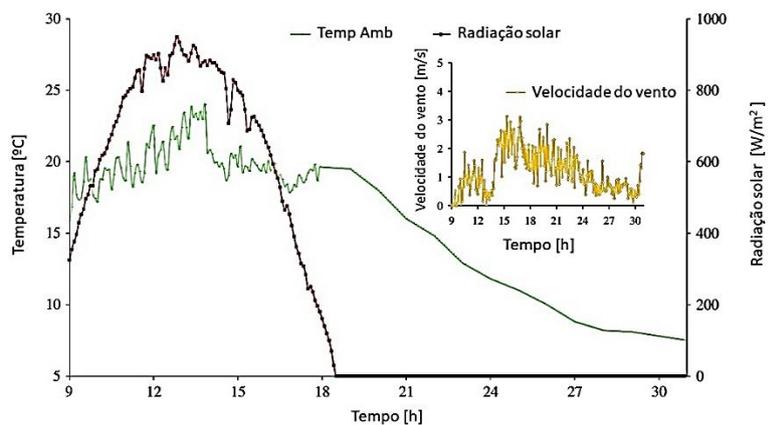
Hasan *et al.* [3] realizaram um estudo com a intenção de analisar o aumento da eficiência de um sistema PV através da sua regulação térmica utilizando PCMs. A instalação experimental inclui três painéis PV policristalinos. Um deles está anexado a um contentor com alhetas verticais com um PCM eutético (PCM₁ com temperatura de fusão de 22.5 °C), outro está anexado a um contentor com alhetas verticais com uma mistura de ácidos gordos (PCM₂ com temperatura de fusão de 29.8°C). O outro painel será tido como referência. Este sistema foi testado em diferentes condições climáticas (ver Figura 2.16). Os autores concluíram que o PCM₂ permitiu maiores reduções da temperatura do painel em ambos os locais. Para as condições climáticas na Irlanda, o painel PV de referência atingia uma temperatura de operação de 49 °C enquanto que a temperatura máxima de operação do sistema PV-PCM₂ era inferior em cerca de 10°C. O sistema PV-PCM₁ também conseguia diminuir a temperatura de operação em 7°C em relação ao painel de referência. A eficiência máxima do sistema nas condições Irlandesas aumentou 14% no caso de se usar o PCM₂ e 10% no caso de se usar o PCM₁. Nas condições climáticas do Paquistão, o aumento da eficiência é superior, o que permitiu concluir que tais sistemas são mais eficazes em condições climáticas quentes e estáveis.

Avaliação experimental do desempenho de painéis fotovoltaicos com unidades de armazenamento de calor amovíveis



Radiação solar máxima [W/m ²]	Gama de Velocidade do vento [m/s]	Gama de temperatura ambiente [°C]
950	Até 1	18-34

(a)



Radiação solar máxima [W/m ²]	Gama de Velocidade do vento [m/s]	Gama de temperatura ambiente [°C]
990	1-3	16-24

(b)

Figura 2.16. Características meteorológicas para dois casos de estudo: (a) Paquistão; (b) Irlanda. Figuras adaptadas da ref. [3].

2.5. Sistemas PV

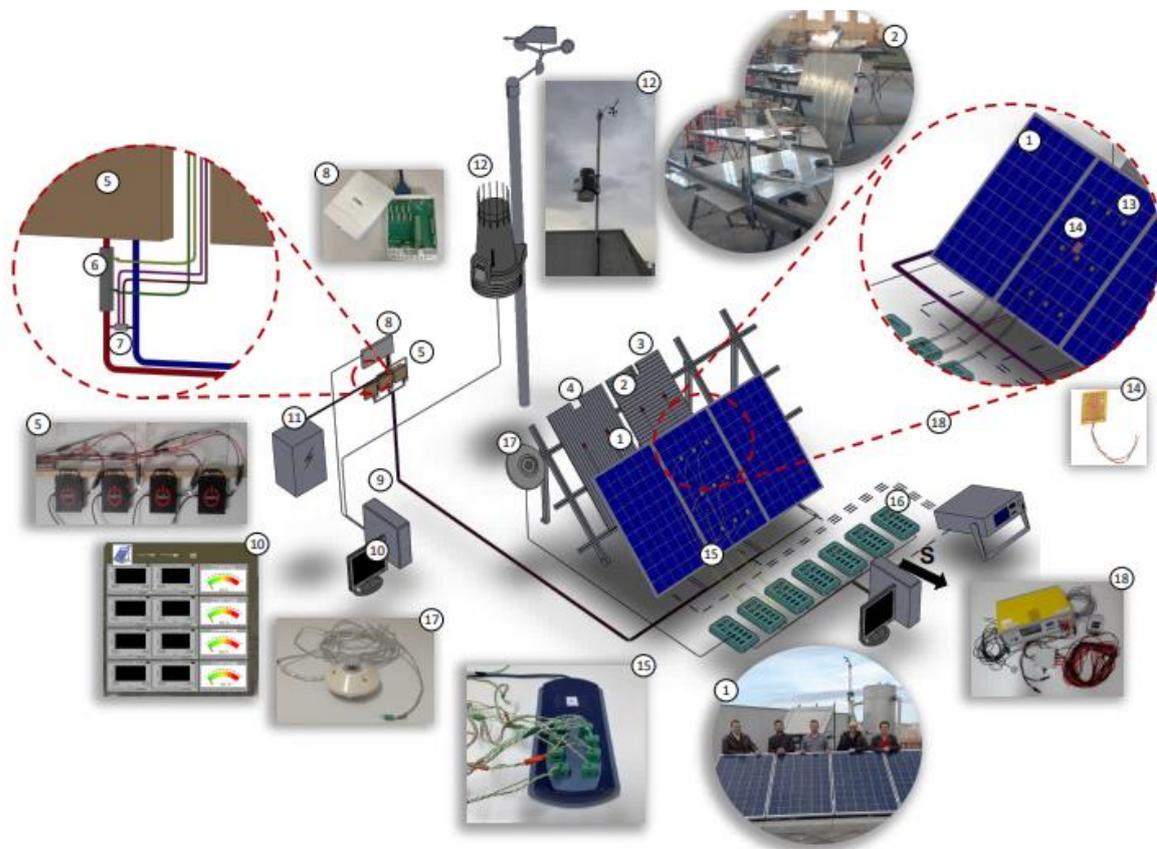
Os sistemas PV podem ser divididos em sistemas ligados à rede e em sistemas autónomos. No caso dos sistemas autónomos, a energia produzida nem sempre corresponde

às necessidades pontuais do consumidor, tornando-se obrigatório considerar um sistema de armazenamento, acumuladores, e meios de apoio complementares de produção de energia. Em geral, a utilização de um acumulador, normalmente baterias recarregáveis, obriga a utilização de um regulador de carga adequado, por forma a garantir uma elevada fiabilidade e um maior tempo de vida útil [1]. Um sistema fotovoltaico ligado à rede é constituído pelos seguintes elementos: (i) um arranjo de vários módulos PV dispostos em série e/ou em paralelo nomeado gerador fotovoltaico; (ii) caixa de junção; (iii) cabos de corrente contínua; (iv) cabos de corrente alternada; (v) inversor; (vi) mecanismos de proteção e aparelhos de medida [1]. A medição da radiação solar pode ser efetuada com piranómetros, com sensores fotovoltaicos ou indiretamente através da análise de imagens de satélite.

3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, é efetuada uma descrição detalhada da instalação experimental piloto instalada na cobertura do edifício da ADAI, em Coimbra.

3.1. Descrição global



- | | | | | | |
|---|-------------------------|----|--|----|---|
| 1 | Painéis Fotovoltaicos | 7 | Divisor de tensão | 13 | Termopares (Tipo K) |
| 2 | UAE preenchidas com PCM | 8 | National Instruments TM SCC-68 I - Bloco de conexão | 14 | OMEGA TM Sensor de fluxo de calor HFS-4 |
| 3 | Dissipador de calor | 9 | Computador para aquisição de dados | 15 | Pico [®] USB TC-08 |
| 4 | Sistema de suporte | 10 | Programa de interface LabVIEW TM | 16 | PicoLog [®] - Programa de aquisição de dados |
| 5 | Microinversor | 11 | Quadro elétrico | 17 | Kipp&Zonen CM11 - Piranómetro |
| 6 | Resistência elétrica | 12 | Davis Instruments Vantage Pro2 TM - Estação meteorológica | 18 | PVPM2540C - Aparelho de medição da curva I-V de módulos fotovoltaicos |

Figura 3.1. Representação esquemática da instalação experimental piloto com os principais instrumentos/equipamentos usados.

A instalação experimental é constituída por painéis PV policristalinos com potência máxima de 250W – modelo RSM60-6-250P da *Risen*, instalados em paralelo, orientados a sul, com uma inclinação de 30° e monitorizados individualmente. A Figura 3.1 mostra um esquema da instalação experimental, indicando os principais equipamentos/instrumentos utilizados. Conforme os objetivos descritos no primeiro capítulo, foram acopladas diferentes UAE a dois dos painéis. Um dos painéis foi também monitorizado e tomado como referência.

Como referido anteriormente, a instalação experimental encontra-se instalada no terraço da cobertura do edifício do Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI), pertencente à ADAI, onde a totalidade da energia elétrica produzida pela instalação é consumida. O sistema está ligado à rede elétrica do edifício.

Na Figura 3.2 apresenta-se uma imagem dos painéis PV instalados.



Figura 3.2. Instalação experimental – disposição dos painéis PV.

3.1.1. Estrutura de suporte

Os painéis PV assentam numa estrutura de alumínio fixada à cobertura do edifício. Os painéis são fixos à estrutura metálica através de talas de junção aparafusadas à estrutura. Relativamente às UAE, estas estão acopladas na parte traseira dos painéis e fixadas na estrutura metálica de suporte.

3.1.2. Unidades de armazenamento de energia (UAE)

As UAE são constituídas por um arranjo de cápsulas de alumínio de secção retangular. As UAE foram fabricadas a partir de perfis extrudidos da *Extrusal*. As dimensões das cavidades foram selecionadas tendo em conta o catálogo da *Extrusal* (ver Figura 3.3).

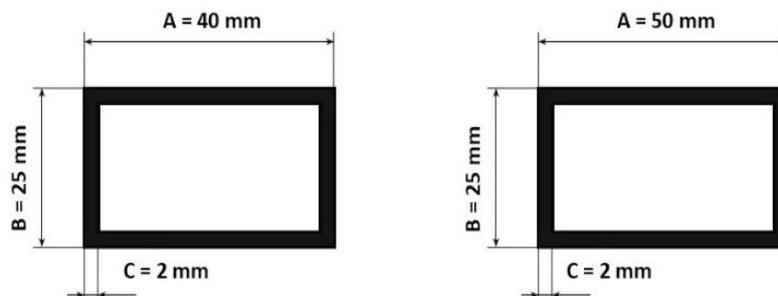


Figura 3.3. Dimensões dos perfis da Extrusal usados no fabrico das UAE. Imagem adaptada do catálogo da Extrusal.

A base e o topo de cada cavidade são constituídos pelo mesmo material que foi posteriormente soldado. As cavidades estão furadas no topo de modo a que seja possível encher o seu interior com o PCM. Cada cavidade foi soldada a outra de forma a constituir a UAE. Após terem sido soldados todos os componentes, foi realizado um acabamento superficial de forma a retirar todo o excedente de solda.

Na Tabela 3.1 e na Figura 3.4 podem-se observar as principais características dos dois tipos de UAE utilizadas nesta dissertação.

Tabela 3.1. Principais características das UAE.

UAE	Número de cavidades	Espessura da parede das cavidades [mm]	Dimensões externas [mm]
(a)	19	2	930×1580×25
(b)	32		922×1580×25

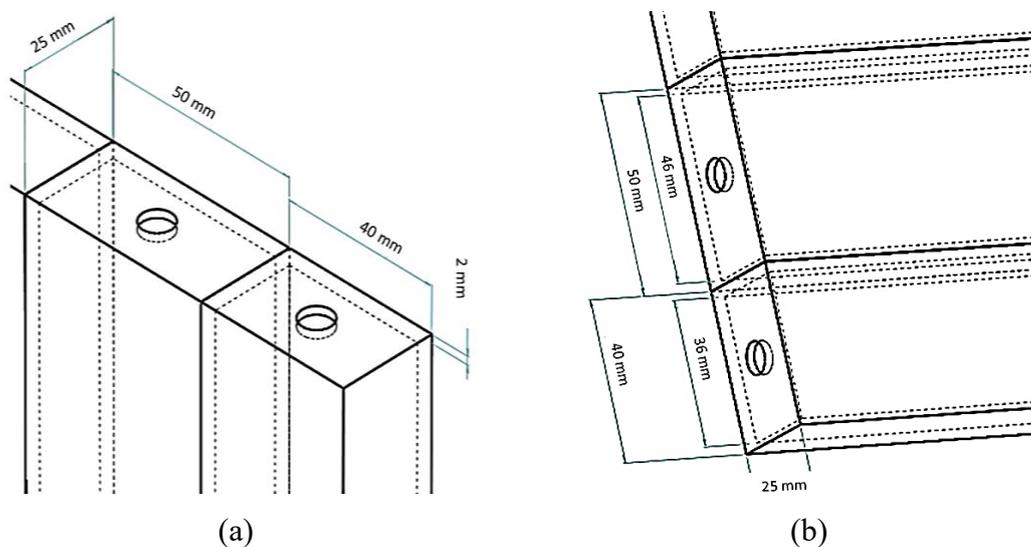


Figura 3.4. UAE com: (a) 19 cavidades na vertical; (b) 32 cavidades na horizontal.

3.1.3. PCM utilizado

Nos ensaios experimentais foi usado o PCM RT22HC da *Rubitherm Technologies GmbH*. Este PCM pertence ao grupo dos materiais orgânicos parafínicos e, segundo dados do fabricante é quimicamente inerte e tem vida útil ilimitada. Na Tabela 3.2 são apresentadas as principais características do PCM utilizado.

Tabela 3.2. Propriedades termofísicas do PCM RT22HC. Características retiradas da ficha técnica [19].

Propriedades	RT22HC
Temperatura de fusão média [°C]	22
Condutibilidade térmica [W / (m.K)]	0.2
Volume de expansão [%]	12.5
Calor latente de fusão [KJ / kg]	190
Temperatura de operação máxima [°C]	50
Densidade no estado líquido [kg / l]	0.7
Densidade no estado sólido [kg / l]	0.76

3.1.4. Enchimento e selagem das UAE

Relativamente ao enchimento das UAE, o PCM necessita de se encontrar no estado líquido para se proceder ao enchimento das cavidades. É no estado líquido que o PCM apresenta o seu volume máximo. É deixado um espaço de ar em cada cavidade para que o PCM se possa ajustar às variações de volume associadas à mudança de fase. A selagem dos furos por onde se colocou o PCM foi efetuada recorrendo a pequenas tampas de borracha corretamente colocadas e cobertas com cola epóxi *Araldite* para prevenir fugas de material líquido (Figura 3.5).

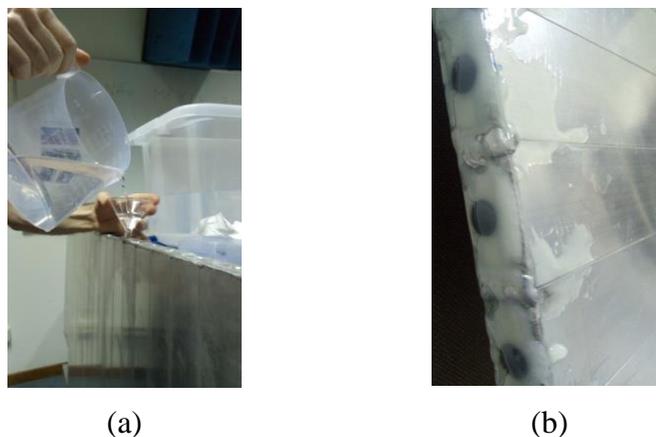


Figura 3.5. (a) Enchimento das cavidades das UAE com o PCM no estado líquido; (b) selagem das cavidades de forma a evitar a fuga de PCM líquido.

3.1.5. Instrumentação

A instrumentação da instalação experimental é composta por: sensores de temperatura, sensores de fluxo de calor e um piranómetro associados a um sistema de aquisição de dados composto por vários *data loggers Pico TC-08*; e por um sistema de aquisição de dados desenvolvido em *LabView™* que permite recolher informação em intervalos de tempo desejados e fazer o cálculo da potência gerada pelos painéis PV. Seguidamente apresenta-se em mais detalhe os vários equipamentos usados na instrumentação da instalação experimental.

3.1.5.1. Sensores de temperatura

As temperaturas nas superfícies frontal e posterior dos painéis e das UAE são medidas com recurso a termopares do tipo K (Cromel/Alumel). Os termopares são sensores de temperatura simples e de baixo custo constituídos por dois fios de metal distintos unidos nas extremidades. Quando há uma diferença de temperatura entre as extremidades do termopar, surge uma diferença de potencial que é correlacionada com a temperatura. Os termopares tipo K podem ser usados na gama de temperaturas [-200;1200] °C, com sensibilidade aproximadamente de 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Possuem um tempo de resposta muito pequeno e usufruem de baixa inércia térmica (fio de 0.15 a 0.2 mm de diâmetro). Na instalação experimental são usados 90 termopares. Os termopares estão unidos por uma ficha em grupos de três. Cada ficha está conectada a uma entrada de um *data logger Pico TC-08*. Todos os grupos de termopares foram previamente calibrados. Os termopares foram mergulhados simultaneamente num banho termostaticado de água agitada e foi registada a temperatura adquirida por cada um para levar a cabo a sua calibração. A aquisição da temperatura foi feita em intervalos de 5 segundos com o objetivo de retirar 10 amostras. O processo foi repetido para diferentes temperaturas, iniciando-se nos 5 °C até aos 65 °C com intervalos de 5 °C. O banho termostaticado é um equipamento capaz de realizar um controle preciso da temperatura. É composto por um recipiente, em geral preenchido com água, um sistema de agitação, uma ou mais resistências elétricas e um termóstato. O sistema de agitação é utilizado para uniformizar a temperatura do líquido e o termóstato para manter a temperatura constante. O equipamento usado é do tipo DBT KB21 da marca *Heto Lab Equipment* (ver Tabela 3.3 e Figura 3.6).

Tabela 3.3. Características técnicas do banho termostático DBT KB21. Dados retirados da ficha técnica do modelo usado.

Características técnicas – banho termostático DBT KB21	
Volume [l]	7
Frequência [Hz]	50
Tensão [V]	230
Corrente [A]	1.2
Temperaturas de operação [°C]	[-30;100]
Potência consumida [W]	145
Líquido refrigerante	R134A



Figura 3.6. Calibração dos 126 termopares.

3.1.5.2. Piranómetro

O piranómetro é utilizado para medir a radiação solar numa superfície. Este possui um apoio ajustável que permite medir a radiação solar segundo a direção dos painéis. Na Tabela 3.4 são apresentadas as principais características do piranómetro utilizado, *Kipp & Zonen* modelo CM11, retiradas da sua ficha técnica [19].

Tabela 3.4. Características técnicas do piranómetro CM 11. Dados retirados da ficha técnica do piranómetro da *Kipp & Zonen* modelo CM11 [19].

Características técnicas – Piranómetro CM 11	
Gama do espetro reconhecido [nm]	[340;2200]
Fator de sensibilidade [V/ (W/ m ²)]	5.41×10 ⁻⁶
Tempo de resposta [s]	< 24
Erro direcional (1000 W/m ²)	< 10 W/m ²
% de desvio da resposta devido a alterações da temperatura ambiente	< 1% (-10°C a +40°C)
% de desvio da resposta devido a alterações da inclinação (1000 W/m ²)	< 0.25%
Temperatura de operação [°C]	[-40;80]
Irradiância solar máxima [W/m ²]	4000

3.1.5.3. Sensores de fluxo de calor

Um sensor de fluxo de calor é um dispositivo ideal para a medição precisa da transferência de calor através de uma superfície. Os sensores de fluxo de calor utilizados são sensores de fluxo de filme fino da *OMEGA ENGINEERING, INC.* Na Tabela 3.5 são apresentadas as principais características dos medidores de fluxo de calor utilizados – sensores HFS-4. Na instalação experimental são utilizados 11 sensores de fluxo de calor. Cada sensor tem um fator de sensibilidade característico. Os fluxos de calor são obtidos diretamente a partir dos sinais fornecidos pelos sensores, em mV, multiplicados pelo fator de sensibilidade em W/m^2 por cada mV. (ver Tabela 0.2 no apêndice).

Tabela 3.5. Características técnicas dos sensores de fluxo de calor HFS-4. Dados retirados da ficha técnica do modelo aplicado [20].

Características técnicas – Sensor HFS-4	
Resistência térmica [$^{\circ}C / (W/m^2)$]	0.004
Capacidade térmica [(W.s)/($m^2 \cdot ^{\circ}C$)]	1000
Tempo de resposta [s]	0.70
Termopar tipo K	SIM

3.1.5.4. Aquisição e tratamento de dados

Para registrar e armazenar os sinais medidos, os sensores foram conectados a *data loggers Pico TC-08* que por sua vez estão ligados a um computador que contem o *software PicoLog*, da *Pico Technology*. Cada *data logger* tem oito entradas. Este sistema de aquisição é apropriado para obter e converter sinais provenientes de diversos tipos de termopares e de qualquer outro sensor (por exemplo do piranómetro). As principais características deste equipamento são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Características técnicas do *Pico TC-08*. Dados retirados da ficha técnica do modelo utilizado [20].

Características técnicas – Pico TC-08	
Resolução [bits]	20
Tipos de termopares suportados	B, E, K, N, J, T, S, R
Tempo de conversão por canal ativo [ms]	100
Número de cais	8
Gama de entrada [mV]	±70
Impedância de entrada [MOhms]	2
Temperatura ambiente de operação [°C]	[0;50]
Gama de temperaturas possíveis de adquirir [°C]	[-270;1820]
Proteção contra sobretensão	±30
<i>Software</i>	<i>PicoLog</i>

3.1.5.5. Programa de aquisição de dados desenvolvido em *LabView*TM

Foi desenvolvido um programa em *LabView*TM pelo aluno Francisco Nunes que permite recolher dados típicos dos módulos PV em intervalos de tempo desejados [21]. Este programa permite um registo contínuo da corrente, tensão e consequentemente da potência elétrica.

Os valores da tensão e a da corrente são apresentados graficamente, o valor da potência gerada é obtido através da multiplicação do valor da tensão e da corrente e é mostrada num medidor. A interface é ainda composta por pequenos visores que apresentam os valores instantâneos a cada segundo de cada variável. Mais informação sobre o programa utilizado para monitorização dos dados experimentais pode ser consultado na ref. [21].

3.1.5.6. Dispositivo de medição da curva *V-I* de módulos PV

Para a obtenção dos valores característicos dos módulos PV utilizados recorreu-se ao dispositivo de medição PVPM2540C, da PVE[®] disponibilizado pelo CTCV (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro). Na Figura 3.7 está representado o equipamento e os seus diversos componentes. As características técnicas deste dispositivo são apresentadas na Tabela 3.7.

Avaliação experimental do desempenho de painéis fotovoltaicos com unidades de armazenamento de calor amovíveis



Legenda:

- 1- Sensor de temperatura;
- 2- Ligação aos painéis PV;
- 3- Módulo solar;
- 4- Conexão do módulo PV ao equipamento;
- 5- Equipamento PVPM2540C.

Figura 3.7. Equipamento PVPM2540C utilizado para a caracterização dos painéis PVs utilizados.

Tabela 3.7. Características técnicas do equipamento PVPM2540C. Dados retirados do catálogo da PVE®.

Características técnicas – PVPM2540C	
<i>Unidades de Medição</i>	
Taxa de Amostragem [Hz]	100k
Resolução [V]	[0.01;0.25]
Resolução [A]	[0.005;0.01]
Duração de uma medição	20 ms até 2 s

Este equipamento permite medir a radiação solar e a temperatura do painel PV instantâneas; permite obter os valores I_{SC} e V_{OC} para condições pontuais de temperatura e radiação solar; e ainda, medir a tensão, a corrente e a potência máxima.

3.1.6. Microinversor

Um microinversor é um dispositivo elétrico capaz de transformar um sinal elétrico produzido pelos painéis PV de corrente contínua (DC, do inglês *Direct Current*) num sinal elétrico de corrente alternada (AC, do inglês *Alternate Current*). Foram instalados três microinversores da BeOn2®, um para cada painel, com as características apresentadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8. Características técnicas dos microinversores utilizados. Dados retirados da ficha técnica do microinversor da BeOn2 [22] .

Características técnicas – Microinversor BeOn2	
<i>DC INPUT DATA</i>	
Potência (STC) [W]	[up to 2×300]
Tensão mínima [V]	18
Tensão máxima [V]	50
Corrente máxima [A]	10
<i>AC OUTPUT DATA</i>	
Potência nominal de saída [W]	500
Corrente na máxima potência [A]	2.8
Fator de potência [%]	> 0.99
Tensão [V]	[184;265] (Ajustável)
Frequências [Hz]	[46;60.2] (Ajustável)
Eficiência máxima [%]	95.6

3.1.7. Estação meteorológica

No terraço da cobertura da ADAI encontra-se uma estação meteorológica da marca *Davis Instruments* e do tipo *Vantage Pro 2 Plus*. A estação é composta por um anemômetro, que inclui sensores de velocidade e direção do vento, por sensores de temperatura e humidade, um sensor de radiação solar e um sensor de radiação ultravioleta. A partir do *software* Wunderground [23] é possível recolher informação acerca da temperatura e humidade ambiente, quantidade de precipitação, velocidade e direção do vento, horário do nascer e pôr do sol e pressão barométrica, em intervalos de tempo de 10 minutos.

4. PROTOCOLO EXPERIMENTAL

4.1. Disposição e fixação dos termopares e dos sensores de fluxo de calor na instalação experimental

Para a fixação de todos os sensores são escolhidos pontos estratégicos, tendo estes a mesma localização em todos os sistemas PV de modo a ser possível a posterior comparação de resultados.

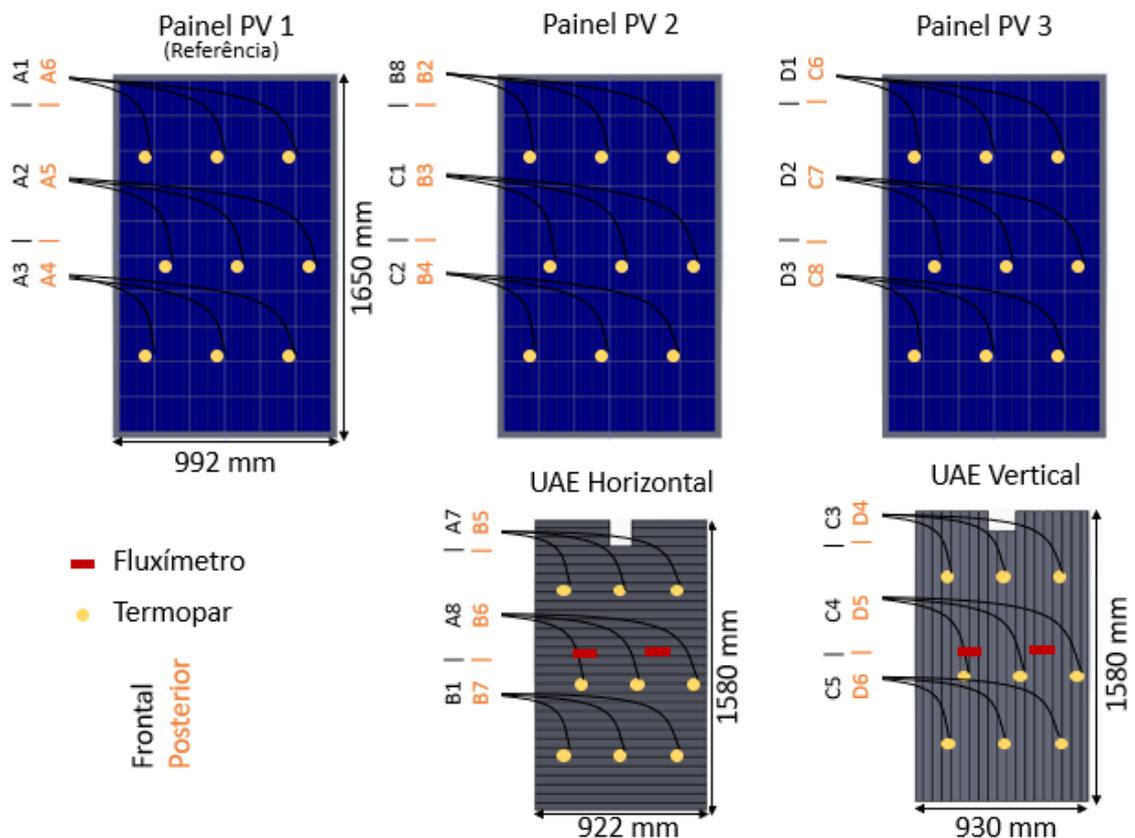


Figura 4.1. Distribuição dos sensores de temperatura e de fluxo de calor nos 3 painéis PV e nas duas UAE utilizados.

Como se pode verificar na Figura 4.1, na face frontal e posterior de cada um dos painéis PV foram colocados 9 termopares, assim como em cada face das UAE. Quanto ao posicionamento dos sensores de fluxo de calor, cada painel PV contém um medidor de fluxo

de calor ao meio da face posterior. Em cada uma das UAE foram colocados quatro sensores de fluxo de calor: dois na face frontal e dois na face posterior. Foi utilizada fita adesiva de alumínio na colocação dos sensores.

4.2. Energia elétrica gerada pelos painéis PVs

A instalação experimental possui uma placa SCC-68 da marca *National Instruments* que serve como meio de conectar os circuitos elétricos a uma placa de aquisição de dados incorporada no processador. Esta placa condiciona os sinais de entrada visto que o valor admissível é de $\pm 10V$.

Como o potencial máximo gerado por um PV é de 37.4V, foi necessário implementar um divisor de tensão constituído por quatro resistências em serie de 4.7k Ω .

De modo a impedir que ocorram danos na placa SCC-68 devido a sobrecarga no sistema, foi colocado ainda um diodo Zener em paralelo com a resistência de medição de cada divisor de tensão. Mais informação sobre o esquema do circuito elétrico criado para a monitorização de cada módulo PV instalado pode ser consultada na ref. [21].

4.2.1. Medição da tensão elétrica e da corrente elétrica

A energia elétrica produzida por cada sistema PV é injetada na rede elétrica do edifício. A tensão é medida no circuito de corrente contínua, isto é, antes dos microinversores. Nos terminais de uma resistência do divisor de tensão estão dois cabos que, em conjunto, fazem a ligação à placa SCC-86 de modo a ser possível medir a tensão. Cada circuito elétrico é dotado de uma resistência elétrica de 0.05 Ω , valor considerado tendo em conta as características admissíveis da placa SCC-68. Os terminais desta resistência estão conectados à placa SCC-68 de modo a ser possível medir a corrente elétrica tendo em conta a lei de Ohm (Equação 4.1), onde I representa a corrente elétrica, V a tensão elétrica e R uma resistência presente no circuito com valor igual a 0.05 Ω .

$$I = \frac{V}{R} [A] \quad (4.1)$$

Mais informação sobre a medição da tensão elétrica e da corrente pode ser consultada na ref. [21].

4.3. Calibração

4.3.1. Calibração do piranómetro

Por forma a calibrar o piranómetro, recorreu-se à informação dada pela estação meteorológica instalada na cobertura do edifício da ADAI. A estação meteorológica fornece o valor da radiação global (direta e difusa) tal como o piranómetro. Com ambos os equipamentos a medir a radiação solar na horizontal, facilmente se comparam os valores obtidos pelos dois equipamentos.

O piranómetro fornece a informação em mV (tensão obtida através da diferença de temperatura entre um corpo negro, que absorve a radiação e o corpo do piranómetro, que atua como dissipador de calor). A conversão desta tensão para W/m^2 é feita recorrendo ao *software* PicoLog tendo em conta o fator de sensibilidade apresentado na Tabela 3.4.

4.3.2. Análise dos dados obtidos pelo equipamento PVPM2540C e pelo sistema de aquisição desenvolvido em *LabView*TM

De modo a certificar que os painéis PV produzem uma quantidade de energia em conformidade com o esperado (e igual entre si), foram realizados dois testes de calibração: um foi efetuado através do sistema de aquisição desenvolvido em *LabView*TM e o outro através da utilização do equipamento PVPM2540C. No primeiro teste, a tensão, a corrente e a potência de cada módulo PV foram monitorizadas durante três dias sucessivos e comparadas entre si. No segundo teste de calibração foi utilizado o dispositivo de medição da curva *V-I* de módulos PV, PVPM2540C, num dia de céu limpo. Foram medidos os valores de V_{OC} e I_{SC} para cada módulo PV. Foram também tidas em consideração as propriedades do painel PV fornecidas pelo fabricante para as condições STC (radiação solar de $1000 W/m^2$ e temperatura da célula $25\text{ }^\circ\text{C}$) apresentadas na Tabela 4.1.

Avaliação experimental do desempenho de painéis fotovoltaicos com unidades de armazenamento de calor amovíveis

Em ambos os testes de calibração foram registradas as condições meteorológicas. Note-se que o valor da radiação solar no plano com a mesma inclinação dos painéis PV foi medido diretamente pelo piranómetro. Os valores da radiação solar medidos pelo piranómetro e pelo equipamento PVPM2540C foram comparados entre si, para efeitos de calibração.

Tabela 4.1. Características dos painéis fotovoltaicos utilizados. Dados retirados da ficha técnica do modelo RSM-60-6-250P da Risen [9].

Características dos módulos PV – RSM60-6-250P	
Potência máxima [W]	250 ± 3%
Tensão em circuito aberto - V_{OC} [V]	37.4
Corrente em curto circuito - I_{SC} [A]	8.88
Tensão para máxima potência [V]	30.0
Corrente para máxima potência [A]	8.34
Eficiência [%]	15.3
Dimensões [mm]	1650×992×35
Garantia	25 anos

De modo a certificar que as condições de ensaio se aproximam o mais possível das condições nominais de teste, os painéis PV foram cobertos na noite anterior à realização do ensaio e descobertos aquando da medição com o equipamento PVPM2540C. Relativamente ao ensaio, os painéis PV são desligados dos microinversores e ligados ao equipamento PVPM2540C. Cada constituinte do equipamento foi devidamente colocado em lugares estratégicos da instalação experimental. O módulo solar, destinado a registar a irradiância durante o período de medição, foi colocado no topo de cada painel PV (e com a mesma inclinação) para garantir um registo representativo da radiação solar. O sensor de temperatura foi colocado na zona central da superfície posterior de cada painel PV.

4.3.3. Preparação das UAE

Antes de acoplar as UAE à parte posterior dos painéis PV, estas foram preenchidas com o PCM e deixadas durante três dias numa câmara climática existente no LAI, a 10 °C, de forma a uniformizar a temperatura na UAE e a estabelecer uma condição inicial de ensaio, para a temperatura do domínio de PCM. A câmara climática existente no LAI é de grandes dimensões, como se pode ver na Figura 4.2.



(a)



(b)

Figura 4.2. (a) Câmara climática instalada no LAI; (b) UAE no interior da câmara climática.

Aquando da acoplação da UAE à parte posterior dos painéis PVs, é colocada uma folha de papel de alumínio amarrotada entre o PV e a UAE com o objetivo de aumentar os pontos de contacto entre ambos.

5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O presente trabalho contempla um sistema que permite recolher e guardar os valores instantâneos necessários para a obtenção das curvas características de um painel PV em condições de funcionamento reais (diferentes das condições nominais estandardizadas), assim como um sistema de aquisição de dados desenvolvido em *LabView*TM que permite quantificar o valor da potência gerada por cada painel PV em tempo real. O sistema de aquisição de dados permite ainda monitorizar a evolução das temperaturas em várias superfícies dos painéis PV e das UAE, assim como medir fluxos de calor e a radiação solar incidente no plano de inclinação dos painéis PV. Seguidamente são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

5.1. Calibração

5.1.1. Calibração do piranómetro

Na Figura 5.1 estão representadas duas curvas que mostram a evolução da radiação solar numa superfície horizontal ao longo do tempo, num dia com algumas nuvens. Uma das curvas tem em conta os valores obtidos através do piranómetro e a outra os valores medidos pela estação meteorológica instalada na cobertura da ADAI.

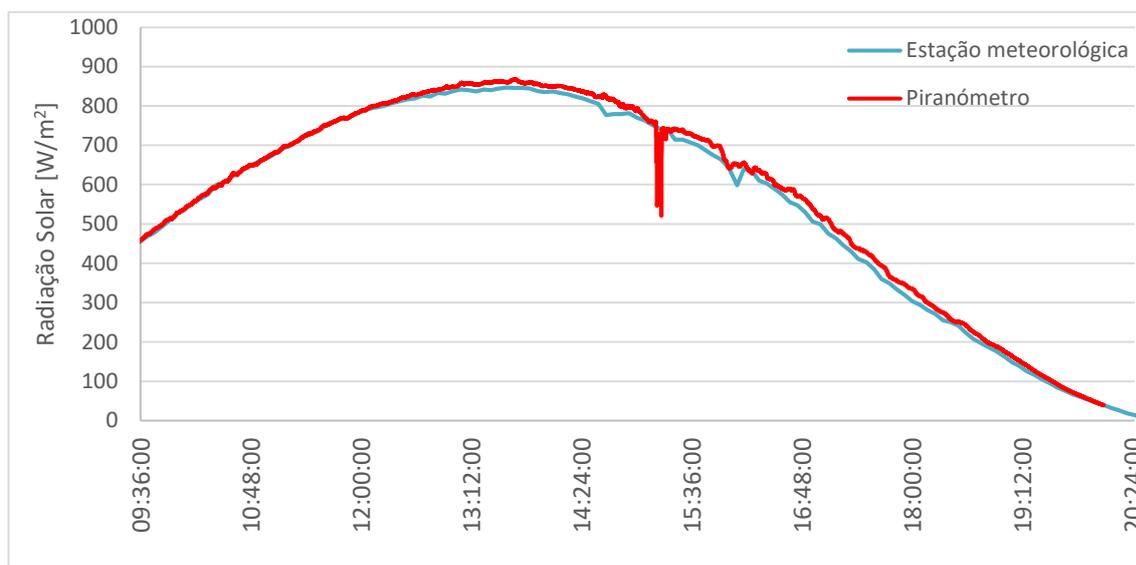


Figura 5.1. Evolução da radiação solar numa superfície horizontal ao longo de um dia (2 de agosto de 2018).

Como se pode verificar, os valores da radiação solar obtidos pelo piranómetro aproximam-se dos valores obtidos pela estação meteorológica, verificando-se um máximo desvio de 52.86 W/m^2 às 16:05 h. Por volta das 15:15 h, o piranómetro regista valores muito inferiores aos registados pela estação meteorológica e posteriormente volta a registar valores muito próximos desta. Este pequeno desvio pode dever-se ao surgimento de uma pequena nuvem na zona abrangida pelo piranómetro, ou de um pequeno corpo móvel. No entanto, os resultados permitem concluir que se pode usar o piranómetro para medir diretamente a radiação solar incidente no plano dos painéis PV (30° com a horizontal).

5.1.2. Análise dos dados obtidos pelo equipamento PVP2540C e pelo sistema de aquisição desenvolvido em *LabView*TM

De modo a compreender como varia a potência gerada pelos painéis PV ao longo de vários dias, com as condições climáticas apresentadas no gráfico da Figura 5.2, foram registados valores de corrente, tensão e potência durante três dias consecutivos. Na Figura 5.3 estão representadas as curvas com a evolução da potência gerada por cada um dos três painéis PV, verificando-se uma tendência padrão ao longo dos três dias de medição. A Figura 5.4 mostra a produção de energia elétrica produzida por cada painel PV, onde mais uma vez é visível uma semelhante produção de energia elétrica ao longo dos três dias. As variações

na produção de energia elétrica podem ser justificadas pelo fato de se terem verificado vários períodos com nuvens passageiras durante o período de medição. O painel PV1 é o que produz menos energia. Este fato deve ser discutido e verificado com mais detalhe em trabalhos futuros. Para efeitos desta dissertação, considera-se que os resultados obtidos são suficientes para fazer a calibração dos painéis PV e garantir que eles produzem mais ou menos a mesma quantidade de energia elétrica para as mesmas condições de ensaio.

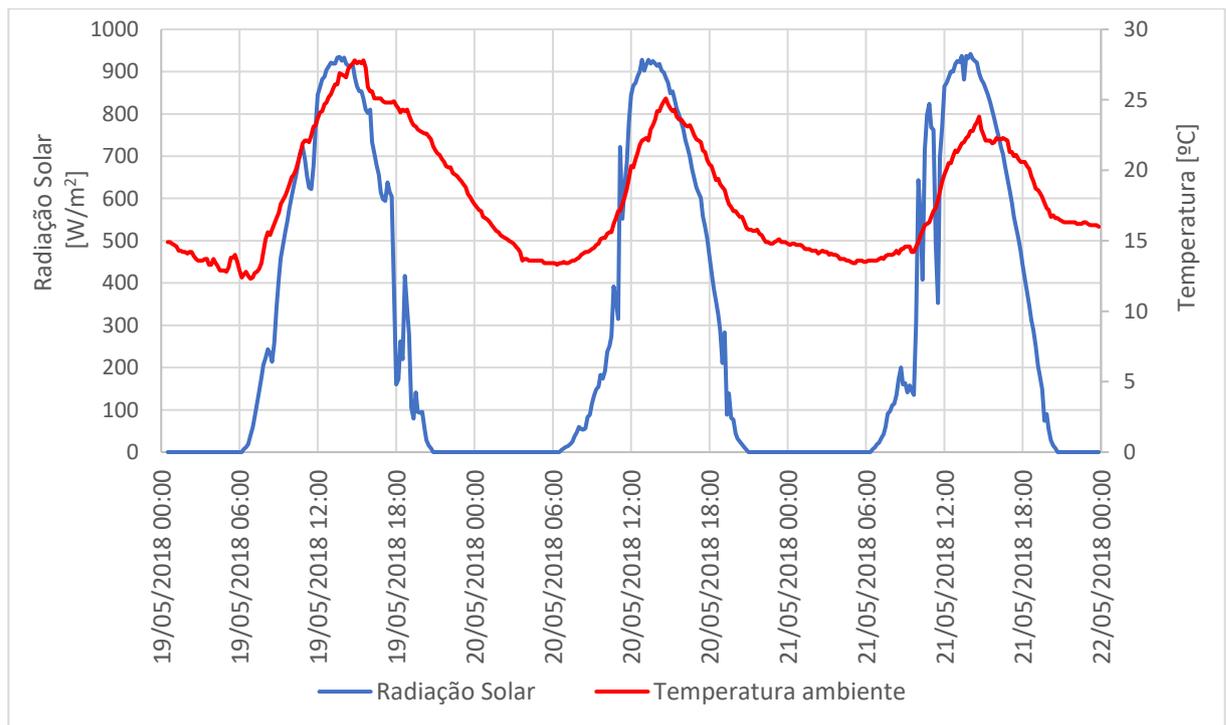
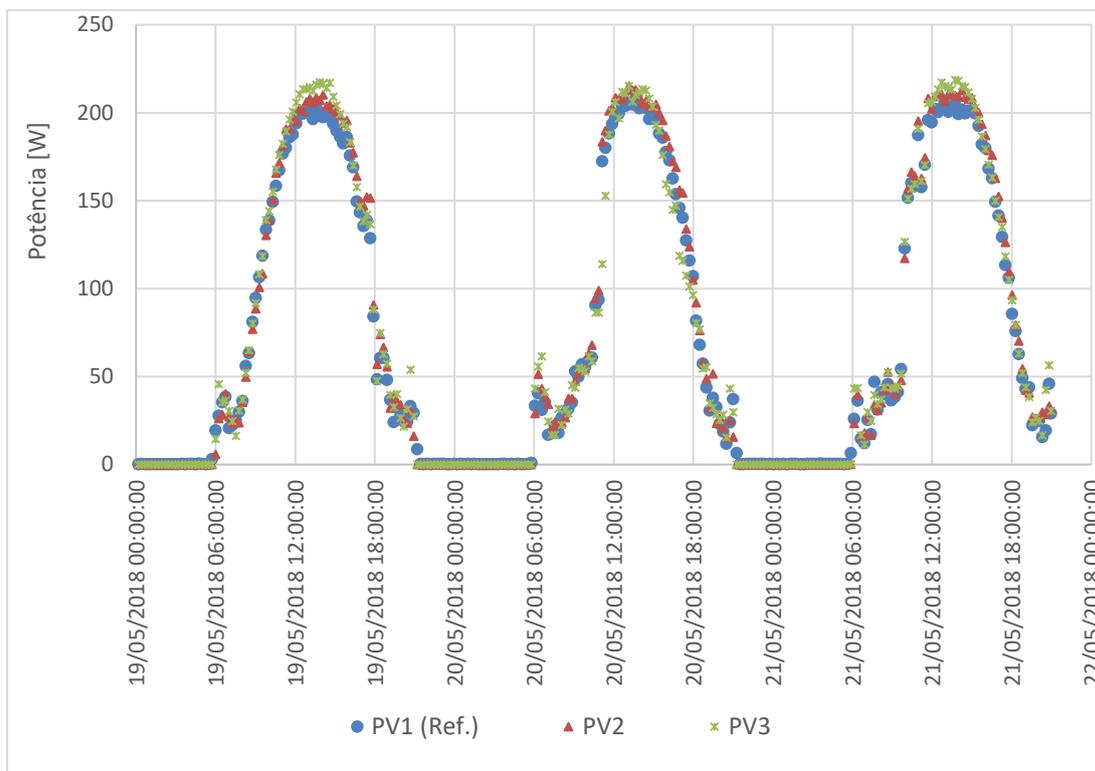


Figura 5.2. Características meteorológicas dos dias avaliados (19 a 21 de maio de 2018).

Avaliação experimental do desempenho de painéis fotovoltaicos com unidades de armazenamento de calor amovíveis



Na Tabela 5.1 apresentam-se os valores máximos de potência registados em cada dia de análise.

Tabela 5.1. Valor de máxima potência registado nos três dias consecutivos.

	Potência máxima [W]		
	19/05/2018	20/05/2018	21/05/2018
PV 1	200.1	206.7	203.1
PV 2	209.5	213.4	211.8
PV 3	217.9	213.2	216.3

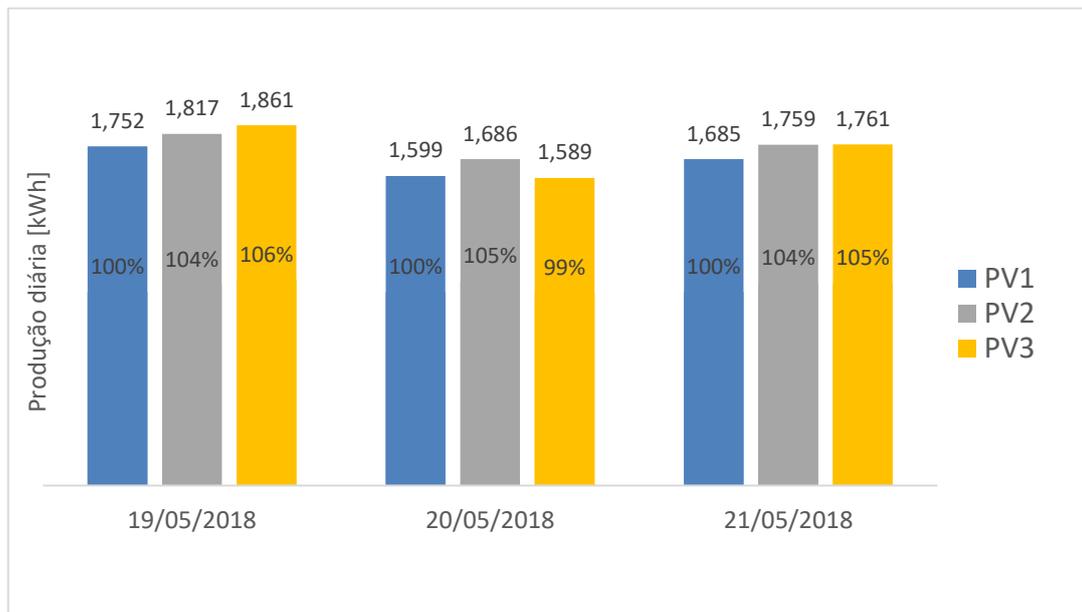


Figura 5.4. Produção de energia elétrica diária por cada painel PV nos diferentes dias e percentagens relativas ao PV1.

Na Tabela 5.2, Tabela 5.3 e na Tabela 5.4 são apresentados os resultados obtidos pelo equipamento PVPM2540C num dia de céu limpo para cada um dos painéis PV utilizados.

Tabela 5.2. Dados característicos do painel PV 1 obtidos a partir do equipamento PVPM2540C.

Medição	PV1			
	1	2	3	4
P_{pk} [W] (at STC)	258.1	257.4	258.6	258.8
$V_p máx$ [V]	28.6	28.3	28.2	28.0
$I_p máx$ [A]	7.23	7.21	7.17	7.19
V_{OC} [V]	36.1	35.8	35.6	35.5
I_{SC} [A]	7.70	7.68	7.65	7.65
FF	0.745	0.742	0.742	0.742
Condições:				
Hora (17/07/2018)	15:33:59	15:34:51	15:35:24	15:35:51
T_{mod} [°C]	35.0	37.4	38.6	40.0
T_{PV} [°C]	36.2	37.9	39.6	40.4
I_{PVPM} [$W \cdot m^{-2}$] (E_{eff})	836	832	827	827
$I_{piranómetro}$ [$W \cdot m^{-2}$]	849	847	844	844

Avaliação experimental do desempenho de painéis fotovoltaicos com unidades de armazenamento de calor amovíveis

Tabela 5.3. Dados característicos do painel PV2 obtidos a partir do equipamento PVPM2540C.

Medição	PV2						
	1	2	3	4	5	6	7
P_{pk} [W] (at STC)	255.7	256.3	256.8	255.3	255.3	255.2	254.1
V_p máx [V]	28.8	28.6	28.5	28.4	28.2	28.1	28.0
I_p máx [A]	6.74	6.71	6.76	6.70	6.70	6.66	6.66
V_{OC} [V]	36.0	35.9	35.8	35.6	35.5	35.4	35.3
I_{SC} [A]	7.11	7.13	7.15	7.11	7.10	7.06	7.07
FF	0.758	0.751	0.754	0.750	0.749	0.749	0.747
Condições:							
Hora (17/07/2018)	15:59:56	16:00:19	16:00:45	16:01:12	16:01:41	16:02:06	16:02:31
T_{mod} [°C]	35.9	36.6	37.8	38.5	39.2	39.8	40.6
T_{PV} [°C]	34.8	36.3	37.0	37.8	39.0	39.7	40.6
I_{PVPM} [W.m ⁻²] (E_{eff})	780	780	781	778	777	772	776
$I_{Piranómetro}$ [W.m ⁻²]	782	782	783	782	777	776	772

Tabela 5.4. Dados característicos do painel PV3 obtidos a partir do equipamento PVPM2540C.

Medição	PV3								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_{pk} [W] (at STC)	256.5	255.6	256.0	256.1	254.6	255.5	255.3	256.5	255.8
V_p máx [V]	29.1	28.9	28.8	28.6	28.5	28.4	28.3	28.2	28.0
I_p máx [A]	6.47	6.48	6.46	6.44	6.45	6.47	6.39	6.42	6.43
V_{OC} [V]	36.2	36.1	35.9	35.8	35.7	35.6	35.5	35.4	35.3
I_{SC} [A]	6.80	6.81	6.81	6.79	6.81	6.82	6.78	6.78	6.83
FF	0.763	0.762	0.760	0.760	0.754	0.757	0.752	0.755	0.749
Condições:									
Hora (17/07/2018)	16:09:50	16:10:26	16:10:57	16:11:24	16:11:41	16:12:12	16:12:48	16:13:06	16:13:48
T_{mod} [°C]	34.8	36.1	37.3	38.2	38.7	39.3	40.0	40.6	41.4
T_{PV} [°C]	34.1	34.7	35.8	36.6	37.1	37.9	38.9	39.8	40.8
I_{PVPM} [W.m ⁻²] (E_{eff})	747	747	746	742	745	745	740	741	745
$I_{Piranómetro}$ [W.m ⁻²]	751	751	750	752	752	751	749	754	748

O valor da P_{Pk} , corresponde à potência máxima nas condições STC (radiação solar de 1000 W/m² e temperatura da célula PV igual a 25°C). A corrente em curto circuito, assim como a tensão em circuito aberto variam conforme os valores da radiação solar e da temperatura. Como se pode ver nas tabelas anteriores e como seria de esperar, o valor da I_{SC} é maioritariamente influenciado pela radiação solar e o valor da V_{OC} pela temperatura da célula. Nos três painéis PV, à medida que a temperatura de operação aumenta, o valor de V_{OC} diminui.

As medições iniciaram-se às 15:33:59 h no painel PV1 e terminaram às 16:13:48 h no painel PV3. Apenas com uma diferença de 40 minutos entre a primeira e a última

medição, verifica-se uma queda na radiação solar de aproximadamente 100 W/m^2 . A realização do ensaio deveria ter sido efetuada mais próximo do meio dia solar, altura em que a radiação solar sofre menor variação e se aproxima mais dos 1000 W/m^2 , de modo a manter os três painéis PV nas mesmas condições de ensaio (e mais próximo das condições STC). Como os ensaios não foram realizados nas condições STC, os valores de I_{SC} e V_{OC} são inferiores aos catalogados (ver Tabela 4.1).

O valor de T_{mod} corresponde à temperatura medida na parte posterior do painel PV. Quanto mais tempo um painel PV está exposto ao sol, maior é a T_{mod} e por consequência menor é o valor de V_{OC} como discutido anteriormente. FF é um fator adimensional que relaciona a corrente em curto circuito, a tensão em circuito aberto e a corrente e a tensão que dão origem à máxima potência, $FF = I_{P \text{ máx}} \times V_{P \text{ máx}} / (I_{SC} \times V_{OC})$. Como se pode ver nas tabelas anteriores, este valor é idêntico em todas as medições, o que leva a concluir que todos os painéis PV se encontram em conformidade com o esperado, permitindo validar a sua utilização para ensaios futuros.

5.2. Estudo do efeito termorregulador das UAE

Na Figura 5.5 estão representadas as condições meteorológicas registadas para os seis dias de ensaio – 14 a 19 de agosto de 2018. Na Figura 5.6 apresenta-se a evolução da temperatura nas superfícies frontal e posterior de cada painel PV ao longo do período avaliado.

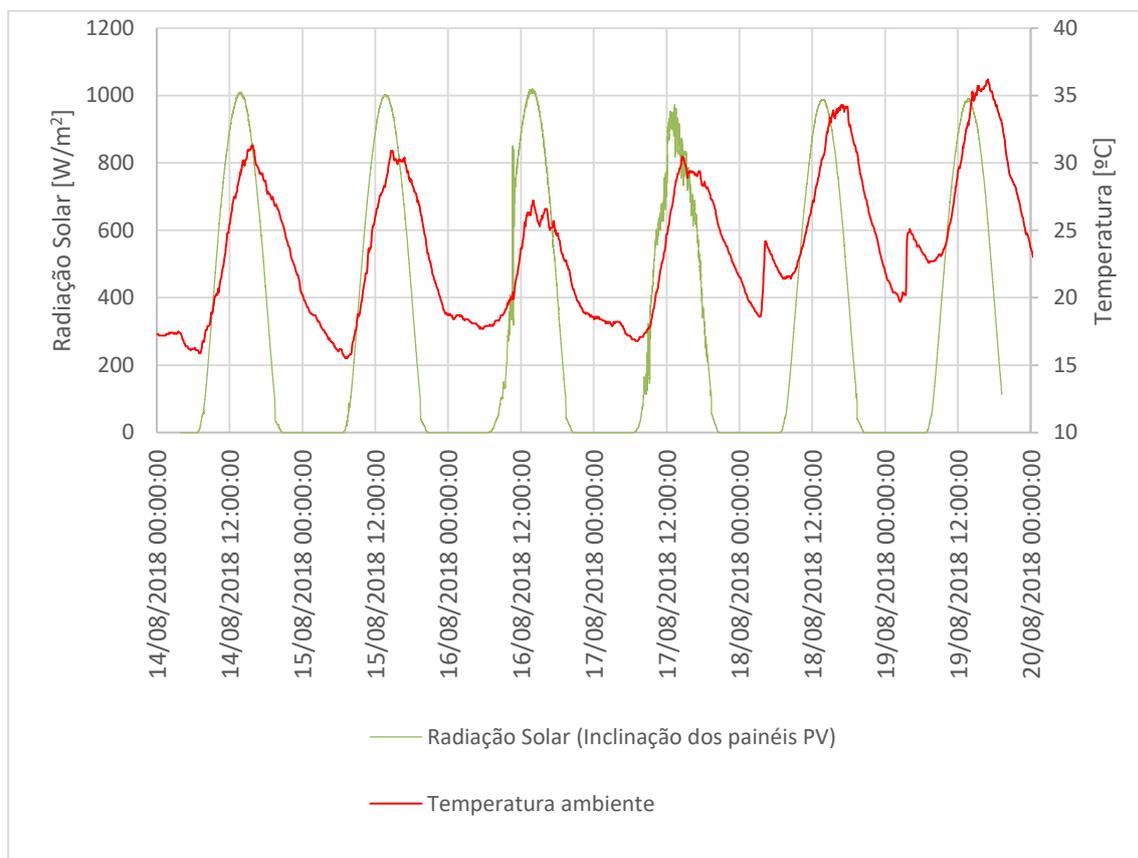


Figura 5.5. Condições meteorológicas de ensaio – 14 a 19 de agosto de 2018.

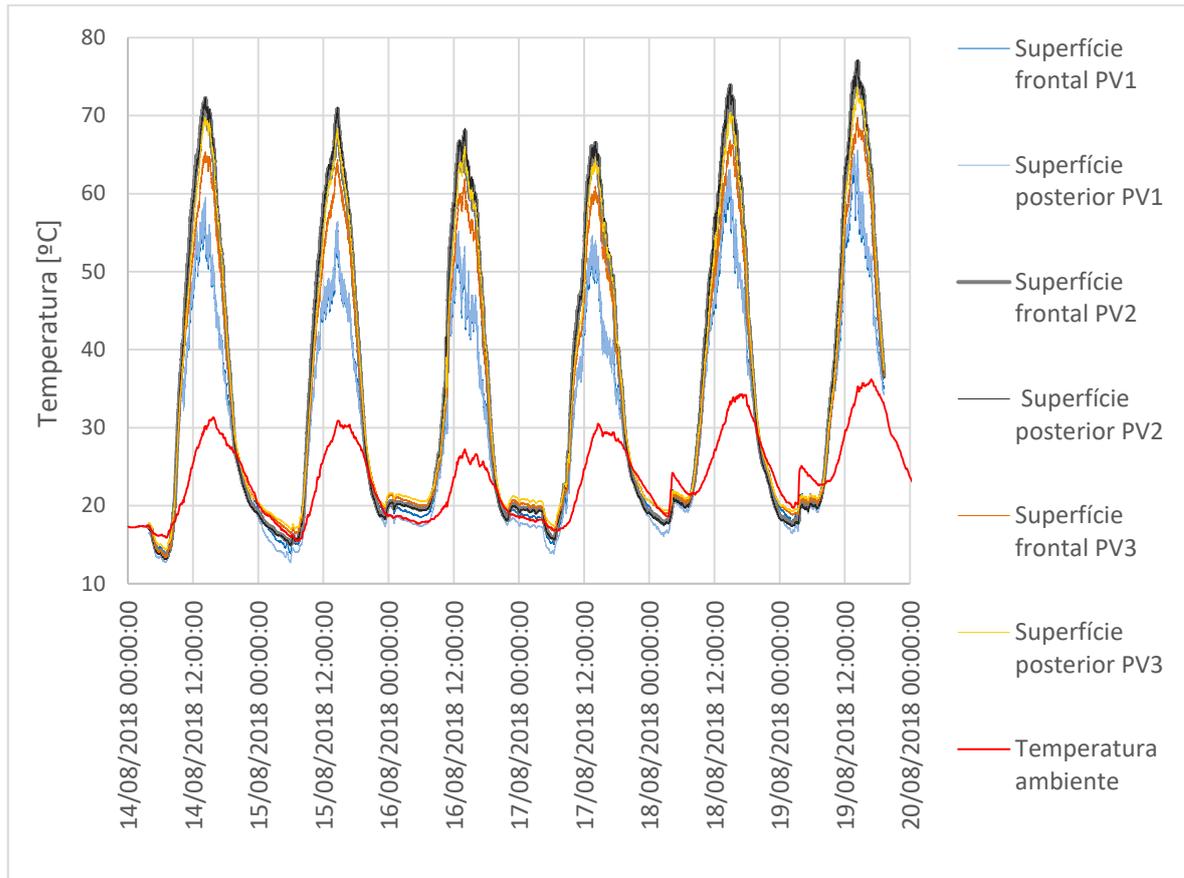


Figura 5.6. Variação da temperatura nas superfícies frontal e posterior de cada painel PV ao longo dos dias consecutivos de análise.

Ao painel PV1 não foi acoplada nenhuma UAE e, no entanto, é o que possui valores mais baixos de temperatura tanto na superfície frontal como na superfície posterior. É notório que os painéis com UAE acopladas apresentam temperaturas operativas mais elevadas (ver Figura 5.6). Ou seja, ao invés de o PCM estar a contribuir para reduzir a temperatura operativa dos painéis PV como era desejado, as UAE estão a fazer com que a temperatura operativa dos painéis aumente. A Figura 5.7 apresenta o fluxo de calor medido da superfície posterior dos painéis PV ao longo do período de ensaio. Verifica-se que o fluxo de calor é mais elevado no painel PV1 de referência. Ou seja, as trocas de calor devido à convecção natural (vento) são superiores. As UAE fazem com que o fluxo de calor na superfície posterior dos painéis PV2 e PV3 não seja tão acentuado.

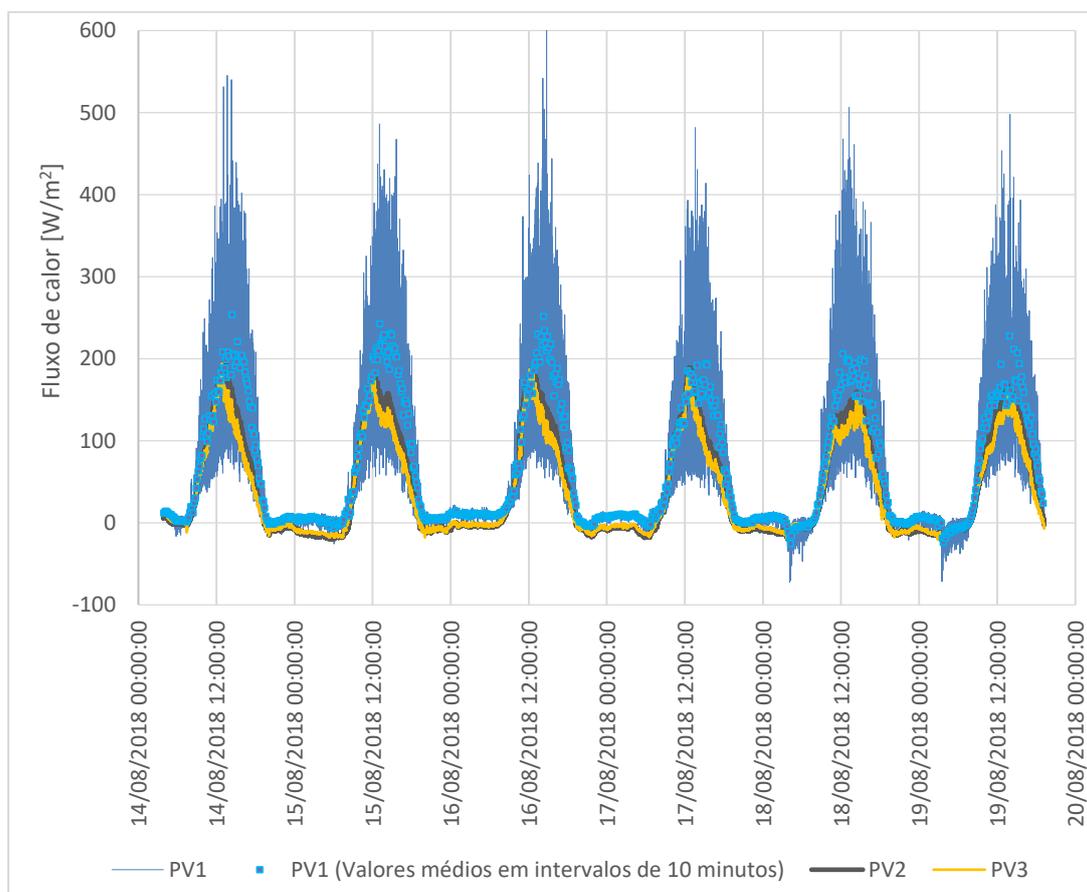


Figura 5.7. Fluxo de calor ao longo dos dias na parte posterior dos painéis PV.

Com recurso aos dados fornecidos pela estação meteorológica, é observável que a temperatura ambiente durante estes seis dias se mantém elevada, nomeadamente durante o período noturno, o que justifica que o PCM utilizado, o RT22HC (temperatura de mudança de fase de 22 °C), não atinja temperaturas que permitam a sua total solidificação durante a noite. Assim, as UAE não realizam a função de diminuir a temperatura operativa das células PV. Pelo contrário, como no ciclo de carga seguinte o PCM já se encontra "carregado", as UAE vão fazer com que a temperatura operativa do painel PV aumente. A temperatura nas superfícies das UAE raramente se situa abaixo dos 22°C, temperatura à qual o PCM muda de fase (ver Figura 5.8 como exemplo).

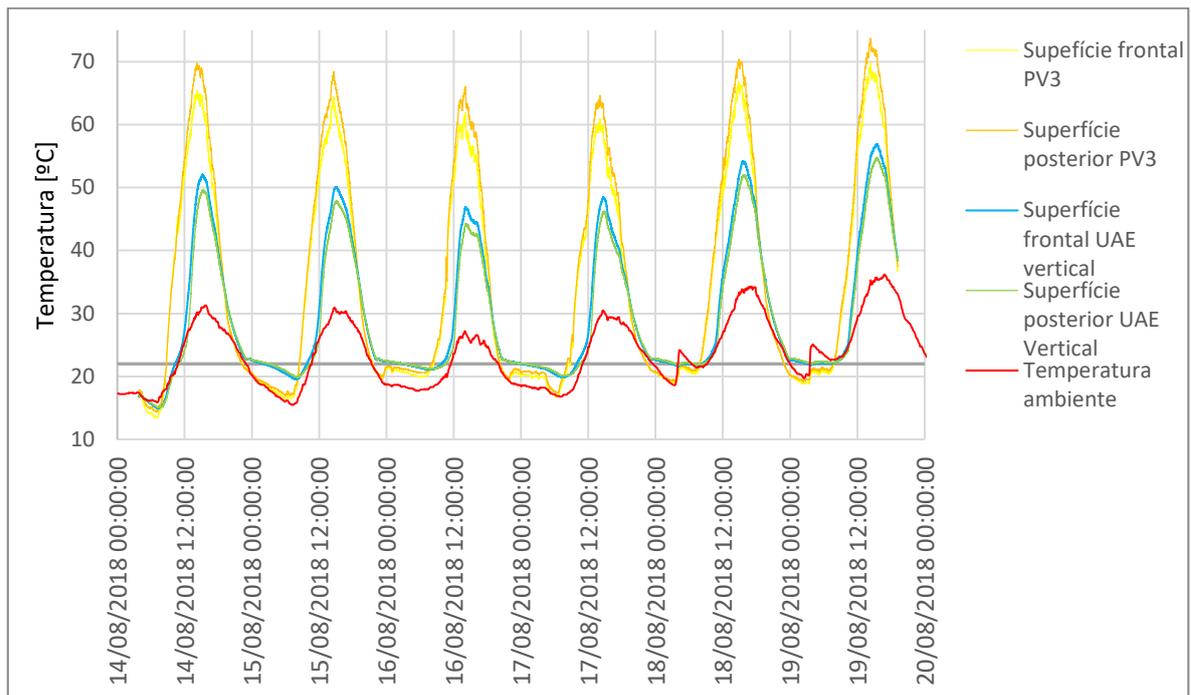


Figura 5.8. Evolução da temperatura ao longo dos dias no sistema PV/PCM3.

O papel de alumínio amarrado colocado entre o painel PV e a UAE possui uma boa condutividade térmica. Este material foi colocado com o propósito de aumentar a área de contacto entre o painel PV e a UAE de forma a ocorrer uma maior transferência de calor do painel para o PCM. Como se pode verificar no gráfico da Figura 5.9, o fluxo de calor na superfície frontal da UAE apresenta maiores amplitudes durante o dia e menores amplitudes durante a noite que o fluxo de calor na superfície posterior do painel PV. Provavelmente, isso deve-se ao facto de o papel de alumínio funcionar como ponte térmica nas extremidades do painel.

O espaço de ar existente entre o painel PV e a UAE é fracamente ventilado. Como esta camada de ar vai aquecer muito durante o dia, ela vai influenciar os fluxos de calor. Esta é mais uma justificação para o facto da amplitude de fluxo de calor na superfície frontal da UAE ser superior à amplitude de calor na superfície posterior do painel PV durante o dia.

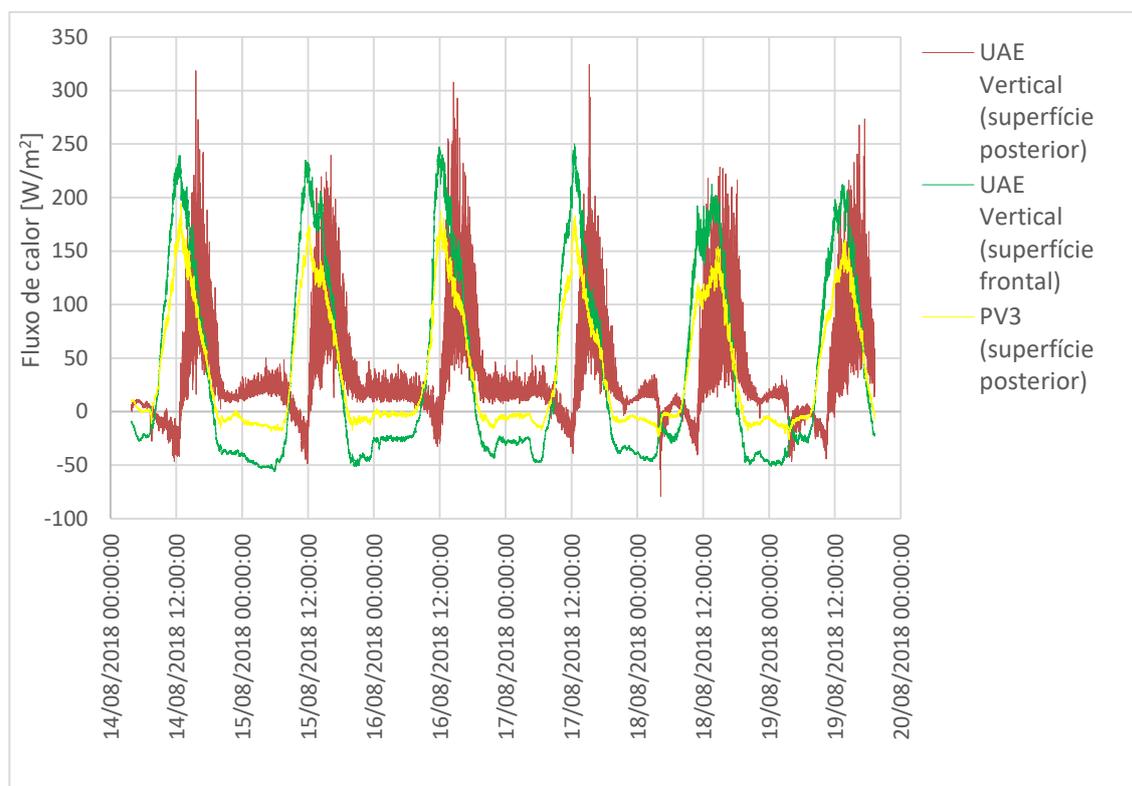


Figura 5.9. Fluxos de calor nas superfícies do sistema PV/PCM3.

Olhando para o gráfico anterior verifica-se que existe um período da manhã onde o fluxo de calor na superfície posterior da UAE é negativo. Durante a noite a superfície da UAE fica fria, atingindo valores mínimos por volta das 08:00h, momento em que a temperatura ambiente começa a aumentar. Como durante este período de tempo a temperatura da superfície é inferior à temperatura ambiente, o fluxo de calor na superfície posterior da UAE inverte o sentido.

Foi medida e registada simultaneamente a potência elétrica de cada painel PV (ver Figura 5.10). Mais uma vez, conclui-se que a produção diária de energia elétrica é menor no PV1 e verifica-se uma tendência na produção igual à que se verificou antes de acoplar as UAE. Por análise do gráfico da Figura 5.11 e da Tabela 5.5 é possível fazer uma comparação das produções diárias tendo em conta as condições meteorológicas nos dois períodos de estudo. O painel PV1 produz menos energia elétrica apesar de apresentar menores temperaturas operativas, o que é um contrassenso tendo em conta os princípios teóricos apresentados nos primeiros capítulos da dissertação. Assim, estes resultados mostram que alguma coisa poderá estar a falhar na instrumentação da instalação experimental, facto que

deve ter sido em conta no prosseguimento dos trabalhos pela equipa de investigação do projeto PCMs4Buildings. Ou seja, o trabalho apresentado nesta dissertação acaba por funcionar como um estudo preliminar de uma campanha experimental a ser desenvolvida a curto prazo.

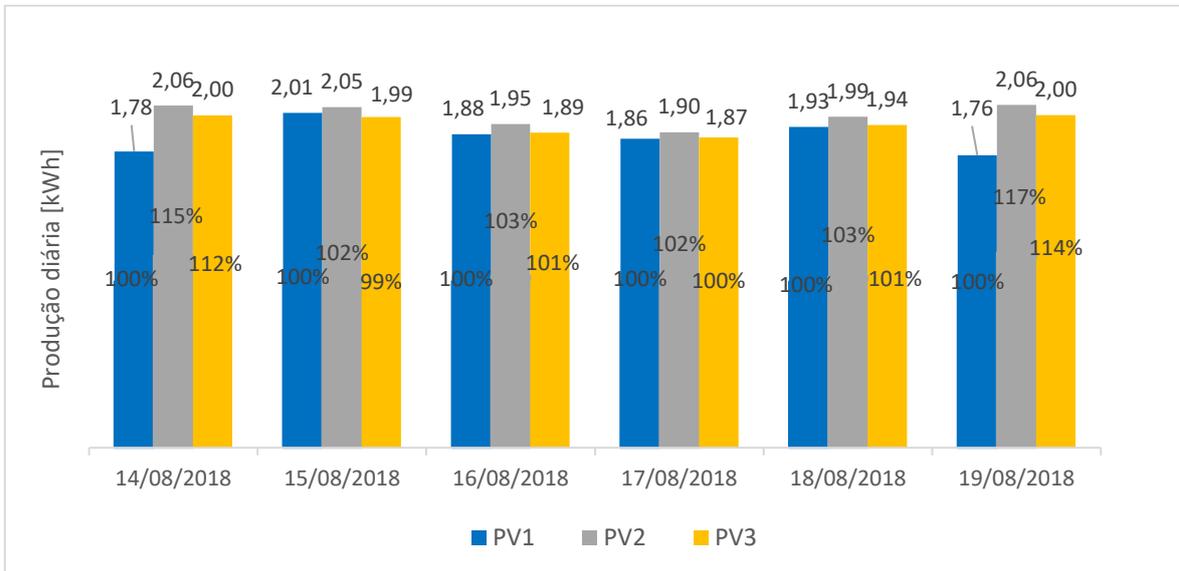


Figura 5.10. Produção de energia elétrica diária por cada painel PV nos diferentes dias de análise e percentagens relativas ao PV1.

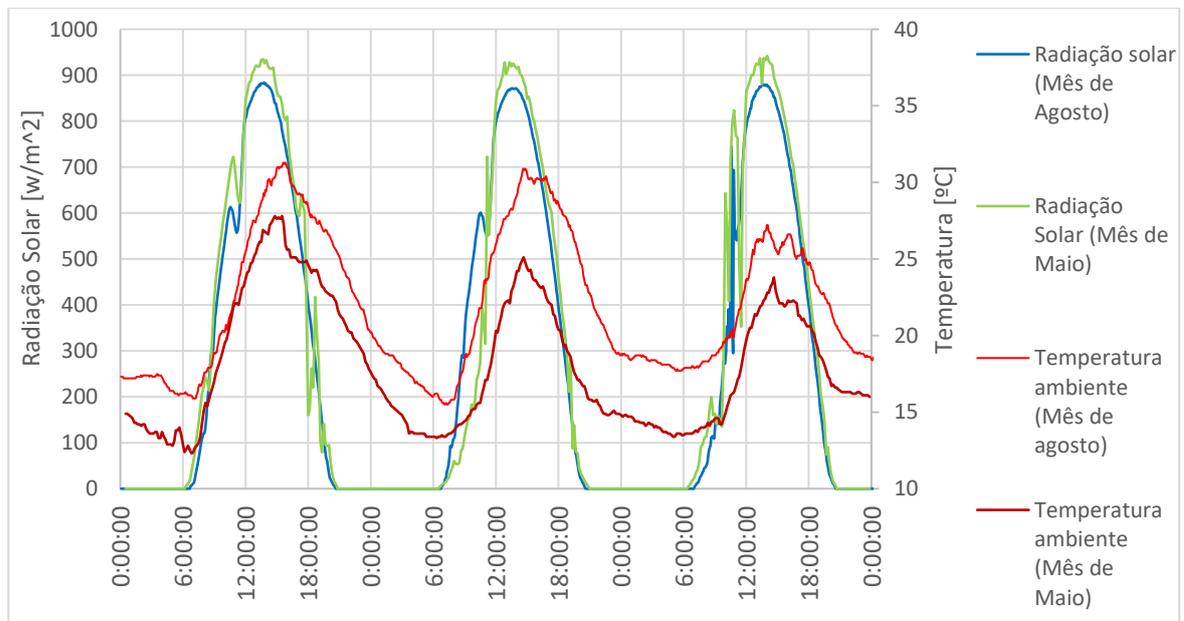


Figura 5.11. Comparação das características meteorológicas de três dias de estudo em maio (19 20 e 21) com três dias de estudo em agosto (14 15 e 16).

Avaliação experimental do desempenho de painéis fotovoltaicos com unidades de armazenamento de calor amovíveis

Tabela 5.5. Comparação da produção de energia elétrica.

Data	Produção diária [kW/h]			Desvios de produção relativamente ao PV1	
	PV1 (Ref.)	PV2	PV3	PV2	PV3
19/05/2018	1.75	1.82	1.86	4%	6.29%
20/05/2018	1.60	1.69	1.59	5.63%	0.59%
21/05/2018	1.69	1.76	1.76	3.98%	4.14%
14/08/2018	1.78	2.06 (com UAE)	2 (com UAE)	13.59%	12.36%
15/08/2018	2.01	2.05 (com UAE)	1.99 (com UAE)	1.95%	1%
16/08/2018	1.88	1.95 (com UAE)	1.89 (com UAE)	3.72%	0.53%

Depois de analisados os resultados obtidos para o período de ensaio e de se ter concluído que o PCM utilizado não desempenhou a função termorreguladora desejada, foi montada novamente toda a instalação experimental em dias onde ocorreu um decréscimo da temperatura ambiente durante o período noturno. O gráfico da Figura 5.12 mostra a evolução da temperatura ambiente assim como a evolução da temperatura nas superfícies dos três painéis PV ao longo dos três dias de análise.

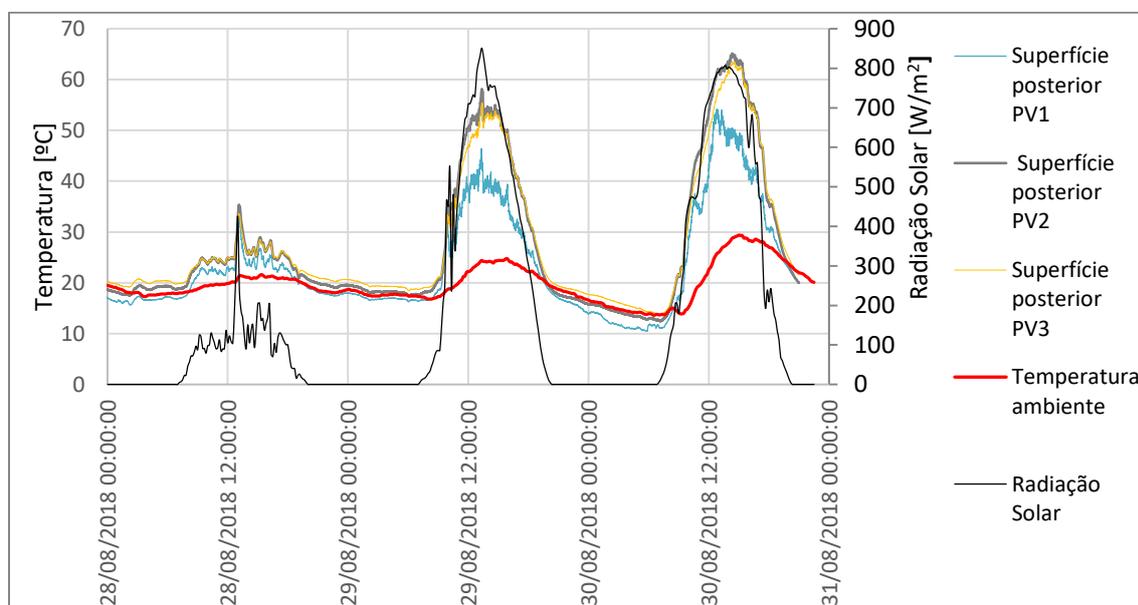


Figura 5.12. Condições meteorológicas e evolução da temperatura nas superfícies posteriores dos painéis PV ao longo dos dias em análise (28 a 30 de agosto de 2018).

Embora a temperatura ambiente tivesse baixado e a temperatura nas superfícies dos painéis tivesse descido, o PV1 continua a ser o painel com temperaturas mais baixas. Neste caso, a temperatura na superfície das UAE está a temperaturas inferiores à temperatura de mudança de fase do PCM durante toda a noite. No entanto, a diferença de temperatura é baixa e insuficiente para que o PCM consiga solidificar totalmente durante uma noite.

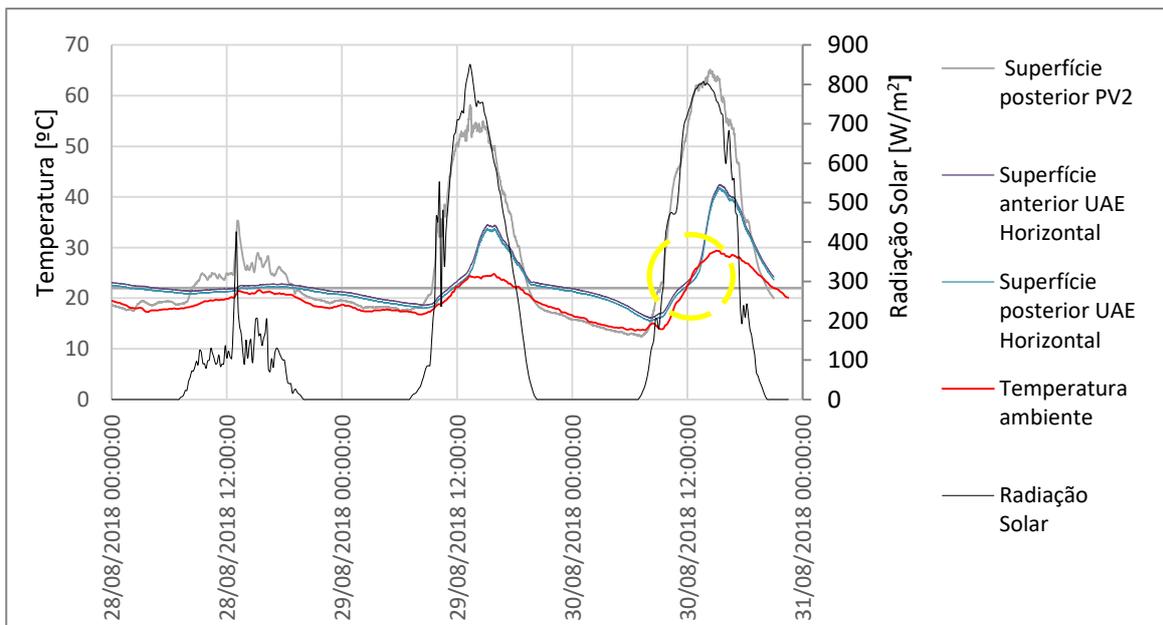


Figura 5.13. Características meteorológicas e evolução das temperaturas nas superfícies do sistema PV/PCM2 ao longo dos dias em análise.

Por análise do gráfico acima, no dia 30/08/2018, verifica-se que as curvas indicadoras das temperaturas nas superfícies das UAE apresentam um claro patamar por volta dos 22°C, comportamento característico de um processo de mudança de fase. A quantidade de material que solidificou durante a noite, muda de fase gradualmente após o meio dia, absorvendo calor do painel PV, conforme se realça na Figura 5.13.

6. NOTAS CONCLUSIVAS

6.1. Conclusões

No presente trabalho, foi desenvolvida e monitorizada uma instalação experimental constituída por três painéis PV comerciais e por duas UAE preenchidas com PCM. O sistema de aquisição de dados é constituído por um programa desenvolvido em *LabView*TM, por um equipamento de medição da curva característica de painéis PV (PVP2540C) e por termopares, um piranómetro e fluxímetros. O grande objetivo deste trabalho é perceber em que medida o PCM RT22HC pode ser usado para a termorregulação de painéis PV.

Com recurso ao programa desenvolvido em *LabView*TM, foi possível avaliar durante dias consecutivos as curvas da potência de cada painel PV. No decorrer desta etapa um dos painéis é considerado como o painel de referência (PV1), e os outros dois funcionam como sistemas PV/PCM. As condições meteorológicas foram devidamente monitorizadas, assim como a evolução da temperatura na parte frontal e posterior dos painéis PV e das UAE. Foi ainda registada a evolução dos fluxos de calor nas superfícies frontal e posterior das UAE. Foram estudados três períodos de tempo diferentes (19 a 20 de maio, 14 a 19 de agosto e 28 a 30 de agosto). Depois de analisados os resultados obtidos, concluiu-se que o PCM utilizado possui uma temperatura de mudança de fase muito baixa para potenciar a termorregulação dos painéis PV para as condições meteorológicas registadas durante os períodos de análise.

Concluiu-se que a produção diária de energia elétrica é menor no PV1 e verificou-se uma tendência na produção igual em todos os períodos de tempo, mesmo depois de serem acopladas as UAE ao PV2 e ao PV3. O painel PV1 produz menos energia elétrica apesar de apresentar menores temperaturas operativas, o que é um contrassenso tendo em conta os princípios teóricos apresentados nos primeiros capítulos da dissertação. Assim, estes resultados mostram que alguma coisa poderá estar a falhar na instrumentação da instalação experimental.

6.2. Trabalhos futuros

Relativamente ao trabalho aqui apresentado, a curto prazo, é fundamental perceber-se o que pode estar a funcionar mal na instrumentação da instalação experimental, de forma a perceber-se porque é que os painéis com maiores temperaturas operativas (sistemas PV/PCMs) produzem mais energia elétrica, o que é um contrassenso tendo em conta os princípios teóricos apresentados nesta dissertação, e verificados por muitos autores na revisão bibliográfica. Uma vez identificado o problema, é necessário repetir os ensaios para condições climáticas de Verão. É também importante avaliar o comportamento dos painéis PV com as UAE acopladas durante o Inverno e as estações intermédias. A médio prazo é necessário avaliar o efeito termorregulador das UAE preenchidas com PCMs que mudem de fase a temperaturas mais elevadas, por exemplo 25 ou 28 °C. Deve ser referido que estes materiais já foram adquiridos e que se encontram disponíveis para a realização de novos ensaios. Os ensaios devem ser realizados para as diferentes estações do ano.

Para avaliar o impacto do aumento da transferência de calor do PCM para a envolvente durante o período noturno (fase de descarga/solidificação do PCM), será importante analisar o efeito de um dissipador de calor, constituído por uma superfície de alumínio alhetada, aplicado na superfície posterior da UAE. Este dissipador de calor encontra-se também já disponível para a realização de ensaios experimentais. Adicionalmente, seria interessante variar o número de cavidades das UAE de forma a ser possível avaliar quais as soluções construtivas ótimas para rentabilizar ao máximo o efeito do PCM.

A energia solar é uma fonte de energia inesgotável. Assim sendo, tudo o que seja direcionado para estudos futuros que aumentem a eficiência dos painéis PV é, na minha opinião, importante e essencial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Energia, “Energia Fotovoltaica (manual sobre tecnologias, projeto e instalação).” [Online]. Available: <https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>.
- [2] IRENA, “Trends in renewable energy (installed capacity).” [Online]. Available: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/index.html?topic=4&subTopic=16>.
- [3] A. Hasan, S. J. McCormack, M. J. Huang, J. Sarwar, and B. Norton, “Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: Materials comparison in different climates,” *Sol. Energy*, vol. 115, 2015.
- [4] T. Ma, H. Yang, Y. Zhang, L. Lu, and X. Wang, “Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, 2015.
- [5] A. Makki, S. Omer, and H. Sabir, “Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, 2015.
- [6] J. Siecker, K. Kusakana, and B. P. Numbi, “A review of solar photovoltaic systems cooling technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, 2017.
- [7] W. Smith, *Principles of Materials Science and Engineering*, 3ed ed. McGraw-Hill, 1999.
- [8] S. Mekhilef, R. Saidur, and M. Kamalisarvestani, “Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, 2012.
- [9] R. solar Technology, “High performance polycrystalline module.” .
- [10] R. Stropnik and U. Stritih, “Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM,” *Renew. Energy*, vol. 97, 2016.
- [11] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2007.
- [12] N. Soares, “Thermal energy storage with phase change materials (PCMs) for the improvement of energy performance of buildings,” 2015.
- [13] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar, and P. Santos, “Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency,” *Energy Build.*, vol. 59, 2013.
- [14] Y. B. Tao, Y. K. Liu, and Y. L. He, “Effects of PCM arrangement and natural convection on charging and discharging performance of shell-and-tube LHS unit,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 115, 2017.
- [15] W.-B. Ye, D.-S. 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, 2012.
- [16] 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, 2010.
- [17] 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, no. 12, 2004.
- [18] A. Machniewicz, D. Knera, and D. Heim, “Effect of Transition Temperature on

- Efficiency of PV/PCM Panels,” *Energy Procedia*, vol. 78, 2015.
- [19] R. T. GmbH, “RT22HC.” 2016.
- [20] O. T. Company, “Omega engineering heat flux sensor calibration report.” 2007.
- [21] F. Nunes, “Desenvolvimento de um sistema de monitorização e aquisição de dados para a avaliação experimental da termorregulação de painéis fotovoltaicos com materiais de mudança de fase - Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciência,” 2018.
- [22] BeOn, “Technical specifications BEON 2.” .
- [23] “Weather Underground,” 2018. [Online]. Available:
<https://www.wunderground.com/weather/pt/coimbra/ICOIMBRA27>.

APÊNDICE - CALIBRAÇÃO

Tabela 0.1. Média da temperatura registada pelos termopares utilizados.

TEMPERATURA DO BANHO		5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C	65°C
TEMPERATURA REGISTADA PELO TERMOPAR (MÉDIA DOS 10 VALORES REGISTADOS)	A1	8,27	10,24	15,22	20,25	25,27	30,19	35,17	40,21	44,97	50,11	55,14	60,20	65,14
	A2	4,00	10,19	15,17	20,18	25,14	30,08	35,11	40,14	44,95	50,07	55,10	60,14	65,08
	A3	7,23	9,94	14,96	20,01	25,07	30,04	35,07	40,15	45,07	50,16	55,22	60,30	65,26
	A4	2,69	9,84	14,81	19,81	24,83	29,75	34,75	39,80	44,74	49,73	54,75	59,79	64,74
	A5	1,00	9,61	14,61	19,66	24,70	29,67	34,71	39,81	44,82	49,81	54,85	59,93	64,90
	A6	6,42	9,90	14,88	19,92	24,95	29,91	34,92	39,99	44,92	49,96	54,98	60,06	65,03
	A7	6,14	10,10	15,07	20,09	25,10	30,03	35,02	40,06	44,90	49,98	54,98	60,03	64,98
	A8	7,30	10,18	15,16	20,18	25,21	30,14	35,12	40,16	44,95	50,07	55,08	60,14	65,08
	B1	5,08	10,32	15,38	20,41	25,46	30,45	35,48	40,54	45,38	50,50	55,60	60,71	65,69
	B2	6,45	10,36	15,36	20,35	25,33	30,28	35,29	40,30	45,15	50,23	55,28	60,34	65,30
	B3	6,15	10,12	15,16	20,20	25,26	30,22	35,27	40,33	45,28	50,35	55,43	60,51	65,50
	B4	3,07	9,96	14,98	20,00	25,04	30,01	35,07	40,12	45,12	50,14	55,21	60,28	65,26
	B5	4,84	9,81	14,82	19,83	24,90	29,86	34,91	39,96	44,94	49,94	55,00	60,10	65,12
	B6	5,09	10,05	15,07	20,10	25,16	30,12	35,17	40,23	45,16	50,21	55,27	60,38	65,37
	B7	4,52	10,20	15,22	20,25	25,31	30,27	35,30	40,35	45,25	50,32	55,39	60,49	65,48
	B8	5,27	10,31	15,35	20,37	25,39	30,38	35,40	40,46	45,28	50,39	55,48	60,59	65,58
	C1	5,32	10,33	15,39	20,41	25,46	30,40	35,43	40,50	45,35	50,49	55,59	60,67	65,66
	C2	5,24	10,32	15,29	20,32	25,38	30,32	35,38	40,44	45,36	50,45	55,53	60,60	65,59
	C3	5,33	10,36	15,26	20,24	25,24	30,14	35,14	40,17	45,06	50,10	55,13	60,16	65,10
	C4	5,11	10,16	15,05	20,03	25,06	29,95	34,97	40,02	44,94	49,96	54,99	60,03	64,98
	C5	4,86	9,90	14,88	19,88	24,95	29,88	34,93	39,99	44,94	49,98	55,05	60,12	65,13
	C6	16,72	8,95	15,17	20,15	25,18	30,08	35,10	40,13	45,03	50,05	55,08	60,14	65,09
	C7	5,21	10,16	15,26	20,28	25,35	30,29	35,33	40,39	45,30	50,37	55,45	60,54	65,52
	C8	5,26	10,24	15,35	20,38	25,45	30,40	35,45	40,52	45,40	50,48	55,59	60,69	65,67
D1	5,22	10,37	15,44	20,45	25,51	30,45	35,46	40,52	45,41	50,51	55,59	60,65	65,61	
D2	5,17	10,29	15,30	20,36	25,42	30,37	35,34	40,46	45,37	50,46	55,55	60,60	65,57	
D3	5,13	10,21	15,21	20,23	25,27	30,22	35,23	40,29	45,21	50,25	55,31	60,35	65,18	
D4	4,98	10,04	15,05	20,06	25,12	30,06	35,09	40,14	45,09	50,12	55,20	60,27	65,23	

Tabela 0.2. Fatores de sensibilidade dos diferentes sensores de fluxo de calor HFS-4 utilizados.

	Fator de sensibilidade (<i>Output at</i> 70F) [$\mu\text{V}/\text{BTU}/\text{ft}^2\cdot\text{Hr}$]	Fator de sensibilidade [(W/m ²) /mV]
HSF ₁	5.5	573.562
HSF ₂	5.9	534.676
HSF ₃	5.8	543.895
HSF ₄	5.9	534.676
HSF ₅	5.9	534.676
HSF ₆	6.1	517.146
HSF ₇	5.8	543.895
HSF ₈	5.8	543.895
HSF ₉	5.9	534.676
HSF ₁₀	5.1	618.547
HSF ₁₁	6.1	517.146