



Sofia Barroca
Monteiro Aleixo
Rocha

**Reformular o futuro energético — protótipo
virtual para análise da armazenagem de calor
latente**



Sofia Barroca
Monteiro Aleixo
Rocha

Reformular o futuro energético — protótipo virtual para análise da armazenagem de calor latente

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Associada com agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Esta dissertação teve o apoio dos projetos

UID/EMS/00481/2019- FCT - FCT -

Fundação para a Ciência e a Tecnologia;

CENTRO-01-0145-FEDER-022083 -

Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional tendo sido realizada no âmbito do Projeto Smart Green Homes

[POCI-01-0247-FEDER-007678], desenvolvido em co-promoção entre a Bosch Termotecnologia S.A. e a Universidade de Aveiro, financiado pelo Portugal 2020, no âmbito do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização, e pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor Associado da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (Aposentado)

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

**Agradecimentos /
Acknowledgements**

Ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Neto, por todo o apoio prestado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À minha coorientadora, a Professora Doutora Mónica Oliveira, por toda a disponibilidade e discussão de ideias que gerou para esta dissertação.

À minha família por nunca terem deixado de acreditar em mim e por sempre me terem apoiado.

Aos meus amigos por terem estado sempre presentes em todas as etapas.

Ao Rui, por ter estado sempre comigo em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis, e por me ter feito sempre acreditar que conseguia ir mais longe.

Palavras-chave

PCM, Método das diferenças finitas, Protótipo virtual, Modelo numérico, Propriedades termofísicas

Resumo

A dependência de energia proveniente de fontes não renováveis é uma crescente preocupação para o ser humano. Neste sentido, o estudo de novos mecanismos e modos de armazenar energia é cada vez mais relevante para que a energia proveniente de fontes renováveis esteja disponível quando necessária. Os materiais de mudança de fase são os mais utilizados para o armazenamento de energia sob a forma de calor latente. Assim, a presente dissertação tem por objetivo desenvolver um protótipo virtual, com o intuito de estudar estes materiais, com recurso ao método das diferenças finitas. Numa primeira fase, foi necessária a validação do método utilizado sendo que, para o efeito, utilizaram-se resultados experimentais de um trabalho prático realizado anteriormente. Uma vez validado o método, deu-se início aos ensaios numéricos onde, primeiramente, se efetuaram estudos com o objetivo de determinar a melhor geometria para o protótipo em estudo. Uma vez determinada a melhor geometria, estudaram-se diferentes caudais mássicos e, seguidamente, com a melhor geometria e melhor caudal mássico, diferentes PCMs. Terminados estes ensaios numéricos avaliaram-se, individualmente, as diferentes propriedades termofísicas do material. Estes estudos permitiram concluir que cada um destes parâmetros (geometria, caudal mássico e PCM) têm grande influência na transferência de calor entre o PCM e o fluido operante. Contudo, a maior influência para essa transferência está assente nas propriedades termofísicas do PCM, principalmente, na sua baixa condutividade térmica.

Keywords

PCM, Finite difference method, Virtual prototype, Numerical model, Thermal-physical properties

Abstract

The dependence on non-renewable energy sources it's a major concern to society. With this problem in mind, the study of new thermal energy storage is vital to assure that the renewable energy is supplied when in demand. Phase change materials are the most used in latent heat energy storage, therefore, the present work, in order to create a numeric model aiming to study this materials, applies the finite difference method. Firstly, the model must be validated and, to achieve this purpose, a comparison with experimental results, obtained from an experience previously made, and the results produce by the model was performed. Once the method was validated, the numerical studies took place. Initially, this studies evaluated the best geometry, after this study took place, the best mass flow rate, in the heat transfer between the PCM and the fluid, was determined using the geometry previously selected. The next step was to study different types of PCM, with the same purpose as before. Once determined the best geometry, mass flow rate and PCM, the evaluation of different thermal-physical properties was made, bearing in mind that each property was evaluated individually. These different studies allowed us to conclude that each parameter (geometry, mass flow rate and PCM) influences the heat transfer behavior between the PCM and the fluid. However, it's the PCM thermal-physical properties that makes the biggest influence, especially, its low thermal conductivity.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Guia de Leitura	3
2	Revisão do Estado da Arte	5
2.1	Armazenamento de energia sob a forma de calor	5
2.2	Materiais de mudança de fase - PCMs	6
2.3	Natureza dos PCMs	6
2.4	Propriedades dos PCMs	7
2.5	Carga e descarga de PCMs	9
2.6	Técnicas para a medição das propriedades termofísicas	9
2.6.1	O uso de calorimetria para caracterização de materiais de mudança de fase	10
2.6.2	O uso de análise térmica diferencial para a caracterização de materiais de mudança de fase	10
2.6.3	Método do fio quente para a caracterização de materiais de mudança de fase	11
2.6.4	Método da sonda plana transiente para a medição de condutividade e difusividade térmica de materiais	11
2.7	Modelos matemáticos e analíticos	12
2.8	Modelos numéricos	12
2.9	Configurações de reservatórios cilíndricos com PCMs	13
2.10	Técnicas para aumento da transferência de calor	14
2.10.1	Aumento da transferência de calor utilizando alhetas	14
2.10.2	Aumento da transferência de calor utilizando múltiplos PCMs	14
2.11	Técnicas para aumento da condutividade térmica do PCM	15
2.11.1	Aumento da condutividade térmica usando materiais porosos	15
2.11.2	Aumento da condutividade térmica usando nanomateriais de elevada condutividade	15
2.11.3	Aumento da condutividade térmica usando materiais de baixa densidade	15
2.12	Aplicações dos materiais de mudança de fase (PCM)	16
2.12.1	Aplicações em edifícios	16
2.12.2	Sistemas solar de aquecimento de água	16
2.12.3	Aplicações em têxteis	17

2.12.4	Aplicações médicas	17
2.13	Permutadores de calor	17
2.14	Síntese da revisão do estado de arte	18
3	Método Numérico	19
3.1	Método das diferenças finitas	19
3.1.1	Formulação explícita e formulação implícita	20
3.1.2	Equações de diferenças finitas	20
4	Modelação Numérica	27
4.1	Desenvolvimento do protótipo virtual	27
4.1.1	Caracterização da malha	27
4.1.2	Convergência	28
4.1.3	Condições iniciais e de fronteira	28
4.2	Funcionamento do protótipo virtual	29
5	Análise Experimental e Validação do Método Numérico	31
5.1	Descrição da experiência realizada	31
5.2	Apresentação do estudo experimental	34
5.2.1	Análise ao Teste 1	34
5.3	Seleção dos dados experimentais para comparação	37
5.4	Análise dos resultados alcançados pelo protótipo virtual face aos resultados experimentais	40
5.4.1	Resultados do protótipo virtual vs Resultados experimentais - Teste 2	40
5.4.2	Resultados do protótipo virtual vs Resultados experimentais - Teste 3	41
5.4.3	Resultados do protótipo virtual vs Resultados experimentais - Teste 6	43
5.5	Síntese	44
6	Caso de Estudo e Análise Paramétrica	45
6.1	Seleção do caso de estudo	45
6.2	Análise paramétrica	48
6.2.1	Estudo da geometria da serpentina	48
6.2.2	Estudo do caudal mássico do fluido operante	53
6.2.3	Estudo para determinar o melhor PCM	57
6.2.4	Estudo de diferentes propriedades termofísicas do PCM	61
6.3	Síntese	70
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	71
7.1	Conclusões	71
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	72
	Referências	75

A	Validação: Análise aos testes experimentais	79
A.1	Análise ao Teste 2	79
A.2	Análise ao Teste 3	81
A.3	Análise ao Teste 4	84
A.4	Análise ao Teste 5	86
A.5	Análise ao Teste 6	88
A.6	Análise ao Teste 7	90
A.7	Análise ao Teste 8	93
A.8	Análise ao Teste 9	95
B	Especificações dos PCMs estudados	99
C	Gráficos das curvas cumulativas de energia para os três estudos	107
C.1	Estudo da geometria da serpentina	107
C.2	Estudo do caudal mássico do fluido operante	110
C.3	Estudo para determinar o melhor PCM	112

Lista de Tabelas

2.1	Vantagens e desvantagens entre materiais orgânicos e inorgânicos.	7
2.2	Propriedades a ter em conta na seleção de um PCM.	8
5.1	Propriedades do PVC utilizado na experiência prática.	32
5.2	Características do PCM utilizado na experiência prática.	33
5.3	Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 1.	34
5.4	Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 1.	36
5.5	Comparação dos parâmetros para os testes que apresentam o caudal mássico mais baixo.	37
5.6	Comparação das temperaturas do PCM nas diferentes secções para os testes que apresentam o caudal mássico mais baixo.	37
5.7	Comparação dos parâmetros para os testes que apresentam o caudal mássico intermédio.	38
5.8	Comparação das temperaturas do PCM nas diferentes secções para os testes que apresentam o caudal mássico intermédio.	39
5.9	Comparação dos parâmetros para os testes que apresentam o caudal mássico maior.	39
5.10	Comparação das temperaturas do PCM nas diferentes secções para os testes que apresentam o caudal mássico maior.	39
6.1	Dimensões da serpentina em cada um dos testes.	48
6.2	Propriedades do PCM PureTemp35.	49
6.3	Resistências térmicas para cada uma das geometrias em estudo.	49
6.4	Energia total e potência média libertada pelo PCM para cada uma das geometrias em estudo.	50
6.5	Energia total e potência média libertada pelo PCM para cada um dos caudais em estudo.	54
6.6	Energia total e potência média libertada pelo PCM, para cada um dos PCMs em estudo.	57
6.7	Comparação das propriedades termofísicas dos PCMs em estudo.	60
6.8	Comparação dos valores da condutividade térmica em cada um dos estudos.	62
A.1	Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 2.	79
A.2	Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 2.	81
A.3	Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 3.	83
A.4	Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 3.	83
A.5	Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 4.	84
A.6	Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 4.	86

A.7	Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 5.	86
A.8	Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 5.	86
A.9	Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 6.	88
A.10	Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 6.	90
A.11	Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 7.	92
A.12	Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 7.	92
A.13	Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 8.	93
A.14	Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 8.	95
A.15	Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 9.	97
A.16	Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 9.	97

Lista de Figuras

1.1	Consumos de energia final por setor na União Europeia.	2
1.2	Consumo médio de uma habitação.	2
2.1	Classificação dos PCMs.	7
2.2	Processos de carga e descarga de um PCM.	9
2.3	Configurações de reservatórios cilíndricos com PCM.	13
3.1	Representação dos modos de transferência de calor presentes no modelo proposto.	20
3.2	Ilustração de diferentes camadas radiais no segmento do tubo.	23
3.3	Representação das trocas de calor entre as várias camadas no segmento do tubo.	23
4.1	Fluxograma do modelo virtual desenvolvido.	29
5.1	Ilustração da experiência desenvolvida por Mendes.	32
5.2	Dimensões do tubo da experiência.	32
5.3	Termograma obtido para o PCM PureTemp 35, através de Calorimetria Diferencial de Varrimento.	33
5.4	Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 1.	35
5.5	Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 1.	35
5.6	Comparação da evolução da velocidade do ar com a velocidade média do ar, Teste 1.	36
5.7	Evolução da temperatura da água à saída do tubo para o modelo e para a experiência, Teste 2.	40
5.8	Evolução da potência instantânea para o modelo e para a experiência, Teste 2.	41
5.9	Evolução da temperatura da água à saída do tubo para o modelo e para a experiência, Teste 3.	42
5.10	Evolução da potência instantânea para o modelo e para a experiência, Teste 3.	42
5.11	Evolução da temperatura da água à saída do tubo para o modelo e para a experiência, Teste 6.	43
5.12	Evolução da potência instantânea para o modelo e para a experiência, Teste 6.	44

6.1	Ilustração do permutador de calor.	46
6.2	Representação da superfície adiabática.	46
6.3	Representação das trocas de calor entre as várias camadas no segmento da serpentina, para um condição fronteira no exterior adiabática.	47
6.4	Temperatura da água à saída da serpentina para cada uma das geometrias em estudo.	51
6.5	Potência instantânea para cada uma das geometrias em estudo.	52
6.6	Temperatura da água à saída da serpentina para cada um dos caudais em estudo.	55
6.7	Potência instantânea para cada um dos caudais em estudo.	56
6.8	Temperatura da água à saída da serpentina para cada um dos PCMs em estudo.	58
6.9	Potência instantânea para cada um dos PCMs em estudo.	59
6.10	Temperatura da água em cada segmento, em diferentes instantes de tempo, para uma temperatura de entrada do fluido de 10 °C.	60
6.11	Temperatura no centro do PCM em cada segmento, em diferentes instantes de tempo, para uma temperatura de entrada do fluido de 10 °C.	61
6.12	Temperatura da água à saída da serpentina para um aumento de 10% em cada um dos valores das propriedades termofísicas.	63
6.13	Potência instantânea para um aumento de 10% em cada um dos valores das propriedades termofísicas.	64
6.14	Temperatura da água à saída da serpentina para um aumento de 35% em cada um dos valores das propriedades termofísicas.	65
6.15	Potência instantânea para um aumento de 35% em cada um dos valores das propriedades termofísicas.	66
6.16	Temperatura da água à saída da serpentina para um aumento da condutividade térmica de 100 vezes.	68
6.17	Potência instantânea para um aumento a condutividade térmica de 100 vezes.	69
A.1	Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 2.	80
A.2	Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 2.	80
A.3	Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 2.	81
A.4	Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 3.	82
A.5	Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 3.	82
A.6	Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 3.	83
A.7	Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 4.	84
A.8	Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 4.	85

A.9	Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 4.	85
A.10	Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 5.	87
A.11	Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 5.	87
A.12	Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 5.	88
A.13	Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 6.	89
A.14	Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 6.	89
A.15	Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 6.	90
A.16	Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 7.	91
A.17	Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 7.	91
A.18	Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 7.	92
A.19	Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 8.	93
A.20	Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 8.	94
A.21	Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 8.	94
A.22	Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 9.	95
A.23	Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 9.	96
A.24	Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 9.	96
B.1	Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 15 °C.	100
B.2	Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 18 °C.	101
B.3	Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 20 °C.	102
B.4	Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 23 °C.	103
B.5	Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 25 °C.	104
B.6	Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 27 °C.	105
C.1	Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 10 °C, em intervalos de 60s, para cada uma das geometrias em estudo.	108
C.2	Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 15 °C, em intervalos de 60s, para cada uma das geometrias em estudo.	109

- C.3 Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 10 °C, em intervalos de 60s, para cada um dos caudais em estudo.110
- C.4 Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 15 °C, em intervalos de 60s, para cada um dos caudais em estudo.111
- C.5 Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 10 °C, em intervalos de 60s, para cada um dos PCMs em estudo. 112
- C.6 Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 15 °C, em intervalos de 60s, para cada um dos PCMs em estudo. 113

Abreviaturas

AQS Água Quente Sanitária

DFAs Diferenças Finitas Aproximadas

DSC Calorimetria Diferencial de Varrimento

EDP Equação de Derivadas Parciais

PCM Material de Mudança de Fase

PCMs Materiais de Mudança de Fase

Grandezas e unidades

L_{PCM}	Calor latente de fusão do PCM	[J/kg]
Re_L	Número de <i>Reynolds</i>	
T_{H_2O}	Temperatura média da água	[°C]
T_1	Temperatura do PCM no nó 1	[°C]
T_1^+	Temperatura do PCM no nó 1, no instante de tempo seguinte	[°C]
T_2	Temperatura do PCM no nó 2	[°C]
T_2^+	Temperatura do PCM no nó 2, no instante de tempo seguinte	[°C]
T_3	Temperatura do PCM no nó 3	[°C]
T_3^+	Temperatura do PCM no nó 3, no instante de tempo seguinte	[°C]
T_4	Temperatura do PCM no nó 4	[°C]
T_4^+	Temperatura do PCM no nó 4, no instante de tempo seguinte	[°C]
T_{ar}	Temperatura do ar	[°C]
$T_{entrada}$	Temperatura da água à entrada do segmento	[°C]
T_{s1}	Temperatura da superfície em contacto com a água	[°C]
T_{s2}	Temperatura da superfície em contacto com o ar	[°C]
T_{saida}	Temperatura da água à saída do segmento	[°C]
U_1	Coefficiente global de transferência de calor, resultante da primeira transformação	[m ² · K/W]
U_2	Coefficiente global de transferência de calor, resultante da segunda transformação	[m ² · K/W]

Δl	Comprimento do segmento do tubo	[m]
Δr	Espessura da camada de PCM	[m]
L	Comprimento do tubo	[m]
R_a	Raio interno do tubo	[m]
R_i	Raio interno do tubo (incluindo a espessura do tubo)	[m]
R_o	Raio externo do tubo (incluindo a espessura do tubo)	[m]
R_p	Raio externo do tubo	[m]
V_{PCM}	Volume do PCM	[m ³]
ρ_{PCM}	Densidade do PCM	[kg/m ³]
$\rho_{l,PCM}$	Densidade do PCM na fase líquida	[kg/m ³]
$\rho_{s,PCM}$	Densidade do PCM na fase sólida	[kg/m ³]
$c_{pl,PCM}$	Calor específico do PCM na fase líquida	[J/(kg · K)]
$c_{ps,PCM}$	Calor específico do PCM na fase sólida	[J/(kg · K)]
h_{H_2O}	Calor transferido por convecção através da água	[W/(m ² · K)]
h_{ar}	Calor transferido por convecção através do ar	[W/(m ² · K)]
k_{H_2O}	Condutividade térmica da água	[W/(m · K)]
k_{tubo}	Condutividade térmica do tubo	[W/(m · K)]
$k_{l,PCM}$	Condutividade térmica do PCM na fase líquida	[W/(m · K)]
$k_{s,PCM}$	Condutividade térmica do PCM na fase sólida	[W/(m · K)]
m_{PCM}	Massa do PCM	[kg]
q_1	Calor resultante da transformação de dois processos de transferência de calor (condução através do PCM e convecção através da água) num só	[W]
q_2	Calor resultante da transformação de dois processos de transferência de calor (condução através do PCM e convecção através do ar) num só	[W]
$q_{2,1}$	Calor transferido por condução do nó 2 para o nó 1	[W]
$q_{3,2}$	Calor transferido por condução do nó 3 para o nó 2	[W]
$q_{3,4}$	Calor transferido por condução do nó 3 para o nó 4	[W]
$q_{cond,tubo}$	Calor transferido por condução através do tubo	[W]
$q_{condv,ar}$	Calor transferido por convecção através do ar	[W]
q_{conv,H_2O}	Calor transferido por convecção através da água	[W]

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Atualmente, a produção de energia a partir de fontes não renováveis tem-se revelado uma das maiores fontes de libertação de gases poluentes, sendo que na Europa a quota do mercado chega a cerca de 80% da energia utilizada. No sentido de reformular o futuro energético e procurar alcançar um mundo mais sustentável, têm-se realizado esforços para reduzir estes consumos com o intuito de diminuir a libertação destes gases prejudiciais. Esta preocupação deu lugar a “metas para o desenvolvimento sustentável” para os anos de 2020, 2030 e 2050 [1–3], pretendendo-se em 2050 alcançar a neutralidade carbónica, ou seja, pretende-se que a percentagem de emissão de gases com efeito de estufa seja zero. Para isto, é necessário que grande parte da energia utilizada provenha de fontes renováveis. Contudo, estes tipos de energias apresentam algumas desvantagens, nomeadamente a sua intermitência sazonal, querendo isto dizer que esta energia é inconstante, não só ao longo do ano, mas também ao longo do dia. Isto cria uma necessidade de armazenar parte da energia obtida através de fontes renováveis, de forma a que esteja disponível quando necessária. Os materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials*- PCMs), devido ao seu preço, segurança e flexibilidade, apresentam-se como uma solução para proporcionar um aumento da capacidade de armazenamento de energia renovável.

Estes materiais têm aplicações nos mais diversos setores e podem, em todos estes casos, conduzir a uma redução do consumo energético. Por este motivo, numa primeira fase, procura-se avaliar os consumos energéticos em diferentes setores, com o intuito de averiguar em qual destes a aplicação de PCMs poderia ser mais significativa, conduzindo a uma redução do consumo energético.

Consumos energéticos a nível europeu

Tal como já referido, o estudo de PCMs poderá contribuir para uma redução significativa do consumo energético a nível mundial. Neste âmbito, devem ser analisados os consumos energéticos de cada setor, com o objetivo de avaliar os maiores consumidores de energia, e verificar em quais destes as aplicações de PCMs poderão contribuir para reduções de consumos mais significativas. Para isto, averiguou-se o consumo final de cada setor e, observando a Figura 1.1, destacam-se os setores dos transportes e doméstico.

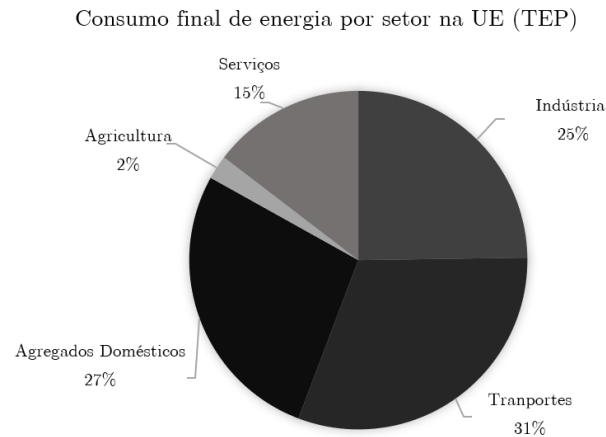


Figura 1.1: Consumos de energia final por setor na União Europeia [4].

Relativamente ao setor doméstico, são inúmeras as aplicações já conhecidas e estudadas onde o uso de PCMs contribuiu para uma redução no consumo. No entanto, no sentido de atingir um mundo mais sustentável e tendo por objetivo encontrar uma solução do que poderá ter mais impacto no consumo energético no setor doméstico, devem ser analisadas as várias vertentes que contribuem para este efeito. Assim, analisando a Figura 1.2, onde estão representados os diferentes consumos no setor doméstico, destaca-se o consumo de energia para a produção de Água Quente Sanitária (AQS).

Apesar do consumo de energia para a produção de AQS não ser o maior, é, no entanto, muito significativo, tendo em consideração que este representa 17% do consumo total, sendo este apenas para aquecimento de água. Por este motivo, é necessário estudar estes sistemas e avaliar de que forma os PCMs podem ser neles incorporados.

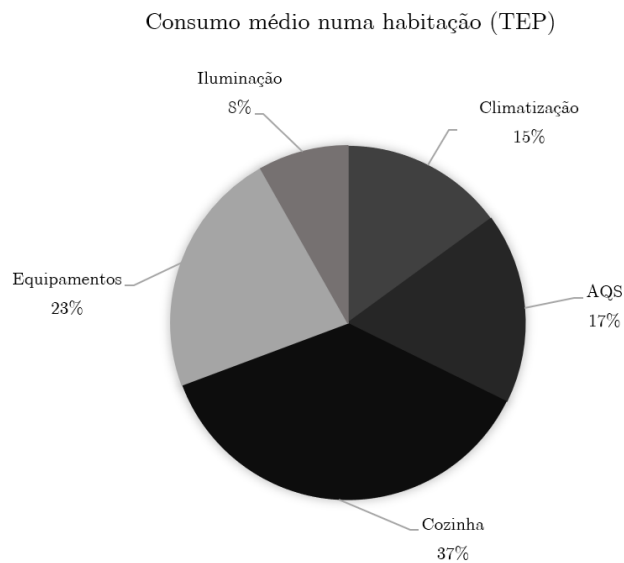


Figura 1.2: Consumo médio de uma habitação [5].

1.2 Objetivos

Este trabalho é desenvolvido no âmbito do projeto *Smart Green Homes - SGH*, uma parceria entre a Bosch e a Universidade de Aveiro, no qual se pretende desenvolver um protótipo virtual de armazenamento de energia térmica recorrendo a PCMs.

O projeto de sistemas de armazenamento de água quente sanitária, por recurso a materiais de mudança de fase, PCMs, não é desprovido de desafios. O dimensionamento destes sistemas, por forma a tirar partido daquilo que são as propriedades intrínsecas dos materiais de mudança de fase, exige uma correta modelação dos principais fenómenos térmicos e hidrodinâmicos envolvidos. Assim, este trabalho tem por principal objetivo desenvolver um protótipo virtual representativo desses mesmos fenómenos, de modo a permitir um estudo paramétrico detalhado acerca da influência relativa das diferentes variáveis inerentes ao sistema, na eficiência global do mesmo.

Para o efeito pretende-se, pois, postular e desenvolver um modelo numérico representativo do problema em análise e proceder à validação do mesmo por recurso a dados experimentais. Posteriormente, pretende-se levar a efeito uma análise paramétrica, no sentido de estabelecer relações que auxiliem a conceção, projeto e análise de sistemas de armazenamento de água quente sanitária onde se utilizem PCMs.

1.3 Guia de Leitura

Num trabalho de investigação deve-se, numa primeira fase, realizar uma procura de trabalhos já existentes, que incidam no tema de estudo da dissertação. Este estudo permite o alcance de um conhecimento mais vasto do tema. Assim, após a contextualização do tema desta dissertação e da apresentação dos objetivos da mesma, realiza-se uma pesquisa bibliográfica.

Esta pesquisa é apresentada no capítulo seguinte onde se procura averiguar a natureza de diferentes PCMs e as diferenças entre cada uma, quais as principais propriedades que devem estar presentes nos PCMs, bem como os métodos para as alcançar. Procura-se também apurar métodos que possam conduzir a uma melhoria no desempenho térmico e de armazenamento de calor. Por fim, estudaram-se métodos matemáticos, analíticos e numéricos desenvolvidos por outros autores. Uma vez que o protótipo a ser desenvolvido neste trabalho é um protótipo virtual, este último ponto é de elevada importância, pois permite determinar fatores que devem ser considerados e outros que talvez possam ser desprezados.

Após essa procura, é descrito no Capítulo 3 o método numérico selecionado. De seguida, e após a modelação do método, o modelo é aplicado a um trabalho prático, permitindo validar o modelo desenvolvido. Posteriormente, este modelo (protótipo virtual) é aplicado a um caso de estudo, o qual permite atingir os objetivos delineados nesta dissertação.

Capítulo 2

Revisão do Estado da Arte

Os materiais de mudança de fase possuem uma grande capacidade de armazenamento de energia num volume reduzido. Esta característica faz com que o estudo sobre estes materiais tenha sofrido um aumento significativo ao longo dos anos. Neste âmbito, é apresentado, em seguida, o trabalho de diversos investigadores que estudam este tema e que também procuram soluções, no sentido de melhorar o desempenho destes materiais, quando em serviço.

2.1 Armazenamento de energia sob a forma de calor

O armazenamento de energia sob a forma de calor é uma das principais formas de armazenamento de energia renovável. Este tipo de armazenamento de energia é fulcral no que diz respeito à ligação entre fornecimento de energia e a sua necessidade. Para além disto, o armazenamento de energia sob a forma de calor promove uma melhor *performance* e rentabilidade dos sistemas de armazenamento. O armazenamento de energia sob a forma de calor está classificado em três tipos - armazenamento sob a forma de calor sensível, sob a forma de calor latente e armazenamento termoquímico.

Relativamente ao armazenamento de energia sob a forma de calor sensível, este é realizado com o aumento da temperatura do material onde a energia será armazenada, sem que este mude de fase. Com isto, conclui-se que a quantidade de calor que é possível armazenar depende do calor específico do material [6].

Quanto ao armazenamento de energia sob a forma de calor latente, contrariamente ao anterior, envolve a mudança de fase do material. Esta mudança pode ser sólida-líquida, sólida-sólida ou líquida-gasosa e vice-versa. A mudança líquida-gasosa ou gasosa-líquida requer uma grande quantidade de substância, enquanto que a mudança sólida-sólida está associada a uma baixa fração de armazenamento de energia por volume de substância. Assim, a mudança sólida-líquida é a mais eficiente, comparada com as restantes formas de mudança de fase [6].

No que diz respeito ao armazenamento termoquímico, este consiste na reversibilidade do fenómeno físico-químico, ou seja, retira-se proveito da reversibilidade química das reações. Neste caso, a energia fornecida poderá sê-lo de diversas formas, elétrica, térmica, ou até mesmo radiação eletromagnética [7].

Deste modo, tendo em conta os três modos de armazenamento de energia sob a forma de calor, conclui-se que o armazenamento sob a forma de calor latente é o mais promissor e atrativo devido à sua capacidade de armazenar energia a uma temperatura constante, onde são usados materiais denominados materiais de mudança de fase [6], sendo este o modo de armazenamento abordado ao longo deste trabalho.

2.2 Materiais de mudança de fase - PCMs

Os Materiais de Mudança de Fase (PCMs) são caracterizados por possuírem um elevado calor latente, o que lhes possibilita a capacidade de absorver e libertar calor durante os seus ciclos de mudança de fase.

Dependendo da aplicação a que se destinam, os PCMs devem ser selecionados tendo por base as suas propriedades termofísicas, a sua temperatura de fusão/solidificação e também a sua natureza - orgânica, inorgânica ou eutética.

O processo de transferência de calor inicialmente ocorre como todos os outros, onde se verifica um aumento na temperatura do material. Porém, quando é alcançada a temperatura de fusão, para o caso de mudança sólida para líquida, o material absorve o calor a uma temperatura constante, o que é ótimo pois a diferença de temperatura entre a fonte quente e o PCM mantém-se constante, facilitando assim a troca de calor, comparativamente a um material que vai aquecendo progressivamente. Os PCMs têm a capacidade de armazenar entre 5 a 14 vezes mais energia por unidade de volume do que o armazenamento sob a forma de calor sensível [8].

2.3 Natureza dos PCMs

Os materiais de mudança de fase são normalmente divididos em orgânicos, inorgânicos e eutéticos (Figura 2.1). Os orgânicos são usualmente associados a parafinas e alcanos, os inorgânicos incluem sais (hidrato de sal) e metais e os eutéticos são uma mistura de diferentes PCMs, podendo assim ser orgânico-orgânico, inorgânico-inorgânico ou orgânico-inorgânico.

Uma vez que os PCMs eutéticos são uma mistura de diferentes PCMs, as suas vantagens e desvantagens estão associadas à natureza dos PCMs que são misturados. Consoante a natureza do PCM, estes apresentam vantagens e desvantagens, tal como Tabela 2.1 ilustra. Na realidade, os PCMs de natureza inorgânica têm a capacidade de duplicar o armazenamento de energia por unidade de volume quando comparados com PCMs de natureza orgânica. No entanto, os metais são bastante corrosivos e os hidratos de sal podem apresentar falta de estabilidade térmica durante a mudança de fase e subarrefecimento afetando a sua capacidade de armazenar energia. Todavia, estas desvantagens não se verificam quando o metal é alumínio, constituindo-se, por isso, um forte candidato a aplicações de elevadas temperaturas [9].

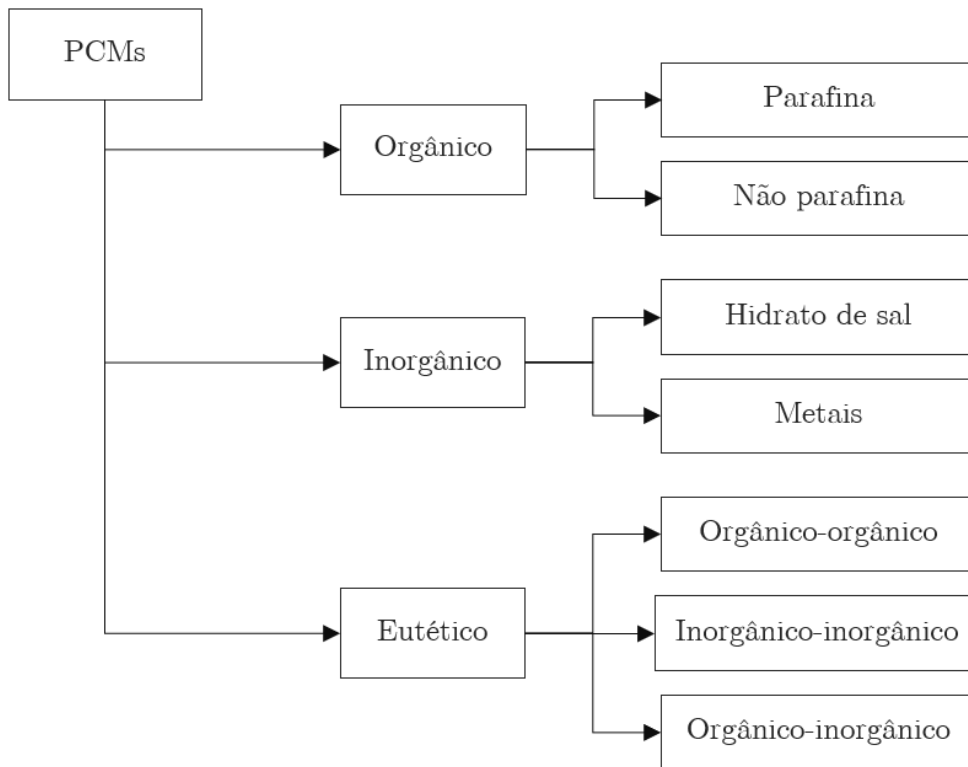


Figura 2.1: Classificação dos PCMs, adaptado de [9].

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens entre materiais orgânicos e inorgânicos [9].

	Orgânico	Inorgânico
Vantagens	Não Corrosivos Não apresenta subarrefecimento Estabilidade química e térmica	Boa entalpia na mudança de fase
Desvantagens	Baixa entalpia na mudança de fase Baixa condutividade térmica Inflamável	Falta de estabilidade térmica na mudança de fase Corrosivo Apresenta subarrefecimento

2.4 Propriedades dos PCMs

Um vasto número de PCMs é conhecido e existem também vastas gamas de pontos de fusão e solidificação. No entanto, consoante a aplicação a que se destina o material, estes devem possuir certas características, térmicas, físicas, químicas, económicas e cinéticas.

Dentro das características térmicas, com o objetivo de minimizar a quantidade necessária do material, o calor latente do Material de Mudança de Fase (PCM) selecionado deve ser o mais alto possível. Deve também ter-se em conta a condutividade térmica, uma vez que esta auxilia a carga e descarga de energia. Para além disto, deve também ser tida em consideração a temperatura de mudança de fase do PCM [6].

Relativamente às propriedades físicas, e com o intuito de alcançar um melhor controlo, o equilíbrio da mudança de fase é um fator a ter em conta na seleção do PCM, bem como uma baixa pressão de vapor e uma baixa variação de volume na mudança de fase. Com o objetivo de reduzir o tamanho do equipamento, deve procurar-se também um PCM que apresente uma alta densidade [6].

No que concerne às propriedades cinéticas, deve ter-se em consideração o efeito indesejável de sobrearrefecimento, uma vez que o mesmo interfere com a taxa de remoção de calor [6]. Efetivamente, o sobrearrefecimento existe quando um líquido não solidifica ou cristaliza, sendo a sua temperatura inferior à de solidificação [10].

Quanto às características químicas, os PCMs, para além de não poderem ser tóxicos, inflamáveis e explosivos, devem ser compatíveis com os materiais que compõem o equipamento [6].

Estas propriedades encontram-se, juntamente com as económicas, resumidas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Propriedades a ter em conta na seleção de um PCM [6].

Propriedades Térmicas	Propriedades Físicas	Propriedades Cinéticas	Propriedades Químicas	Propriedades Económicas
Temperatura de mudança de fase	Alta densidade	Não apresentar sobrearrefecimento	Compatível com os materiais do equipamento	Abundante
Elevado calor latente	Mudança de fase ocorrer a baixa pressão	Fração de cristalização	Não ser tóxico	Disponível
Boa condutividade térmica	Pequena alteração do volume após a mudança de fase		Não ser inflamável	Bom custo

Importância das propriedades termofísicas

Tendo em conta as propriedades apresentadas na secção 2.4, deve salientar-se a importância das propriedades termofísicas, pois estas são as mais relevantes na seleção do PCM. Efetivamente, com o objetivo de diminuir o volume necessário para o seu armazenamento, o PCM deve apresentar um elevado calor latente de fusão/solidificação por unidade de volume; a sua temperatura de mudança de fase deve estar de acordo com a temperatura de operação do sistema em questão. Por último, e para que os ciclos de carga e descarga sejam mais rápidos, o PCM deve também apresentar uma elevada difusividade térmica em ambas as fases.

2.5 Carga e descarga de PCMs

Os PCMs armazenam energia durante o estado de fusão e libertam energia durante a sua solidificação, sendo que estes processos são conhecidos por carga e descarga de PCM, respetivamente.

Durante o processo de carga, o PCM começa por aquecer até que a sua temperatura de fusão seja atingida. Nesse momento, a temperatura mantém-se constante até todo o material sofrer o processo de mudança de fase [11]. Isto é possível devido à transferência de calor de um fluido quente para o PCM. Vários investigadores defendem que inicialmente o processo de transferência de calor é controlado pela condução e, após uma quantidade suficiente de PCM ter sofrido o processo de mudança de fase, a transferência de calor passa a ser controlada pela convecção natural [12].

Quanto ao processo de descarga, este ocorre de modo contrário ao processo descrito anteriormente. Neste caso é o PCM a transferir calor para um fluido frio, sofrendo assim um arrefecimento, o que conduz à sua solidificação [11]. O principal mecanismo de transferência de calor durante todo este processo é a condução [13].

Os processos de carga e descarga estão representados na Figura 2.2, respetivamente. Neste caso, esquematiza-se o armazenamento de energia, sob a forma de água quente, num reservatório cilíndrico, note-se que R_i corresponde ao raio interno do reservatório, R_e ao raio exterior e r à interface entre a camada sólida e líquida do PCM.

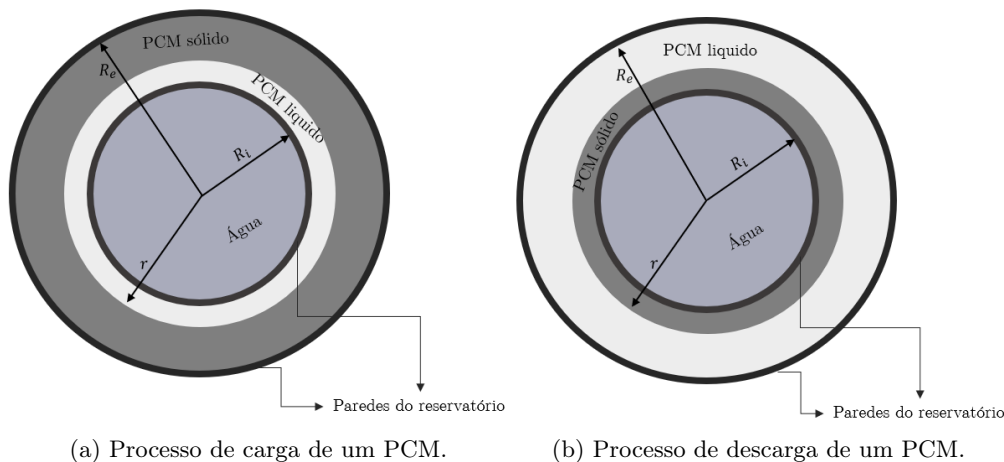


Figura 2.2: Processos de carga e descarga de um PCM.

2.6 Técnicas para a medição das propriedades termofísicas

De acordo com o enunciado na secção 2.4, certas condições devem estar presentes no PCM selecionado tendo em conta a aplicação a que este se destina. Assim, é necessário a utilização de técnicas de caracterização que permitam aferir as propriedades do material. Estas técnicas subdividem-se em métodos de análise térmica, métodos de calorimetria e métodos de contacto transiente [14, 15]. A escolha da técnica que deve ser utilizada depende dos resultados finais alcançados, da precisão dos resultados, do tamanho da amostra em estudo, entre outros.

2.6.1 O uso de calorimetria para caracterização de materiais de mudança de fase

Tal com referido no ponto anterior, a técnica de calorimetria é utilizada para a caracterização dos PCMs. O seu princípio de funcionamento consiste em manter à mesma temperatura dois corpos, a amostra em estudo e uma amostra referência. Caso ocorra algum fenómeno térmico na amostra em estudo, este é detetado, corrigido e registado, obtendo-se um termograma [16].

São várias as técnicas de calorimetria existentes, destacando-se a calorimetria diferencial de varrimento - *DSC* (*differential scanning calorimetry*), a qual será abordada no ponto seguinte.

Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC)

A técnica DSC é uma das mais utilizadas no que diz respeito à análise termofísica de PCMs e tem por base o princípio de funcionamento da calorimetria explicado anteriormente. Foi desenvolvida por Watson *et al.* [17] e a sua inclusão comercial foi realizada na Conferência de Pittsburgh sobre Química Analítica e espectroscopia aplicada. Esta técnica permite alcançar diversas propriedades tais como a temperatura e entalpia de fusão e solidificação da amostra em estudo, bem como o seu calor específico [14, 18].

Apesar de ser muito utilizada, apresenta algumas limitações. Na realidade, a massa da amostra em estudo influencia os resultados finais, deve apresentar dimensões reduzidas e as propriedades da amostra de referência devem estar bem definidas [14, 18].

2.6.2 O uso de análise térmica diferencial para a caracterização de materiais de mudança de fase

Para além das técnicas de calorimetria, o método de análise térmica, e em particular, a análise térmica diferencial também é usada na caracterização de materiais de mudança de fase. Esta técnica consiste na utilização de um banho térmico cuja temperatura deve ser superior à temperatura de fusão do PCM ou PCMs em estudo. Neste banho térmico são colocados vários tubos que têm as amostras em estudo, bem como a amostra de referência, que é usualmente água devido ao vasto conhecimento das suas propriedades termofísicas. Tendo então os tubos no banho térmico, este é sujeito a uma mudança súbita de temperatura, após a qual se dá início ao processo de arrefecimento. As curvas são então obtidas, resultando num gráfico de temperatura em função do tempo. As propriedades do PCM são determinadas quando a sua curva é comparada com a curva de referência. Esta técnica foi inicialmente desenvolvida por Yinping *et al.* [19] como método alternativo à técnica *DSC*. Posteriormente, inúmeros investigadores dedicaram-se ao seu estudo desenvolvendo métodos experimentais e matemáticos nela baseados [14].

A aplicação da análise térmica diferencial permite a determinação de várias propriedades das quais se podem citar o calor específico, a entalpia, tanto para a fase líquida como para a sólida e a condutividade térmica [14].

2.6.3 Método do fio quente para a caracterização de materiais de mudança de fase

Em acréscimo aos métodos descritos anteriormente, existem também os métodos de contacto transiente, onde o método do fio quente se insere. Este método é, por norma, utilizado para determinar a condutividade térmica de uma amostra em estudo e foi comprovado que permite alcançar resultados corretos para vários materiais: gasosos, líquidos, sólidos e também nanofluidos. Esta técnica consiste no aquecimento de uma amostra devido à passagem de corrente por um fio isolado (fio quente). É então obtido o gráfico T vs $\ln(t)$ que, através da Equação 2.1 [18], permite obter o valor da condutividade térmica. No entanto, caso a amostra sofra um processo de mudança de fase, este modelo não poderá ser aplicado pois o calor absorvido por esta corresponde não só ao calor sensível como também a calor latente. Assim, o processo de transferência de calor é descrito pela Equação 2.2, adaptada de [20].

$$k = \left(\frac{V \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot L} \right) / dT / [d(\ln(t))] \quad (2.1)$$

Onde:

k - condutividade térmica do PCM

V - voltagem

I - corrente

L - comprimento do fio

T - temperatura do fio

t - tempo

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.2)$$

Onde:

ρ - densidade do PCM

c_p - calor específico do PCM

k - condutividade térmica do PCM

2.6.4 Método da sonda plana transiente para a medição de condutividade e difusividade térmica de materiais

Um outro método de contacto transiente é o método da sonda plana transiente. Este método permite a realização de ensaios segundo a norma ISO 22007-2 (2008): Plastics–Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity–Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method. Este é capaz de testar diferentes tipos de materiais: homogêneos, isotrópicos e também anisotrópicos com uma estrutura uniaxial. De um modo geral, este método é adequado para ser aplicado a materiais com uma condutividade térmica entre $0,01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ e $500 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ e valores de difusividade térmica entre $5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ e $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ [21, 22].

O princípio de funcionamento deste método ocorre pela colocação de uma sonda de disco quente num dado material. Um fluxo de calor gradual, produzido por uma corrente

elétrica, percorre a sonda com o objetivo de gerar um campo de temperatura dinâmico no interior da amostra. O aumento de temperatura na sonda é medido em função do tempo, ou seja, esta funciona como um sensor de temperatura presente na fonte. A resposta é então analisada de acordo com o modelo desenvolvido para aquela sonda e para as condições de contorno assumidas [22].

2.7 Modelos matemáticos e analíticos

O estudo e aplicação de modelos matemáticos é vastamente abordado por investigadores na literatura. Estes modelos dividem-se em duas análises distintas, uma análise baseada na primeira lei da termodinâmica e uma análise baseada na segunda lei da termodinâmica.

Grande parte dos autores recorrem à primeira lei para a idealização dos seus modelos e estes foram verificados através de análises experimentais e/ou numéricas. Contudo, os modelos são por norma desenvolvidos para um sistema em concreto e muitos deste são unidimensionais. Para além disso, a maioria dos modelos desenvolvidos na literatura contemplam apenas a condução como meio de transferência de calor do PCM, desprezando a convecção quando este se encontra no estado líquido [23].

Relativamente à implementação da segunda lei, Verma *et al.* [24] refere que o uso de uma análise exérgica é bastante importante para uma melhor compreensão do comportamento termodinâmico de sistemas de armazenamento de energia térmica. No entanto, os modelos que têm por base este método não foram validados, o que de algum modo compromete a sua fiabilidade. Assim, para que possam ser retiradas conclusões sobre modelos matemáticos que tenham por base o uso da segunda lei será necessário a realização de testes que comprovem os resultados obtidos.

2.8 Modelos numéricos

A aplicação de modelos numéricos permite uma análise mais detalhada e realista de problemas reais do que os modelos analíticos e, além disso, para muitas geometrias e também, para determinadas condições fronteiras a implementação de soluções analíticas não é ainda viável [25]. Existem modelos numéricos comerciais e métodos numéricos que, quando modelados, podem ser implementados para simular o desempenho de um sistema de armazenamento que utiliza PCM.

Os modelos numéricos comerciais são capazes de simular a transferência de calor de um PCM em diversas geometrias e a sua principal vantagem é que apenas requerem um conhecimento básico sobre métodos numéricos para transferência de calor. Contudo, estes *softwares* (modelos numéricos comerciais, como por exemplo *Ansys*) apresentam desvantagens significativas tais como, ser difícil para o utilizador compreender o que o *software* está a fazer. Por norma o utilizador não adquire um conhecimento mais profundo ao usar estas ferramentas e por vezes a precisão dos resultados é sobrevalorizada por causa dos gráficos que resultam da simulação [26].

Os métodos numéricos apenas necessitam que o problema seja definido por equações diferenciais, sendo a resolução destas posteriormente realizada computacionalmente. A grande vantagem da aplicação destes métodos é que permitem o desenvolvimento de um modelo único para cada problema, bem como a análise e a visualização do que está a ocorrer a cada instante.

Estão descritos na literatura diversos modelos desenvolvidos para aplicações específicas. Mehling *et al.* [27] implementou um método numérico para simular o armazenamento de calor de um reservatório de água quente com um módulo de PCM no topo. O método implementado foi o das diferenças finitas explícito e os efeitos térmicos tidos em conta no modelo foram a condução de calor de uma camada de água para a seguinte, a perda de calor da água para o meio, a transferência de calor do PCM para a água e a perda de calor do PCM. Este modelo numérico foi comprovado experimentalmente. Apesar de o autor não ter calculado os erros associados aos resultados obtidos pelo modelo face aos resultados experimentais, é possível observar, nos gráficos ilustrados, que a diferença de temperaturas alcançadas pelo modelo face ao alcançado pela experiência prática varia entre 3 °C a 5 °C. Lo Brano *et al.* [28] estudou a incorporação de PCM em painéis fotovoltaicos. Para compreender como é que o PCM assegura uma regulação térmica nesses sistemas é necessário avaliar o processo de transferência de calor em detalhe e para diferentes camadas de PCM. Para este efeito, os autores aplicaram o método das diferenças finitas explícito. O modelo desenvolvido foi validado por comparação dos resultados produzidos pelo modelo com os resultados recolhidos experimentalmente. Neste estudo, o autor procedeu ao cálculo dos erros relativos e estes variam entre 4,92% e 8,37%.

2.9 Configurações de reservatórios cilíndricos com PCMs

Existem inúmeras configurações de reservatórios cilíndricos de PCMs. No entanto, dentro destas, destacam-se três configurações: o PCM encerrado na casca do reservatório e o fluido de transferência de calor escorre no seu interior; o PCM encontra-se dentro do tubo e o fluido de transferência de calor corre paralelamente; por último, trata-se da junção destes dois modos onde o PCM encontra-se tanto na casca como em tubo e o fluido de transferência de calor corre entre ambos [12]. Na Figura 2.3 é possível observar cada uma das configurações descritas.

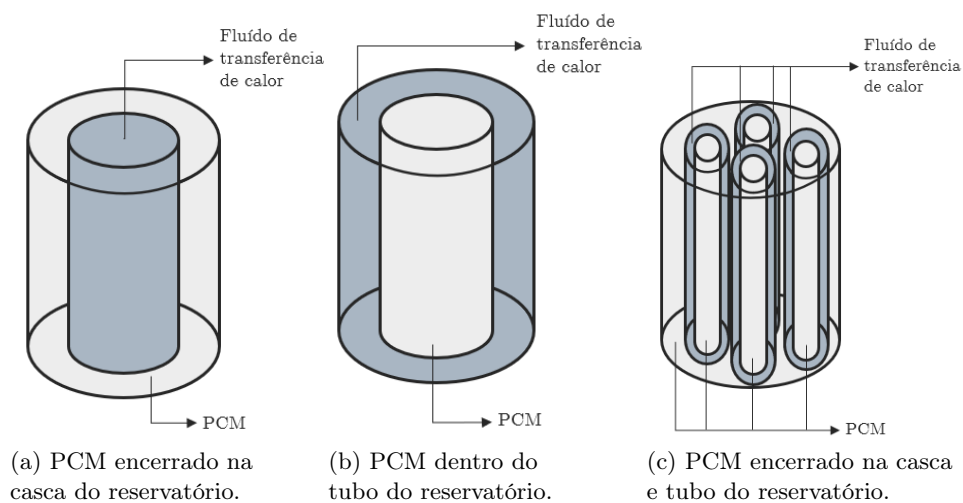


Figura 2.3: Configurações de reservatórios cilíndricos com PCM, adaptado de [12].

2.10 Técnicas para aumento da transferência de calor

Uma vez que a maioria das classes dos PCMs apresentam uma condutividade térmica reduzida, o que conduz a uma baixa transferência de calor, tornou-se necessário investigar formas de melhorar a taxa de transferência de calor associada a estes sistemas. De seguida, apresentam-se alguns métodos que têm vindo a ser propostos.

2.10.1 Aumento da transferência de calor utilizando alhetas

As alhetas são usualmente utilizadas com o intuito de aumentar a área de transferência de calor entre o PCM e o fluido de transferência de calor, o que conduz a um aumento da potência.

Existem inúmeros estudos relacionados com o uso de alhetas associados ao aumento de transferência de calor [6]. Destes, realçam-se dois tipos distintos de sistemas: os que armazenam calor proveniente de um fluido e os que armazenam calor através de uma parede. Nos sistemas que armazenam calor proveniente de uma parede, as alhetas estão por norma localizadas dentro do PCM, enquanto que nos sistemas que armazenam energia originada por um fluido, as alhetas estão alocadas ao ponto que apresenta a menor condutividade térmica.

Uma multiplicidade de autores estudaram o uso de alhetas com o objetivo de aumentar a transferência de calor, dentro destes, destacam-se o estudo Sparrow *et al.* [29] e o estudo Stritih [30]. O estudo de Sparrow *et al.* [29], consiste na solidificação de um PCM num tubo alhetado através do controlo por condução e convecção natural. Os autores concluíram que a condução era o fator de controlo até o fluido atingir a sua temperatura de fusão. A partir desse momento, o fator de controlo passava a ser a convecção natural. Stritih [30] realizou um estudo comparativo entre sistemas de armazenamento de calor latente com e sem alhetas usando a parafina como PCM, tanto em processos de solidificação como para a fusão. Concluiu que a convecção natural é um fator dominante durante a fase de fusão e que a presença de alhetas não influencia o processo. Quanto à fase de solidificação, a condução é o fator dominante e a presença de alhetas reduz em cerca de 40% o tempo do processo.

Para além destes estudos, muitos outros foram realizados. A partir destes, [31–35], concluiu-se que o uso de alhetas melhora a transferência de calor durante a mudança de fase do PCM, independentemente da geometria do sistema. Acresce ainda referir que outros estudos demonstram que o tempo de solidificação e de fusão pode ser melhorado através de alhetas, sendo que a sua aplicação em nada afeta o fluxo do fluido de transferência de calor [6].

2.10.2 Aumento da transferência de calor utilizando múltiplos PCMs

O uso de múltiplos PCMs na transferência de energia sob a forma de calor latente tem como propósito manter uma diferença de temperatura constante entre o PCM e o fluido de transferência de calor, tanto na fase de carga como na de descarga do PCM [6].

É usual nos sistemas de armazenamento de energia sob a forma de calor latente, que os PCMs sejam organizados de acordo com a sua temperatura de fusão/solidificação de um modo decrescente. Isto conduziria idealmente a um fluxo de temperatura constante do PCM para o fluido de transferência de calor.

Vários autores investigaram a temática, destacando-se o estudo numérico realizado por Fang & Chen [36]. Os autores relatam a importância da diferença de temperaturas dos PCMs selecionados, afirmando mesmo ser este um ponto crucial para um aumento da transferência de energia sob a forma de calor latente.

2.11 Técnicas para aumento da condutividade térmica do PCM

O aumento da condutividade térmica dos PCMs é outra opção que conduz a um aumento da transferência de energia sob a forma de calor latente. Normalmente, a condutividade térmica de um PCM pode ser melhorada através de materiais porosos de elevada condutividade térmica, de dispersão de materiais de elevada condutividade (por exemplo, nanomateriais) ou de dispersão de materiais de baixa densidade na matriz do PCM [6]. Cada uma destas técnicas será abordada nos pontos seguintes.

2.11.1 Aumento da condutividade térmica usando materiais porosos

Esta técnica tem sido alvo de uma crescente investigação devido à elevada condutividade dos materiais porosos quando comparados com a condutividade térmica do PCM puro.

Grande parte dos estudos realizados por esta envolvem parafina, um PCM orgânico que apresenta uma reduzida condutividade térmica, tal como referido na secção 2.3. Deste modo, procura-se então aumentar a sua condutividade térmica. Com isto em mente, muitos estudos referem também o uso de alumínio e grafite expandida como aditivos. Esta escolha pode ser justificada devido à baixa densidade que estes materiais apresentam, aliada à sua elevada condutividade térmica (quando comparada com outros aditivos). Deve salientar-se que no uso desta técnica a fração de massa/volume dos meios porosos é um fator que deve ser tomado em consideração, uma vez que pode diminuir a capacidade de armazenamento de calor [6].

2.11.2 Aumento da condutividade térmica usando nanomateriais de elevada condutividade

Os nanomateriais incorporados em PCMs convencionais atingem uma melhor condutividade térmica quando comparados com os materiais usados normalmente.

É de notar que a maioria dos estudos realizados sobre esta técnica são experimentais, dentro dos quais se destacam os de Zhang *et al.* [37] e de Fan *et al.* [38]. O primeiro concluiu que a condutividade térmica do compósito aumenta com o aumento da fração de massa de nanomaterial aplicado. O segundo concluiu que a condutividade térmica do compósito depende fortemente da estrutura do nanomaterial usado como aditivo.

2.11.3 Aumento da condutividade térmica usando materiais de baixa densidade

Os metais, apesar da sua elevada condutividade térmica, apresentam alguns problemas principalmente devido à sua elevada densidade que aumenta a probabilidade de sedimentação do aditivo durante os ciclos de carga/descarga causando, também, uma degradação muito rápida do compósito. Para além disto, alguns metais não são compatíveis com os

PCMs. Estas desvantagens levaram a que os investigadores procurassem outras alternativas, como por exemplo materiais de baixa densidade. Destes destacam-se as fibras de carbono devido à sua baixa densidade, à sua elevada condutividade térmica (bastante próxima do alumínio e cobre) e à sua elevada resistência à corrosão. Salienta-se ainda a sua compatibilidade com grande parte dos PCMs [6].

Ainda da revisão bibliográfica realizada por Ibrahim *et al.* [6] conclui-se que a taxa de mudança de fase, tanto de solidificação como de fusão é beneficiada pela adição de materiais porosos de elevada condutibilidade e de baixa densidade. Todavia, deve ter-se em atenção a fração de massa/volume do aditivo, uma vez que esta, se mal estimada, poderá conduzir a uma redução da capacidade de armazenamento de energia do PCM.

2.12 Aplicações dos materiais de mudança de fase (PCM)

Devido à enorme pesquisa sobre os materiais de mudança de fase, descobriu-se que a gama de pontos de fusão e solidificação é bastante vasta. Assim, com o desenvolvimento desta tecnologia e com o conhecimento cada vez maior adquirido acerca deste tema, as aplicações dos PCMs estão em crescimento, não só na indústria como também no setor doméstico.

Algumas das aplicações mais conhecidas encontram-se descritas nas subsecções seguintes.

2.12.1 Aplicações em edifícios

A construção de edifícios apresenta problemas relacionados com a escolha de materiais devido à diferença de temperaturas que se verifica ao longo do dia, porque esta diferença de temperaturas cria uma sensação de desconforto no interior do edifício. Os materiais de mudança de fase são uma solução para este problema [39].

Na verdade, quando o PCM é incorporado com o objetivo de aproveitar a energia solar para aquecimento e o ar fresco que se verifica à noite para arrefecimento, resulta num aumento do conforto humano. Isto é possível pois o PCM é incorporado nas paredes do edifício e a energia do ar quente exterior é armazenada sob a forma de calor latente no PCM, ou seja, este ar provoca um processo de carga do PCM, e à noite, o ar frio provoca a descarga deste. Como resultado, a temperatura no interior do edifício mantém-se constante, ajudando a reduzir a dimensão do ar condicionado dimensionado para o edifício em questão [39].

2.12.2 Sistemas solar de aquecimento de água

Os sistemas solar de aquecimento de água estão a ganhar cada vez mais popularidade graças ao seu custo reduzido e à sua fácil manutenção.

O PCM é incorporado no reservatório de armazenamento de água. Durante as horas de sol a água é aquecida através da sua energia (painéis solares térmicos) e transfere calor ao PCM. Este é assim carregado armazenando a energia sob a forma de calor latente. Nas horas em que não há sol a tendência de arrefecimento da água é contrariada pelo PCM, o que leva a que este liberte a energia previamente armazenada mudando assim do estado sólido para o estado líquido [39].

2.12.3 Aplicações em têxteis

Para os trabalhadores da indústria, muitas vezes, é necessário vestuário especializado. A roupa é mais confortável se se puder ajustar a diferentes tipos de ambientes. O PCM é capaz de realizar este ajuste, uma vez que existem PCM com temperatura de mudança de fase próximas da temperatura do corpo humano e podem ser incorporados nas fibras têxteis [26].

Estudos revelaram que o uso de PCM em têxteis resulta na redução significativa de perda de suor e temperatura da pele.

2.12.4 Aplicações médicas

Os PCMs têm também uma vasta gama de aplicações médicas como por exemplo no transporte e armazenamento, bem como aplicações médicas no corpo humano.

O transporte e armazenamento de produtos médicos é uma aplicação onde o uso de PCMs apresenta grandes benefícios. Isto está relacionado com o facto desses produtos, como por exemplo o sangue e vacinas, terem de ser transportados e armazenados em gamas de temperaturas muito específicas (tome-se como o exemplo o caso das vacinas que só são eficazes se conservadas a temperaturas entre 2 °C e 8 °C). Assim, sempre que possível estes produtos são transportados em veículos com ar condicionado e armazenados em câmaras frigoríficas. Contudo, existe o problema do transporte entre o veículo e o seu destino final. O uso de PCM nestes sistemas consegue alcançar resultados bastante promissores devido à sua capacidade de regulação de temperatura [26].

No que diz respeito às aplicações humanas, a utilização de PCMs está relacionada com o uso de calor e frio em terapias ou curas. Por exemplo, o gelo é utilizado como tratamento em várias lesões, principalmente no desporto. No entanto, em algumas aplicações o uso de gelo não é recomendável pois é difícil o controlo da sua temperatura. Os PCMs apresentam a possibilidade deste controlo a temperaturas reduzidas [26].

2.13 Permutadores de calor

Os permutadores de calor são um equipamento muito versátil com aplicações em diversas indústrias, desde indústria química à produção de eletricidade em centrais termoelétricas.

De acordo com Shah & Sekulić [40], o permutador de calor é um sistema que tem por finalidade a transferência de calor entre dois ou mais fluidos, que se encontram a diferentes temperaturas. Esta troca de calor entre os fluidos pode ocorrer de duas formas distintas, por contacto direto ou por contacto indireto. O contacto direto consiste na mistura dos fluidos de transferência de calor, enquanto que o contacto indireto reside na transferência de calor dos fluidos por meio de uma parede que os separa, não ocorrendo assim mistura entre estes.

Uma vez que existem inúmeros permutadores de calor, é importante a sua distinção. Segundo Shah & Sekulić [40], a classificação destes pode ser quanto ao processo de transferência de calor, ao número de fluidos que participam no processo, pode ser também de acordo com os mecanismos de transferência de calor, o tipo de construção do permutador, o regime de escoamento, entre outros. No que diz respeito ao processo de transferência de calor, este foi explicado anteriormente, relacionado com a transferência de calor por contacto direto ou indireto. Quanto ao número de fluidos, na maioria dos

permutadores apenas estão presentes dois. No entanto, alguns processos necessitam da presença de mais, por exemplo, purificação e liquidificação de hidrogénio. Relativamente ao tipo de construção do permutador existem três diferentes tipos - permutadores tubulares, permutadores de placas e permutadores de superfície estendida - realçando-se os permutadores de calor tubulares, onde está inserido o tipo serpentina.

O permutador em serpentina é constituído através de uma ou mais serpentinas (tubos circulares) colocadas dentro de uma carcaça, onde um dos fluídos circula no interior dos tubos e o outro no espaço entre a carcaça e as serpentinas de tubos. Devido à sua construção em espiral este tipo de permutadores permite acondicionar uma grande superfície, mas a sua limpeza é bastante problemática [40].

Quanto à composição e dimensões da serpentina, vários artigos, onde as aplicações estudadas são coletores e painéis solares, remetem para a escolha do cobre com dimensões bastante pequenas (diâmetros de 10 mm a 25 mm) [41].

2.14 Síntese da revisão do estado de arte

Em resumo, a utilização de PCMs é de facto bastante vasta. Neste contexto, primeiramente, estudou-se a natureza e as principais propriedades dos PCMs. No que ao último ponto diz respeito, verificou-se que a maioria destes apresentam um valor de condutividade térmica reduzida, o que faz com que se tornem uma barreira à condução de calor, conduzindo a um ciclo de carga e descarga muito longos. Por este motivo, existe uma procura constante de novos materiais de mudança de fase e de técnicas que possam conduzir ou ao aumento da transferência de calor ou ao aumento da condutividade térmica do material.

Para avaliar tanto os novos materiais como o aumento da condutividade térmica do PCM é necessário estudar as várias técnicas que conduzem à obtenção das suas propriedades termofísicas. Para isto, estudaram-se várias técnicas, utilizadas por diferentes autores, onde se constatou que a técnica de caracterização mais frequente é a calorimetria diferencial de varrimento pois permite obter, simultânea e corretamente, um vasto número de propriedades termofísicas.

No que diz respeito ao aumento da transferência de calor foram abordados, neste capítulo, várias técnicas, das quais se destacou o uso de alhetas como sendo uma das mais estudadas em toda a literatura.

Relativamente a modelos matemáticos e analíticos desenvolvidos, destaca-se o uso da primeira lei da termodinâmica em formulações que obtêm resultados próximos dos espectáveis. Para além disso, muitos destes modelos desprezam a convecção do PCM quando este se encontra no estado líquido.

Quanto aos modelos numéricos, muitos autores optam por aplicar o método das diferenças finitas explícito pois, ao contrário do implícito, não requer tanto poder computacional e o método das diferenças finitas permite uma análise mais detalhada do problema, uma vez que é possível dividir a geometria em várias camadas e averiguar o que ocorre em cada uma. Importa relevar que, tal como nos modelos matemáticos e analíticos, a convecção do PCM é desprezada quando este se encontra no estado líquido.

Capítulo 3

Método Numérico

No contexto deste trabalho pretende-se desenvolver um protótipo virtual/modelo numérico, o qual permitirá analisar as trocas de calor entre um PCM e um fluido que circula dentro de um tubo circular.

Uma vez que o objetivo deste modelo é avaliar a transferência de calor que ocorre entre o PCM e um fluido, é importante compreender quais as variáveis e quais os parâmetros no modelo. No que diz respeito a este modelo, os parâmetros são a geometria do tubo, as características do fluido e os meios de transferência de calor. Quanto às variáveis, estas são a evolução da temperatura do PCM ao longo do tempo, de acordo com o raio e com o comprimento e a temperatura do fluido à saída do reservatório, também ao longo do tempo.

O desenvolvimento deste modelo baseou-se na primeira lei da termodinâmica. Tal como referido na secção 2.7, os modelos que têm por base esta abordagem convergem para os resultados esperados, sendo que muitos destes estudos foram comprovados experimentalmente. Contudo, e tendo em consideração as propriedades do PCM, as análises matemáticas terão sempre de ser divididas de acordo com o estado físico em que este se encontra.

Neste âmbito, o modelo desenvolvido deve ser um compromisso entre precisão e complexidade, pois caso o modelo seja demasiado complexo isto implica maior poder computacional. Na realidade, não existe necessidade de criar um modelo que seja muito complexo uma vez que, estão presentes no mercado *softwares* capazes de realizar estas análises.

3.1 Método das diferenças finitas

O método das diferenças finitas é um procedimento numérico que tem a capacidade de resolver Equação de Derivadas Parciais (EDP) através da discretização do domínio contínuo físico numa rede nodal, aproximando a derivada parcial exata da EDP por Diferenças Finitas Aproximadas (DFAs), substituindo as DFAs na EDP com o intuito de alcançar a equação algébrica de diferenças finitas, resolvendo-a para a variável dependente [42].

A aplicação deste método apresenta vantagens na resolução de problemas transientes, pois é aplicável a diferentes geometrias e diferentes condições fronteiras, o que nas soluções analíticas por vezes não é possível.

Este método é vastamente aplicado para determinação de temperaturas num dado instante de tempo. Porém, as diferenças finitas têm duas formas de formulações distintas, a metodologia explícita e a metodologia implícita. Estas metodologias/formulações são apresentados na subsecção seguinte.

3.1.1 Formulação explícita e formulação implícita

Tomando como exemplo a determinação de temperaturas num dado instante de tempo, as formulações explícita e implícita distinguem-se uma da outra na forma de determinar a temperatura num dado ponto e num dado instante. A primeira formulação (formulação explícita) determina-a pelo conhecimento das temperaturas nos nós vizinhos e no próprio nó no instante anterior. Assim sendo, a determinação da temperatura nodal de um dado instante é independente das temperaturas dos outros pontos nodais no instante em questão [25]. Diferentemente, na aplicação da formulação implícita, a temperatura do nó num dado instante depende das temperaturas dos nós adjacentes nesse instante que, em geral, são desconhecidas. Assim, todas as equações devem ser resolvidas em simultâneo. Importa ainda referir que, para o caso da formulação explícita requerem-se condições de estabilidade [25].

Nesta dissertação a formulação aplicada é a explícita, uma vez que esta formulação foi aplicada e validada em outros estudos. Concomitantemente, é também de programação mais simples, atendendo a que cada equação pode ser resolvida independentemente da outra. Quanto ao critério de estabilidade, este é determinado pela exigência de que o coeficiente associado ao nó anterior de interesse no instante de tempo anterior seja maior ou igual a zero [25].

3.1.2 Equações de diferenças finitas

Para a aplicação do método das diferenças finitas é necessário, numa primeira fase, avaliar os modos de transferência de calor presentes no sistema. Estes estão representados na Figura 3.1. É de notar que, neste caso, se considera que na condição fronteira, ou seja na superfície externa, está presente convecção forçada.

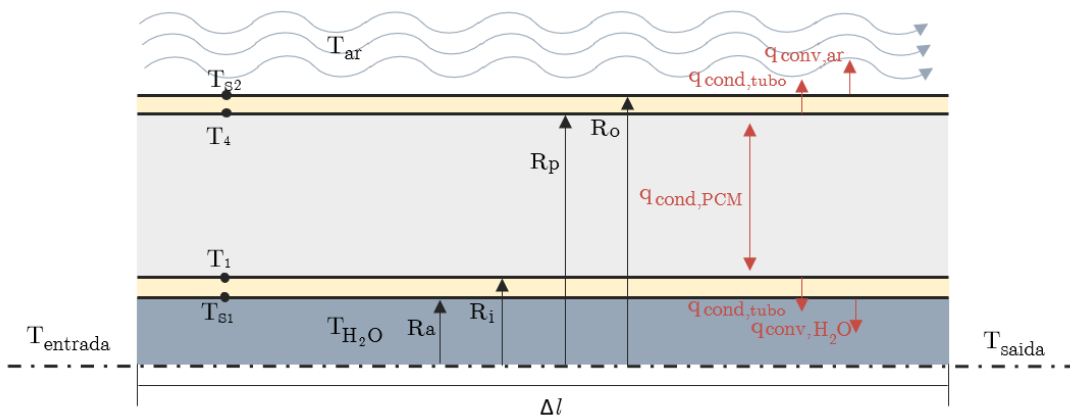


Figura 3.1: Representação dos modos de transferência de calor presentes no modelo proposto.

Assim, na Figura 3.1 é visível a transferência de calor por condução no interior do PCM ($q_{\text{cond,PCM}}$), o qual perde calor, simultaneamente, para a água e para o ar. Também está representada a transferência de calor por condução através de ambas as paredes do tubo ($q_{\text{cond,tubo}}$) e as duas transferências de calor por convecção, uma através da água ($q_{\text{conv,H}_2\text{O}}$) e a outra através do ar exterior ($q_{\text{conv,ar}}$).

De forma a tornar o problema menos complexo, a análise de transferências de calor será tratada de forma unidimensional. Neste enquadramento, divide-se o tubo em n segmentos com comprimento muito reduzido ($\Delta l = L/n$), delimitados longitudinalmente por fronteiras adiabáticas. Como consequência, a transferência de calor ocorre tal como está representada na Figura 3.1.

De seguida, transformam-se os processos de transferência de calor por convecção da água e por condução através do tubo num só. Isto também é realizado para o processo de transferência de calor por convecção do ar exterior e o de condução através do tubo. Refira-se que para esta transformação poder ocorrer tem-se como pressuposto que não existe acumulação de energia térmica nas paredes do tubo. O resultado de cada uma destas transformações está apresentado abaixo.

Para a primeira transformação:

$$q_{\text{conv,H}_2\text{O}} = 2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot R_a \cdot h_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{s1} - T_{\text{H}_2\text{O}})$$

$$q_{\text{cond,tubo}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot k_{\text{tubo}} \cdot (T_1 - T_{s1})}{\ln\left(\frac{R_i}{R_a}\right)}$$

$$q_1 = q_{\text{conv,H}_2\text{O}} = q_{\text{cond,tubo}} = \frac{T_1 - T_{\text{H}_2\text{O}}}{\frac{\ln(R_i/R_a)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot k_{\text{tubo}}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot R_a \cdot h_{\text{H}_2\text{O}}}}$$

Onde:

$$T_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{T_{\text{entrada}} + T_{\text{saida}}}{2}$$

$$q_1 = 2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot R_a \cdot U_1 \cdot (T_1 - T_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (3.1)$$

Sendo:

$$U_1 = \frac{1}{\frac{R_a}{k_{\text{tubo}}} \cdot \ln\left(\frac{R_i}{R_a}\right) + \frac{1}{h_{\text{H}_2\text{O}}}}$$

Para o cálculo do coeficiente convectivo da água é necessário, numa primeira fase, avaliar o tipo de escoamento. Para a caso de se tratar de um escoamento laminar, o coeficiente convectivo é calculado pela Equação 3.2 [25]. Por outro lado, se o escoamento for turbulento, o coeficiente convectivo é obtido pela Equação 3.3 [25].

$$h_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{3,66 \cdot k_{\text{H}_2\text{O}}}{2 \cdot R_o} \quad (3.2)$$

Onde:

$$3,66 = Nu_D$$

$$h_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,023 \cdot Re_D^{4/5} \cdot Pr^n \cdot k_{\text{H}_2\text{O}}}{2 \cdot R_o} \quad (3.3)$$

Em que:

$n = 0,4$ para o caso do fluido estar a ser aquecido

$n = 0,3$ para o caso do fluido estar a ser arrefecido

Para a segunda transformação:

$$\begin{aligned} q_{\text{condv,ar}} &= 2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot R_o \cdot h_{\text{ar}} \cdot (T_{s2} - T_{\text{ar}}) \\ q_{\text{cond,tubo}} &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot k_{\text{tubo}} \cdot (T_4 - T_{s2})}{\ln\left(\frac{R_o}{R_p}\right)} \\ q_2 = q_{\text{condv,ar}} = q_{\text{cond,tubo}} &= \frac{T_4 - T_{\text{ar}}}{\frac{\ln(R_o/R_p)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot k_{\text{tubo}}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot R_o \cdot h_{\text{ar}}}} \\ q_2 &= 2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot R_o \cdot U_2 \cdot (T_4 - T_{\text{ar}}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Onde:

$$U_2 = \frac{1}{\frac{R_o}{k_{\text{tubo}}} \cdot \ln\left(\frac{R_o}{R_p}\right) + \frac{1}{h_{\text{ar}}}}$$

Para o cálculo do coeficiente convectivo do ar, calcula-se primeiramente o número de *Reynolds* [25] de forma a determinar o tipo de escoamento. Atendendo a que o escoamento é no sentido axial, o cálculo do coeficiente convectivo do tubo é semelhante ao de uma placa plana, bem como o número de *Reynolds*.

$$Re_L = \frac{v_{\text{ambiente}} \cdot L}{\nu_{\text{ar}}} \quad (3.5)$$

Caso o número de *Reynolds* seja inferior a 5×10^5 trata-se de um escoamento laminar, e o coeficiente convectivo é calculado através da Equação 3.6 [25]. Por outro lado, se o número de *Reynolds* for superior ao valor indicado anteriormente, está-se perante um escoamento turbulento e o coeficiente convectivo é obtido através da Equação 3.7 [25].

$$h_{\text{ar}} = \frac{0,664 \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \cdot k_{\text{ar}}}{L} \quad (3.6)$$

$$h_{\text{ar}} = \frac{0,680 \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \cdot k_{\text{ar}}}{L} \quad (3.7)$$

Para aplicar o método das diferenças finitas é necessário dividir o PCM em camadas com espessuras de Δr que, neste caso, se consideram iguais, tal como está ilustrado na Figura 3.2.

Em seguida, procede-se ao balanço térmico para cada uma das camadas. No entanto, deve ter-se em conta que a formulação destes balanços divide-se em três partes, uma vez que as propriedades termofísicas do PCM dependem do seu estado físico. Assim, numa primeira instância é apresentada a formulação para a fase líquida, seguida pela formulação para a mudança de fase do PCM e, por último, a formulação para a fase sólida.

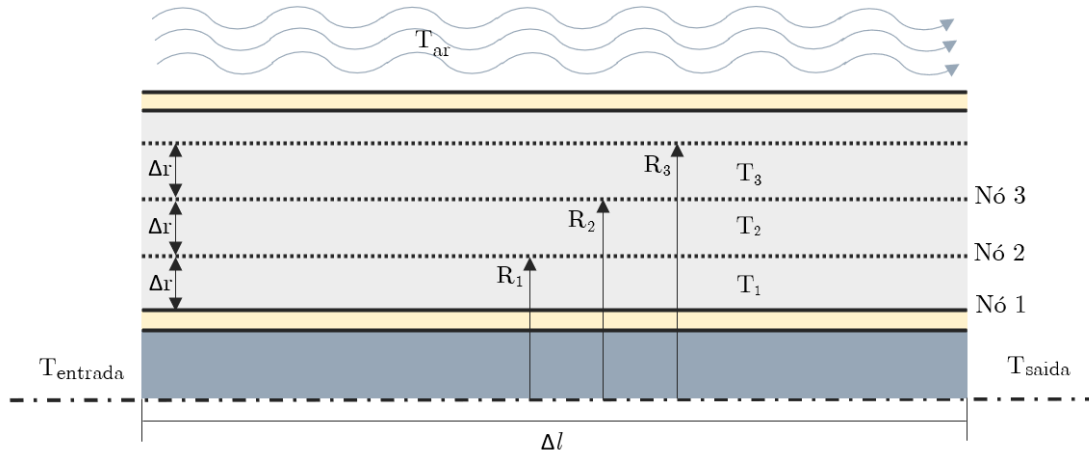


Figura 3.2: Ilustração de diferentes camadas radiais no segmento do tubo.

Formulação do problema durante a fase líquida do PCM

A formulação apresentada nesta secção terá em conta três camadas de PCM. No entanto, se o número de camadas fosse maior o procedimento seria semelhante. Merece também relevar, que quando o PCM se encontra no estado líquido este tem dois modos de transferência de calor - por condução e por convecção (uma vez que no estado líquido o PCM se trata de um fluido). Contudo, inúmeros autores [13, 23, 27] referem que o principal modo de transferência de calor é a condução, podendo a transferência de calor por convecção ser desprezada. No sentido de analisar essas transferências de calor, na Figura 3.3 apresenta-se, de uma forma esquemática, as transferências que ocorrem entre as diferentes camadas, para o caso aqui considerado (a condição fronteira considerada é convecção externa).

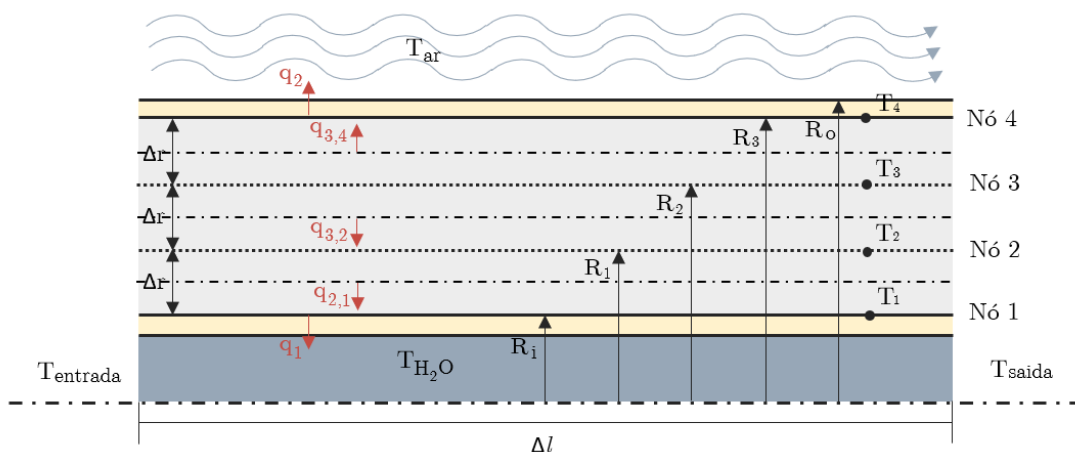


Figura 3.3: Representação das trocas de calor entre as várias camadas no segmento do tubo.

Em seguida, e tendo em consideração as figuras ilustradas anteriormente, apresenta-

-se o balanço energético para cada um dos nós representados na Figura 3.3.

Balanço energético para o nó 1:

O calor transportado por condução do nó 2 para o nó 1 ($q_{2,1}$) é calculado através da Lei de *Fourier*, Equação 3.8.

$$q_{2,1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot \Delta l \cdot k_{l,PCM} \cdot (T_2 - T_1)}{\Delta r} \quad (3.8)$$

O calor transportado do nó 1 para a água (q_1) é obtido pela Lei de *Newton*, Equação 3.9

$$q_1 = 2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot R_a \cdot U_1 \cdot (T_1 - T_{H_2O}) \quad (3.9)$$

A taxa de acumulação de energia no nó 1:

$$m_{PCM} \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_1^+ - T_1}{\Delta t} = \rho_{PCM} \cdot V_{PCM} \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_1^+ - T_1}{\Delta t} \quad (3.10)$$

$$\Leftrightarrow \frac{dE}{dt} = \rho_{l,PCM} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta r^2 \cdot \Delta l \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_1^+ - T_1}{\Delta t}$$

Balanço Energético:

$$q_{2,1} - q_1 = \frac{dE}{dt} \quad (3.11)$$

$$\Leftrightarrow R_1 \cdot k_{l,PCM} \cdot \frac{T_2 - T_1}{\Delta r} - R_a \cdot U_1 \cdot (T_1 - T_{H_2O}) = \rho_{l,PCM} \cdot (R_1^2 - R_i^2) \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_1^+ - T_1}{\Delta t}$$

Balanço Energético para o nó 2:

O calor transportado por condução do nó 3 para o nó 2 ($q_{3,2}$) é obtido pela Lei de *Fourier*, Equação 3.12.

$$q_{3,2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot \Delta l \cdot k_{l,PCM} \cdot (T_3 - T_2)}{\Delta r} \quad (3.12)$$

O calor transportado por condução do nó 2 para o nó 1 ($q_{2,1}$) é calculado através da Lei de *Fourier*, Equação 3.13.

$$q_{2,1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot \Delta l \cdot k_{l,PCM} \cdot (T_2 - T_1)}{\Delta r} \quad (3.13)$$

A taxa de acumulação de energia no nó 2:

$$m_{PCM} \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_2^+ - T_2}{\Delta t} = \rho_{l,PCM} \cdot V_{PCM} \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_2^+ - T_2}{\Delta t} \quad (3.14)$$

$$\Leftrightarrow \frac{dE}{dt} = \rho_{l,PCM} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta r^2 \cdot \Delta l \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_2^+ - T_2}{\Delta t}$$

Balanço Energético:

$$q_{3,2} - q_{2,1} = \frac{dE}{dt} \quad (3.15)$$

$$\Leftrightarrow R_2 \cdot k_{l,PCM} \cdot \frac{T_3 - T_2}{\Delta r} - R_1 \cdot k_{l,PCM} \cdot \frac{T_2 - T_1}{\Delta r} = \rho_{l,PCM} \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_2^+ - T_2}{\Delta t}$$

Balço Energético para o nó 3:

O calor transportado por condução do nó 3 para o nó 4 ($q_{3,4}$) é calculado através da Lei de *Fourier*, Equação 3.16.

$$q_{3,4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot \Delta l \cdot k_{l,PCM} \cdot (T_3 - T_4)}{\Delta r} \quad (3.16)$$

O calor transportado por condução do nó 3 para o nó 2 ($q_{3,2}$) é obtido pela Lei de *Fourier*, Equação 3.17.

$$q_{3,2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot \Delta l \cdot k_{l,PCM} \cdot (T_3 - T_2)}{\Delta r} \quad (3.17)$$

A taxa de acumulação de energia no nó 3:

$$m_{PCM} \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_3^+ - T_3}{\Delta t} = \rho_{l,PCM} \cdot V_{PCM} \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_3^+ - T_3}{\Delta t} \quad (3.18)$$

$$\Leftrightarrow \frac{dE}{dt} = \rho_{l,PCM} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta r^2 \cdot \Delta l \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_3^+ - T_3}{\Delta t}$$

Balço Energético:

$$-q_{3,4} - q_{3,2} = \frac{dE}{dt} \quad (3.19)$$

$$\Leftrightarrow -R_3 \cdot k_{l,PCM} \cdot \frac{T_3 - T_4}{\Delta r} - R_2 \cdot k_{l,PCM} \cdot \frac{T_3 - T_2}{\Delta r} = \rho_{l,PCM} \cdot (R_3^2 - R_2^2) \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_3^+ - T_3}{\Delta t}$$

Balço energético para o nó 4:

O calor transportado por condução do nó 3 para o nó 4 ($q_{3,4}$) é calculado através da Lei de *Fourier*, Equação 3.20.

$$q_{3,4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot \Delta l \cdot k_{l,PCM} \cdot (T_3 - T_4)}{\Delta r} \quad (3.20)$$

O calor transportado do nó 4 para o ar (q_2) é obtido pela Lei de *Newton*, Equação 3.21.

$$q_2 = 2 \cdot \pi \cdot \Delta l \cdot R_o \cdot U_2 \cdot (T_4 - T_{ar}) \quad (3.21)$$

A taxa de acumulação de energia no nó 4:

$$m_{PCM} \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_4^+ - T_4}{\Delta t} = \rho_{l,PCM} \cdot V_{PCM} \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_4^+ - T_4}{\Delta t} \quad (3.22)$$

$$\Leftrightarrow \frac{dE}{dt} = \rho_{l,PCM} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta r^2 \cdot \Delta l \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_4^+ - T_4}{\Delta t}$$

Balço Energético:

$$q_{3,4} - q_2 = \frac{dE}{dt} \quad (3.23)$$

$$\Leftrightarrow R_3 \cdot k_{l,PCM} \cdot \frac{T_3 - T_4}{\Delta r} - R_o \cdot U_2 \cdot (T_4 - T_{ar}) = \rho_{l,PCM} \cdot (R_o^2 - R_3^2) \cdot c_{pl,PCM} \cdot \frac{T_4^+ - T_4}{\Delta t}$$

Formulação do problema durante a mudança de fase do PCM

Nesta secção é apresentada a formulação do problema em estudo durante a mudança de fase do PCM. Da mesma forma que anteriormente, apenas serão tidas em conta três camadas.

O processo de mudança de fase do PCM é um dos mais importantes, pois é durante este que o PCM liberta uma maior quantidade de calor. Para este caso, e com o objetivo de aplicar a formulação utilizada à fase líquida, transformou-se o calor latente de fusão num valor de calor específico relativo à mudança de fase. Neste sentido, para determinar este c_p correspondente à mudança de fase divide-se o calor latente de fusão por um intervalo de temperaturas. O intervalo considerado é uma variação de 2°C em torno da temperatura de fusão, $T_{\text{fusao}} - 1^\circ\text{C}$ e $T_{\text{fusao}} + 1^\circ\text{C}$. Assim a formulação é a mesma que a apresentada para fase líquida e o valor de c_p utilizado é obtido através da equação equação 3.24.

$$c_{p_f,\text{PCM}} = \frac{L_{\text{PCM}}}{(T_{\text{fusao}} + 1) - (T_{\text{fusao}} - 1)} = \frac{L_{\text{PCM}}}{2} \quad (3.24)$$

Formulação do problema para a fase sólida do PCM

A formulação para fase sólida do PCM é equivalente à fase líquida do mesmo, com exceção dos valores das propriedades termofísicas (condutividade térmica ($k_{s,\text{PCM}}$), calor específico ($c_{p_s,\text{PCM}}$) e densidade ($\rho_{s,\text{PCM}}$)).

Capítulo 4

Modelação Numérica

Uma vez definidas as equações que caracterizam as três formulações do problema, é possível modelá-lo na globalidade e resolvê-lo por recurso a métodos numéricos. Deve ainda referir-se que, para o efeito, se recorreu à linguagem de programação *Python*.

4.1 Desenvolvimento do protótipo virtual

A modelação numérica do protótipo virtual (modelo numérico) foi realizada de forma a que o utilizador possa escolher o tipo de PCM, ou seja, introduz no modelo numérico as suas propriedades termofísicas e a sua temperatura de fusão. Introduce também a condutividade térmica do material que compõe o tubo, o caudal mássico da água que circula dentro deste e a temperatura da água à sua entrada. Com isto, o protótipo virtual é capaz de devolver a evolução da temperatura da água à saída do tubo, a potência instantânea, a energia cedida pelo PCM durante o teste e a potência média. O protótipo também tem a capacidade de fornecer, num determinado instante de tempo e ao longo de diferentes segmentos, a temperatura da água e do PCM. Realça-se ainda que o protótipo desenvolvido é também capaz de simular um processo de carga do PCM, sendo apenas necessário colocar um sinal negativo nas equações descritas no Capítulo anterior.

Contudo, e de forma a assegurar a coerência desejada, no desenvolvimento deste protótipo virtual, existiu necessidade de ter em conta certos aspetos. Neste contexto, é necessário efetuar a caracterização da malha, assegurar a convergência dos valores e determinar as condições iniciais e de fronteira do sistema. Para este efeito, cada um destes pontos é discutido em detalhe nas subsecções seguintes.

4.1.1 Caracterização da malha

Tendo em consideração a geometria do protótipo a desenvolver (cilíndrica), é necessário caracterizar a malha no sentido radial, mas também, devido ao comprimento do tubo, esta deve ser caracterizada no sentido longitudinal, dividindo assim o tubo em diferentes segmentos.

No que concerne à caracterização no sentido longitudinal, o número de segmentos, n , em que o tubo será dividido, deve-se ter em conta não só as dimensões deste, mas também o facto da condução de calor ser apenas unidimensional, ou seja, cada segmento será analisado individualmente, tal como discutido no capítulo anterior. Deste modo, deve ser garantido que o comprimento l , do segmento n é suficiente para garantir a

validade do pressuposto inerente à condução de calor unidimensional. Neste âmbito, e de acordo com o proposto por Mehling *et al.* [27], considera-se um tamanho de segmento de 0,1 m.

Quanto às camadas radiais, estas devem respeitar o critério de estabilidade que é determinado pela exigência de que o coeficiente associado ao nó de interesse seja maior ou igual a zero. Este critério é representado pela Equação 4.1 para os nós interiores. O critério para outros nós pode ser encontrado no livro *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* [25].

$$\frac{\Delta t}{(\Delta r)^2} \leq \frac{\rho \cdot c_p}{4 \cdot k} \quad (4.1)$$

Considerando então a caracterização da malha acima exposta, o programa desenvolvido calcula, a cada Δt e em cada segmento, a evolução da temperatura do PCM em cada uma destas camadas, usando as Equações 3.11, 3.15, 3.19 e 3.23, bem como a temperatura da água à saída, utilizando a Equação 4.2.

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{p\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{saída}}^+ - T_{\text{entrada}}) = 2 \cdot \pi \cdot l \cdot R_a \cdot U_1 \cdot (T_1 - T_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (4.2)$$

4.1.2 Convergência

No sentido de assegurar a convergência do modelo, os valores calculados para a temperatura do PCM em cada nó, e em cada segmento, bem como a temperatura da água à saída de cada segmento, foram comparados com os obtidos no instante de tempo anterior. Esta comparação é feita através da Equação 4.3. A convergência é assegurada quando, simultaneamente e para todas as variáveis (temperatura do PCM em cada nó, e em cada segmento, e a temperatura da água à saída de cada segmento) a Equação 4.3 atinge um valor inferior a 0,01. Caso esta condição não se verifique, o valor das variáveis na iteração anterior (*variavel_i*) é substituído pelo valor calculado para nova iteração (*variavel_{i+1}*), sendo estas novamente calculadas e a condição é, novamente, verificada. Este processo é repetido até a condição ser verdadeira para todas variáveis em simultâneo.

$$\frac{|variavel_{i+1} - variavel_i|}{variavel_i} \quad (4.3)$$

4.1.3 Condições iniciais e de fronteira

As condições iniciais são a temperatura da água à entrada do tubo e a temperatura do PCM. Considera-se ainda que a temperatura da água à saída do primeiro segmento é a temperatura de entrada no segundo e assim sucessivamente. Para além disto, o programa monitoriza a temperatura do PCM em cada camada e verifica, individualmente, quando esta atinge a temperatura de mudança de fase ou se já se encontra em fase de solidificação e altera o valor das propriedades de acordo com a fase em que este se encontra.

Relativamente às condições fronteira, estas podem ser três: convecção, radiação ou adiabática. O método descrito no capítulo anterior tratou da existência de convecção no exterior. No entanto, poderia também ter sido considerado radiação ou uma parede adiabática. Para isto apenas é necessário alterar essa condição de transferência de calor na Equação 3.19. Tomemos como exemplo a condição fronteira ser adiabática: a única diferença da equação seria retirar a parcela respeitante ao calor transferido por convecção.

4.2 Funcionamento do protótipo virtual

Uma vez discutidos todos os aspetos necessários para a coerência desejada, o funcionamento do protótipo virtual pode ser então discutido. Na Figura 4.1 está ilustrado o fluxograma do modelo virtual desenvolvido. Este permite compreender a lógica e os vários passos que regem o protótipo. Após serem determinadas as temperaturas dos diferentes nós do PCM e a temperatura da água à saída, é possível proceder ao cálculo de outras variáveis como a potência instantânea, a energia total libertada pelo PCM, entre outras. Acresce ainda referir que o modelo desenvolvido permite guardar os dados relativos à temperatura do PCM em cada nó e em cada segmento, bem como a temperatura da água em cada segmento, para cada instante de tempo. Possibilita ainda o estudo da evolução da temperatura da água, longitudinalmente e também a evolução temperatura do PCM quer longitudinalmente, quer radialmente.

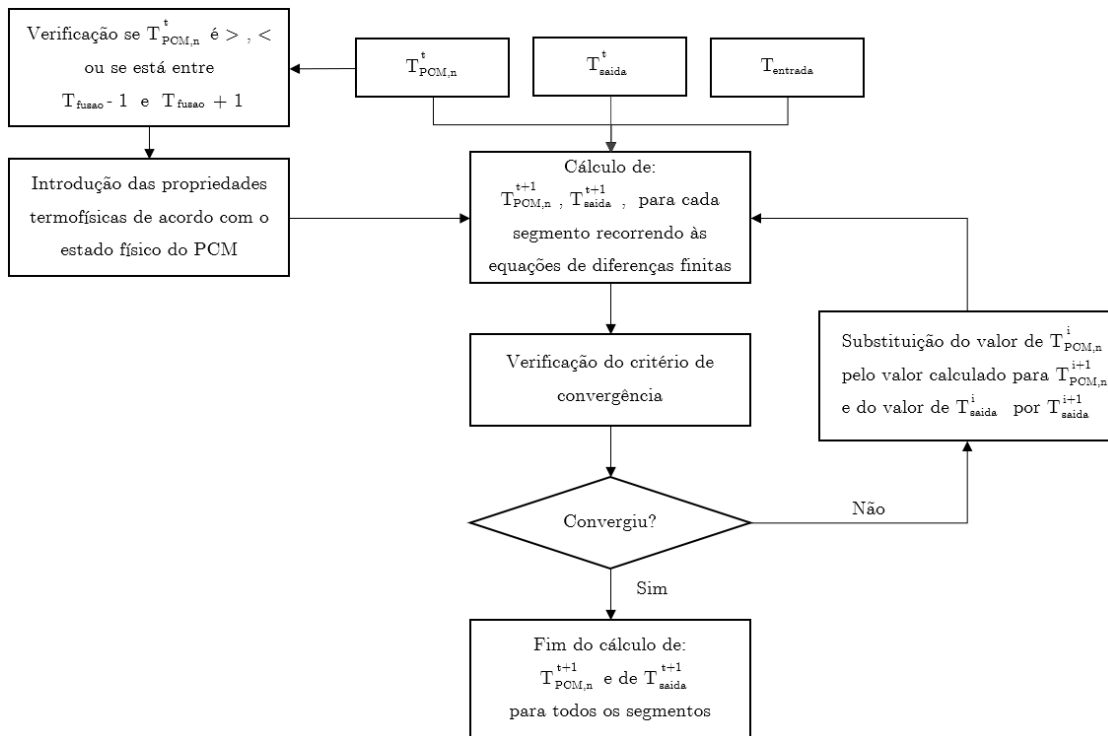


Figura 4.1: Fluxograma do modelo virtual desenvolvido.

Capítulo 5

Análise Experimental e Validação do Método Numérico

O presente capítulo centra-se na aplicação do método apresentado no Capítulo 3 à experiência realizada pelo autor Mendes [43]. Neste sentido, apresenta-se uma descrição da experiência realizada, a análise da mesma e a aplicação do método numérico a esta.

Com isto, pretende-se validar o método selecionado para que este possa ser aplicado a um caso de estudo.

5.1 Descrição da experiência realizada

O trabalho laboratorial realizado consistiu no desenvolvimento e caracterização do funcionamento de um sistema de armazenamento de energia térmica latente utilizando PCM, tendo por objetivo a sua posterior libertação. Na experiência pretendia-se estudar o comportamento da temperatura de saída do fluido de trabalho sobre diversas condições ambientais, de caudal e também de diferentes temperaturas de entrada. A instalação experimental possuía um circuito para recirculação de ar (capaz de (re)produzir as condições pretendidas), um sistema de monitorização e controlo de dados e um outro sistema de registo de dados, para que, posteriormente, se efetuar o tratamento dos mesmos.

Na Figura 5.1 encontra-se representada uma ilustração da experiência desenvolvida por Mendes [43].

Analisando então a Figura 5.1, verifica-se que o PCM irá transferir calor para a água, mas também que perde calor para o meio ambiente. Assim, estão presentes três modos de transferência de calor: a convecção da água, a condução que ocorre no PCM e a convecção do ar ambiente.

Para além dos modos de transferência de calor, é também essencial averiguar as variáveis que sofrem alteração ao longo do tempo. São estas a temperatura do PCM, tanto no sentido axial como no radial e a temperatura da água à saída do tubo.

Descrição do tubo

Neste estudo utilizou-se um tubo concêntrico extrudido em PVC com um diâmetro exterior de 14 mm, um diâmetro interior de 3,5 mm e uma espessura de parede de 1 mm (Figura 5.2), sendo o comprimento do tubo de 1000 mm (1 m) [43].

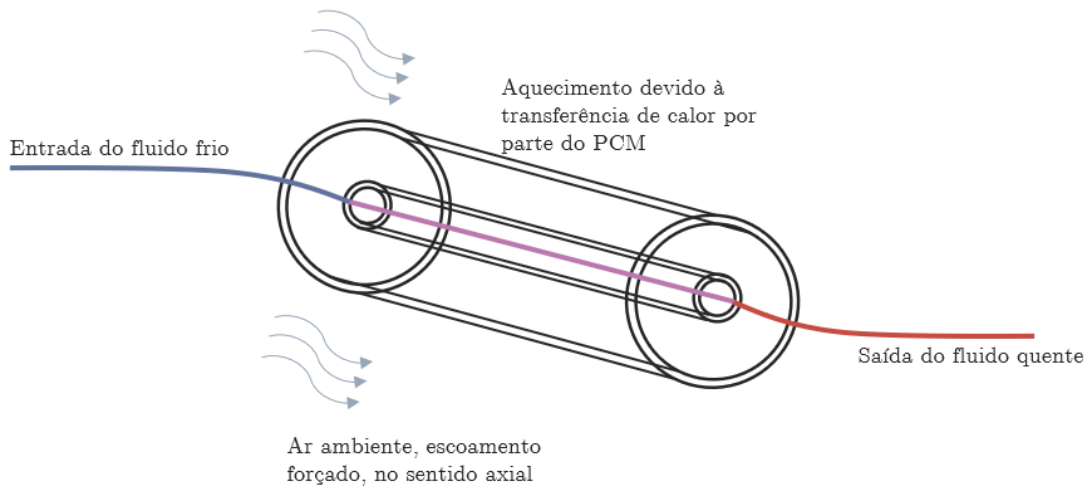


Figura 5.1: Ilustração da experiência desenvolvida por Mendes, adaptada de [43].

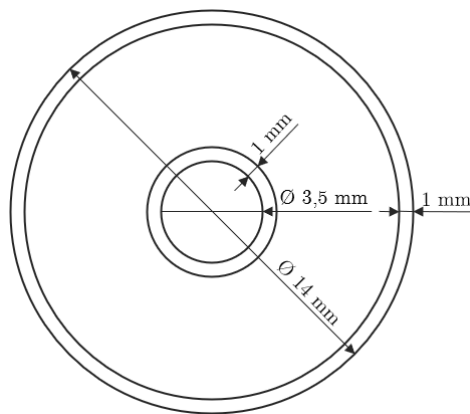


Figura 5.2: Dimensões do tubo da experiência, adaptado de [43].

Relativamente ao material que compõe o tubo, tal como já referido anteriormente, trata-se de um tubo em PVC, e as suas propriedades termofísicas encontram-se descritas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Propriedades do PVC utilizado na experiência prática [44].

Calor específico ($c_{p,\text{PVC}}$)	1,50 kJ/kg
Condutividade térmica (k_{PVC})	0,16 W/(m · K)
Densidade (ρ_{PVC})	1300,00 kg/m ³

Descrição do material de mudança de fase

O material de mudança de fase utilizado neste estudo é de natureza orgânica e trata-se de uma parafina adquirida na empresa PureTemp [45]. As suas características encontram-se apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Características do PCM utilizado na experiência prática [43].

Temperatura de fusão	35 °C
Calor específico líquido ($c_{pl,PCM}$)	2,72 kJ/(kg · K)
Calor específico sólido ($c_{ps,PCM}$)	2,44 kJ/(kg · K)
Calor latente de fusão (L_{PCM})	181,00 kJ/kg
Condutividade térmica líquida ($k_{l,PCM}$)	0,15 W/(m · K)
Condutividade térmica sólida ($k_{s,PCM}$)	0,25 W/(m · K)
Densidade líquido ($\rho_{l,PCM}$)	850,00 kg/m ³
Densidade sólido ($\rho_{s,PCM}$)	940,00 kg/m ³

Apesar do material de mudança de fase ter as suas propriedades termofísicas definidas pelo fornecedor, o autor realizou uma calorimetria diferencial de varrimento (DSC) para confirmação da temperatura de mudança de fase [43]. Esta resultou no termograma apresentado na Figura 5.3, onde é possível verificar que o PCM em estudo tem uma temperatura de mudança de fase de 30 °C para a descarga e de 35 °C para a carga, ou seja, uma temperatura de solidificação de 30 °C e uma temperatura de fusão de 35 °C.

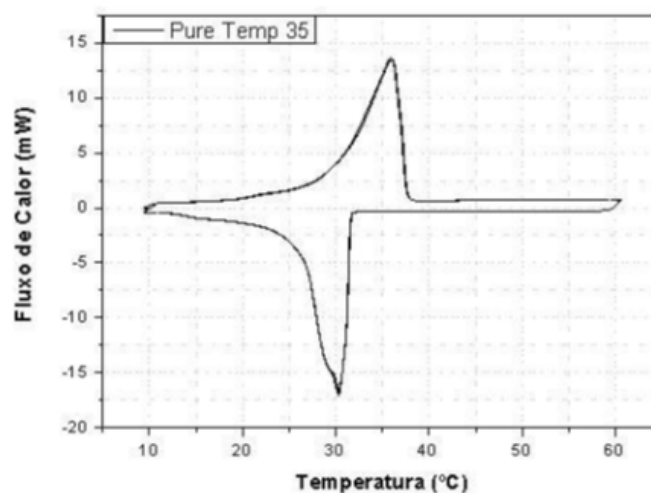


Figura 5.3: Termograma obtido para o PCM PureTemp 35, através de Calorimetria Diferencial de Varrimento [43].

5.2 Apresentação do estudo experimental

No desenvolvimento do seu plano experimental Mendes [43] averiguou, recorrendo ao método de *Taguchi*, o número total de experiências que devem ser realizadas para avaliar um certo número de fatores. Da aplicação deste método concluiu que deve realizar nove testes experimentais.

Cada um destes testes será apresentado de seguida, no qual se efetuará o respetivo tratamento de dados, com o objetivo de se determinar quais os testes que apresentam as melhores condições para serem posteriormente reproduzidos no protótipo virtual.

Antes do início de cada teste, a estação experimental é iniciada, cerca de trinta minutos, de forma a que a temperatura e velocidade do ar ambiente estabilize. O fluido operante (água potável proveniente da rede) é colocado para um depósito com enchimento autorregulável, a partir do qual migra posteriormente para o refrigerador. Neste equipamento, a água é mantida 5 °C abaixo da temperatura de entrada pré-determinada para cada um dos testes. O tubo que contém o PCM encontra-se inicialmente numa estufa, onde se dá a fusão deste, e é depois transportado daqui até à estação experimental. Neste percurso é colocada uma manga térmica sobre o tubo, com o intuito de minimizar as perdas por convecção que eventualmente possam ocorrer. Uma vez colocado o tubo na instalação experimental e verificada se a temperatura do PCM se encontra acima da temperatura de fusão, abre-se a válvula de saída da água refrigerada, regula-se o caudal, e dá-se início ao registo de dados.

5.2.1 Análise ao Teste 1

Este ensaio tem a duração de 740 s e a variação de cada um dos parâmetros ao longo do tempo encontra-se ilustrada nos gráficos das Figuras 5.4, 5.5 e 5.6. Observando as Figuras 5.4 e 5.5, pode afirmar-se que nos primeiros 100 s estes parâmetros estão ainda a ser ajustados. Efetivamente, devido ao caudal ser bastante reduzido, observa-se alguma inconstância neste ao longo do ensaio experimental. Contudo, a diferença, face à média, raramente é superior a 0,05 g/s, o que pode ser considerada uma boa aproximação.

Para avaliar a dispersão dos dados em torno da média, calculou-se o desvio padrão de cada um destes parâmetros, que se encontram apresentados na Tabela 5.3. Tendo em conta os valores alcançados para cada um, é possível concluir que, para este teste, os valores de todos os parâmetros são próximos da média.

Tabela 5.3: Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 1.

Parâmetros	Valor médio	Desvio padrão (σ)
Caudal (g/s)	0,07	0,037
Temperatura de entrada do fluido (°C)	9,45	0,392
Temperatura do ar (°C)	9,76	0,660
Velocidade do ar (m/s)	1,00	0,166

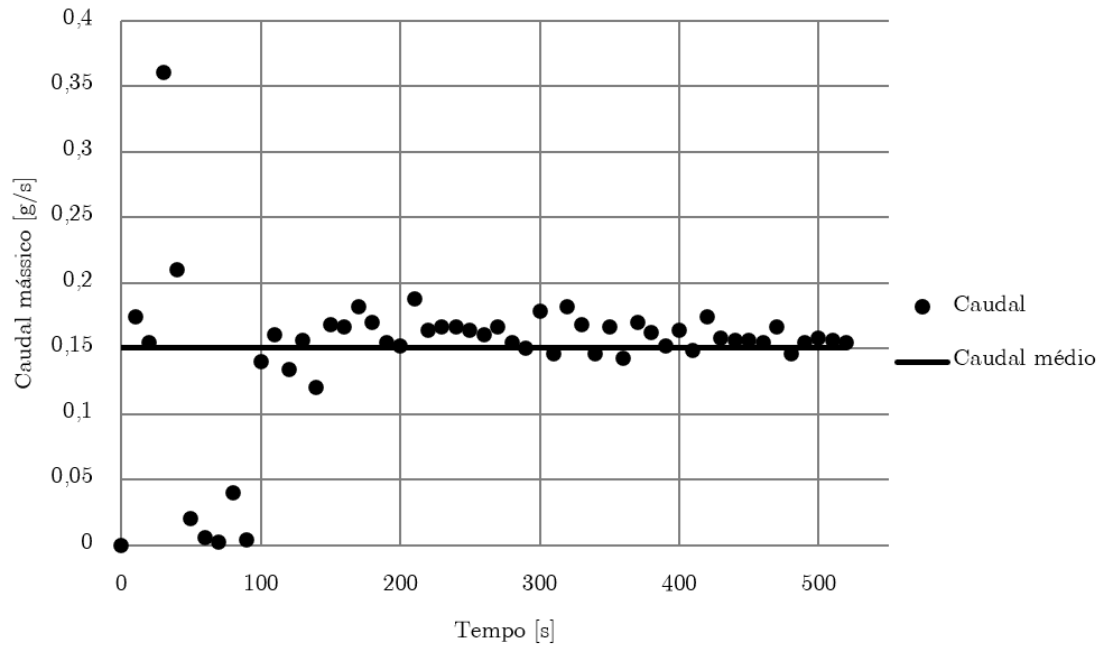


Figura 5.4: Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 1.

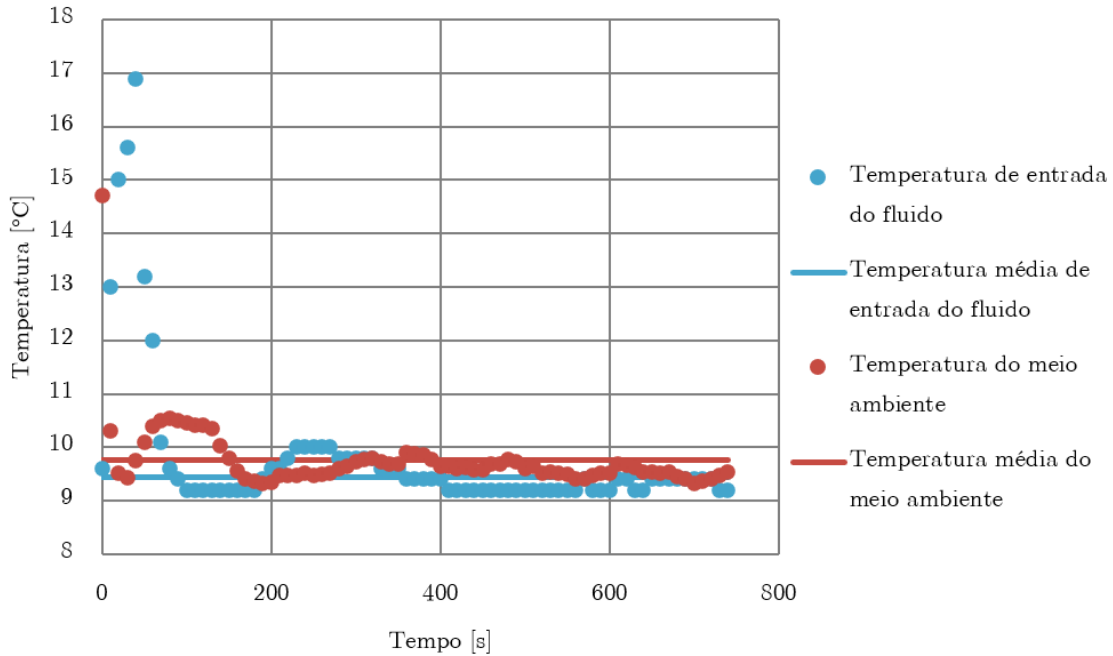


Figura 5.5: Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 1.

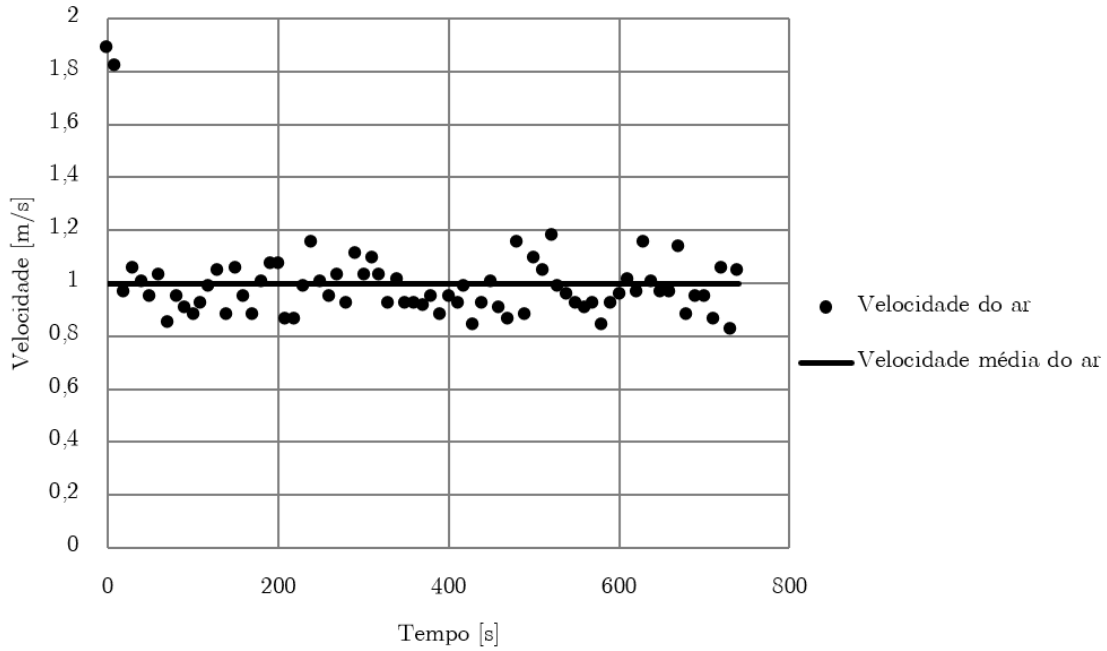


Figura 5.6: Comparação da evolução da velocidade do ar com a velocidade média do ar, Teste 1.

Para além do exposto, também é necessário averiguar a temperatura do PCM aquando do início do ensaio, atendendo a que caso este não esteja no estado líquido não lhe é possível efetuar na plenitude a função para a qual é projetado. Para este efeito, a temperatura é avaliada em seis pontos distintos. Fazendo uma secção transversal do PCM (admitindo imaginariamente que este fica dividido em dois), pode-se verificar que, para cada secção, a temperatura está a ser avaliada no centro e em cada uma das extremidades opostas do tubo. Na Tabela 5.4 estão descritas as temperaturas do PCM em cada um dos pontos.

Tabela 5.4: Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 1.

	Secção 1	Secção 2
L = 0 m	25,92 °C	40,56 °C
L = 0,5 m	46,77 °C	46,32 °C
L = 1 m	41,52 °C	41,52 °C

Para além do teste 1, analisaram-se também os restantes testes experimentais realizados por Mendes [43]. Uma vez que essas análises são semelhantes à do teste 1, optou-se por remetê-las para o Apêndice A, de forma a não tornar esta apresentação exaustiva.

5.3 Seleção dos dados experimentais para comparação

Uma vez analisados todos os resultados experimentais obtidos na experiência e efetuado o seu tratamento, procede-se à seleção dos dados para comparação com os resultados alcançados pelo modelo numérico que propomos apresentar. Os dados selecionados devem contemplar as diferentes gamas caudais estudados pelo autor (ordem de grandeza de 0,05 g/s - caudal mais baixo; ordem de grandeza de 0,15 g/s - caudal intermédio; e por último, ordem de grandeza de 0,25 g/s - caudal maior) [43]. Assim nas Tabelas 5.5, 5.7 e 5.9 dividiram-se os estudos pelas diferentes gamas de caudais, tendo por objetivo selecionar o melhor de cada um. Todavia, para esta seleção, não devem ser considerados apenas os parâmetros referenciados, mas também o estado do PCM aquando do início do teste. Esta comparação encontra-se nas Tabelas 5.6, 5.8 e 5.10.

Tabela 5.5: Comparação dos parâmetros para os testes que apresentam o caudal mássico mais baixo.

Teste	\dot{m} [g/s]		T_{entrada} [°C]		T_{ar} [°C]		v_{ar} [m/s]	
	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão
Teste 1	0,07	0,037	9,45	0,392	9,76	0,660	1,00	0,165
Teste 6	0,08	0,056	10,57	1,102	18,70	0,759	1,48	0,221
Teste 8	0,08	0,048	15,80	0,262	15,62	0,657	2,00	0,191

Tabela 5.6: Comparação das temperaturas do PCM nas diferentes secções para os testes que apresentam o caudal mássico mais baixo.

Teste	$L = 0 \text{ m}$		$L = 0,5 \text{ m}$		$L = 1 \text{ m}$	
	Secção 1	Secção 2	Secção 1	Secção 2	Secção 1	Secção 2
Teste 1	25,96 °C	40,56 °C	46,77 °C	46,32 °C	41,52 °C	41,52 °C
Teste 6	42,61 °C	43,37 °C	50,94 °C	48,09 °C	47,08 °C	43,01 °C
Teste 8	27,92 °C	48,06 °C	55,72 °C	54,31 °C	30,03 °C	41,63 °C

Relativamente aos testes que apresentam um caudal mais reduzido, deve-se ter em conta a informação presente nas Tabelas 5.5 e 5.6. É de notar que no teste 8 uma secção do segmento $L = 0$ m já fundiu ($T = 27,92^\circ\text{C}$), e que no último segmento uma secção do PCM está prestes a fundir ($T = 30,03^\circ\text{C}$). Por este motivo, este não será um bom teste para fazer a comparação com o modelo numérico. Quanto aos outros dois testes, o primeiro (Teste 1) apresenta também uma secção que já fundiu (em $L = 0$ m, $T = 25,96^\circ\text{C}$) e o Teste 6 apresenta um desvio padrão para a temperatura de entrada do fluido no tubo um pouco superior, quando comparado com os outros desvios padrão calculados. Contudo, este desvio padrão face ao valor médio da temperatura não é significativo dado que, o erro padrão face à média, neste caso, é de 0,108. Assim, e considerando todos os dados obtidos, o teste selecionado é o Teste 6.

Quanto aos testes que apresentam um caudal mássico intermédio, a informação relevante à seleção do teste, que mais tarde será comparado como modelo numérico, encontra-se nas Tabelas 5.7 e 5.8. Seguindo a mesma metodologia, avaliam-se as temperaturas do PCM. Neste ponto, verifica-se que o Teste 4, para além de ter uma secção onde o PCM já fundiu ($T = 26,89^\circ\text{C}$), as restantes zonas apresentam temperaturas bastante mais baixas do que o que seria esperado. Assim, este ensaio experimental será descartado. No que diz respeito aos outros testes (2, 7 e 9), todos eles apresentam uma secção com temperatura do PCM mais reduzida, mas que ainda não fundiu. Neste contexto, deve-se então considerar os desvios padrão calculados para cada um dos parâmetros. Feita esta análise, observa-se que o teste que apresenta, de um modo geral, os menores valores para os desvios padrão é o Teste 2 e por este motivo é o teste selecionado para comparação.

Tabela 5.7: Comparação dos parâmetros para os testes que apresentam o caudal mássico intermédio.

Teste	\dot{m} [g/s]		T_{entrada} [$^\circ\text{C}$]		T_{ar} [$^\circ\text{C}$]		v_{ar} [m/s]	
	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão
Teste 2	0,15	0,058	11,03	0,583	14,50	0,336	0,89	0,091
Teste 4	0,16	0,080	15,22	0,905	10,36	0,674	1,47	0,128
Teste 7	0,18	0,084	10,33	0,782	11,37	0,737	1,95	0,225
Teste 9	0,15	0,050	8,21	0,577	20,16	0,967	1,94	0,325

Tabela 5.8: Comparação das temperaturas do PCM nas diferentes secções para os testes que apresentam o caudal mássico intermédio.

Teste	$L = 0 \text{ m}$		$L = 0,5 \text{ m}$		$L = 1 \text{ m}$	
	Secção 1	Secção 2	Secção 1	Secção 2	Secção 1	Secção 2
Teste 2	47,08 °C	44,89 °C	56,91 °C	54,97 °C	49,19 °C	33,51 °C
Teste 4	38,56 °C	38,88 °C	46,04 °C	37,03 °C	36,87 °C	26,89 °C
Teste 7	41,85 °C	42,36 °C	49,41 °C	47,47 °C	39,71 °C	40,45 °C
Teste 9	42,44 °C	41,38 °C	32,16 °C	46,40 °C	40,56 °C	41,63 °C

Por fim, avaliam-se os testes que apresentam o maior caudal mássico, cuja informação está plasmada nas Tabelas 5.9 e 5.10. Verifica-se que em todas as secções as temperaturas registadas para o PCM estão de acordo com o expetável. Para o caso dos desvios padrão, observa-se que o relativo ao caudal mássico no Teste 5 apresenta um erro padrão face à média superior comparativamente com outros testes. Este fator, tal como referido na análise deste teste (Apêndice A, secção A.4), pode estar associado à sua curta duração (a grande maioria dos ensaios experimentais demora cerca de 100 s a estabilizar os parâmetros). Sendo que este teste tem apenas uma duração de 180 s a estabilização pode não ter ocorrido. Como resultado, o teste selecionado é o Teste 3.

Tabela 5.9: Comparação dos parâmetros para os testes que apresentam o caudal mássico maior.

Teste	\dot{m} [g/s]		T_{entrada} [°C]		T_{ar} [°C]		v_{ar} [m/s]	
	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão
Teste 3	0,25	0,055	14,60	0,292	20,25	0,972	1,01	0,172
Teste 5	0,23	0,138	5,24	0,548	15,01	0,912	1,49	0,242

Tabela 5.10: Comparação das temperaturas do PCM nas diferentes secções para os testes que apresentam o caudal mássico maior.

Teste	$L = 0 \text{ m}$		$L = 0,5 \text{ m}$		$L = 1 \text{ m}$	
	Secção 1	Secção 2	Secção 1	Secção 2	Secção 1	Secção 2
Teste 3	53,76 °C	55,17 °C	59,59 °C	54,31 °C	54,28 °C	51,33 °C
Teste 5	42,61 °C	43,37 °C	50,94 °C	48,09 °C	47,08 °C	43,01 °C

5.4 Análise dos resultados alcançados pelo protótipo virtual face aos resultados experimentais

5.4.1 Resultados do protótipo virtual vs Resultados experimentais - Teste 2

O ensaio experimental 2 teve uma duração de 520 s, um caudal mássico médio de $0,15 \times 10^{-3}$ kg/s (0,009 L/min), uma velocidade média do ar de 0,89 m/s, uma temperatura média do fluido operante à entrada do tubo de 11,03 °C e uma temperatura média do ar de 14,50 °C. Na Figura 5.7 é apresentada a evolução da temperatura da água à saída do tubo para o protótipo virtual (modelo) e para a experiência e na Figura 5.8 a potência instantânea para cada uma das situações.

Neste ensaio experimental, a variação das temperaturas, tanto de entrada do fluido como do ar foram quase nulas, bem como o caudal mássico e a velocidade do ar, o que resulta numa curva de evolução de temperatura da água à saída do tubo e da potência instantânea muito próximas das alcançadas pelo modelo. Procedeu-se, numa primeira fase, para a temperatura da água à saída e para a potência instantânea, ao cálculo da percentagem do erro relativo em cada um dos pontos. Posteriormente, foi calculado, para cada uma destas variáveis, a média da percentagem do erro relativo tendo-se obtido o valor é de 4,98% para a temperatura da água à saída e de 10,97% para potência instantânea. Observa-se que o erro associado à potência instantânea é superior ao da temperatura da água à saída do tubo. Na realidade, atendendo a que o cálculo da potência inclui os valores obtidos para a temperatura da água à saída, consequentemente, para além do erro associado ao caudal, também está incluído o erro devido à temperatura da água à saída. Como resultado, o erro encontrado para a potência instantânea é mais elevado, comparativamente com o da temperatura da água à saída.

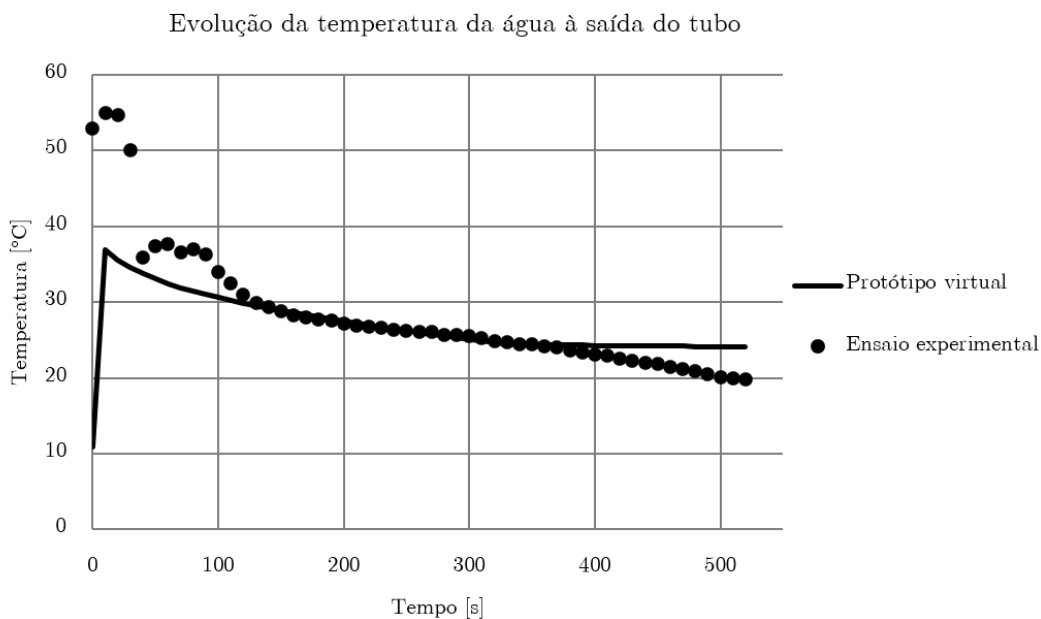


Figura 5.7: Evolução da temperatura da água à saída do tubo para o modelo e para a experiência, Teste 2.

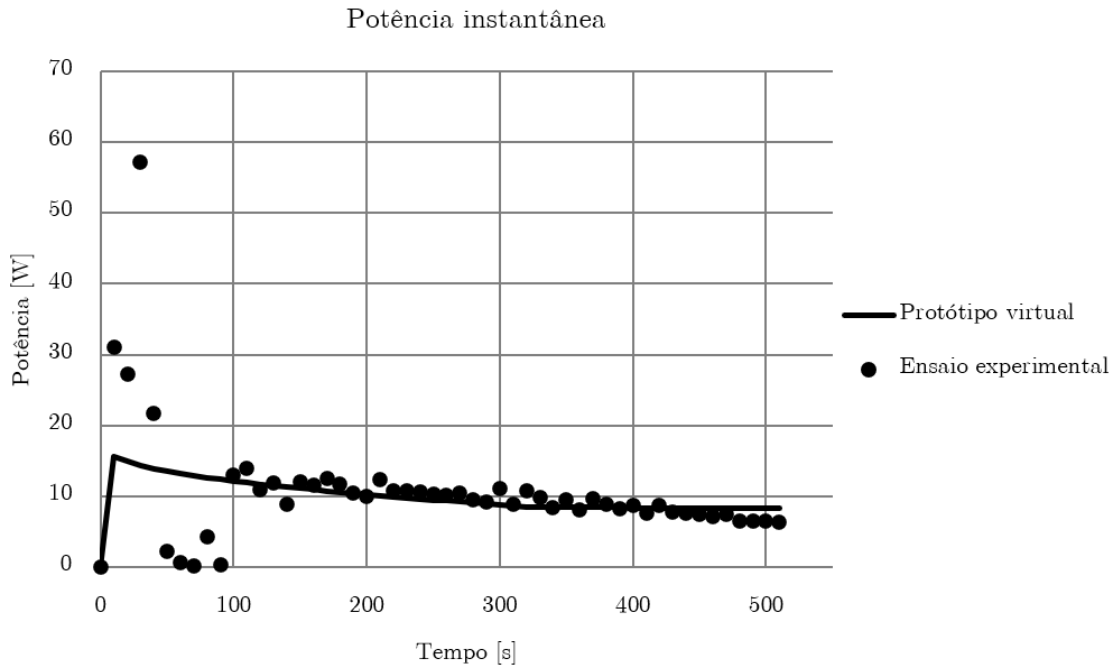


Figura 5.8: Evolução da potência instantânea para o modelo e para a experiência, Teste 2.

5.4.2 Resultados do protótipo virtual vs Resultados experimentais - Teste 3

A experiência 3 durou 630 s, o fluido operante apresentou um caudal mássico médio de $0,25 \times 10^{-3}$ kg/s (0,015 L/min) e uma temperatura média à entrada de $14,60$ °C. Quanto ao ar, este apresentou uma temperatura média de $20,25$ °C e uma velocidade média de $1,01$ m/s. Os gráficos que comparam a evolução da temperatura da água à saída do tubo e a potência instantânea estão representados nas Figuras 5.9 e 5.10, respetivamente.

As curvas de evolução da temperatura da água à saída (Figura 5.9) são muito semelhantes, sendo que a curva do modelo apresenta temperaturas um pouco mais elevadas, cerca de 3 °C, o que, numa primeira análise, indica poder ser uma boa aproximação. Na mesma linha de raciocínio que anteriormente, a média da percentagem do erro relativo calculado para todos os pontos foi de $18,60\%$. Apesar deste erro ser mais elevado, comparativamente com o obtido no teste anterior, pode-se considerar uma boa aproximação, atendendo a que Mehling *et al.* [27] validou um modelo numérico com discrepâncias de temperaturas na mesma ordem de grandeza à aqui encontrada.

Relativamente à potência instantânea (Figura 5.10), os valores alcançados pelo modelo são próximos dos obtidos pela experiência prática. A diferença que se verifica poderá estar relacionada com a diferença observada na temperatura da água à saída do tubo, uma vez que as variáveis estão relacionadas. Para a potência instantânea obteve-se uma média da percentagem do erro relativo de $59,61\%$, o que pode ser explicado pela razão mencionada anteriormente.

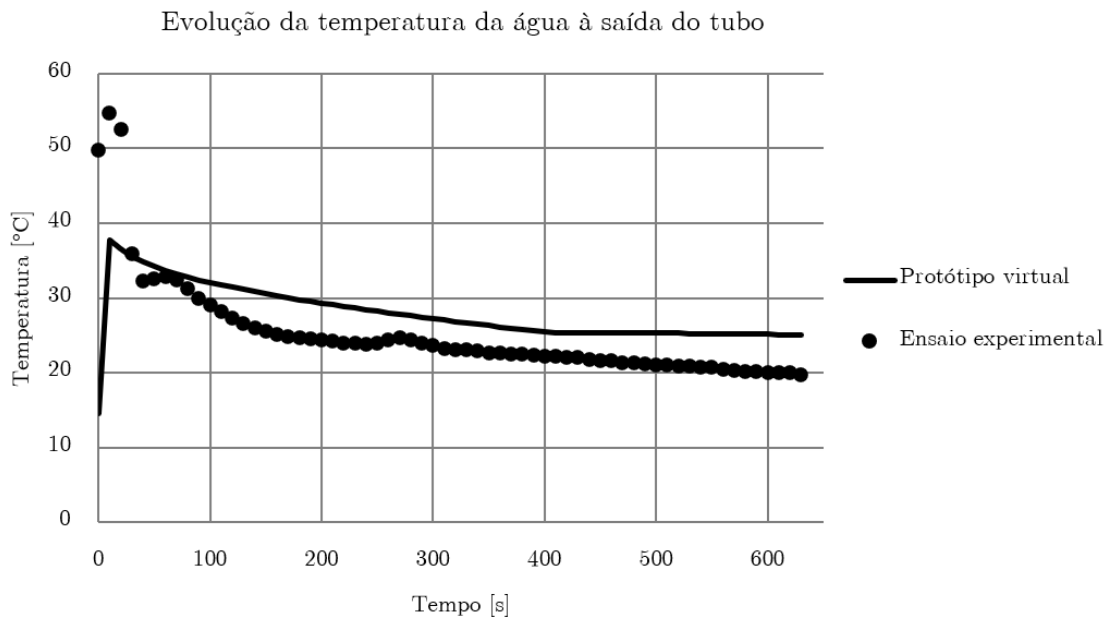


Figura 5.9: Evolução da temperatura da água à saída do tubo para o modelo e para a experiência, Teste 3.

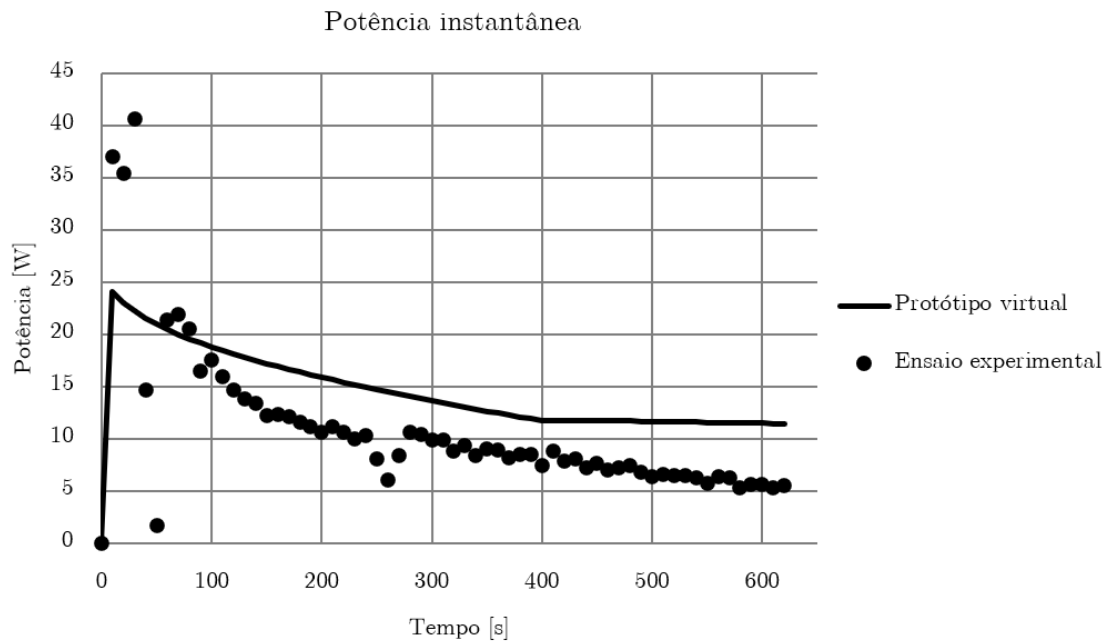


Figura 5.10: Evolução da potência instantânea para o modelo e para a experiência, Teste 3.

5.4.3 Resultados do protótipo virtual vs Resultados experimentais - Teste 6

O teste experimental número 6 teve uma duração de 1040 s, o ar exterior teve uma temperatura média de 18,70 °C e uma velocidade média de 1,48 m/s. Quanto à água, esta apresentou uma temperatura média à entrada do tubo de 10,57 °C e um caudal mássico médio de $0,08 \times 10^{-3}$ kg/s (0,0048 L/min). Os gráficos que representam as curvas da evolução da temperatura da água à saída do tubo e a potência instantânea estão ilustrados nas Figuras 5.11 e 5.12, respetivamente.

Os resultados alcançados pelo modelo para este teste são muito semelhantes aos resultados experimentais. Pode-se assim concluir que para este caso o modelo proporciona bons resultados. Com efeito, para a temperatura da água à saída do tubo obteve-se uma média da percentagem do erro relativo de 9,65% e para a potência instantânea obteve-se 49,27%. Na realidade, a observação das Figuras 5.11 e 5.12 também induz para a afirmação de que a aproximação atingida pelo modelo seja efetiva.

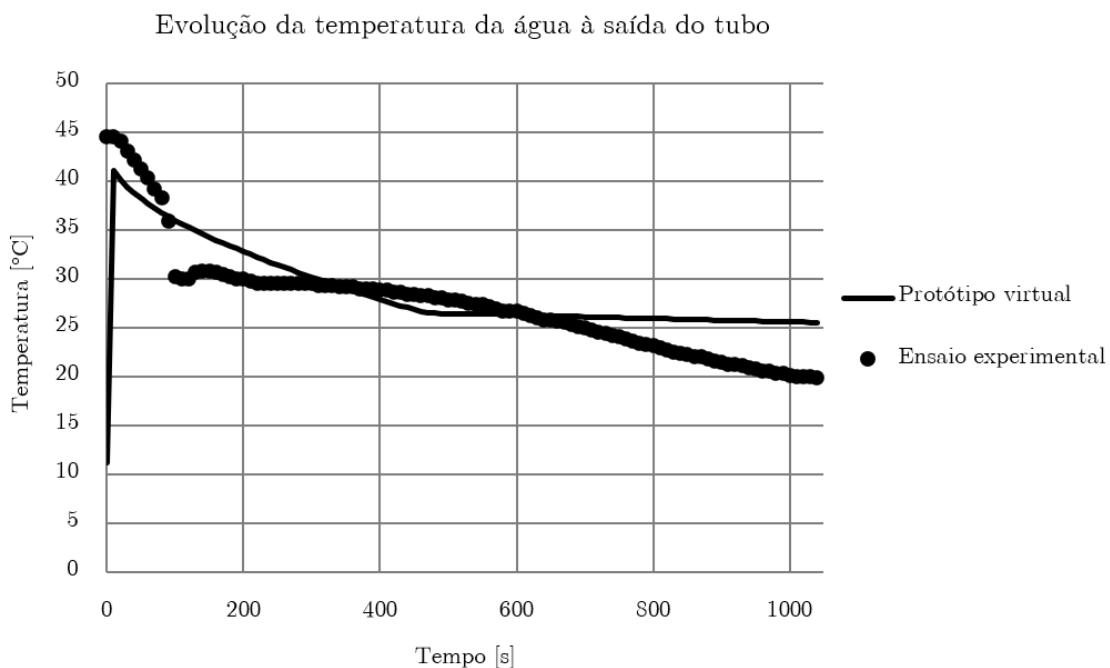


Figura 5.11: Evolução da temperatura da água à saída do tubo para o modelo e para a experiência, Teste 6.

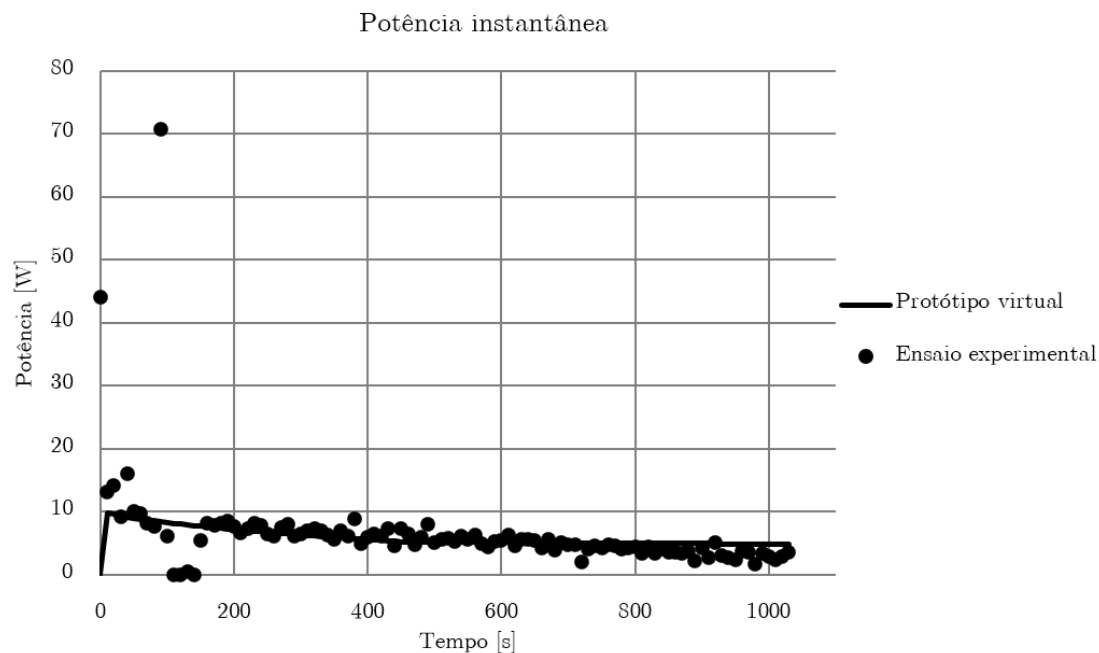


Figura 5.12: Evolução da potência instantânea para o modelo e para a experiência, Teste 6.

5.5 Síntese

Após a comparação do modelo com a experiência realizada por Mendes [43] em diferentes condições, é possível verificar que o modelo produz resultados bastante próximos dos obtidos experimentalmente nos testes selecionados. Algumas divergências que tenham sido verificadas podem estar relacionadas com parâmetros de difícil controle, que são inerentes à prática. Deste modo, considera-se o modelo numérico desenvolvido validado, detendo a robustez necessária para permitir levar a efeito o estudo paramétrico subsequente.

Capítulo 6

Caso de Estudo e Análise Paramétrica

Uma vez validado o modelo numérico/protótipo virtual desenvolvido é possível aplicá-lo a problemas semelhantes. Tal como descrito anteriormente (Capítulo 3), a modelação numérica do protótipo virtual foi realizada tendo como variáveis de entrada o tipo de PCM (ou seja, as suas propriedades termofísicas nas diferentes fases e a sua temperatura de fusão), a condutividade térmica do material que compõe o tubo e o caudal mássico e temperatura de entrada da água; as variáveis de saída são a evolução da temperatura da água à saída, a potência instantânea, a energia total libertada pelo PCM ao longo do ensaio numérico, bem como a sua potência média. Para além destas variáveis de saída, podem ainda ser também definidas a temperatura da água ao longo dos diferentes segmentos e também a evolução da temperatura do PCM longitudinalmente e radialmente, para um certo instante de tempo.

Considerando então todas estas potencialidades e capacidades inerentes ao protótipo virtual e, uma vez que este é capaz de analisar as trocas de calor entre um PCM e um qualquer tubo cilíndrico concêntrico, torna-se necessário seleccionar um caso de estudo em concreto para que se realizar uma análise paramétrica.

6.1 Seleção do caso de estudo

Dado os objetivos da União Europeia para o ano de 2050, tal como já abordado anteriormente, os sistemas AQS representam uma fonte de enorme consumo energético que deve ser examinada. Os sistemas de aquecimento de águas quentes sanitárias apresentam inúmeras limitações que conduzem a um desperdício de água e de energia. O combate a estes desperdícios é um esforço mundial que tem por objetivo alcançar um mundo autossustentável. No sentido de procurar soluções para este problema e tendo em mente algumas das limitações dos PCMs, nomeadamente a sua baixa condutividade térmica, procurou-se uma solução realista para reduzir não só o uso de combustíveis fósseis para o aquecimento de água, mas também para minimizar os custos associados a este aquecimento. Para o efeito, no caso de estudo simulado com o protótipo virtual desta dissertação representa-se um permutador de calor composto por uma serpentina de cobre e PCM carregado entre cada uma das espiras (Figura 6.1). Este permutador tem como objetivo auxiliar um reservatório de armazenamento de água quente proveniente de um

painel solar térmico. Assim, quando o reservatório de água quente já tiver atingido a sua capacidade máxima e o painel solar térmico ainda tiver capacidade para produzir água quente, esta é reencaminhada para o permutador, de forma a fundir o PCM. Quando o reservatório estiver a ser usado, e caso o painel solar térmico não seja capaz de produzir água quente, o permutador pode ser usado para pré-aquecimento da água que vai para o reservatório. Neste caso, o uso de PCMs reduzirá o consumo total de energia.

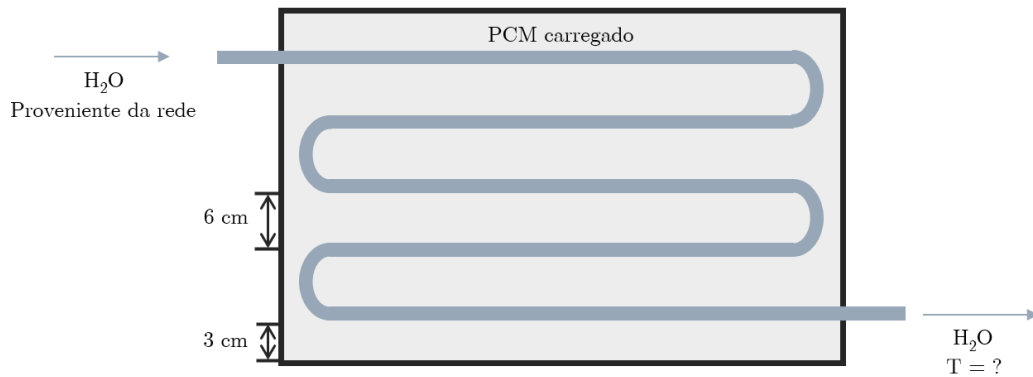


Figura 6.1: Ilustração do permutador de calor.

Numa primeira fase e tendo o objetivo de simplificar a modelação numérica, considera-se a metade do PCM entre cada espira uma superfície adiabática, a representação da superfície adiabática está ilustrada na Figura 6.2.

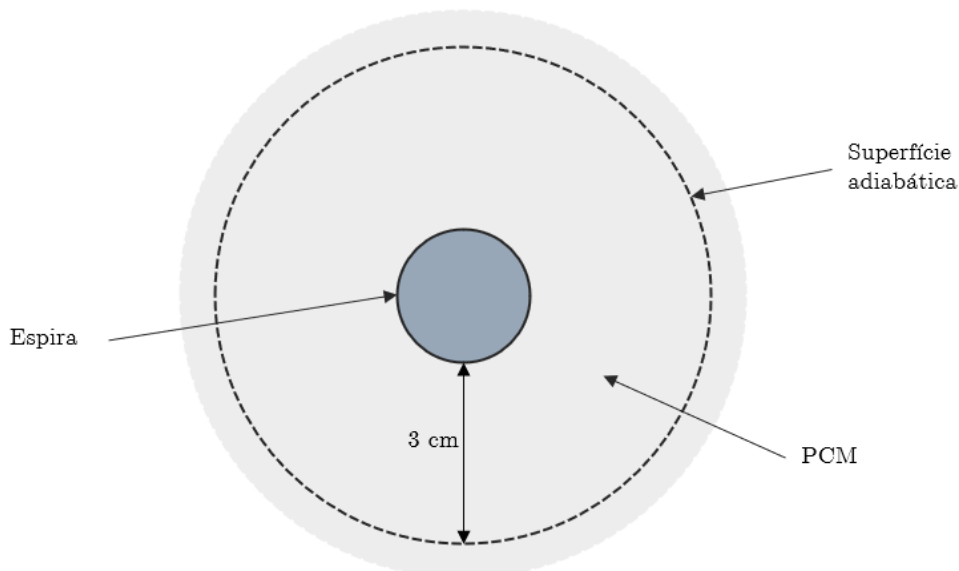


Figura 6.2: Representação da superfície adiabática.

Esta aproximação baseia-se na teoria do sólido semi-infinito, que “fornece uma idealização útil para muitos problemas práticos” [25]. Neste caso o PCM pode ser aproximado a um sólido semi-infinito por ter uma condutividade térmica muito reduzida. Para que esta aproximação seja válida, é necessário comprovar que a superfície em questão não irá sofrer alterações na sua temperatura durante o intervalo de tempo do ensaio. Assim, tendo em conta o propósito deste estudo (pré-aquecer a água para uso doméstico) o intervalo de tempo considerado são 20 min. Existem três casos de condições superficiais para avaliar a variação de temperatura ao longo do tempo num sólido semi-infinito. Neste caso em concreto trata-se da primeira, temperatura na superfície constante. A Equação 6.1 representa a solução analítica para este caso.

$$\frac{T(x, t) - T_s}{T_i - T_s} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (6.1)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{k_{\text{PCM}}}{\rho_{\text{PCM}} \cdot c_{\text{PCM}}}$$

Pretende-se determinar x , assegurando $T(x, t) = T_i$, com $t = 20\text{min}$. A função erf representa a *função erro de Gauss*.

O valor da *função erro de Gauss* que permite obter o valor de 1 (valor da fração da esquerda, na Equação 6.1) é aproximadamente 3. Assim, usando as propriedades termofísicas do PCM utilizado no capítulo anterior (ver Tabela 5.2) o valor obtido para x é de 2,65 cm. No entanto, com o intuito de assegurar que a parede será adiabática para outro PCM, o valor usado será 3 cm. Como consequência, a distância entre cada uma das espiras deve ser de 6 cm (tal como ilustrado na Figura 6.1).

Para que esta superfície possa ser corretamente simulada é necessária a alteração da condição fronteira no modelo descrito no Capítulo 3, Subsecção 3.1.2, passando assim a condição fronteira no exterior a ser uma superfície adiabática. As trocas de calor entre o PCM e o fluido para esta condição fronteira encontram-se ilustradas na Figura 6.3.

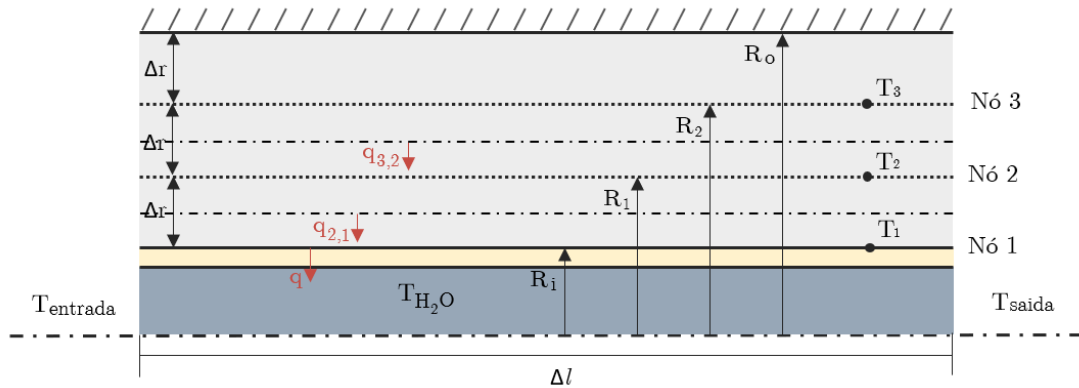


Figura 6.3: Representação das trocas de calor entre as várias camadas no segmento da serpentina, para um condição fronteira no exterior adiabática.

6.2 Análise paramétrica

Nesta secção são descritos os ensaios numéricos realizados e os resultados alcançados por cada um deles. Tendo por objetivo determinar a melhor solução para o permutador de calor, estudaram-se, em primeiro lugar, a geometria da serpentina, o caudal mássico do fluido operante e o PCM, ou seja, serão analisados diferentes tipos de PCMs. Após determinadas as melhores soluções resultantes dos estudos atrás mencionados, passa-se ao estudo das diferentes propriedades termofísicas do PCM, determinando qual é a mais relevante para a maximização da transferência de calor.

Em todos os estudos foram avaliadas duas temperaturas distintas da água à entrada da serpentina. Isto porque, a água pode apresentar diferentes temperaturas, não só podem depender da estação do ano, como também da região e do país. Neste quadro de atuação, serão avaliadas duas temperaturas da água à entrada da serpentina, uma temperatura de 10 °C e de 15 °C. Acresce ainda referir que, em cada teste avaliaram-se também outros parâmetros de forma a robustecer as conclusões obtidas.

6.2.1 Estudo da geometria da serpentina

O estudo da geometria da serpentina teve por base o mencionado no estado de arte (Capítulo 2, Secção 2.13), onde se verificaram quais as dimensões usuais de uma serpentina presente num permutador de calor. As aplicações estudadas anteriormente tratavam de coletores e painéis solares, o que não é o caso aqui presente. De forma a obstar a este problema, estudaram-se também outras dimensões standard do fabricante *Wednesbury Copper Tubes* [46]. O material que compõe a serpentina é o cobre, uma vez que este é o material que, geralmente, está presente nestes sistemas. Como resultado de toda esta pesquisa, ficou estabelecido o estudo de seis geometrias diferentes, com o objetivo de avaliar qual é a que conduz a uma maior transferência de calor. As dimensões de cada serpentina estão apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Dimensões da serpentina em cada um dos testes.

Teste	1	2	3	4	5	6
Diâmetro exterior [mm]	10	15	22	35	42	54
Espessura [mm]	0,7	1	1,2	1,2	1,2	1,2
Comprimento [m]	2	2	2	2	2	2

Nos ensaios numéricos (testes) mantiveram-se as propriedades do PCM e o caudal mássico da água, mais concretamente, o PCM PureTemp35 (PCM utilizado na validação do método numérico) e o caudal mássico de 5 L/min (0,083 kg/s). As propriedades do PCM utilizadas neste estudo estão apresentadas na Tabela 6.2. A duração do ensaio foi de 900 s (15 min). Esta escolha baseou-se no propósito do caso de estudo, uma vez que se está a avaliar o permutador para auxiliar um sistema AQS e considera-se que o tempo ideal para tomar banho é de 10 min. Na Tabela 6.3 estão apresentadas as resistências térmicas presentes em cada um dos ensaios.

Tabela 6.2: Propriedades do PCM PureTemp35.

Temperatura de fusão	35 °C
Calor específico líquido ($c_{p_l,PCM}$)	2,72 kJ/(kg · K)
Calor específico sólido ($c_{p_s,PCM}$)	2,44 kJ/(kg · K)
Calor latente de fusão (L_{PCM})	181,00 kJ/kg
Condutividade térmica líquida ($k_{l,PCM}$)	0,15 W/(m · K)
Condutividade térmica sólida ($k_{s,PCM}$)	0,25 W/(m · K)
Densidade líquido ($\rho_{l,PCM}$)	850,00 kg/m ³
Densidade sólido ($\rho_{s,PCM}$)	940,00 kg/m ³

Tabela 6.3: Resistências térmicas para cada uma das geometrias em estudo.

Teste	1	2	3	4	5	6
$R_{cond} \times 10^{-6}$ [K/W]	1,663	2,365	2,903	2,969	2,987	3,008
$R_{conv} \times 10^{-3}$ [K/W]	0,382	0,803	1,681	4,200	5,639	23,576
$R_{total} \times 10^{-3}$ [K/W]	0,383	0,805	1,684	4,202	5,643	23,578

Os gráficos que comparam as curvas temperatura da água à saída da serpentina para cada um dos testes estão apresentados na Figura 6.4. Na Figura 6.4a é apresentado o gráfico que compara as curvas de cada um dos testes para uma temperatura da água à entrada da serpentina de 10 °C e na Figura 6.4b é apresentado o mesmo gráfico mas para uma temperatura da água à entrada da serpentina de 15 °C. Relativamente à potência instantânea, na Figura 6.5 estão apresentados dois gráficos que a comparam, para cada um dos testes realizados, a evolução da potência com o tempo para duas temperaturas de entrada de água na serpentina.

Na Tabela 6.4 apresentam-se, para cada uma das temperaturas do fluido à entrada da serpentina e para cada um dos ensaios numéricos, a energia total libertada (E_{lib}) pelo PCM durante o intervalo de tempo estudado e a potência média (P_{med}). A evolução cumulativa da energia libertada pelo PCM, ou seja, a energia acumulada pela água, está apresentada nas Figuras C.1 e C.2, Anexo C.

Analisando então os quatro gráficos (Figuras 6.4a, 6.4b, 6.5a e 6.5b), verifica-se que para a temperatura de entrada da água de 10 °C são os diâmetros de 35 mm e de 42 mm que alcançam tanto para as temperaturas da água à saída como para as potências valores mais elevados. Quanto à temperatura de entrada da água de 15 °C é possível verificar que para além desses dois diâmetros do tubo, o diâmetro de 22 mm atinge também valores elevados ao longo do tempo. No entanto, como é necessário encontrar uma solução que seja favorável às duas temperaturas de entrada estudadas, o diâmetro de 22 mm é excluído. De entre os outros dois diâmetros verifica-se que o que produz melhores resultados para ambas as temperaturas de entrada é o de 35 mm. Efetivamente, conjugando

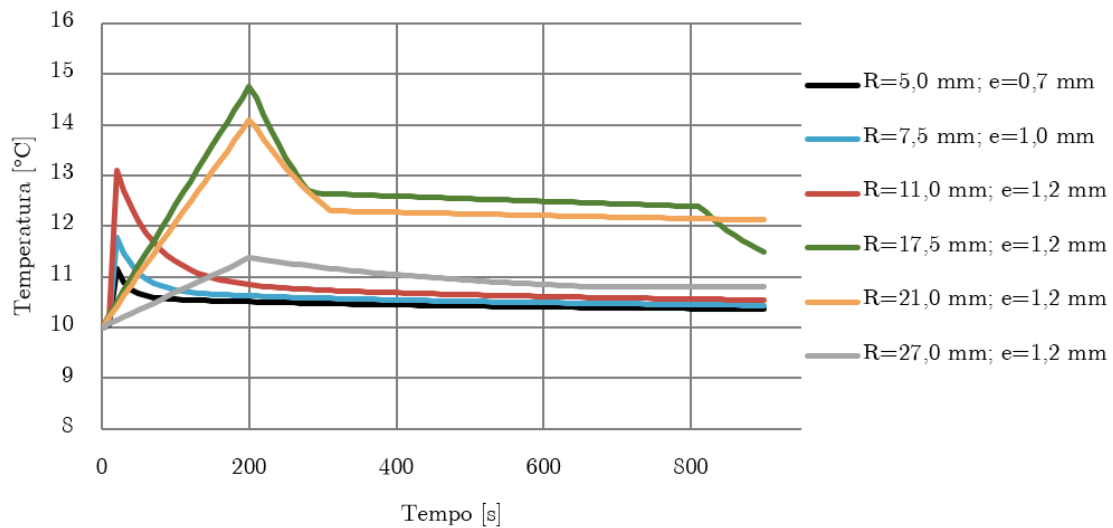
estes resultados com a observação da Tabela 6.4, verifica-se que este diâmetro (Teste 4), para uma temperatura de entrada da água de 15 °C, atinge o maior valor de energia libertada pelo PCM e conseqüentemente, também o maior valor para a potência média. No respeitante à temperatura de entrada de 10 °C, os maiores valor de energia libertada e de potência média máxima foram verificadas no Teste 5. Contudo, a geometria estudada no Teste 5 resulta numa energia e potência muito mais baixas para a temperatura de entrada de 15 °C quando comparadas com o Teste 4 (cerca de menos 50 kJ para a energia libertada e também menos de 50 W para a potência média), enquanto que quando comparado o Teste 4 com o 5 para uma temperatura de entrada de 10 °C a diferença entre estes é bastante menor (cerca de menos 15 kJ para a energia libertada e também menos 15 W para a potência média).

Assim, e tendo em consideração todos estes resultados, a geometria selecionada é a do Teste 4 - diâmetro de 35 mm, espessura da parede do tubo de 1,2 mm e comprimento do tubo de 2 m. Este resultado representa o compromisso entre uma maior área para a transferência de calor e uma maior turbulência. Pretende-se com isto dizer que os tubos com maior diâmetro têm uma maior área, o que implica uma maior transferência de calor. Porém, o facto de ter uma maior área para um mesmo caudal faz com que o escoamento se torne menos turbulento o que torna a resistência térmica superior, enquanto que num menor diâmetro verifica-se o contrário, isto é, menor área para a transferência de calor mas uma maior turbulência no escoamento.

Tabela 6.4: Energia total e potência média libertada pelo PCM para cada uma das geometrias em estudo.

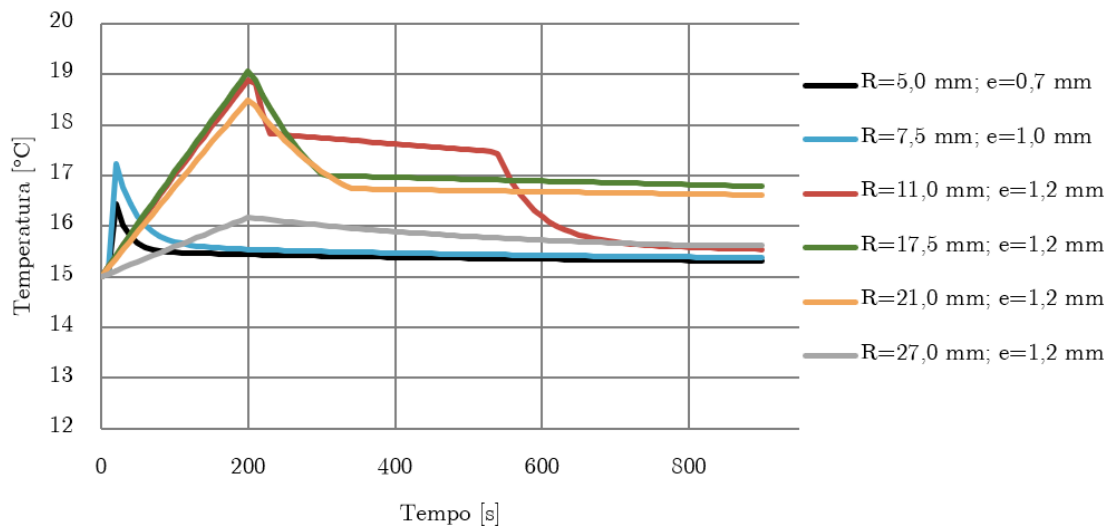
Teste	E_{lib} [kJ]		P_{med} [W]	
	10 °C	15 °C	10 °C	15 °C
1	143,12	126,06	158,85	139,01
2	180,60	163,52	200,45	181,49
3	251,69	452,73	279,35	502,47
4	691,27	601,89	767,22	668,02
5	705,89	552,72	783,45	613,46
6	286,30	235,61	317,76	261,50

Temperatura da água à saída da serpentina, para uma temperatura da água à entrada de 10 °C



(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.

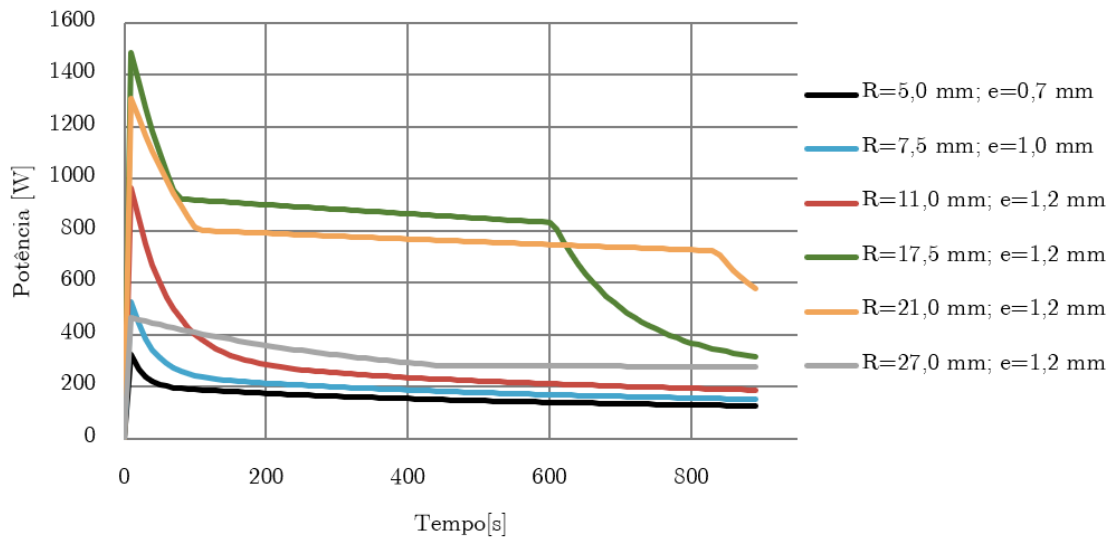
Temperatura da água à saída da serpentina, para uma temperatura da água à entrada de 15 °C



(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

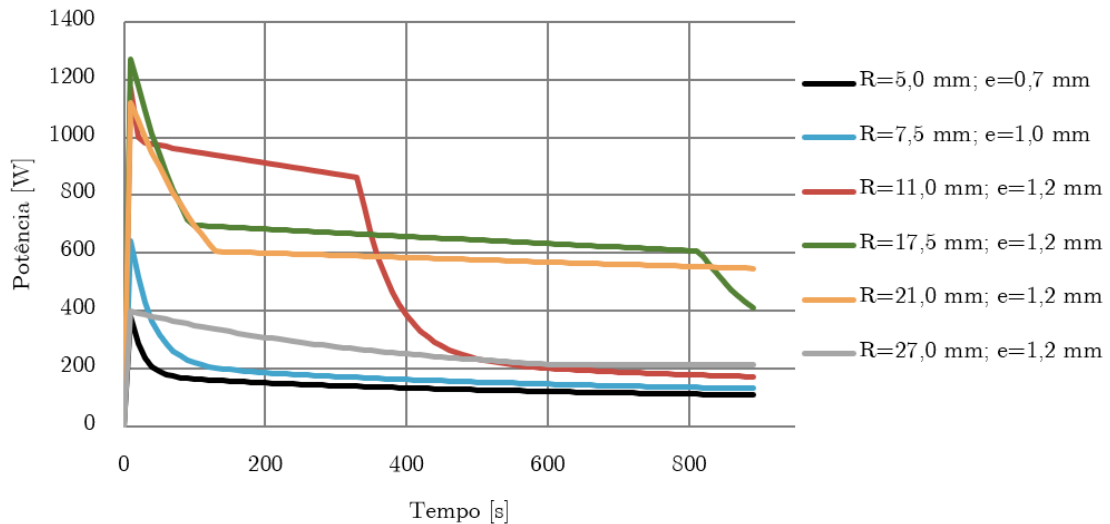
Figura 6.4: Temperatura da água à saída da serpentina para cada uma das geometrias em estudo.

Potência instantânea, para uma temperatura da água à entrada da serpentina de 10 °C



(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.

Potência instantânea, para uma temperatura da água à entrada da serpentina de 15 °C



(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

Figura 6.5: Potência instantânea para cada uma das geometrias em estudo.

6.2.2 Estudo do caudal mássico do fluido operante

Esta subsecção tem por objetivo avaliar de que forma o caudal mássico do fluido operante influencia a transferência de calor do PCM para este. Neste contexto, avaliaram-se os caudais mais comuns num sistema de AQS. Assim, realizou-se uma pesquisa para determinar qual eram esses caudais. Nesta pesquisa chegou-se à conclusão que o caudal depende não só do gosto pessoal do utilizador, mas também do tipo de função (lavar a louça, banho de chuveiro, banho de banheira, entre outros) [47]. Foram então estudados seis caudais distintos - 5 L/min, 7 L/min, 9 L/min, 11 L/min, 13 L/min e 15 L/min [47].

Os ensaios numéricos realizados tiveram todos as mesmas dimensões para a serpentina, com a geometria selecionada na subsecção 6.2.2 (diâmetro de 35 mm, espessura de 1,2 mm e um comprimento de 2 m), e as mesmas propriedades termofísicas do PCM, sendo que o PCM selecionado foi o mesmo que no estudo anterior (Tabela 6.7). Tal como anteriormente, todos os ensaios tiveram uma duração de 900 s.

Na Figura 6.6 estão apresentados dois gráficos, a e b, que avaliam a temperatura da água à saída para cada um dos caudais em estudo, para temperaturas de entrada da água na serpentina de 10 °C e 15 °C, respetivamente. Paralelamente, os gráficos apresentados na Figura 6.7 ilustram as curvas da potência instantânea obtidas em cada um dos casos aqui em estudo. A Figura 6.7a ilustra o gráfico que compara as curvas de cada um dos caudais, para uma temperatura da água à entrada da serpentina de 10 °C, enquanto que a Figura 6.7b é relativa a uma temperatura de 15 °C. A Tabela 6.5 apresenta os valores obtidos para a energia total libertada pelo PCM e para a sua potência média para cada um dos casos. Novamente, a evolução da energia libertada encontra-se nas Figuras C.3 e C.4, Anexo C.

Considerando os quatro gráficos (Figuras 6.6a, 6.6b, 6.7a e 6.7b) verifica-se que, no que diz respeito à temperatura da água à saída da serpentina, para ambas as temperaturas de entrada, é o caudal de 5 L/min que atinge os valores mais elevados para a água à saída. Quanto aos gráficos que avaliam a potência instantânea, as curvas de cada um dos caudais divergem bastante entre as diferentes temperaturas de entrada. Por exemplo, para os caudais de 13 L/min e 15 L/min quando a temperatura de entrada da água é de 10 °C, estes apresentam as curvas com valores mais baixos de potência e quando a temperatura de entrada da água é de 15 °C apresentam as curvas com valores inicialmente mais elevados, decrescendo, depois, drasticamente. Isto pode ser justificado considerando que para a temperatura de entrada de 15 °C as curvas para estes caudais são semelhantes às restantes o que, aliado ao elevado caudal, conduz a uma maior potência instantânea.

Importa referir que a potência instantânea é obtida através da Equação 6.2, o que conduz a que os caudais mais elevados possam atingir potências instantâneas também mais elevadas, apesar da diferença de temperaturas ser maior para o caudal de 5 L/min. Isto é também o que origina que a energia libertada e potência média sejam também mais elevadas para esses caudais. Deve-se também notar que, no que à potência instantânea diz respeito, as curvas que correspondem ao caudal selecionado são as que se mantêm constantes durante mais tempo e as que apresentam também um decréscimo mais tardio, reforçando assim a escolha efetuada. Tendo em consideração tudo o anteriormente refe-

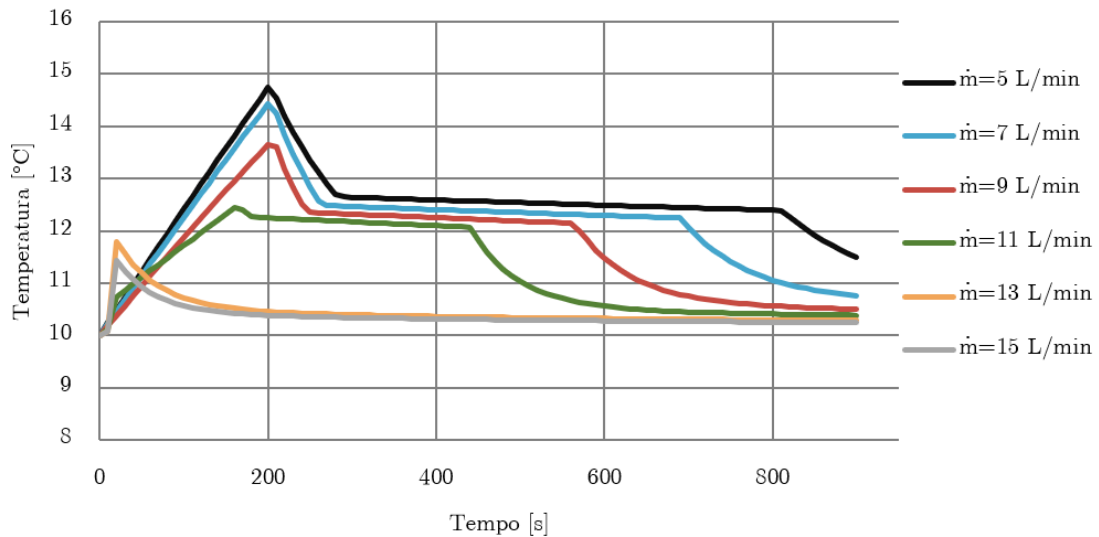
rido, e, apesar de o caudal para este tipo de aplicações não poder ser único, nos testes subsequentes o caudal utilizado será o caudal de 5 L/min.

$$P_{ins} = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} \cdot (T_{saída} - T_{entrada}) \quad (6.2)$$

Tabela 6.5: Energia total e potência média libertada pelo PCM para cada um dos caudais em estudo.

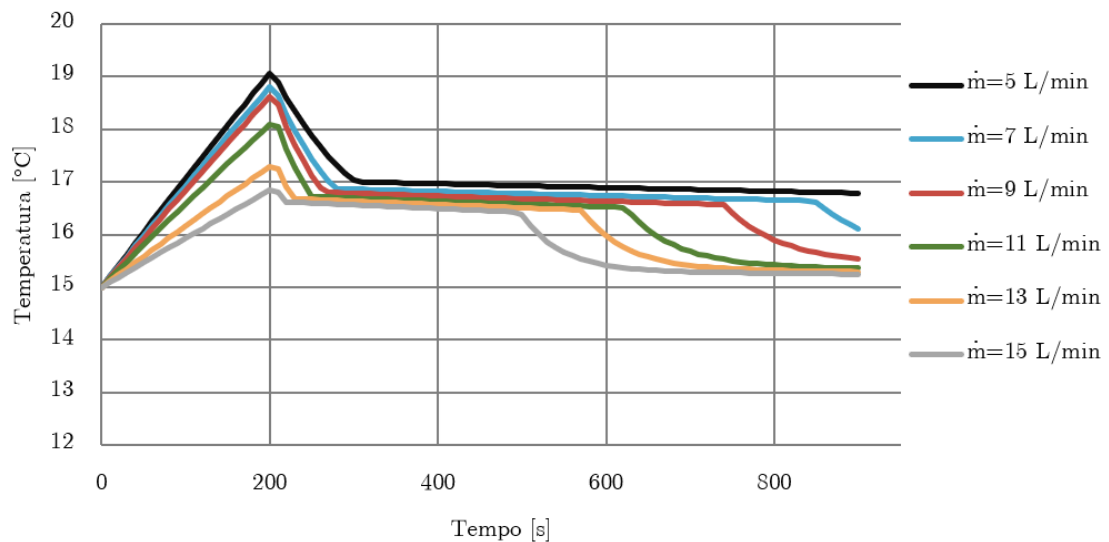
Caudal mássico	E _{lib} [kJ]		P _{med} [W]	
	10 °C	15 °C	10 °C	15 °C
5 [L/min]	691,27	601,89	767,22	668,02
7 [L/min]	736,65	654,21	817,60	726,09
9 [L/min]	721,30	697,57	800,57	774,21
11 [L/min]	686,54	678,98	761,98	753,58
13 [L/min]	357,58	683,97	396,54	759,13
15 [L/min]	345,73	647,81	383,72	718,99

Temperatura da água à saída da serpentina, para uma temperatura da água à entrada de 10 °C



(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.

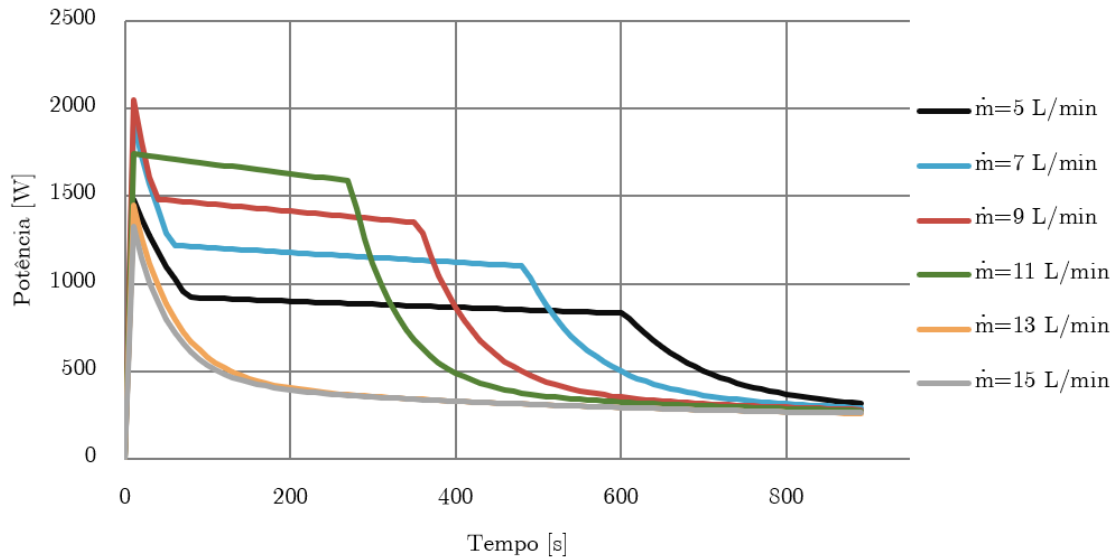
Temperatura da água à saída da serpentina, para uma temperatura da água à entrada de 15 °C



(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

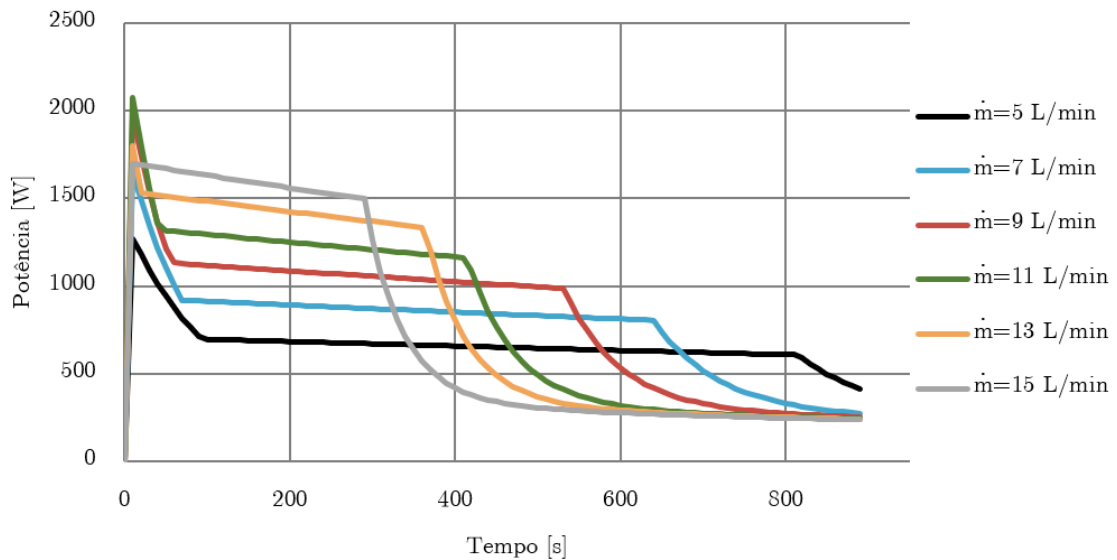
Figura 6.6: Temperatura da água à saída da serpentina para cada um dos caudais em estudo.

Potência instantânea, para uma temperatura da água à entrada da serpentina de 10 °C



(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.

Potência instantânea, para uma temperatura da água à entrada da serpentina de 15 °C



(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

Figura 6.7: Potência instantânea para cada um dos caudais em estudo.

6.2.3 Estudo para determinar o melhor PCM

O estudo de diferentes PCMs tem por objetivo avaliar de que forma estes influenciam a transferência de calor e selecionar o que alcança a maior temperatura da água à saída da serpentina e maior potência instantânea. Os PCMs selecionados são da empresa PureTemp, dado que a empresa disponibiliza fichas técnicas de cada material de mudança de fase com grande detalhe e a sua base de PCMs é bastante extensa no que diz respeito às temperaturas de fusão. Estudaram-se então seis PCMs diferentes e as suas fichas técnicas encontram-se no Apêndice B. Os PCMs selecionados têm temperaturas de fusão de 15 °C, 18 °C, 20 °C, 23 °C, 25 °C e 27 °C, sendo que as características de cada um estão apresentadas nas Figuras B.1, B.2, B.3, B.4, B.5 e B.6, respetivamente.

Em cada um dos ensaios numéricos a serpentina teve a geometria selecionada (diâmetro de 35 mm, espessura da parede do tubo de 1,2 mm e comprimento do tubo de 2 m) e o fluido operante teve um caudal mássico de 5 L/min, caudal selecionado. Quanto à duração do ensaio, tal como nos estudos anteriores, foi de 900 s. A temperatura inicial do PCM varia entre 30 °C e 45 °C de acordo com o PCM em estudo.

Os gráficos a e b da Figura 6.8 comparam as curvas da temperatura da água à saída da serpentina para cada um dos PCMs em estudo, sendo que o gráfico a corresponde a uma temperatura da água à entrada da serpentina de 10 °C e o gráfico b corresponde a uma temperatura de entrada de 15 °C. Seguindo a mesma metodologia, a Figura 6.9 apresenta os dois gráficos que ilustram as curvas da potência instantânea para cada um dos PCMs. Destes dois gráficos, o primeiro (gráfico a) diz respeito a uma temperatura da água à entrada da serpentina de 10 °C enquanto que o segundo corresponde a uma temperatura de entrada de 15 °C.

A Tabela 6.6 é relativa aos valores alcançados para a energia total libertada pelo PCM e também para a sua potência média. Da mesma forma que nas subsecções anteriores, a evolução da quantidade de energia libertada pelo PCM está ilustrada nas Figuras C.5 e C.6, que se encontram no Anexo C.

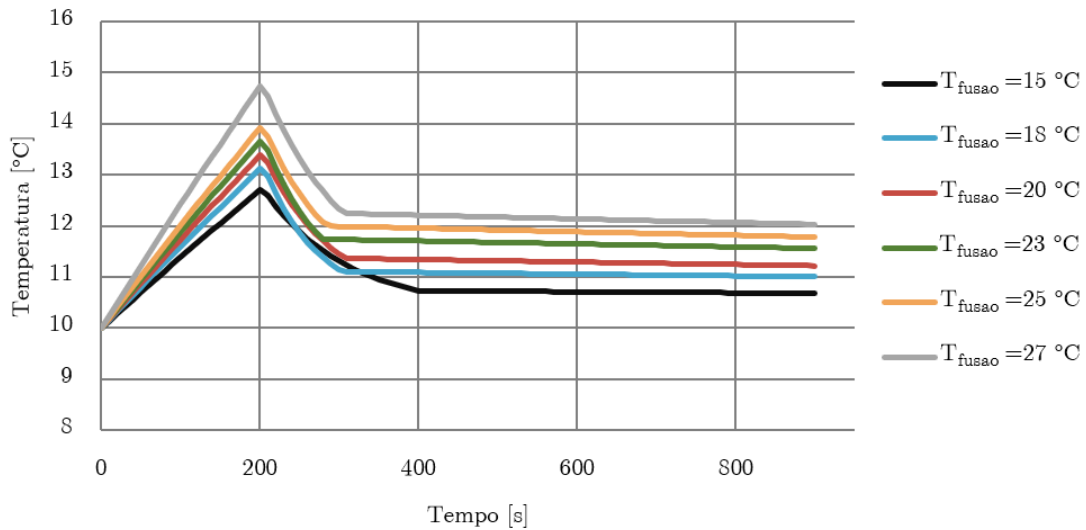
Tabela 6.6: Energia total e potência média libertada pelo PCM, para cada um dos PCMs em estudo.

PCMs - T_{fusao}	E_{lib} [kJ]		P_{med} [W]	
	10 °C	15 °C	10 °C	15 °C
15 [°C]	264,17	137,81	293,20	152,96
18 [°C]	351,26	183,33	389,86	203,48
20 [°C]	425,24	254,48	471,97	282,44
23 [°C]	528,54	351,72	586,62	390,36
25 [°C]	587,49	426,69	652,04	473,58
27 [°C]	683,08	519,54	758,12	576,63

Avaliando as Figuras 6.8a, 6.8b, 6.9a e 6.9b e também a Tabela 6.6, é possível constatar que em todos os casos (tanto para ambas as temperaturas de entrada como para os dois parâmetros que estão a ser avaliados), o PCM que apresenta uma temperatura de fusão de 27 °C é o que resulta numa potência instantânea mais elevada e numa temperatura da água à saída também mais elevada. Deste modo, conclui-se que este deve ser o PCM selecionado. Na realidade, da análise das propriedades de todos os PCMs

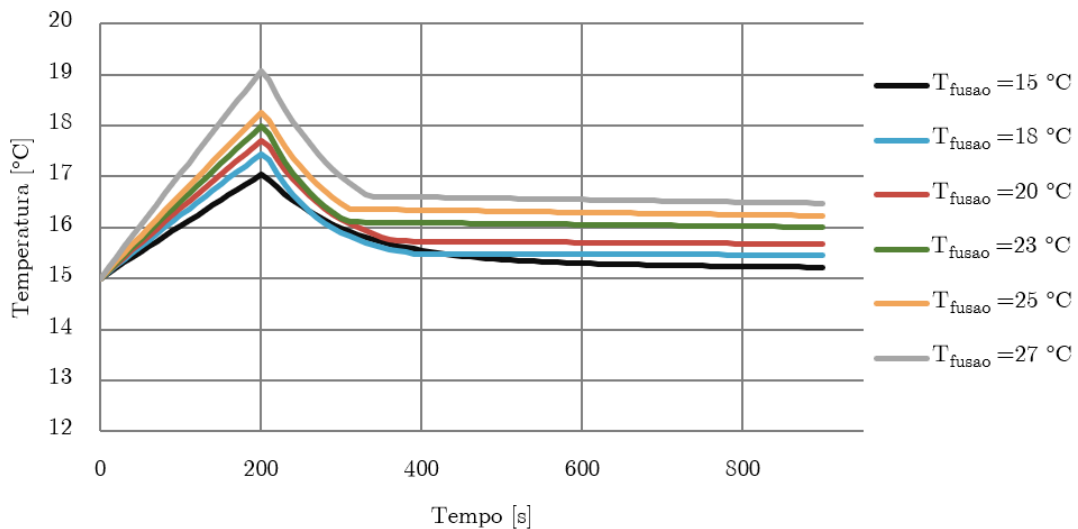
aqui estudados, Tabela 6.7, observa-se que o PCM que apresenta uma temperatura de fusão de 27 °C é o que deveria ser selecionado, atendendo a que é este que evidencia a combinação entre um maior valor de condutividade térmica e de calor específico, em ambas as fase, bem como um maior calor latente de fusão.

Temperatura da água à saída da serpentina, para uma temperatura da água à entrada de 10 °C



(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.

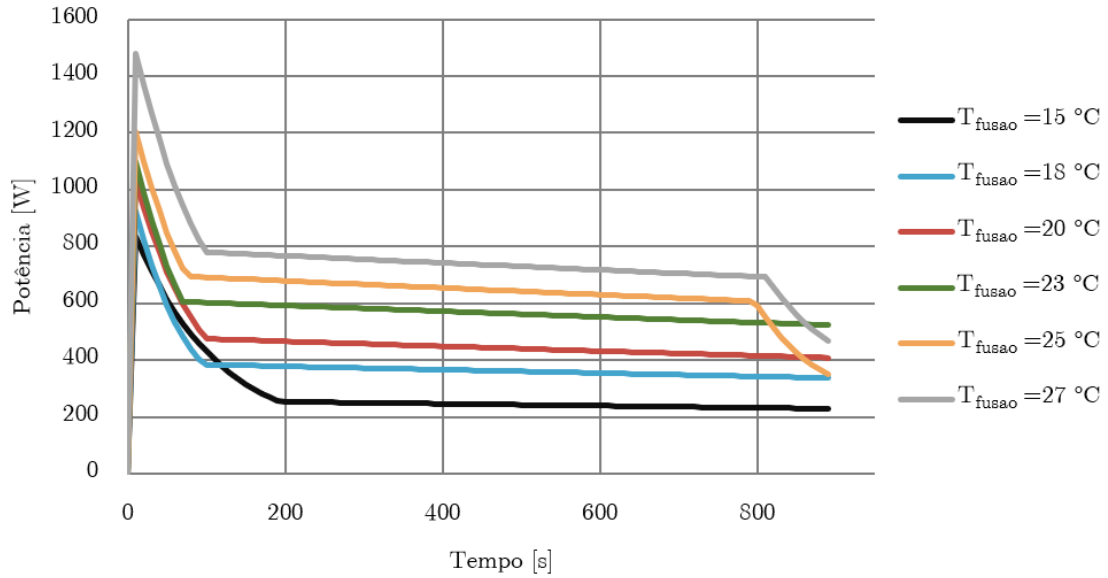
Temperatura da água à saída da serpentina, para uma temperatura da água à entrada de 15 °C



(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

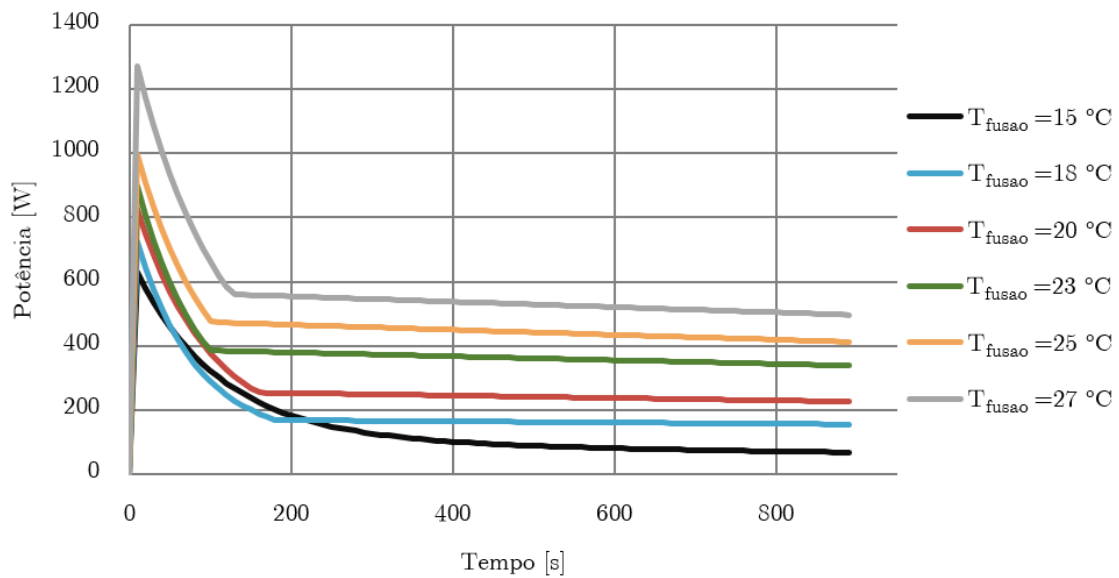
Figura 6.8: Temperatura da água à saída da serpentina para cada um dos PCMs em estudo.

Potência instantânea, para uma temperatura da água à entrada da serpentina de 10 °C



(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.

Potência instantânea, para uma temperatura da água à entrada da serpentina de 15 °C



(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

Figura 6.9: Potência instantânea para cada um dos PCMs em estudo.

Tabela 6.7: Comparação das propriedades termofísicas dos PCMs em estudo.

PCMs - T_{fusao}	15	18	20	23	25	27
c_{pl} [kJ/(kg · K)]	2,56	1,74	2,15	1,99	2,29	2,63
c_{ps} [kJ/(kg · K)]	2,25	1,47	2,07	1,84	1,99	2,46
k_l [W/(m · K)]	0,15	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15
k_s [W/(m · K)]	0,25	0,25	0,23	0,25	0,25	0,25
L_{fusao} [kJ/kg]	182	192	171	201	187	202

Uma vez determinado o PCM que origina, para o caso em estudo, os valores mais elevados para a temperatura de água à saída, potência instantânea e média, e energia libertada mais elevados para o caso de estudo (PCM PureTemp27, ou seja, PCM que apresenta uma temperatura de mudança de fase de 27 °C), é possível avaliar a evolução da temperatura da água dentro do tubo e em diferentes instantes de tempo. A Figura 6.10 apresenta os resultados obtidos para a temperatura da água à entrada de 10 °C, também foi realizado o estudo para a temperatura da água à entrada de 15 °C, sendo os resultados semelhantes, por este motivo optou-se por não incluir aqui o gráfico. Da análise da Figura 6.10, pode-se afirmar que a temperatura da água vai aumentando ligeiramente em cada segmento. Também é possível observar que com o aumento do tempo o aumento de temperatura não é tão evidente. Esta observação poderá estar relacionada com o facto do PCM já ter libertado grande parte da sua energia nos instantes iniciais.

Temperatura da água à saída de cada segmento do tubo, para uma temperatura da água à entrada de 10°C

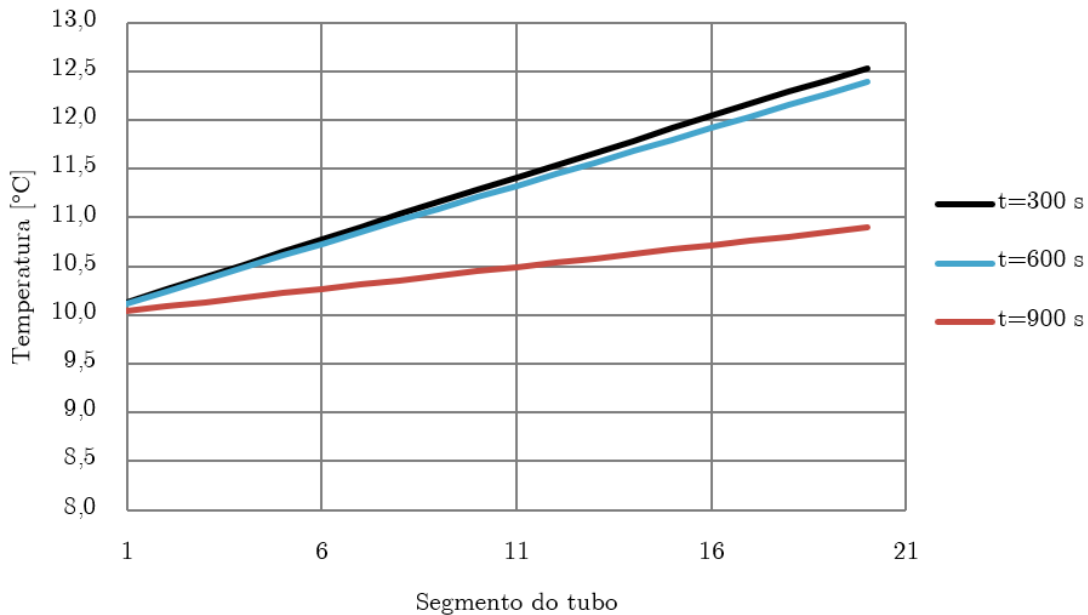


Figura 6.10: Temperatura da água em cada segmento, em diferentes instantes de tempo, para uma temperatura de entrada do fluido de 10 °C.

A avaliação que foi feita anteriormente para a água é também possível ser feita para o PCM. Assim, a evolução da temperatura no centro do PCM ao longo do comprimento do tubo, e para diferentes instantes de tempo, encontra-se na Figura 6.11. Neste caso, o centro do PCM ainda se encontra em estado líquido. Este comportamento pode ser atribuído ao facto das primeiras camadas do PCM (as que se encontram mais próximas do escoamento), estarem já solidificadas e, por esse motivo, constituírem uma barreira à condução do calor, principalmente, devido à sua baixa condutividade térmica.

Temperatura no centro do PCM em cada segmento do tubo, para uma temperatura da água à entrada de 10°C

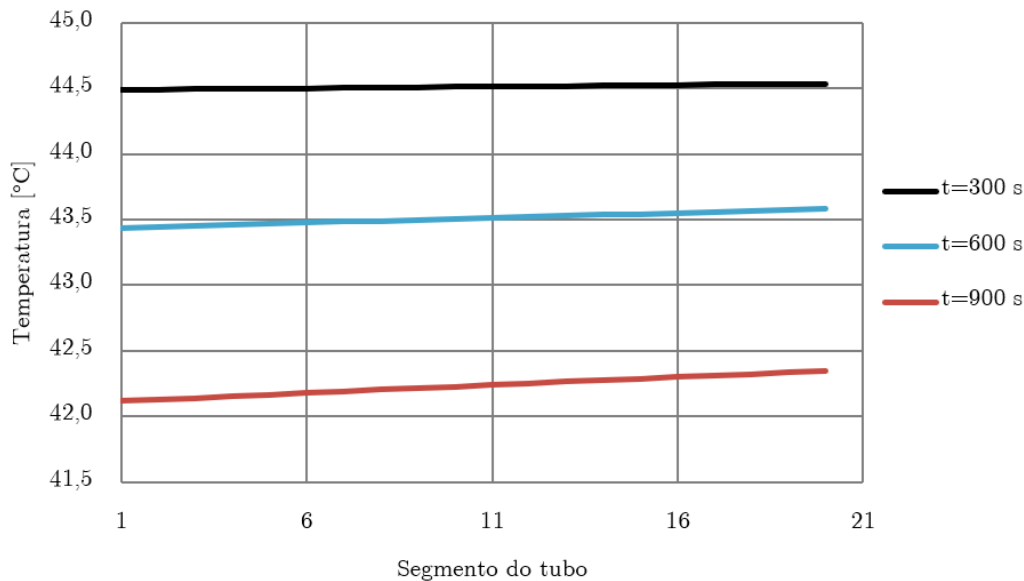


Figura 6.11: Temperatura no centro do PCM em cada segmento, em diferentes instantes de tempo, para uma temperatura de entrada do fluido de 10 °C.

6.2.4 Estudo de diferentes propriedades termofísicas do PCM

Nesta subsecção serão estudadas individualmente várias propriedades termofísicas, podendo assim determinar as mais relevantes na transferência de calor entre o PCM e um fluido operante.

Para a concretização deste objetivo, realizaram-se duas experiências distintas. Na primeira aumentou-se, para cada uma das propriedades do PCM (condutividade térmica, calor específico e calor latente de solidificação) 10% do seu valor. Na segunda considerou-se um aumento de 35%.

Em cada um dos estudos manteve-se a geometria da serpentina, o caudal mássico e as propriedades do PCM, com exceção da que estava em estudo. Mais concretamente, a geometria destes ensaios numéricos foi a selecionada no primeiro estudo (diâmetro de 35 mm, espessura da parede do tubo de 1,2 mm e comprimento do tubo de 2 m), o fluido operante teve um caudal mássico de 5 L/min e o PCM escolhido foi o selecionado no estudo anterior, PCM PureTemp27. Quanto à duração do ensaio, tal como nos estudos anteriores, foi de 900 s.

Numa primeira fase, considerou-se um pequeno aumento no sentido de verificar se este seria suficiente para observar alguma melhoria na transferência de calor do PCM para a água. Assim, inicialmente aumentou-se em 10% cada uma das propriedades termofísicas (condutividade térmica, calor específico e calor latente de fusão/solidificação). Na Figura 6.12 é possível observar dois gráficos, onde cada um destes apresenta quatro curvas que dizem respeito à temperatura da água à saída da serpentina alcançada graças ao aumento de cada uma dessas propriedades e também para o caso base, ou seja, com as propriedades constantes tal como apresentadas na ficha técnica do PCM (Figura B.6). A Figura 6.13 apresenta os gráficos correspondentes à potência instantânea para estes mesmos casos.

Analisando os gráficos a e b da Figura 6.12, verifica-se que o aumento de 10% em cada uma das propriedades teve pouca influência na transferência de calor que ocorre do PCM para a água. Com efeito, todas as curvas apresentam valores para a temperatura da água à saída muito próximos, sendo possível afirmar que em quase todos os casos foram mesmo iguais ao caso base. Relativamente à potência instantânea (Figuras 6.13a e 6.13b) observa-se que as curvas apresentadas são também muito semelhantes à curva base, notando-se apenas uma maior discrepância no primeiro gráfico, mas apenas nos últimos segundos.

Considerando então que o aumento de 10% nas propriedades termofísicas revelou ser insuficiente para o aumento da transferência de calor entre o PCM e a água (os resultados obtidos por este aumento se mostraram iguais ao caso base), optou-se por efetuar um aumento de 35%. Este valor baseia-se em trabalhos previamente mencionados na revisão do estado da arte, onde através de técnicas como a junção de nanopartículas ou materiais com elevada condutividade, conseguiram atingir aumentos na condutividade térmica desta ordem de grandeza [6, 48].

Na Figura 6.14 estão ilustrados dois gráficos, a e b, que comparam, para duas temperaturas da água à saída da serpentina, 10 °C e 15 °C, respetivamente, um aumento de 35% em cada uma das propriedades termofísicas, relativamente ao caso base (propriedades constantes). Já a Figura 6.15 compara a potência instantânea para as mesmas situações.

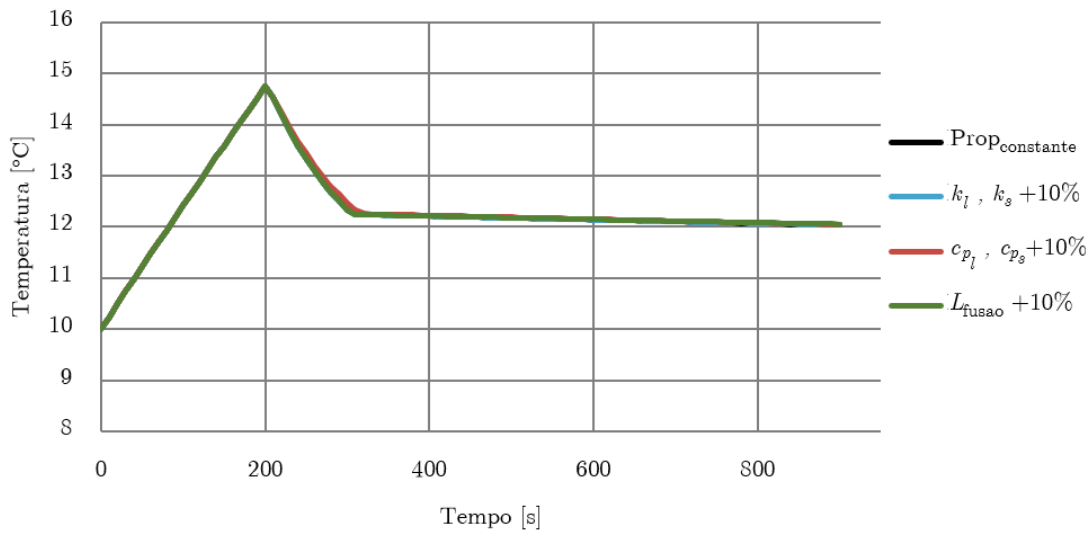
Observando as Figuras 6.14a, 6.14b, 6.15a e 6.15b conclui-se que um aumento de 35% nas propriedades termofísicas tem, novamente, pouca influência tanto na temperatura da água à saída da serpentina como na sua potência instantânea. A propriedade onde a diferença entre o seu aumento percentual e as condições base mais se evidencia é o calor específico. No entanto esta diferença é muito pequena.

Na realidade, apesar deste novo acréscimo, verificou-se a mesma situação que no primeiro estudo, onde o aumento foi apenas de 10%. Este facto pode estar relacionado com o baixo valor que permanece na condutividade térmica. Observando a Tabela 6.8 pode-se afirmar que independentemente dos aumentos impostos, o PCM continua com valores de condutividade térmica semelhantes aos de um isolador térmico.

Tabela 6.8: Comparação dos valores da condutividade térmica em cada um dos estudos.

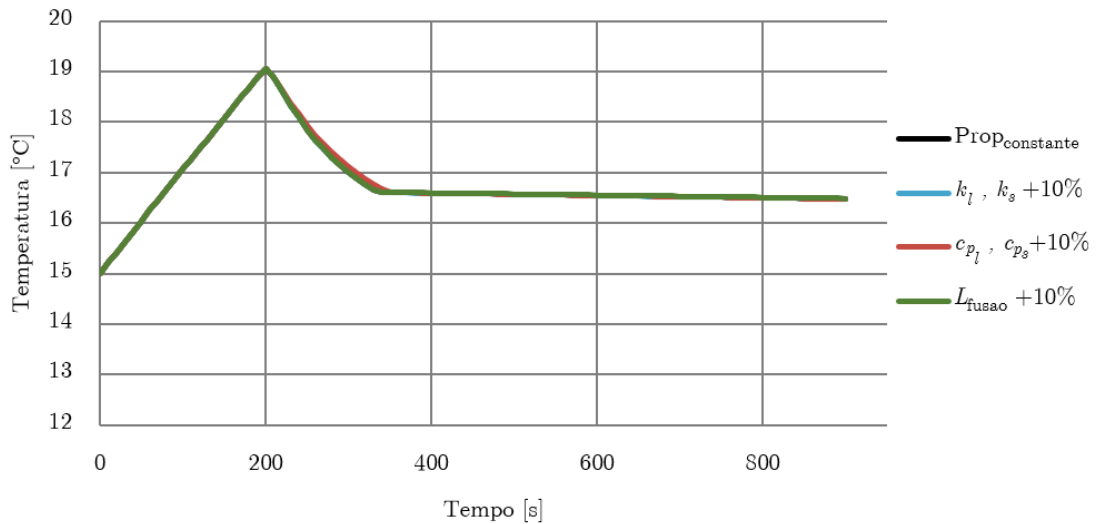
	Caso base	Aumento 10%	Aumento 35%
k_l [W/(m · K)]	0,15	0,165	0,203
k_s [W/(m · K)]	0,25	0,275	0,338

Temperatura da água à saída da serpentina, com uma temperatura de entrada de 10 °C



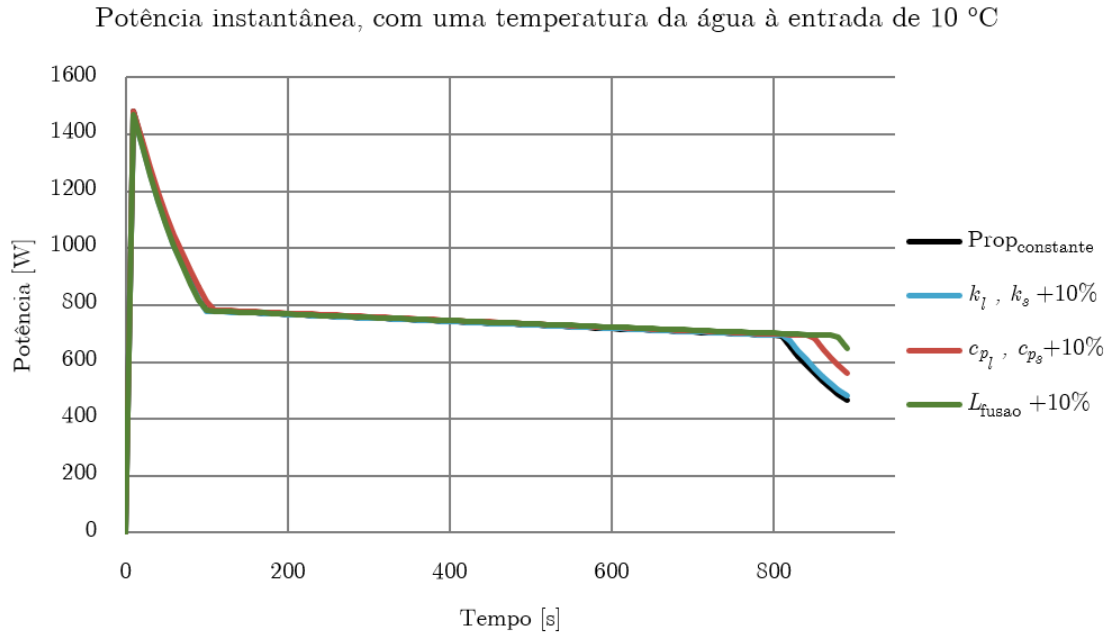
(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.

Temperatura da água à saída da serpentina, com uma temperatura de entrada de 15 °C

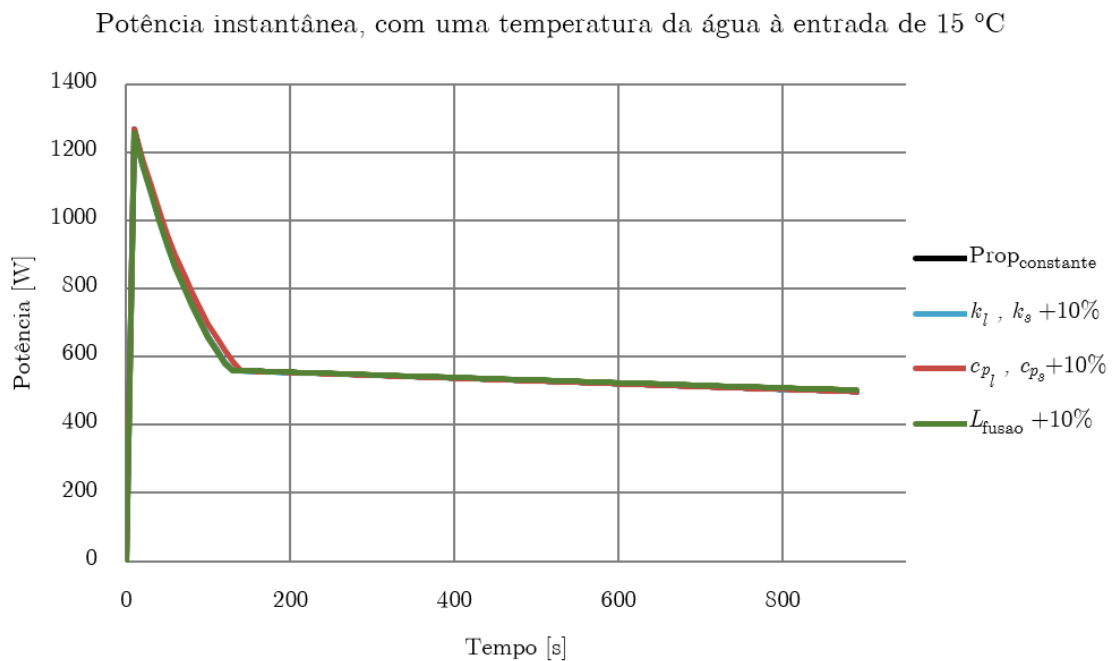


(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

Figura 6.12: Temperatura da água à saída da serpentina para um aumento de 10% em cada um dos valores das propriedades termofísicas.

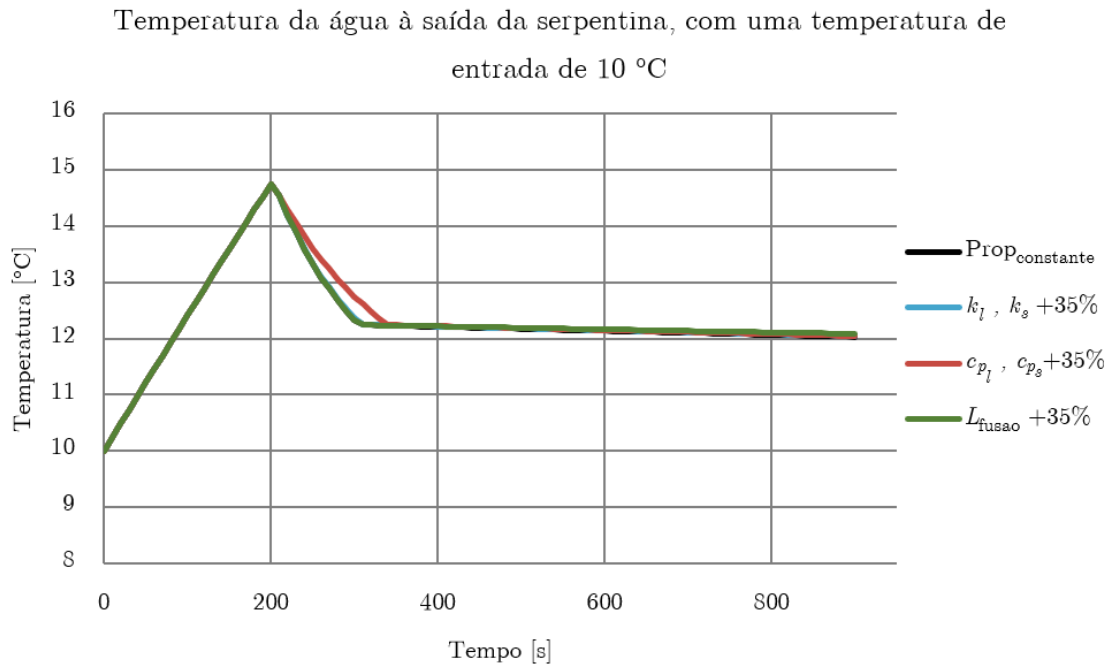


(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.

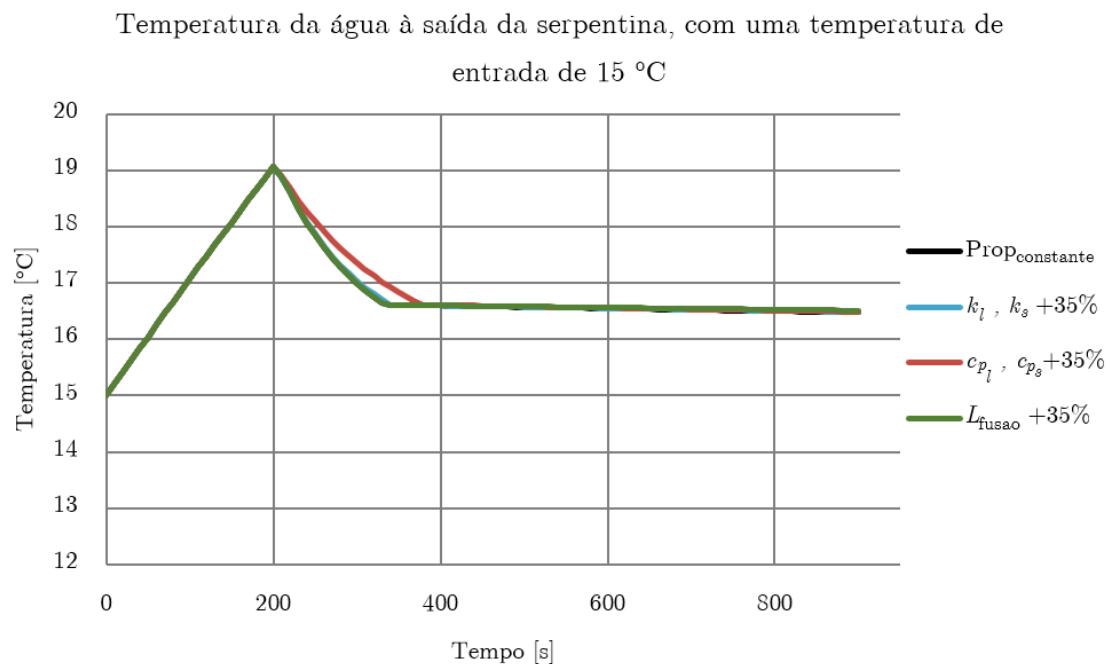


(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

Figura 6.13: Potência instantânea para um aumento de 10% em cada um dos valores das propriedades termofísicas.



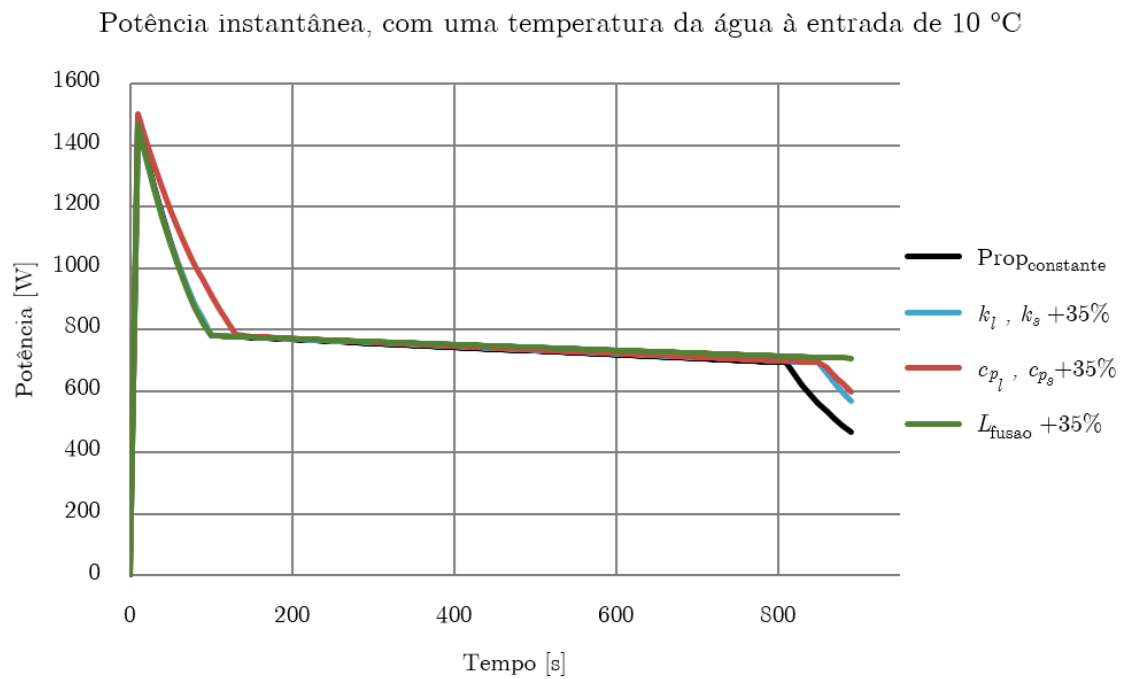
(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.



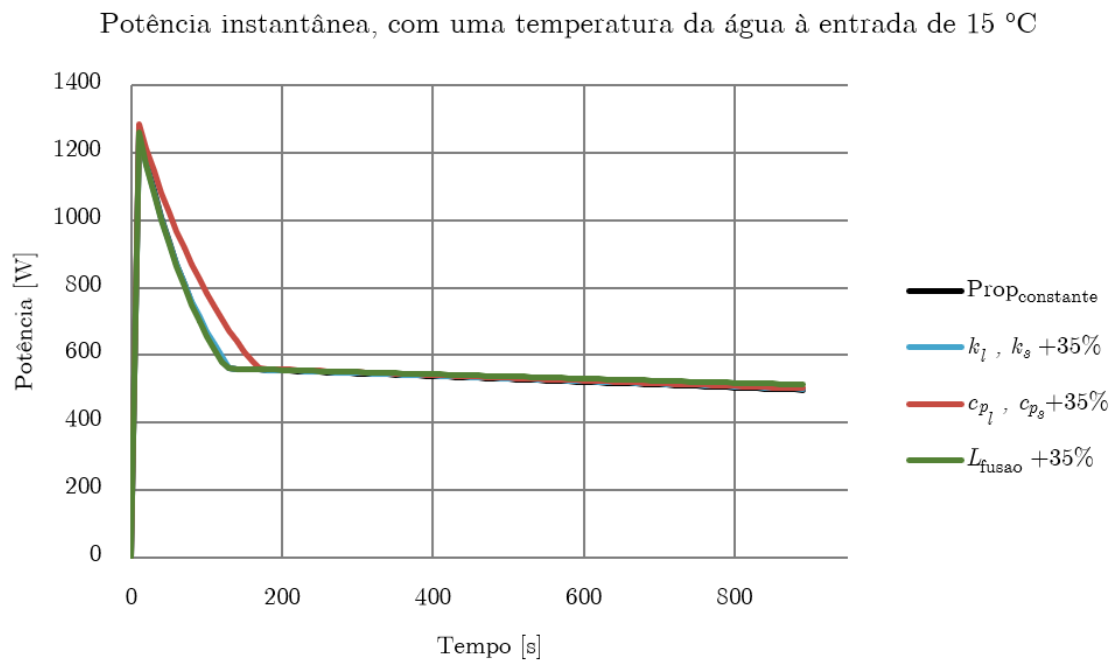
(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

Figura 6.14: Temperatura da água à saída da serpentina para um aumento de 35% em cada um dos valores das propriedades termofísicas.

Assim, e tendo por objetivo verificar o impacto da condutividade térmica, realizou-se



(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.



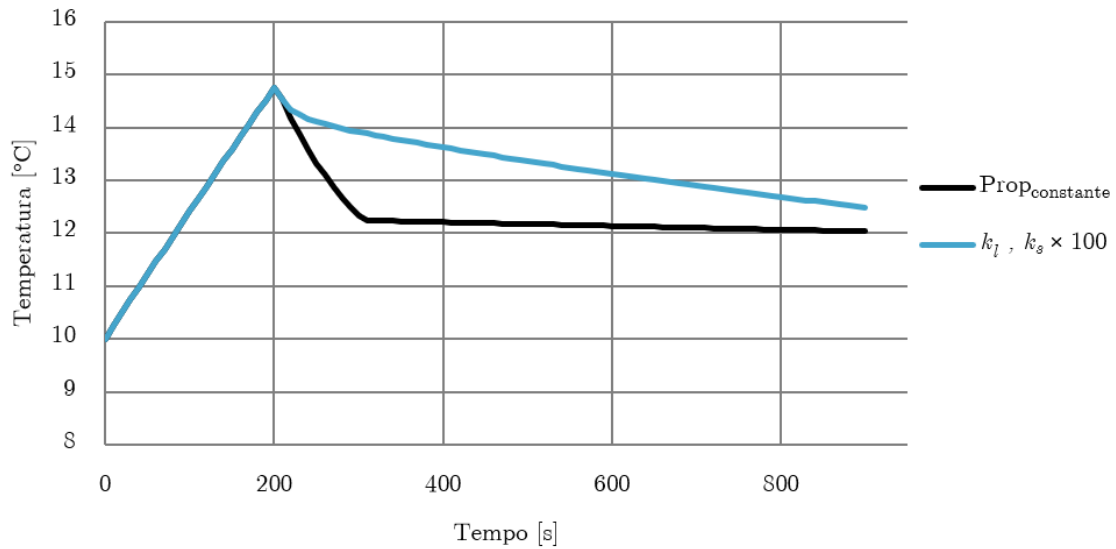
(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

Figura 6.15: Potência instantânea para um aumento de 35% em cada um dos valores das propriedades termofísicas.

um aumento irreal, aumentando-a em 100 vezes. A Figura 6.16 ilustra os dois gráficos que comparam a temperatura da água à saída da serpentina para um aumento da condutividade térmica 100 vezes superior. Simultaneamente, a Figura 6.17, avalia a potência instantânea para a mesma situação.

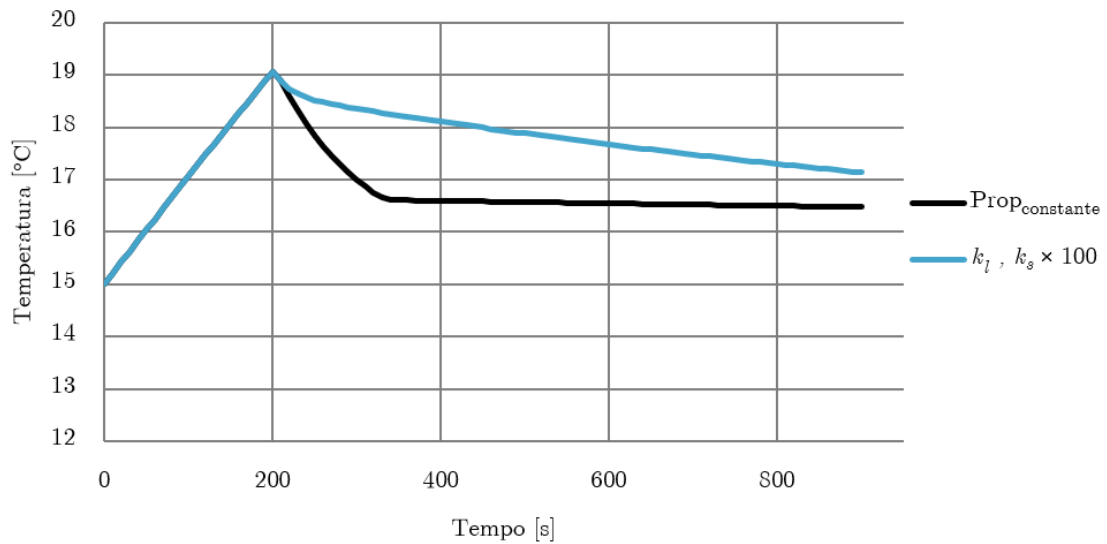
Analisando os gráficos a e b da Figura 6.16 observa-se que o aumento da condutividade térmica resulta num aumento acentuado da temperatura da água à saída, quando comparado com o caso das propriedades constantes. Nos primeiros instantes de tempo a diferença não é visível pois a diferença de temperaturas entre o PCM e a água é elevada o que faz com que o processo de transferência de calor seja condicionado por ela. Contudo, após a temperatura do PCM decrescer a condutividade térmica passa a ter um maior impacto e este efeito torna-se evidente quando se observa a curva. No entanto o novo valor para a condutividade térmica do PCM está longe de ser o de um condutor e para casos como o que está aqui em estudo, onde o caudal mássico é bastante elevado, é pouco provável que a temperatura da água à saída seja muito superior. Quanto à potência instantânea (gráficos a e b da Figura 6.17), é esperado, face ao aumento de temperatura da água à saída da serpentina, que os valores obtidos sejam também superiores, tal como é visível nos gráficos.

Temperatura da água à saída da serpentina, para uma temperatura da água à entrada de 10 °C



(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.

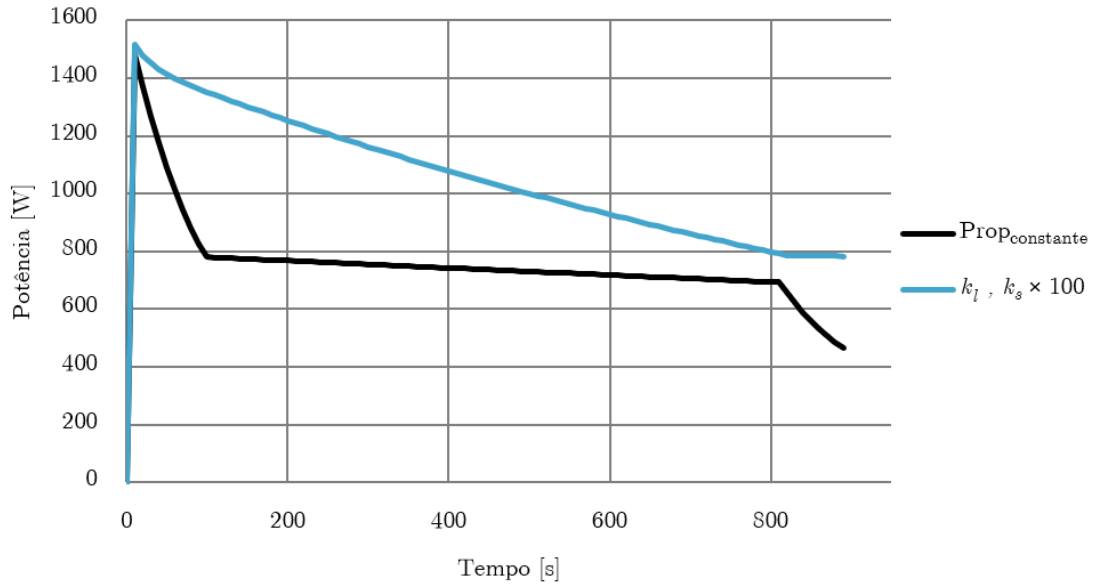
Temperatura da água à saída da serpentina, para uma temperatura da água à entrada de 15 °C



(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

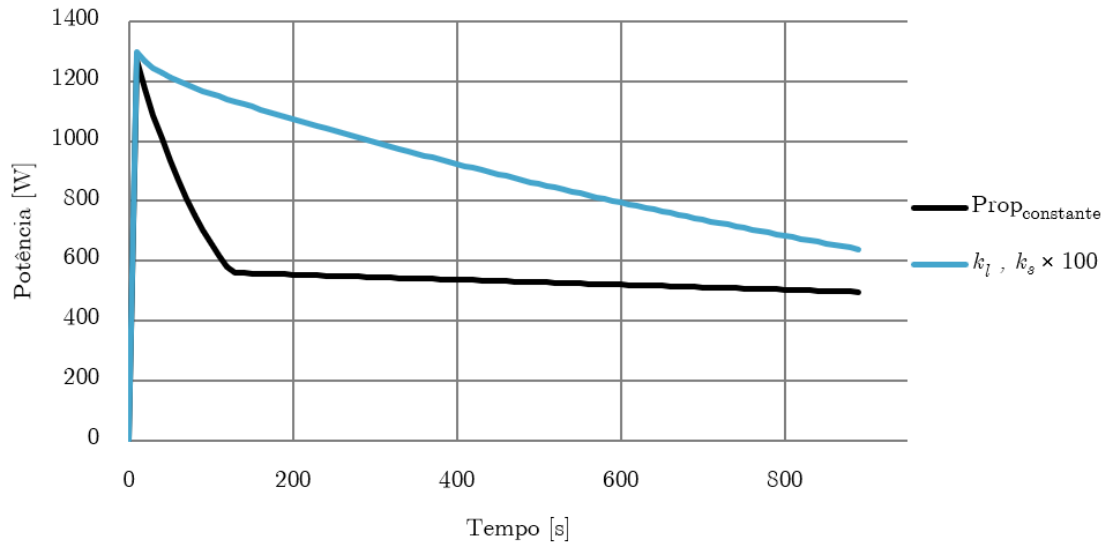
Figura 6.16: Temperatura da água à saída da serpentina para um aumento da condutividade térmica de 100 vezes.

Potência instantânea, para uma temperatura da água à entrada de 10 °C



(a) Temperatura da água à entrada de 10 °C.

Potência instantânea, para uma temperatura da água à entrada da serpentina de 15 °C



(b) Temperatura da água à entrada de 15 °C.

Figura 6.17: Potência instantânea para um aumento a condutividade térmica de 100 vezes.

6.3 Síntese

Uma vez concluídos os vários estudos planeados, é possível concluir que, no que diz respeito à geometria selecionada, esta deve apresentar um compromisso entre a turbulência do escoamento e uma maior área para a transferência de calor. De facto, uma maior turbulência traduz-se numa menor resistência térmica, enquanto que uma maior área para a transferência de calor conduz a uma maior temperatura da água e conseqüentemente uma maior potência, quando o caudal do fluido é o mesmo.

Relativamente ao caudal mássico selecionado, todos os caudais aqui estudados são bastante elevados o que conduz a que estes estejam dentro da serpentina durante pouco tempo. Por este motivo, o caudal mássico selecionado é o mais baixo por ser o que permanece mais tempo em circulação dentro dela e conseqüentemente o que alcança maiores temperaturas à saída.

No que diz respeito ao estudo de diferentes PCMs, estudaram-se seis diferentes. O selecionado foi não só o que permitiu que as diferenças de temperatura entre este e a água fossem maiores (o que se traduz numa maior transferência de calor), mas também o que apresentava as melhores propriedades termofísicas. Assim, compreendeu-se a importância destas propriedades e fez-se um estudo detalhado de cada uma delas. Neste estudo concluiu-se que os PCMs têm uma enorme capacidade de armazenamento de calor (observando os valores que estes têm para o calor latente de fusão/solidificação e também o calor específico). Todavia, apresentam uma baixa condutividade térmica, o que faz com que estes materiais demorem bastante tempo a libertar todo o calor que são capazes de armazenar, ou seja, apresentam uma baixa difusividade térmica.

O uso desta aplicação, tal como referido anteriormente, permite a redução do consumo energético, principalmente no aquecimento de água. Dos estudos efetuados concluiu-se que um aumento de 2 °C na temperatura de entrada da água num sistema de AQS representa uma diminuição das necessidades energéticas na ordem de 696 W. Tendo por base os custos associados aos combustíveis fósseis, esta redução no consumo energético resulta numa poupança anual significativa.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

A crescente preocupação a nível mundial da dependência dos combustíveis fósseis, aliada a políticas de sustentabilidade, gerou uma enorme procura por formas de armazenar energia proveniente de fontes renováveis. Neste âmbito e como resposta a este problema, surgem os PCMs, materiais que têm a capacidade de armazenar uma grande quantidade de energia num pequeno volume. Contudo, estes materiais apresentam alguns problemas, principalmente a sua baixa difusividade térmica.

Neste enquadramento, desenvolveu-se um protótipo virtual, recorrendo ao método das diferenças finitas, o qual permite estudar estes materiais em diferentes cenários. Numa primeira instância, foi necessária a validação deste protótipo. Para isso recorreu-se a uma experiência prática e simulou-se essa experiência no protótipo e, após comparar os resultados alcançados por ambos, foi validado. Assim, o protótipo virtual desenvolvido possui inúmeras capacidades de simulação de problemas que recorrem a PCMs. Este é capaz de simular sistemas cilíndricos que tenham uma camada de PCM até 3 cm, selecionar as dimensões do sistema, bem como o seu material. Permite também selecionar o caudal mássico do fluido que circula no sistema e o PCM a utilizar. Fornecendo estes dados ao protótipo, ele é capaz de produzir a evolução da temperatura da água à saída do sistema, a potência instantânea, a energia cedida pelo PCM, a potência média, a evolução da temperatura da água ao longo do comprimento do tubo, para um dado instante de tempo, e também, a evolução da temperatura do PCM no sentido longitudinal e radial, para um dado instante de tempo. Ou seja, o protótipo virtual desenvolvido inclui diversas capacidades e o seu tempo de resposta é bastante rápido (cerca de um minuto), o que faz com que este possa ser usado para decisões rápidas no caso de uma experiência.

Tendo em conta as vastas potencialidades do protótipo virtual desenvolvido, procurou-se aplicá-lo a um caso de estudo em concreto. O caso de estudo selecionado foi o de um permutador de calor para auxílio de um reservatório de água quente. Aqui, foram estudadas diferentes vertentes do sistema mais concretamente, a sua geometria, o caudal mássico do fluido, diferentes PCMs e, por fim, as propriedades termofísicas do PCM. Deste estudo, conclui-se, no que diz respeito à geometria, que a escolha resulta de um compromisso entre uma maior turbulência e uma maior área de transferência de calor. Isto pode ser justificado pelo facto de uma maior turbulência resultar numa menor resistência térmica. Contudo, para atingir uma maior turbulência (para o mesmo caudal) é necessária uma menor área de transferência de calor o que se traduz em menores tempe-

raturas da água à saída e conseqüentemente uma menor potência instantânea. Quanto ao caudal, os caudais comuns a este tipo de aplicações (aplicações AQS) são, por norma, caudais bastante turbulentos, o que levou à escolha do menor caudal, atendendo a que este é o que fica mais tempo no interior do tubo, permitindo assim uma transferência de calor durante um intervalo de tempo maior, para a mesma quantidade de água. Relativamente ao estudo dos PCMs, o selecionado como sendo o melhor, ou seja, o que evidenciou uma maior evolução da temperatura da água à saída e também uma maior potência instantânea, foi o que apresentava as propriedades termofísicas mais elevadas. Assim, procedeu-se a um estudo detalhado, de forma individual, de cada uma destas propriedades. Deste estudo concluiu-se, tal como sintetizado no final do capítulo anterior (Capítulo 6, Secção 6.3), que apesar da elevada capacidade de armazenamento de calor presente nestes materiais, a sua condutividade térmica é muito baixa, sendo semelhante à de um isolador térmico. Isto faz com que o calor retido nos PCMs demore bastante tempo a ser transferido, o que, para o caso de estudo em questão tornou-se num ponto crucial do problema.

Em resumo, o protótipo virtual criado é uma ferramenta que permite o estudo rápido de um sistema e permite ao utilizador saber que escolhas deve tomar no desenvolvimento de um protótipo experimental. Ademais, a aplicação deste modelo ao caso de estudo selecionado permite também concluir que, devido às características termofísicas do PCM, principalmente a sua baixa difusividade térmica, a sua aplicação a sistemas que necessitem de uma resposta mais rápida não será uma boa opção para estes materiais. Porém o seu uso deve ser encorajado em sistemas com caudais mais reduzidos ou até mesmo em sistemas em o que objetivo seja manter a temperatura do fluido ou do ambiente.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Procurando atingir um mundo mais sustentável e que a energia utilizada provenha de fontes renováveis, o uso de PCMs é fundamental. Assim, será útil a implementação do protótipo virtual desenvolvido no âmbito desta dissertação, em sistemas que beneficiem da aplicação deste tipo de materiais. Na verdade, em sistemas onde o escoamento seja laminar a aplicação poderá ter vantagens, atendendo a que o fluido permanece mais tempo no seu interior, o que conduz a uma transferência de energia mais prolongada. Será também interessante um estudo de um reservatório de AQS onde o isolamento deste é não só isolamento térmico, mas também constituído por PCM com o objetivo de avaliar as perdas de calor para o exterior. Neste contexto, o protótipo virtual aqui desenvolvido poderá ser adaptado, com o objetivo de avaliar o comportamento deste novo sistema. Será de esperar que neste caso, a temperatura no interior de reservatório se mantenha constante durante um intervalo de tempo maior. Isto pode levar à eliminação das resistências presentes neste sistema que têm por objetivo manter a temperatura da água num determinado valor.

Relativamente ao protótipo virtual desenvolvido, podem ser realizados pequenos ajustes, nomeadamente pode ser imposto um critério de convergência mais rigoroso. Ainda neste âmbito, e no que diz respeito à malha, esta pode ser ainda mais “refinada”, tanto no sentido radial como no longitudinal, de forma a comparar os futuros resultados com os já obtidos, permitindo deste modo verificar se este é um fator diferenciador no desenvolvimento do modelo. No protótipo virtual desenvolvido pode também alterar-se a análise

unidimensional para uma análise bidimensional. Para além do exposto, pode também incluir-se a convecção do PCM quando este se encontra no estado líquido e equacionar novas formulações para a resolução do problema de mudança de fase no PCM.

Referências

1. *2020 climate & energy package | Climate Action* https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en (2020).
2. *2030 climate & energy framework | Climate Action* https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en (2020).
3. *2050 long-term strategy | Climate Action* https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en (2020).
4. *PORDATA - Ambiente de Consulta* <https://www.pordata.pt/DB/Europa/Ambiente+de+Consulta/Tabela> (2020).
5. *Poupa Energia - Consumo de energia em casa* pt-pt. Ago. de 2017. <https://poupaenergia.pt/consumo-de-energia-em-casa/> (2020).
6. Ibrahim, N. I., Al-Sulaiman, F. A., Rahman, S., Yilbas, B. S. & Sahin, A. Z. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review. en. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **74**, 26–50. ISSN: 13640321 (jul. de 2017).
7. N'Tsoukpoe, K. E., Liu, H., Le Pierrès, N. & Luo, L. A review on long-term sorption solar energy storage. en. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**, 2385–2396. ISSN: 13640321 (dez. de 2009).
8. Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C. & Buddhi, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. en. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**, 318–345. ISSN: 13640321 (fev. de 2009).
9. Mohamed, S. A. *et al.* A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. en. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **70**, 1072–1089. ISSN: 13640321 (abr. de 2017).
10. Hu, H., Jin, X. & Zhang, X. Effect of Supercooling on the Solidification Process of the Phase Change Material. en. *Energy Procedia. 8th International Conference on Applied Energy, ICAE2016, 8-11 October 2016, Beijing, China* **105**, 4321–4327. ISSN: 1876-6102 (mai. de 2017).
11. Murray, R. E. & Groulx, D. Experimental study of the phase change and energy characteristics inside a cylindrical latent heat energy storage system: Part 1 consecutive charging and discharging. en. *Renewable Energy* **62**, 571–581. ISSN: 09601481 (fev. de 2014).

12. Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P. & Smyth, M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). en. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **14**, 615–628. ISSN: 13640321 (fev. de 2010).
13. Jegadheeswaran, S. & Pohekar, S. D. Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review. en. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**, 2225–2244. ISSN: 13640321 (dez. de 2009).
14. Solé, A., Miró, L., Barreneche, C., Martorell, I. & Cabeza, L. F. Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). en. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **26**, 425–436. ISSN: 13640321 (out. de 2013).
15. Tye, R. P., Kubičár, L. & Lockmuller, N. The Development of a Standard for Contact Transient Methods of Measurement of Thermophysical Properties. en. *International Journal of Thermophysics* **26**, 1917–1938. ISSN: 0195-928X, 1572-9567. <http://link.springer.com/10.1007/s10765-005-8605-4> (2020) (nov. de 2005).
16. Dumas, J.-P. *et al.* Interpretation of calorimetry experiments to characterise phase change materials. en. *International Journal of Thermal Sciences* **78**, 48–55. ISSN: 12900729 (abr. de 2014).
17. Watson, E. S., O’Neill, M. J., Justin, J. & Brenner, N. A Differential Scanning Calorimeter for Quantitative Differential Thermal Analysis. en. *Analytical Chemistry* **36**, 1233–1238. ISSN: 0003-2700, 1520-6882 (jun. de 1964).
18. Cheng, R., Pomianowski, M., Wang, X., Heiselberg, P. & Zhang, Y. A new method to determine thermophysical properties of PCM-concrete brick. en. *Applied Energy* **112**, 988–998. ISSN: 03062619 (dez. de 2013).
19. Yinping, Z., Yi, J. & Yi, J. A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. en. *Measurement Science and Technology* **10**, 201–205. ISSN: 0957-0233, 1361-6501 (mar. de 1999).
20. Zhang, P., Ma, Z., Shi, X. & Xiao, X. Thermal conductivity measurements of a phase change material slurry under the influence of phase change. en. *International Journal of Thermal Sciences* **78**, 56–64. ISSN: 12900729 (abr. de 2014).
21. Instituto Pedro Nunes en. <https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaio/5> (2020).
22. 14:00-17:00. *ISO 22007-2:2015* en. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/11/61190.html> (2020).
23. Zukowski, M. Mathematical modeling and numerical simulation of a short term thermal energy storage system using phase change material for heating applications. en. *Energy Conversion and Management* **48**, 155–165. ISSN: 01968904 (jan. de 2007).
24. Verma, P., Varun & Singal, S. Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material. en. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **12**, 999–1031. ISSN: 13640321 (mai. de 2008).

25. Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P. & Dewitt, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer* 6th ed. en. OCLC: ocm62532755. ISBN: 978-0-471-45728-2 (John Wiley, Hoboken, NJ, 2007).
26. Mehling, H. & Cabeza, L. F. *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications* en (eds. Mewes, D. & Mayinger, F.) ISBN: 978-3-540-68556-2 978-3-540-68557-9 (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008).
27. Mehling, H., Cabeza, L., Hippeli, S. & Hiebler, S. PCM-module to improve hot water heat stores with stratification. en. *Renewable Energy* **28**, 699–711. ISSN: 09601481 (abr. de 2003).
28. Lo Brano, V., Ciulla, G., Piacentino, A. & Cardona, F. Finite difference thermal model of a latent heat storage system coupled with a photovoltaic device: Description and experimental validation. en. *Renewable Energy* **68**, 181–193. ISSN: 09601481 (ago. de 2014).
29. Sparrow, E., Larson, E. & Ramsey, J. Freezing on a finned tube for either conduction-controlled or natural-convection-controlled heat transfer. en. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **24**, 273–284 (fev. de 1981).
30. Stritih, U. An experimental study of enhanced heat transfer in rectangular PCM thermal storage. en. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **47**, 2841–2847. ISSN: 00179310 (jun. de 2004).
31. Ismail, K. A. R., Alves, C. L. F. & Modesto, M. S. Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder. en. *Applied Thermal Engineering* **21**, 53–77. ISSN: 1359-4311 (jan. de 2001).
32. Jmal, I. & Baccar, M. Numerical study of PCM solidification in a finned tube thermal storage including natural convection. en. *Applied Thermal Engineering* **84**, 320–330. ISSN: 1359-4311 (jun. de 2015).
33. Al-Abidi, A. A., Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M. Y. & Mohammad, A. T. Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers. en. *Applied Thermal Engineering* **53**, 147–156. ISSN: 1359-4311 (abr. de 2013).
34. Al-Abidi, A. A., Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M. Y. & Mohammad, A. T. Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins. en. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **61**, 684–695. ISSN: 0017-9310 (jun. de 2013).
35. Hosseinizadeh, S. F., Tan, F. L. & Moosania, S. M. Experimental and numerical studies on performance of PCM-based heat sink with different configurations of internal fins. en. *Applied Thermal Engineering. SET 2010 Special Issue* **31**, 3827–3838. ISSN: 1359-4311 (dez. de 2011).
36. Fang, M. & Chen, G. Effects of different multiple PCMs on the performance of a latent thermal energy storage system. en. *Applied Thermal Engineering* **27**, 994–1000. ISSN: 1359-4311 (abr. de 2007).

37. Zhang, N., Yuan, Y., Yuan, Y., Cao, X. & Yang, X. Effect of carbon nanotubes on the thermal behavior of palmitic–stearic acid eutectic mixtures as phase change materials for energy storage. en. *Solar Energy* **110**, 64–70. ISSN: 0038-092X (dez. de 2014).
38. Fan, L.-W. *et al.* Effects of various carbon nanofillers on the thermal conductivity and energy storage properties of paraffin-based nanocomposite phase change materials. en. *Applied Energy* **110**, 163–172. ISSN: 0306-2619 (out. de 2013).
39. Mishra, A., Shukla, A. & Sharma, A. Latent heat storage through phase change materials. en. *Resonance* **20**, 532–541. ISSN: 0971-8044, 0973-712X (jun. de 2015).
40. Shah, R. K. & Sekulić, D. P. *Fundamentals of heat exchanger design* en. ISBN: 978-0-471-32171-2 (John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2003).
41. Sable, A. Experimental and economic analysis of concrete absorber collector solar water heater with use of dimpled tube. en. *Resource-Efficient Technologies* **3**, 483–490. ISSN: 2405-6537 (dez. de 2017).
42. Hoffman, J. D. & Frankel, S. *Numerical Methods for Engineers and Scientists* en. Google-Books-ID: F5K3DwAAQBAJ. ISBN: 978-1-4822-7060-0 (CRC Press, out. de 2018).
43. Mendes, R. d. C. N. *Materiais de mudança de fase para aquecimento em escoamentos laminares* por. Accepted: 2014-07-31T10:31:58Z Journal Abbreviation: Phase change materials on heating of laminar flows. Tese de mestrado (Universidade de Aveiro, 2013).
44. *Polyvinyl Chloride (PVC): Properties, Processing, and App.s - Matmatch* <https://matmatch.com/learn/material/polyvinyl-chloride-pvc> (2020).
45. *PureTemp - Global Authority on Phase Change Material* <http://www.puretemp.com/> (2020).
46. *Wednesbury Copper Tubes - UK Copper Tube Manufacturers* <https://www.wednesburytube.com/Size-ranges.html> (2020).
47. *Hot Water Flow Rates to Fixtures* https://www.engineeringtoolbox.com/fittings-hot-water-flow-rate-d_90.html (2020).
48. Wang, J., Xie, H. & Xin, Z. Thermal properties of paraffin based composites containing multi-walled carbon nanotubes. en. *Thermochimica Acta* **488**, 39–42. ISSN: 0040-6031 (mai. de 2009).

Apêndice A

Validação: Análise aos testes experimentais

A.1 Análise ao Teste 2

Este ensaio experimental durou 520 s e os parâmetros estudados no teste 1 são abordados também neste. Na Figura A.1 é possível observar a dispersão dos valores do caudal mássico em cada instante de tempo. Tal como no teste anterior, nos primeiros 100 s verifica-se a mesma discrepância dos valores face à média. Contudo, ao fim deste tempo os pontos estabilizam, estando próximos do valor médio calculado. No que diz respeito às temperaturas de entrada do fluido no tubo e da temperatura do ar ambiente (Figura A.2), a primeira apresenta uma pequena variação ao longo do tempo, enquanto que a segunda mantém-se praticamente constante, estando em quase todos os instantes coincidente com o valor médio calculado. Por outro lado, a velocidade do ar oscila bastante durante o ensaio experimental, Figura A.3. Na verdade, como o caudal e a velocidade do ar são valores bastante mais reduzidos quando comparados com as temperaturas do ar e do fluido à entrada do tubo, uma pequena oscilação destes é mais notória comparativamente com as das temperaturas. Por estes factos, é necessário avaliar a dispersão dos dados.

Tal como para o caso anterior, para avaliar a dispersão dos dados em torno da média procedeu-se ao cálculo do desvio padrão de cada um dos parâmetros, Tabela A.1. Neste caso, e tendo por base os desvios padrão obtidos para cada um dos parâmetros, pode-se concluir que todos eles são próximos do valor médio.

Tabela A.1: Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 2.

Parâmetros	Valor médio	Desvio padrão (σ)
Caudal (g/s)	0,15	0,058
Temperatura de entrada do fluido (°C)	11,03	0,583
Temperatura do ar (°C)	14,50	0,339
Velocidade do ar (m/s)	0,89	0,091

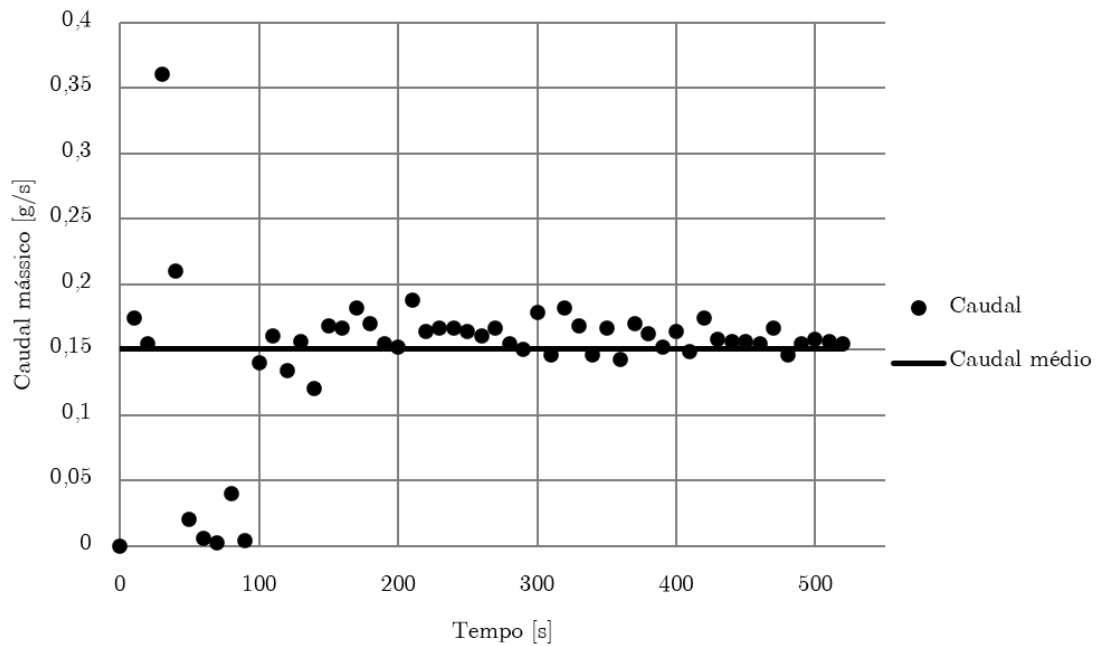


Figura A.1: Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 2.

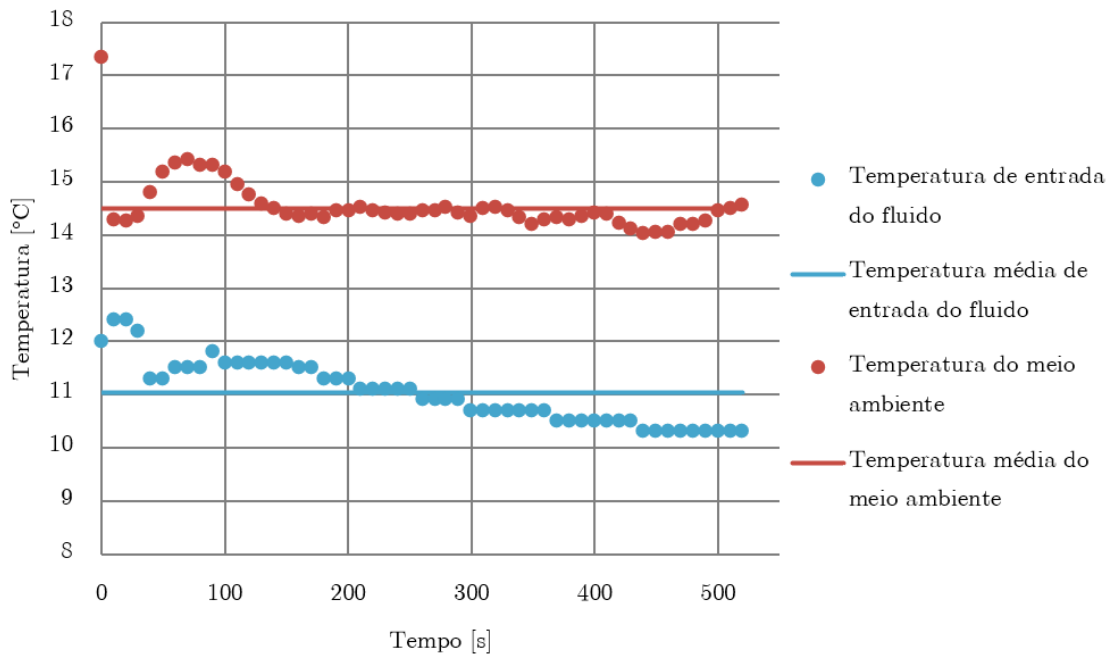


Figura A.2: Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 2.

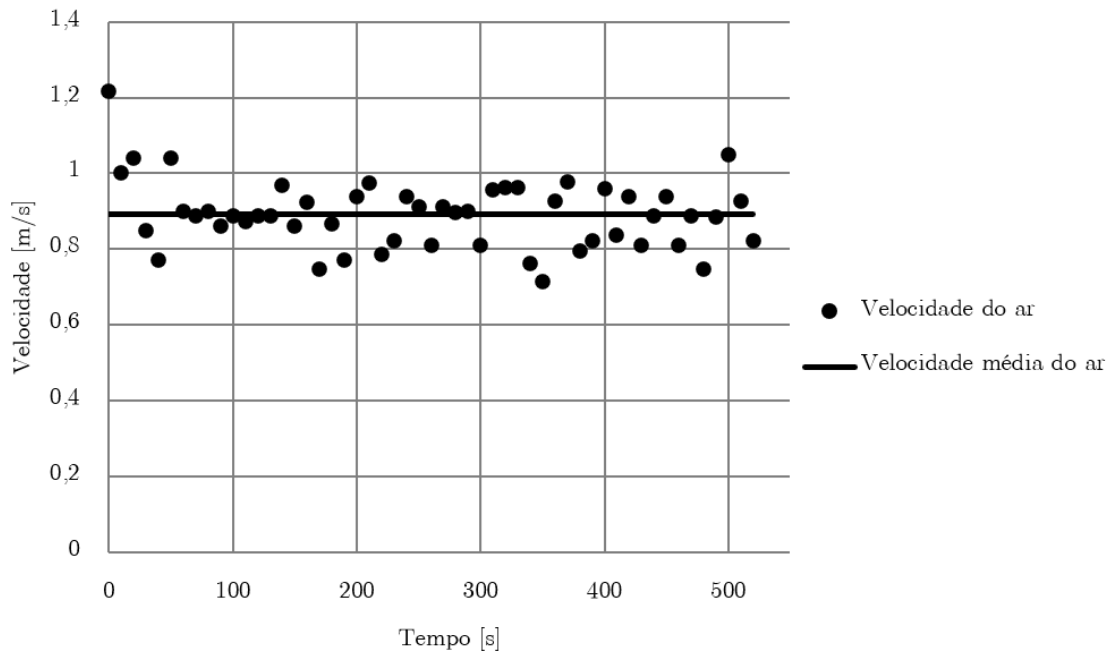


Figura A.3: Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 2.

Tal como no teste 1, é necessário averiguar o estado do PCM aquando o início do ensaio experimental em cada um dos três pontos de cada secção, Tabela A.2.

Tabela A.2: Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 2.

	Secção 1	Secção 2
L = 0 m	47,08 °C	44,89 °C
L = 0,5 m	56,91 °C	54,97 °C
L = 1 m	49,19 °C	33,51 °C

A.2 Análise ao Teste 3

Este teste teve a duração de 630 s e a evolução do valor dos parâmetros (caudal mássico, temperatura do fluido à entrada do tubo, temperatura ambiente e a sua velocidade) ao longo do tempo estão ilustrados nas Figuras A.4, A.5 e A.6, respetivamente. Cada um destes gráficos apresenta também o respetivo valor médio.

Observando as figuras verifica-se que todos os parâmetros, com exceção da temperatura do meio ambiente, têm em todos os intervalos de tempo valores bastantes próximos da média (no caso da temperatura do meio ambiente (ar), a oscilação é mais intensa em torno da média). Efetivamente, o cálculo do desvio padrão face à média, confirma a afirmação anteriormente realizada, Tabela A.3.

Por fim, resta apenas verificar a temperatura do PCM em cada uma das secções, no primeiro instante de tempo, Tabela A.4.

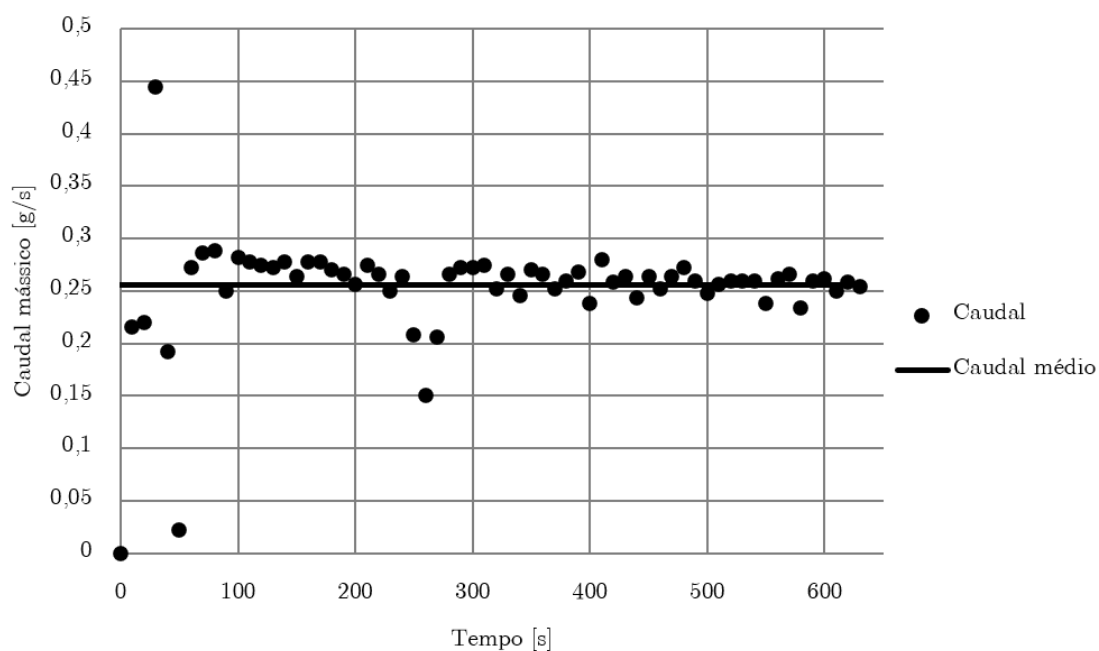


Figura A.4: Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 3.

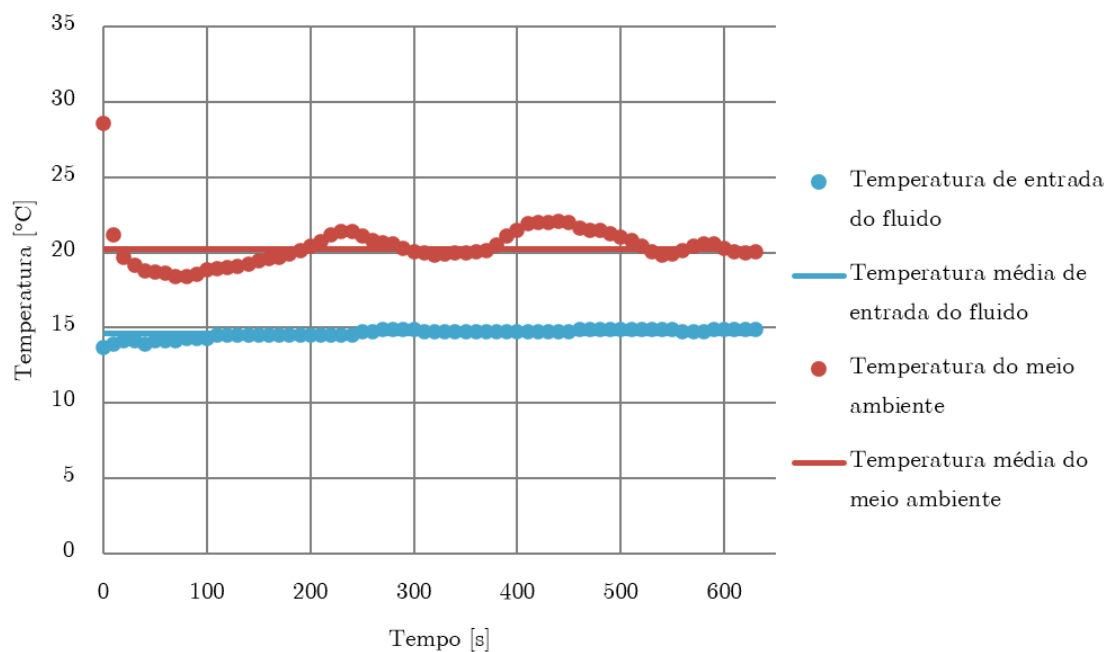


Figura A.5: Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 3.

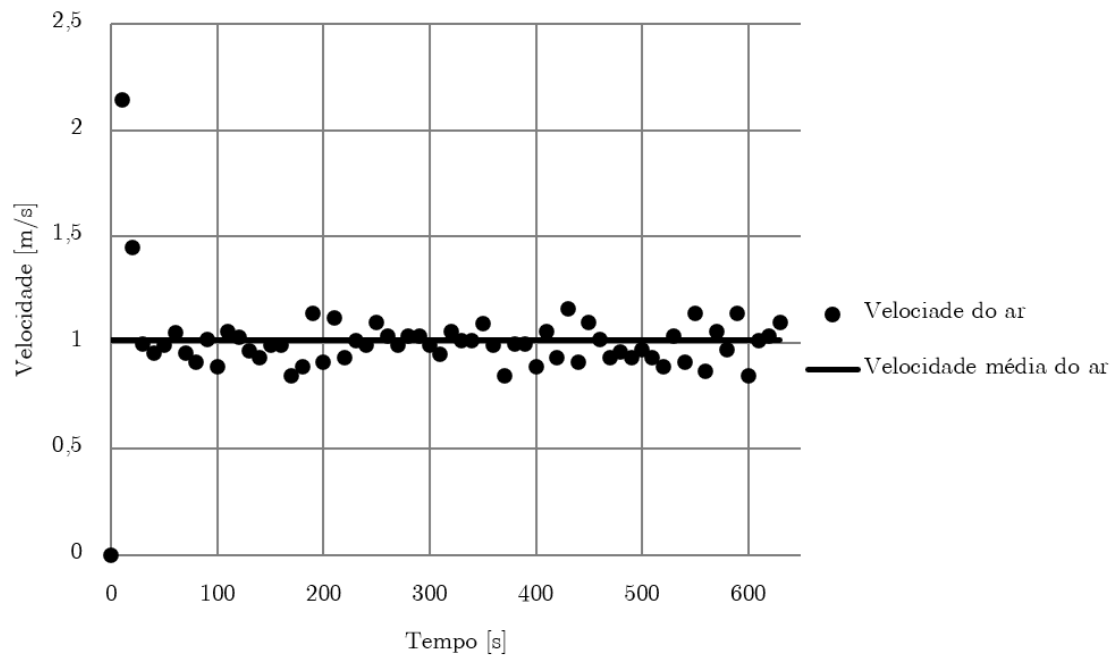


Figura A.6: Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 3.

Tabela A.3: Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 3.

Parâmetros	Valor médio	Desvio padrão (σ)
Caudal (g/s)	0,25	0,055
Temperatura de entrada do fluido ($^{\circ}\text{C}$)	14,60	0,292
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	20,25	0,972
Velocidade do ar (m/s)	1,01	0,172

Tabela A.4: Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 3.

	Secção 1	Secção 2
L = 0 m	53,76 $^{\circ}\text{C}$	55,17 $^{\circ}\text{C}$
L = 0,5 m	59,59 $^{\circ}\text{C}$	54,31 $^{\circ}\text{C}$
L = 1 m	54,18 $^{\circ}\text{C}$	51,33 $^{\circ}\text{C}$

A.3 Análise ao Teste 4

O ensaio experimental 4 teve um período de 530s durante o qual o caudal mássico, as temperaturas de entrada do fluido e do ar ambiente, e a velocidade do ar variaram tal como ilustrado nos gráficos das Figuras A.7, A.8 e A.9, respetivamente. O desvio padrão face à média de cada um dos parâmetros enunciados anteriormente é apresentado na Tabela A.5. Para este teste, verifica-se, através da tabela anunciada anteriormente, que os valores dos parâmetros em estudo estão de acordo com o valor médio de cada um deles.

Tabela A.5: Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 4.

Parâmetros	Valor médio	Desvio padrão (σ)
Caudal (g/s)	0,16	0,080
Temperatura de entrada do fluido ($^{\circ}\text{C}$)	15,22	0,905
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	10,35	0,674
Velocidade do ar (m/s)	1,47	0,128

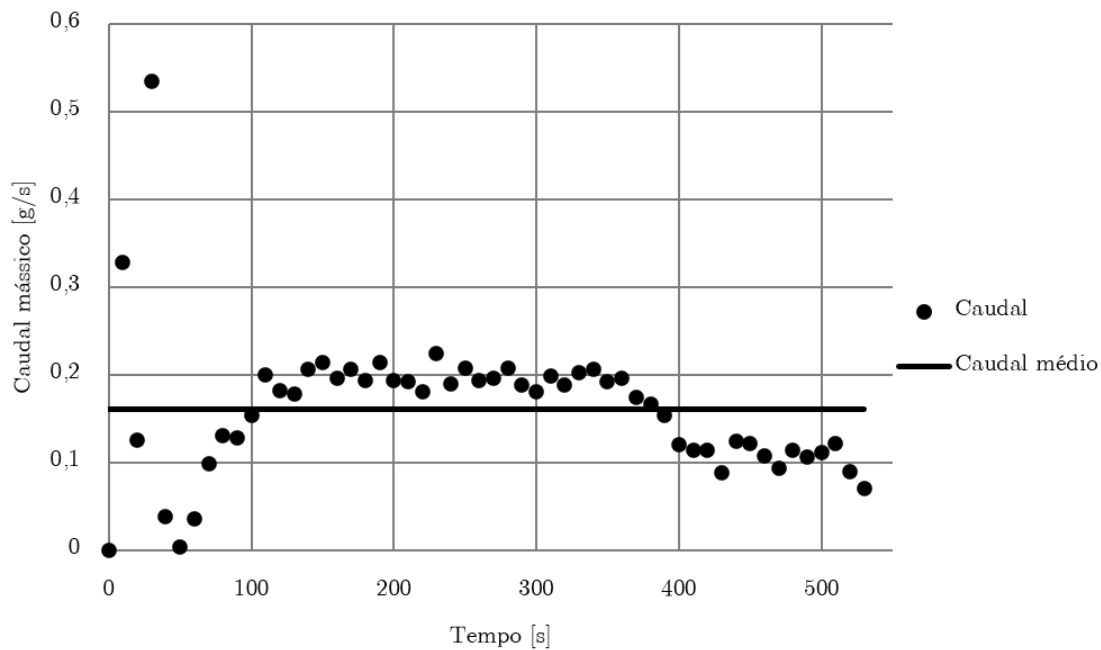


Figura A.7: Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 4.

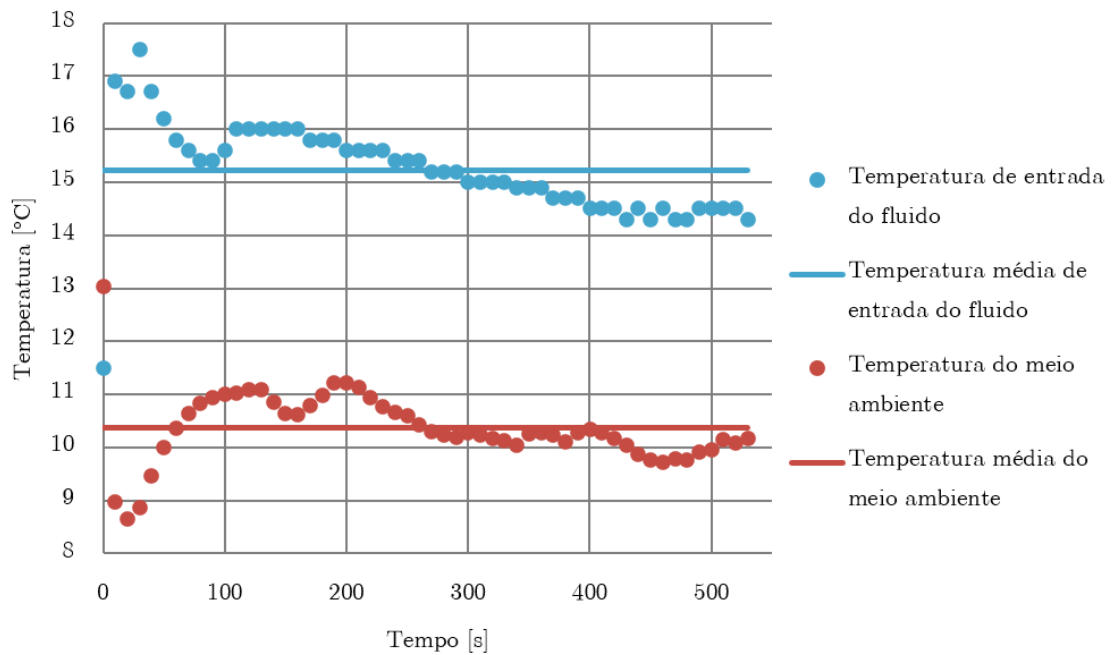


Figura A.8: Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 4.

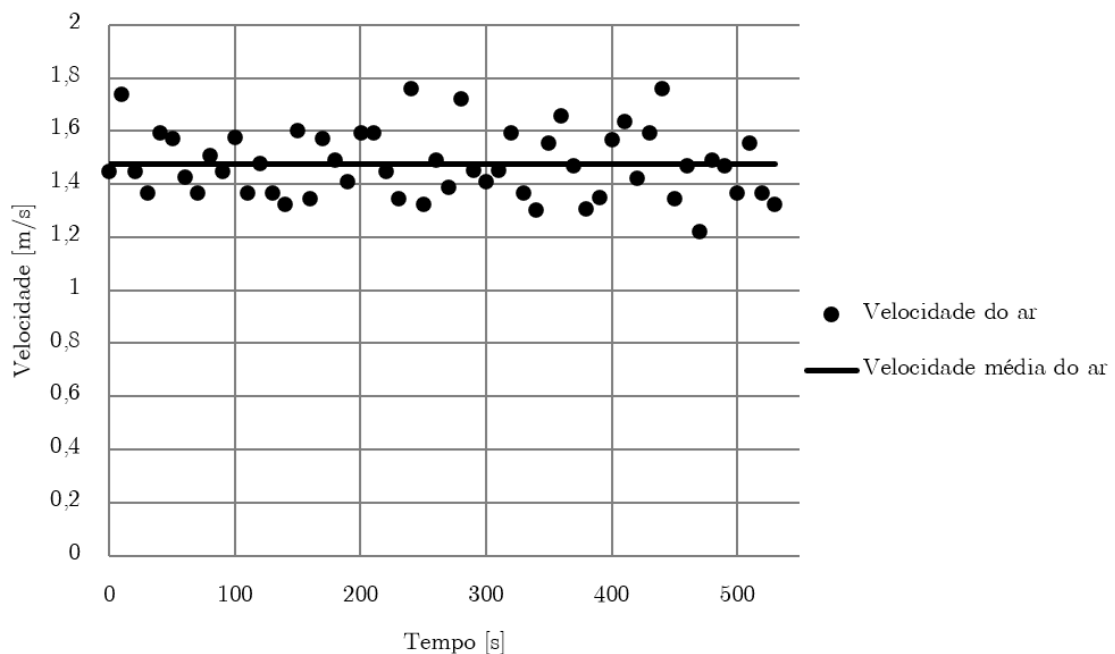


Figura A.9: Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 4.

Quanto à temperatura do PCM em cada uma das secções no instante de tempo $t = 0$ s, estas estão apresentadas na Tabela A.6. Contrariamente às temperaturas que se verificaram nos ensaios experimentais anteriores e à temperatura que se pretendia alcançar no início de cada teste (45 °C), o presente teste experimental não decorreu de acordo com o esperado.

Tabela A.6: Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 4.

	Secção 1	Secção 2
L = 0 m	38,56 °C	38,88 °C
L = 0,5 m	46,04 °C	37,03 °C
L = 1 m	36,87 °C	26,89 °C

A.4 Análise ao Teste 5

O teste 5 apresentou uma extensão de 180 s. Relativamente aos parâmetros deste estudo (caudal mássico, temperaturas de entrada do fluido e do ar ambiente, e velocidade do ar), a sua variação em cada instante de tempo e a média está apresentada nos gráficos das Figuras A.10, A.11 e A.12. Para averiguar a dispersão de cada um dos parâmetros em torno da média calcula-se o seu desvio padrão. A Tabela A.7 sumariza os valores obtidos. É de notar que o desvio padrão, face à média, do caudal mássico, quando comparado com os teste anteriores, é mais acentuado. Isto pode ser atribuído ao facto de, geralmente, os parâmetros demorarem cerca de 100 s até estabilizarem, o que atendendo à duração do presente teste pode não ter ocorrido.

Tabela A.7: Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 5.

Parâmetros	Valor médio	Desvio padrão (σ)
Caudal (g/s)	0,23	0,138
Temperatura de entrada do fluido (°C)	5,24	0,548
Temperatura do ar (°C)	15,01	0,912
Velocidade do ar (m/s)	1,49	0,242

A temperatura do PCM em cada uma das diferentes secções de medição encontra-se na Tabela A.8.

Tabela A.8: Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 5.

	Secção 1	Secção 2
L = 0 m	41,69 °C	41,66 °C
L = 0,5 m	51,80 °C	48,17 °C
L = 1 m	38,65 °C	39,60 °C

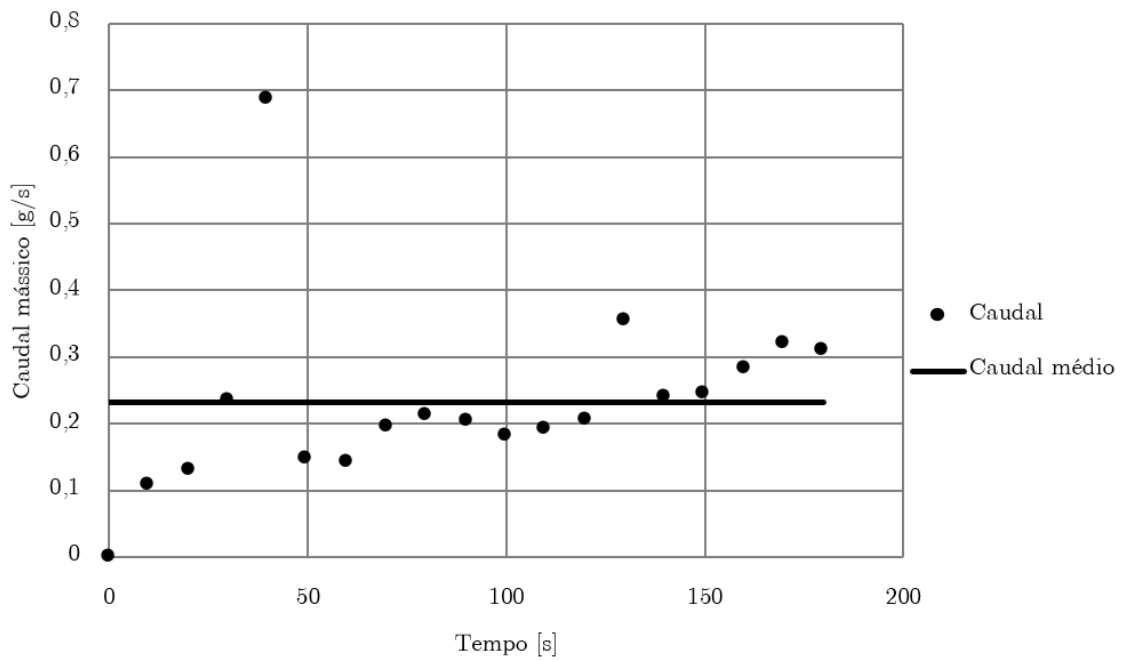


Figura A.10: Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 5.

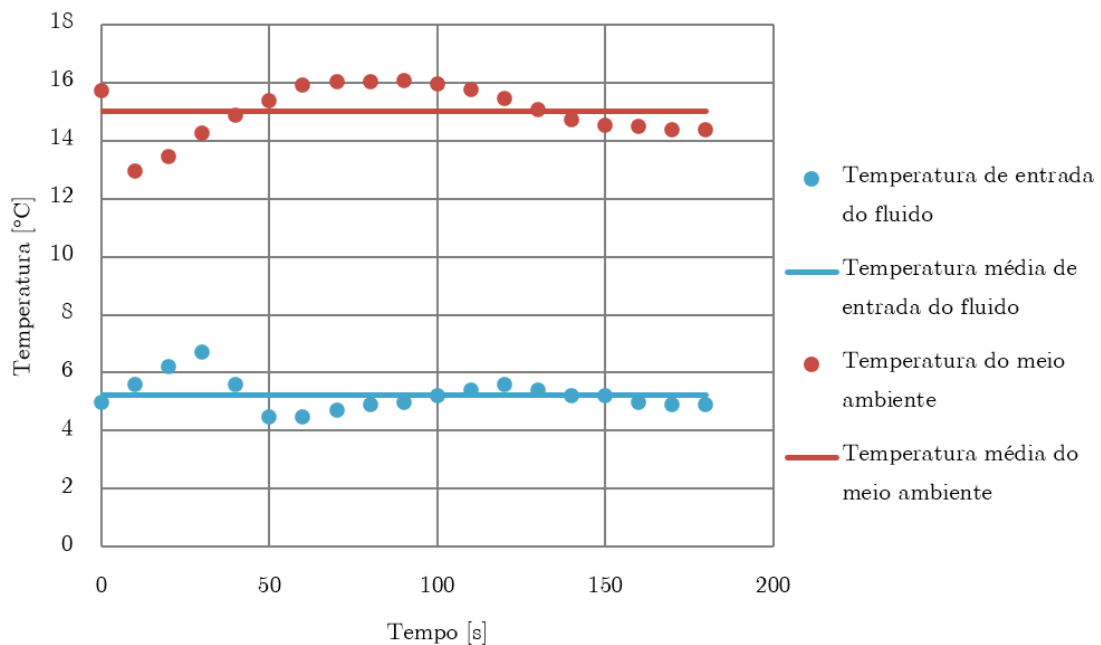


Figura A.11: Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 5.

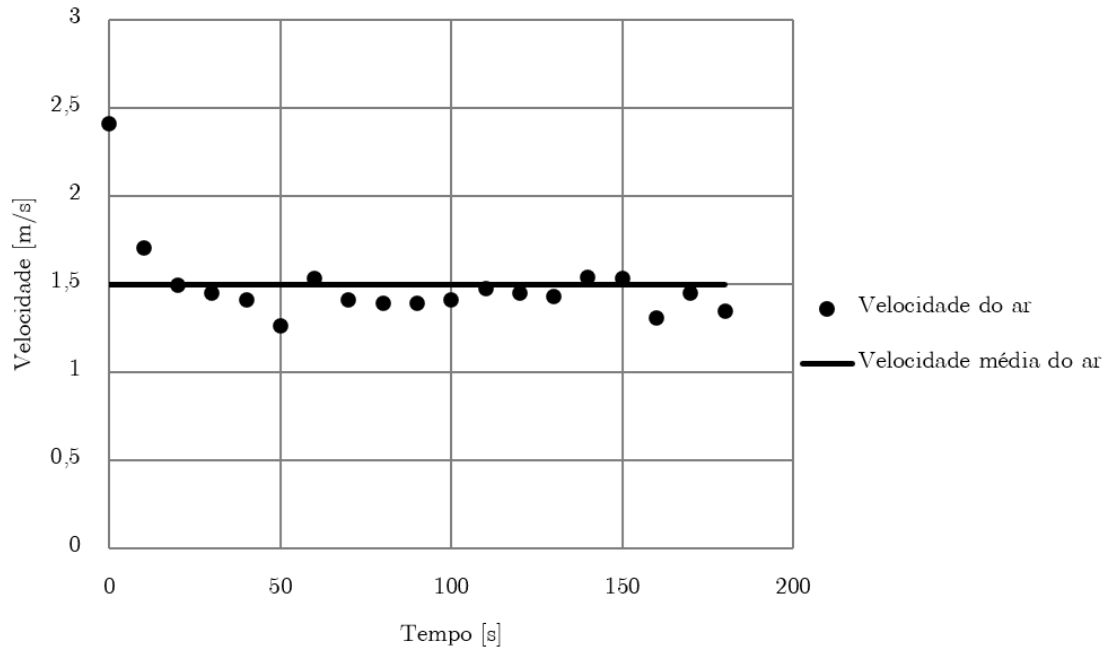


Figura A.12: Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 5.

A.5 Análise ao Teste 6

O ensaio experimental 6 teve uma duração de 1040s. A variação do caudal mássico em cada instante de tempo e a sua média encontram-se no gráfico da Figura A.13 , enquanto que a variação das temperaturas de entrada do fluido no tubo e do ar ambiente, bem como as suas médias, estão apresentados na Figura A.14. Quanto à velocidade do ar, a sua variação e a sua média são apresentadas no gráfico da Figura A.15. Com o objetivo de avaliar, tal como anteriormente, a dispersão dos dados, calcula-se o desvio padrão de cada um dos parâmetros. Estes e a média são apresentados na Tabela A.9. Pela análise desta tabela pode-se concluir que os valores médios dos parâmetros em estudo, exceto a temperatura de entrada do fluido, estão próximos dos valores registados por cada um, nos diferentes intervalos de tempo.

Tabela A.9: Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 6.

Parâmetros	Valor médio	Desvio padrão (σ)
Caudal (g/s)	0,08	0,056
Temperatura de entrada do fluido ($^{\circ}$ C)	10,57	1,102
Temperatura do ar ($^{\circ}$ C)	18,70	0,759
Velocidade do ar (m/s)	1,48	0,221

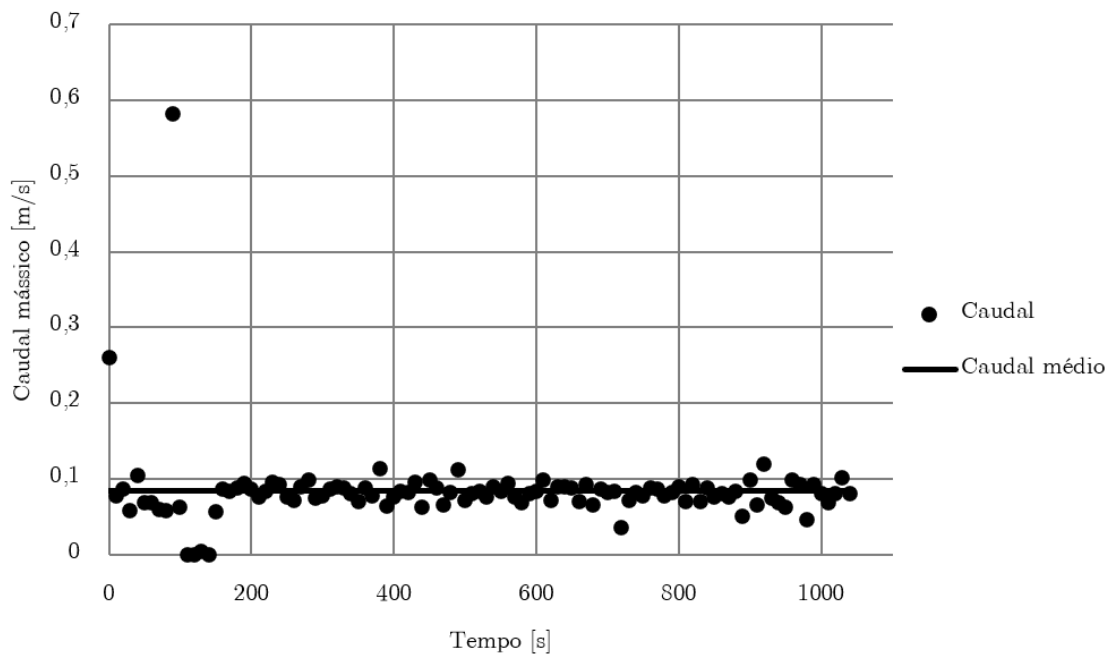


Figura A.13: Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 6.

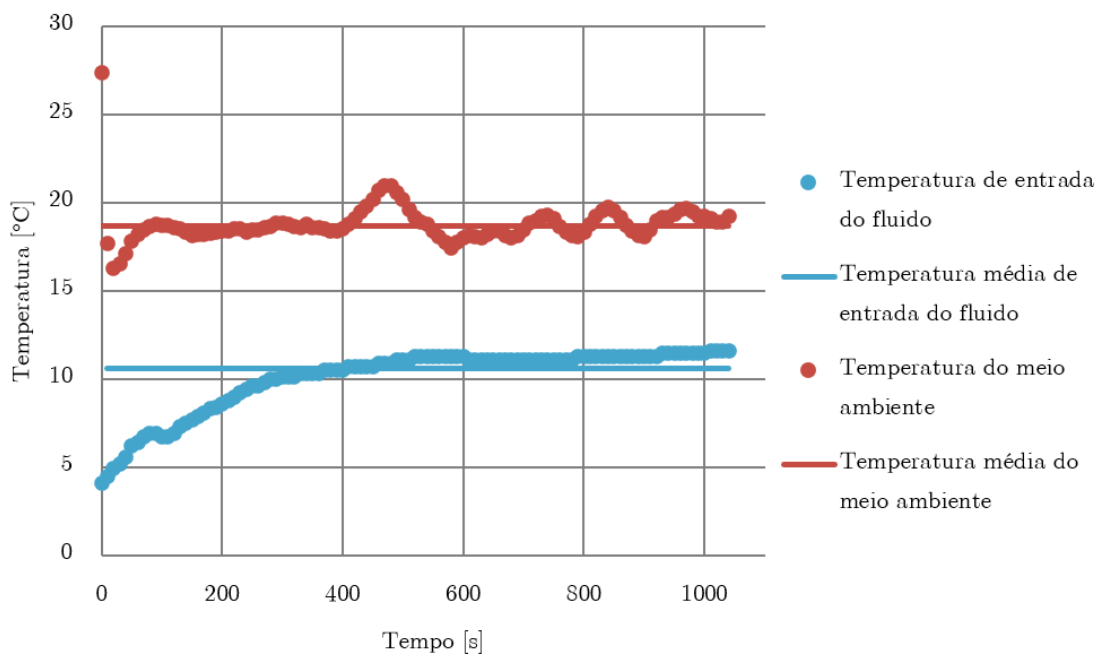


Figura A.14: Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 6.

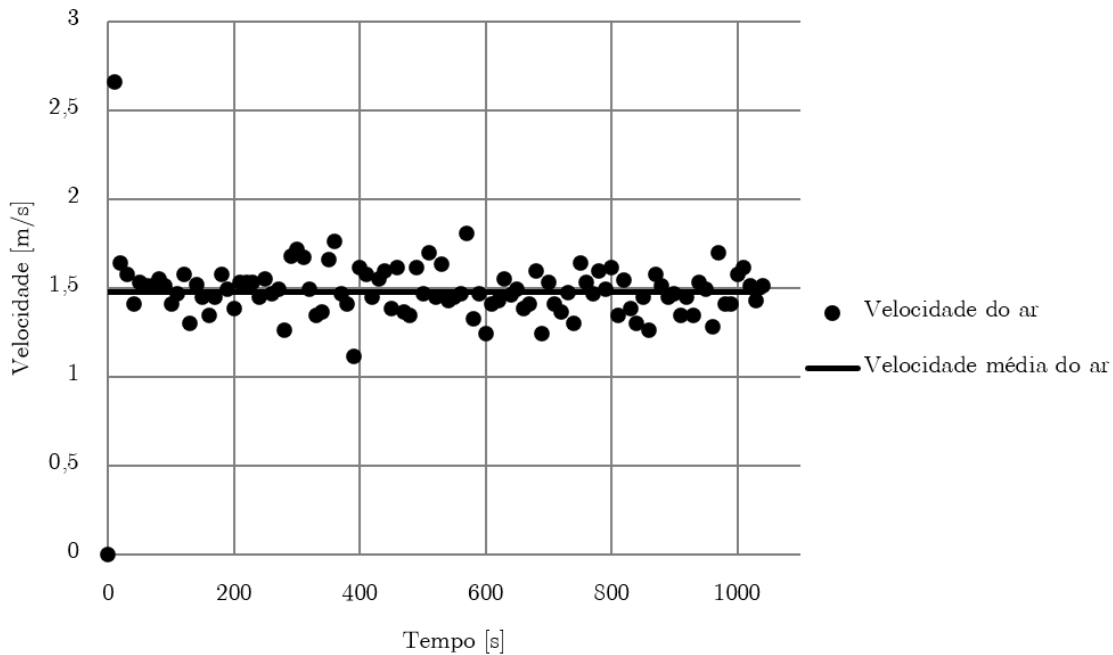


Figura A.15: Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 6.

No sentido de averiguar o estado do PCM no início do teste, o autor mede a temperatura do PCM em três segmentos longitudinais, sendo que em cada um destes se testa duas secções distintas. As temperaturas registadas estão na Tabela A.10.

Tabela A.10: Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 6.

	Secção 1	Secção 2
L = 0 m	42,61 °C	43,37 °C
L = 0,5 m	50,94 °C	48,09 °C
L = 1 m	47,08 °C	43,01 °C

A.6 Análise ao Teste 7

O teste 7 durou 320s e a variação do caudal mássico, das temperaturas de entrada do fluido no tubo e do meio ambiente, bem como a velocidade deste, encontram-se ilustradas nos gráficos das Figuras A.16, A.17 e A.18, respetivamente (em cada um dos gráficos está representada também a média de cada um dos parâmetros). Tal como para os testes anteriores, calcula-se o desvio padrão de cada um dos parâmetros, bem com a média dos mesmos, os quais estão sumarizados na Tabela A.11. Os valores obtidos para o desvio padrão, para cada um dos parâmetros, permitem concluir a aproximação entre o valor médio destes e valor registado em cada intervalo de tempo pode ser considerada uma boa aproximação.

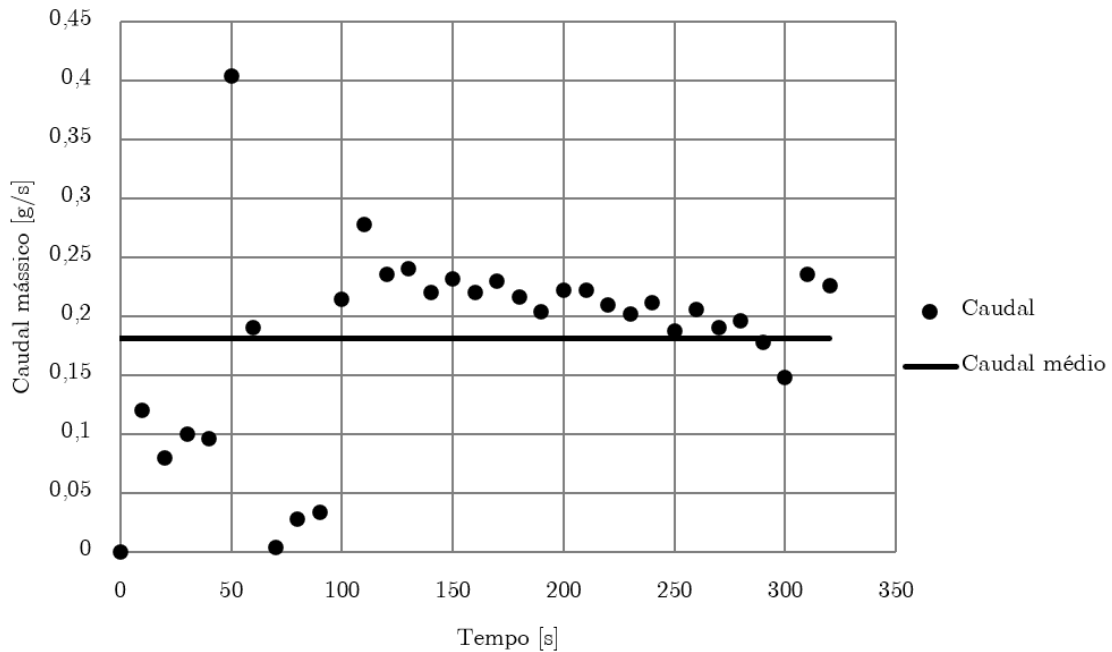


Figura A.16: Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 7.

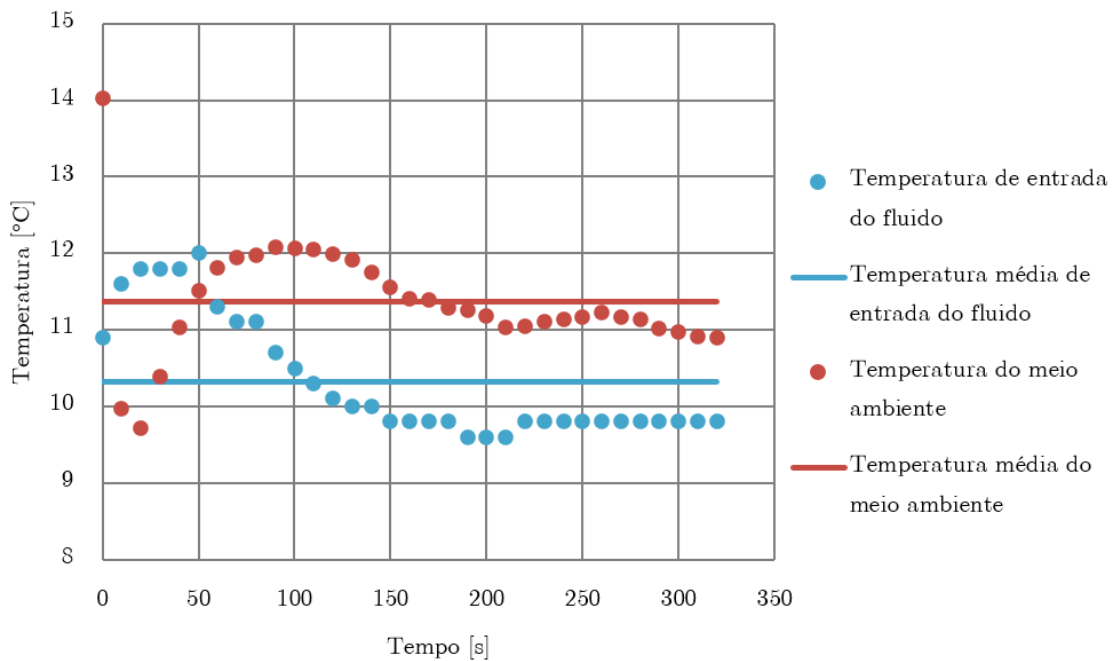


Figura A.17: Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 7.

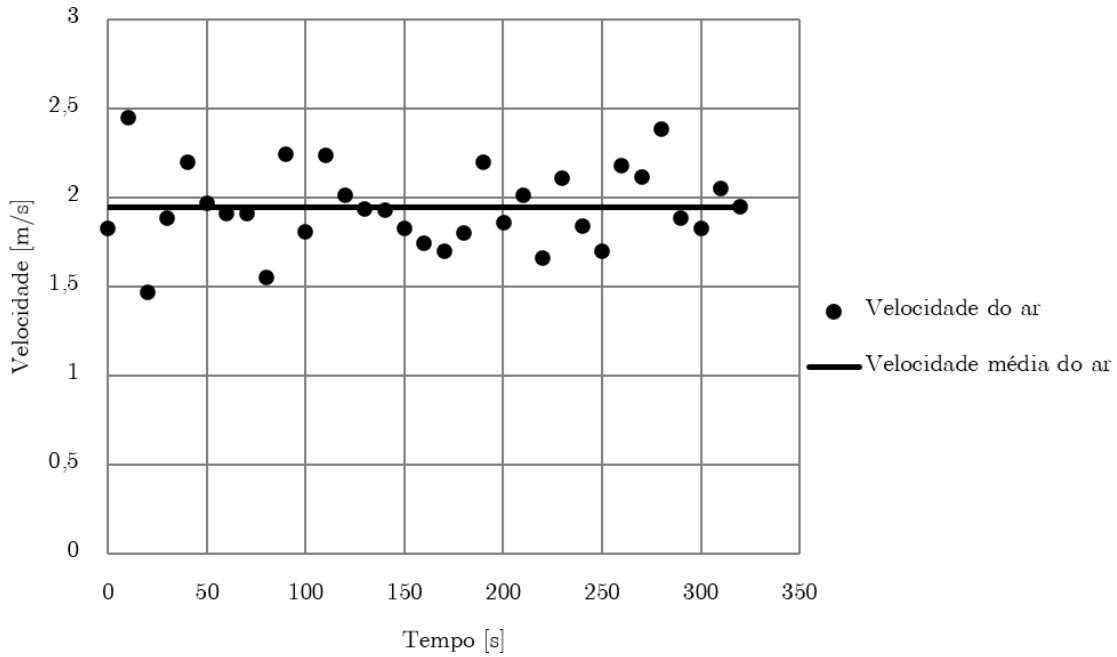


Figura A.18: Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 7.

Tabela A.11: Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 7.

Parâmetros	Valor médio	Desvio padrão (σ)
Caudal (g/s)	0,18	0,084
Temperatura de entrada do fluido ($^{\circ}\text{C}$)	10,33	0,782
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	11,37	0,737
Velocidade do ar (m/s)	1,95	0,225

No que diz respeito à temperatura do PCM aquando do início do ensaio experimental, esta também foi medida em seis pontos diferentes do tubo (três segmentos longitudinais e, em cada um destes mediu-se duas secções distintas) e as temperaturas registadas encontram-se na Tabela A.12.

Tabela A.12: Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 7.

	Secção 1	Secção 2
L = 0 m	41,85 $^{\circ}\text{C}$	42,36 $^{\circ}\text{C}$
L = 0,5 m	49,41 $^{\circ}\text{C}$	47,47 $^{\circ}\text{C}$
L = 1 m	39,61 $^{\circ}\text{C}$	40,45 $^{\circ}\text{C}$

A.7 Análise ao Teste 8

O ensaio experimental 8 apresentou um período de 790s, durante o qual quatro parâmetros distintos (caudal mássico, temperaturas de entrada do fluido e do ar ambiente, e velocidade do ar) apresentaram uma variação, sendo esta visível nos gráficos das Figuras A.19, A.20 e A.21. No sentido de avaliar a dispersão dos dados de cada um dos parâmetros em torno da média, procedeu-se ao cálculo do desvio padrão. O valor obtido para cada um dos parâmetros bem com a média de cada um destes encontram-se na Tabela A.13. Tendo por base os valores obtidos para cada um, pode-se concluir que, para o teste em análise, os valores de todos os parâmetros são próximos do valor médio de cada um.

Tabela A.13: Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 8.

Parâmetros	Valor médio	Desvio padrão (σ)
Caudal (g/s)	0,08	0,048
Temperatura de entrada do fluido ($^{\circ}\text{C}$)	15,80	0,262
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	15,62	0,657
Velocidade do ar (m/s)	2,00	0,191

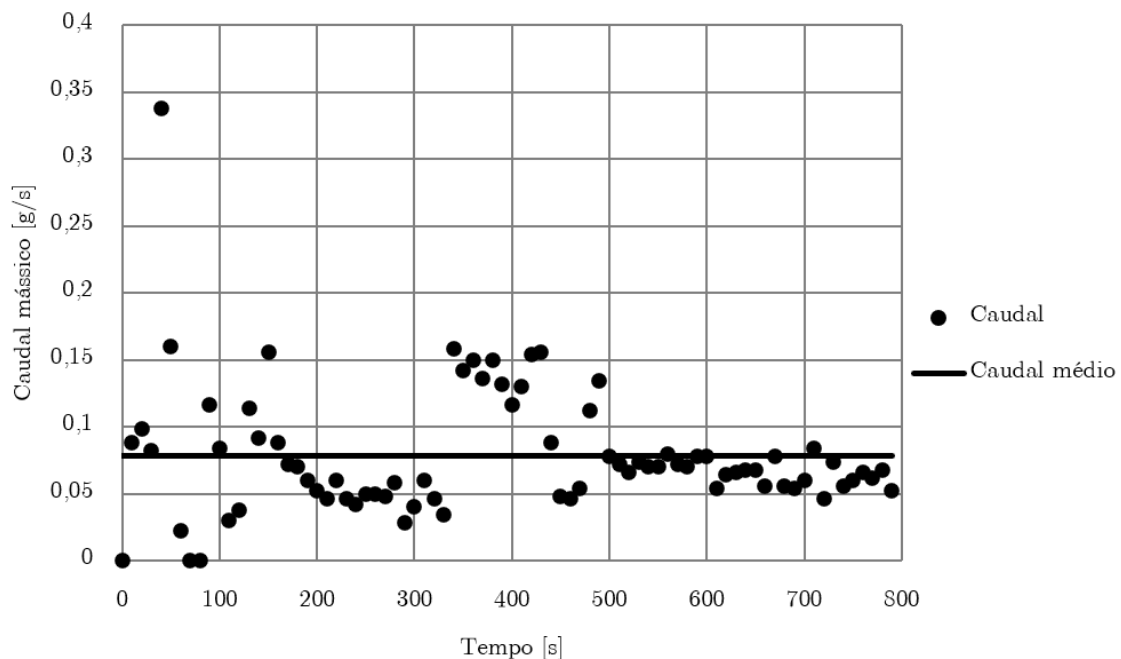


Figura A.19: Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 8.

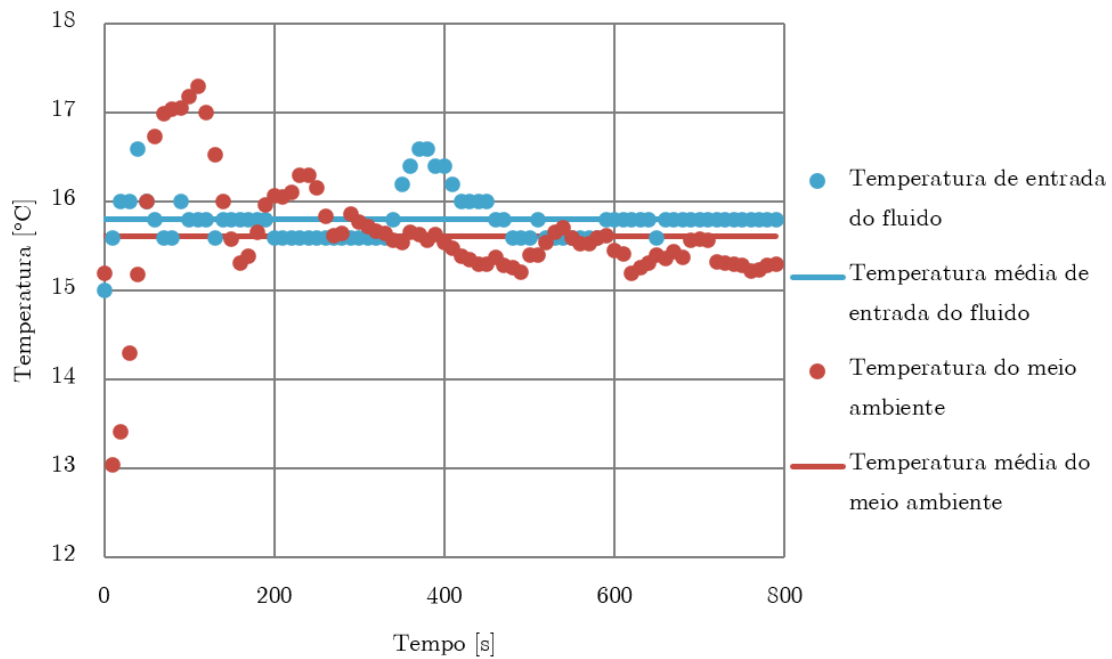


Figura A.20: Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 8.

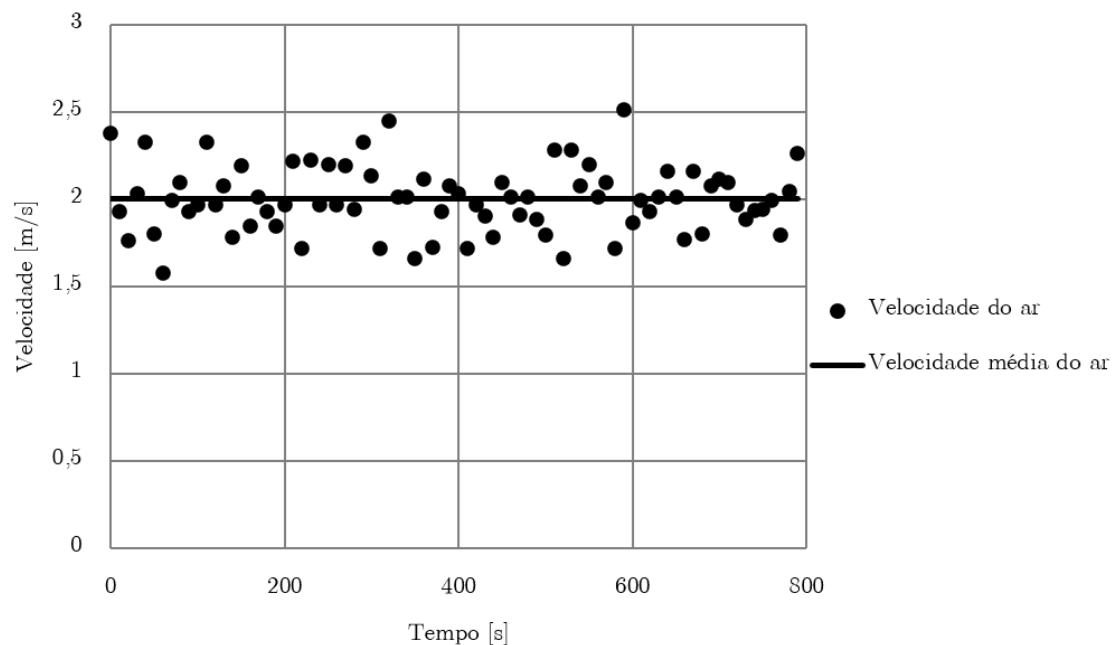


Figura A.21: Comparação da evolução da velocidade do ar com velocidade média do ar, Teste 8.

Quanto à temperatura do PCM, tal como para os testes anteriores, esta é medida em seis pontos diferentes (três segmentos longitudinais e, em cada um destes segmentos, medem-se duas secções distintas) e os valores alcançados para cada uma destas secções estão apresentados na Tabela A.14.

Tabela A.14: Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 8.

	Secção 1	Secção 2
L = 0 m	27,92 °C	48,06 °C
L = 0,5 m	55,72 °C	54,31 °C
L = 1 m	30,03 °C	50,94 °C

A.8 Análise ao Teste 9

O último ensaio experimental durou 630s. Durante este tempo o caudal mássico, a temperatura de entrada do fluido, a temperatura do meio ambiente e a sua velocidade variaram, tal como é possível observar nos gráficos das Figuras A.22, A.23 e A.24. Da mesma forma que em todos os testes, procedeu-se ao cálculo do desvio padrão, de forma a avaliar a dispersão em torno da média de cada um dos parâmetros. O valor obtido para estes bem como a média de cada um encontram-se na Tabela A.15. Tal como na maioria dos testes analisados anteriormente, também este revelou uma boa aproximação entre o valor médio e o valor registado para cada parâmetro nos diferentes intervalos de tempo.

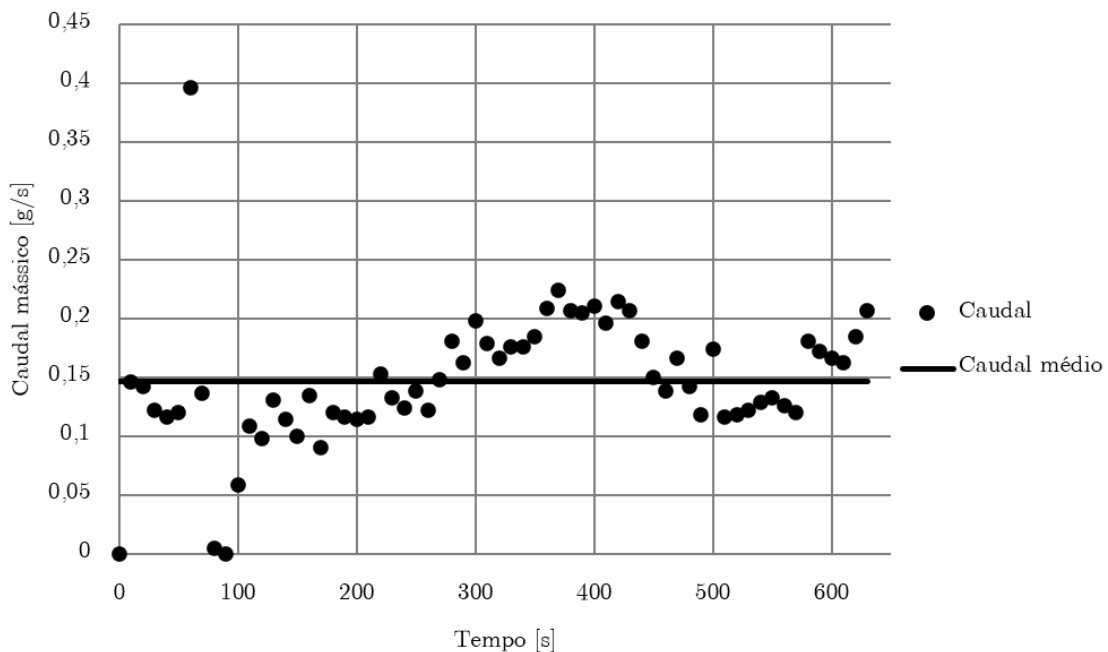


Figura A.22: Comparação da evolução do caudal mássico com o caudal mássico médio, Teste 9.

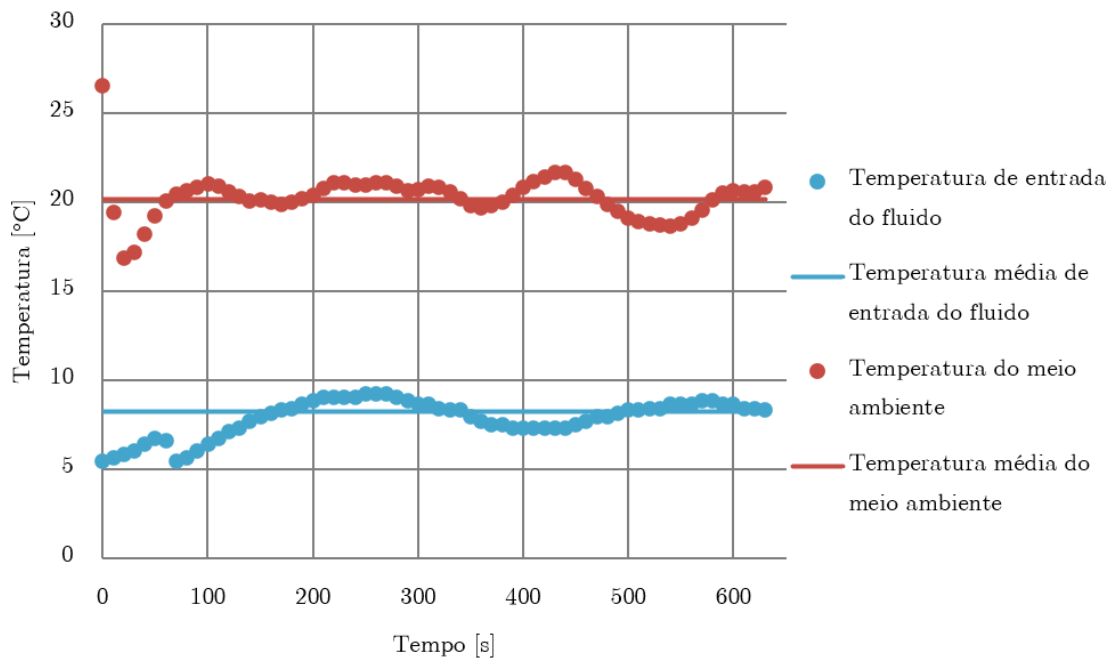


Figura A.23: Comparação da evolução das temperaturas de entrada do fluido e ambiente com as suas temperaturas médias, Teste 9.

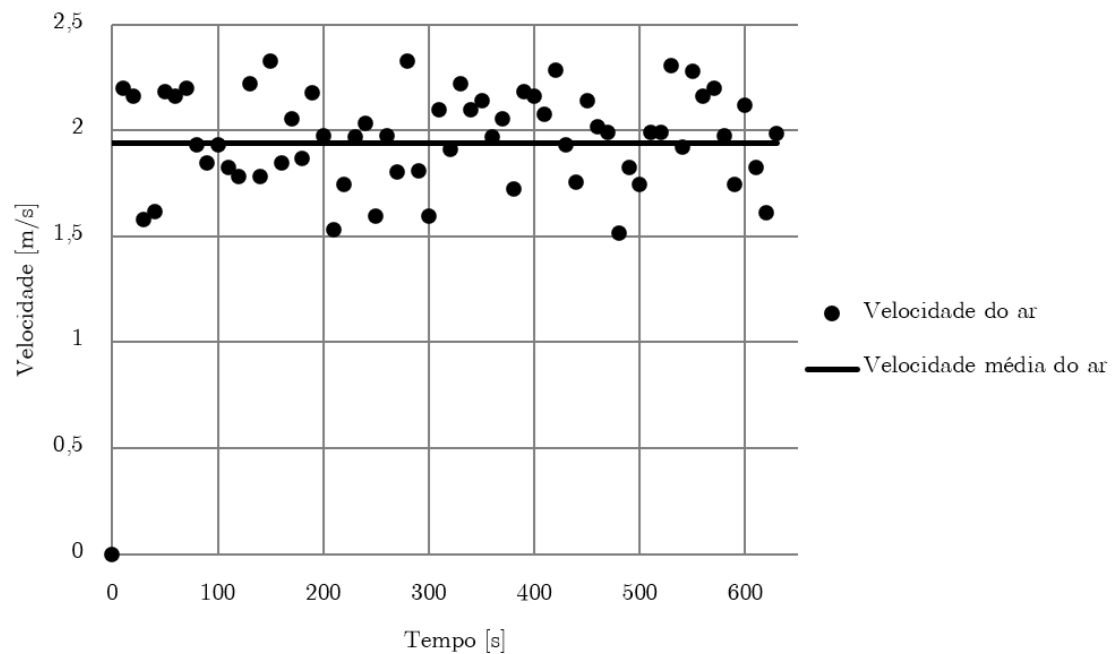


Figura A.24: Comparação da evolução da velocidade do ar com a velocidade média do ar, Teste 9.

Tabela A.15: Valor médio e desvio padrão para cada um dos parâmetros, para o Teste 9.

Parâmetros	Valor médio	Desvio padrão (σ)
Caudal (g/s)	0,15	0,050
Temperatura de entrada do fluido ($^{\circ}\text{C}$)	8,21	0,577
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	20,16	0,967
Velocidade do ar (m/s)	1,94	0,325


Relativamente à temperatura registada no PCM para cada uma das secções estas estão apresentadas na Tabela A.16.

Tabela A.16: Temperatura do PCM em cada um dos seis pontos, para o Teste 9.

	Secção 1	Secção 2
L = 0 m	42,44 $^{\circ}\text{C}$	41,38 $^{\circ}\text{C}$
L = 0,5 m	32,16 $^{\circ}\text{C}$	46,40 $^{\circ}\text{C}$
L = 1 m	40,56 $^{\circ}\text{C}$	41,63 $^{\circ}\text{C}$

Apêndice B

Especificações dos PCMs estudados



PureTemp® Thermal Energy Storage Materials

PureTemp thermal energy storage materials offer new levels of performance in storing or releasing large quantities of thermal energy at any given temperature. Our proprietary formulations and patented manufacturing processes yield superior quality biobased phase change materials at cost effective prices.

Some key properties:

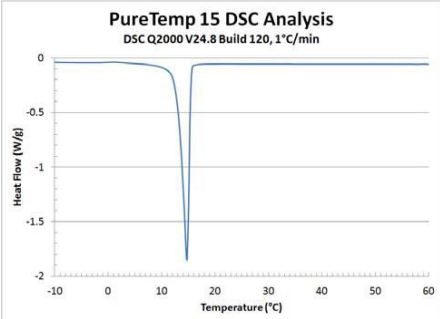
- Thermal energy storage capacities which average 200 J/g
- Over 200 unique, engineered phase change transition temperatures between -40 °C and 151 °C
- Consistent, repeatable performance over thousands of thermal (melt/solidify) cycles
- 100% renewable and readily biodegradable – produced from agricultural sources, not petroleum

PureTemp 15 Technical Information


PureTemp 15 is a USDA Certified Biobased product.

Appearance	Clear liquid, waxy solid
Melting point	15 °C
Heat storage capacity	182 J/g
Thermal conductivity (liquid)	0.15 W/m°C
Thermal conductivity (solid)	0.25 W/m°C
Density (liquid)	0.86 g/ml
Density (solid)	0.95 g/ml
Specific heat (liquid)	2.56 J/g°C
Specific heat (solid)	2.25 J/g°C

Typical physical properties are listed in the table above.




Entropy Solutions, LLC.
 4232 Park Glen Road, Minneapolis, MN 55416
 Tel: +1-952-941-0306
 Inquiry: www.puretemp.com/contact
 Website: www.puretemp.com
 © Entropy Solutions, LLC. All Rights Reserved



IMPORTANT NOTE: The preceding data is based on tests and experience which Entropy Solutions believes reliable, and is supplied for informational purposes only. Entropy Solutions expressly disclaims any liability whatsoever for damage or injury which results from the use of the preceding data and nothing contained therein shall constitute a guarantee, warranty, or representation (including freedom from patent liability) by Entropy Solutions with respect to the data, the product described, or its fitness for use for any specific purpose, even if that purpose is known to Entropy Solutions. Individual requirements may vary and each purchaser is urged to perform their own tests, experiments, and investigations in the use of this product. For detailed safety and handling information regarding these products, please refer to the respective PureTemp Safety Data Sheet.

Figura B.1: Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 15 °C [45].



PureTemp® Thermal Energy Storage Materials

PureTemp thermal energy storage materials offer new levels of performance in storing or releasing large quantities of thermal energy at any given temperature. Our proprietary formulations and patented manufacturing processes yield superior quality biobased phase change materials at cost effective prices.

Some key properties:

- Thermal energy storage capacities which average 200 J/g
- Over 200 unique, engineered phase change transition temperatures between -40 °C and 151 °C
- Consistent, repeatable performance over thousands of thermal (melt/solidify) cycles
- 100% renewable and readily biodegradable – produced from agricultural sources, not petroleum

PureTemp 18 Technical Information

PureTemp 18 is a USDA Certified Biobased product

Appearance	Clear liquid, waxy solid
Melting point	18 °C
Heat storage capacity	192 J/g
Thermal conductivity (liquid)	0.15 W/m°C
Thermal conductivity (solid)	0.25 W/m°C
Density (liquid)	0.86 g/ml
Density (solid)	0.95 g/ml
Specific heat (liquid)	1.74 J/g°C
Specific heat (solid)	1.47 J/g°C

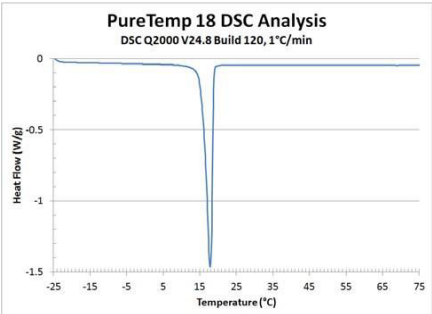
Typical physical properties are listed in the table above.

Thermal Cycle Stability


A thermal cycle stability study was performed on PureTemp 18 in which samples underwent a series of freeze and thaw cycles. The two-year study completed 10,000 thermal cycles, with performance analyses performed on the samples at various time points. The study for PureTemp 18 found that:

- The average latent heat for PureTemp 18, over the course of 10,000 cycles, passes the product specification.
- PureTemp 18 maintained a peak melting point of 19.1 ± 0.3 °C.

PureTemp 18 is stable through 10,000 thermal cycles, which is approximately 27.4 years of continuous daily usage.




Entropy Solutions, LLC.
 4232 Park Glen Road, Minneapolis, MN 55416
 Tel: +1-952-941-0306
 Inquiry: www.puretemp.com/contact
 Website: www.puretemp.com
 © Entropy Solutions, LLC. All Rights Reserved



IMPORTANT NOTE: The preceding data is based on tests and experience which Entropy Solutions believes reliable, and is supplied for informational purposes only. Entropy Solutions expressly disclaims any liability whatsoever for damage or injury which results from the use of the preceding data and nothing contained therein shall constitute a guarantee, warranty, or representation (including freedom from patent liability) by Entropy Solutions with respect to the data, the product described, or its fitness for use for any specific purpose, even if that purpose is known to Entropy Solutions. Individual requirements may vary and each purchaser is urged to perform their own tests, experiments, and investigations in the use of this product. For detailed safety and handling information regarding these products, please refer to the respective PureTemp Safety Data Sheet.

Figura B.2: Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 18 °C [45].



PureTemp® Thermal Energy Storage Materials

PureTemp thermal energy storage materials offer new levels of performance in storing or releasing large quantities of thermal energy at any given temperature. Our proprietary formulations and patented manufacturing processes yield superior quality biobased phase change materials at cost effective prices.

Some key properties:

- Thermal energy storage capacities which average 200 J/g
- Over 200 unique, engineered phase change transition temperatures between -40 °C and 151 °C
- Consistent, repeatable performance over thousands of thermal (melt/solidify) cycles
- 100% renewable and readily biodegradable – produced from agricultural sources, not petroleum

PureTemp 20 Technical Information

PureTemp 20 is a USDA Certified Biobased product

Appearance	Clear liquid, waxy solid
Melting point	20 °C
Heat storage capacity	171 J/g
Thermal conductivity (liquid)	0.14 W/m°C
Thermal conductivity (solid)	0.23 W/m°C
Density (liquid)	0.86 g/ml
Density (solid)	0.95 g/ml
Specific heat (liquid)	2.15 J/g°C
Specific heat (solid)	2.07 J/g°C

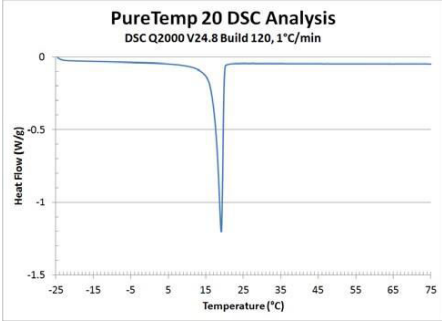
Typical physical properties are listed in the table above.

Thermal Cycle Stability

A thermal cycle stability study was performed on PureTemp 20 in which samples underwent a series of freeze and thaw cycles. The two year study completed 10,000 thermal cycles, with performance analyses performed on the samples at various time points. The study for PureTemp 20 found that:


- The average latent heat for PureTemp 20, over the course of 10,000 cycles, passes the product specification.
- PureTemp 20 maintained a peak melting point of 19.9 ± 0.3 °C.

PureTemp 20 is stable through 10,000 thermal cycles, which is approximately 27.4 years of continuous daily usage.




PureTemp 20 DSC Analysis
DSC Q2000 V24.8 Build 120, 1°C/min

Entropy Solutions, LLC.
4232 Park Glen Road, Minneapolis, MN 55416
Tel: +1-952-941-0306
Inquiry: www.puretemp.com/contact
Website: www.puretemp.com
© Entropy Solutions, LLC. All Rights Reserved



IMPORTANT NOTE: The preceding data is based on tests and experience which Entropy Solutions believes reliable, and is supplied for informational purposes only. Entropy Solutions expressly disclaims any liability whatsoever for damage or injury which results from the use of the preceding data and nothing contained therein shall constitute a guarantee, warranty, or representation (including freedom from patent liability) by Entropy Solutions with respect to the data, the product described, or its fitness for use for any specific purpose, even if that purpose is known to Entropy Solutions. Individual requirements may vary and each purchaser is urged to perform their own tests, experiments, and investigations in the use of this product. For detailed safety and handling information regarding these products, please refer to the respective PureTemp Safety Data Sheet.

Figura B.3: Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 20 °C [45].



PureTemp® Thermal Energy Storage Materials

PureTemp thermal energy storage materials offer new levels of performance in storing or releasing large quantities of thermal energy at any given temperature. Our proprietary formulations and patented manufacturing processes yield superior quality biobased phase change materials at cost effective prices.

Some key properties:

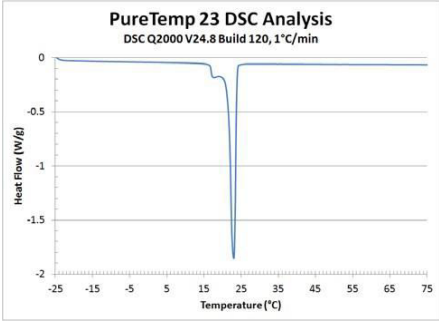
- Thermal energy storage capacities which average 200 J/g
- Over 200 unique, engineered phase change transition temperatures between -40 °C and 151 °C
- Consistent, repeatable performance over thousands of thermal (melt/solidify) cycles
- 100% renewable and readily biodegradable – produced from agricultural sources, not petroleum

PureTemp 23 Technical Information

PureTemp 23 is a USDA Certified Biobased product

Appearance	Clear liquid, waxy solid
Melting point	23 °C
Heat storage capacity	201 J/g
Thermal conductivity (liquid)	0.15 W/m°C
Thermal conductivity (solid)	0.25 W/m°C
Density (liquid)	0.83 g/ml
Density (solid)	0.91 g/ml
Specific heat (liquid)	1.99 J/g°C
Specific heat (solid)	1.84 J/g°C

Typical physical properties are listed in the table above.




Thermal Cycle Stability

A thermal cycle stability study was performed on PureTemp 23 in which samples underwent a series of freeze and thaw cycles. The two year study completed 10,000 thermal cycles, with performance analyses performed on the samples at various time points. The study for PureTemp 23 found that:

- The average latent heat for PureTemp 23, over the course of 10,000 cycles, passes the product specification.
- PureTemp 23 maintained a peak melting point of 23.4 ± 0.2 °C.


PureTemp 23 is stable through 10,000 thermal cycles, which is approximately 27.4 years of continuous daily usage.

Entropy Solutions, LLC.
 4232 Park Glen Road, Minneapolis, MN 55416
 Tel: +1-952-941-0306
 Inquiry: www.puretemp.com/contact
 Website: www.puretemp.com
 © Entropy Solutions, LLC. All Rights Reserved



IMPORTANT NOTE: The preceding data is based on tests and experience which Entropy Solutions believes reliable, and is supplied for informational purposes only. Entropy Solutions expressly disclaims any liability whatsoever for damage or injury which results from the use of the preceding data and nothing contained therein shall constitute a guarantee, warranty, or representation (including freedom from patent liability) by Entropy Solutions with respect to the data, the product described, or its fitness for use for any specific purpose, even if that purpose is known to Entropy Solutions. Individual requirements may vary and each purchaser is urged to perform their own tests, experiments, and investigations in the use of this product. For detailed safety and handling information regarding these products, please refer to the respective PureTemp Safety Data Sheet.

Figura B.4: Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 23 °C [45].



PureTemp® Thermal Energy Storage Materials

PureTemp thermal energy storage materials offer new levels of performance in storing or releasing large quantities of thermal energy at any given temperature. Our proprietary formulations and patented manufacturing processes yield superior quality biobased phase change materials at cost effective prices.

Some key properties:

- Thermal energy storage capacities which average 200 J/g
- Over 200 unique, engineered phase change transition temperatures between -40 °C and 151 °C
- Consistent, repeatable performance over thousands of thermal (melt/solidify) cycles
- 100% renewable and readily biodegradable – produced from agricultural sources, not petroleum

PureTemp 25 Technical Information

PureTemp 25 is a USDA Certified Biobased product

Appearance	Clear liquid, waxy solid
Melting point	25 °C
Heat storage capacity	187 J/g
Thermal conductivity (liquid)	0.15 W/m°C
Thermal conductivity (solid)	0.25 W/m°C
Density (liquid)	0.86 g/ml
Density (solid)	0.95 g/ml
Specific heat (liquid)	2.29 J/g°C
Specific heat (solid)	1.99 J/g°C

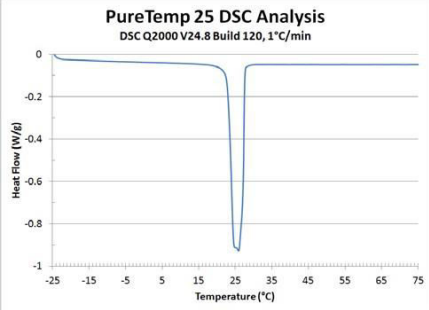
Typical physical properties are listed in the table above.

Thermal Cycle Stability

A thermal cycle stability study was performed on PureTemp 25 in which samples underwent a series of freeze and thaw cycles. The two-year study completed 10,000 thermal cycles, with performance analyses performed on the samples at various time points. The study for PureTemp 25 found that:


- The average latent heat for PureTemp 25, over the course of 10,000 cycles, passes the product specification.
- PureTemp 25 maintained a peak melting point of 25.2 ± 1.1 °C.

PureTemp 25 is stable through 10,000 thermal cycles, which is approximately 27.4 years of continuous daily usage.




PureTemp 25 DSC Analysis
DSC Q2000 V24.8 Build 120, 1°C/min

Entropy Solutions, LLC.
4232 Park Glen Road, Minneapolis, MN 55416
Tel: +1-952-941-0306
Inquiry: www.puretemp.com/contact
Website: www.puretemp.com
© Entropy Solutions, LLC. All Rights Reserved



IMPORTANT NOTE: The preceding data is based on tests and experience which Entropy Solutions believes reliable, and is supplied for informational purposes only. Entropy Solutions expressly disclaims any liability whatsoever for damage or injury which results from the use of the preceding data and nothing contained therein shall constitute a guarantee, warranty, or representation (including freedom from patent liability) by Entropy Solutions with respect to the data, the product described, or its fitness for use for any specific purpose, even if that purpose is known to Entropy Solutions. Individual requirements may vary and each purchaser is urged to perform their own tests, experiments, and investigations in the use of this product. For detailed safety and handling information regarding these products, please refer to the respective PureTemp Safety Data Sheet.

Figura B.5: Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 25 °C [45].



PureTemp® Thermal Energy Storage Materials

PureTemp thermal energy storage materials offer new levels of performance in storing or releasing large quantities of thermal energy at any given temperature. Our proprietary formulations and patented manufacturing processes yield superior quality biobased phase change materials at cost effective prices.

Some key properties:

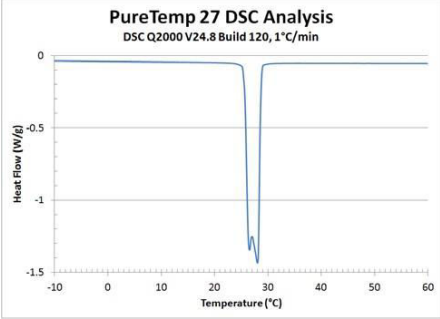
- Thermal energy storage capacities which average 200 J/g
- Over 200 unique, engineered phase change transition temperatures between -40 °C and 151 °C
- Consistent, repeatable performance over thousands of thermal (melt/solidify) cycles
- 100% renewable and readily biodegradable – produced from agricultural sources, not petroleum

PureTemp 27 Technical Information


PureTemp 27 is a USDA Certified Biobased product

Appearance	Clear liquid, waxy solid
Melting point	27 °C
Heat storage capacity	202 J/g
Thermal conductivity (liquid)	0.15 W/m°C
Thermal conductivity (solid)	0.25 W/m°C
Density (liquid)	0.86 g/ml
Density (solid)	0.95 g/ml
Specific heat (liquid)	2.63 J/g°C
Specific heat (solid)	2.46 J/g°C

Typical physical properties are listed in the table above.



Entropy Solutions, LLC.
 4232 Park Glen Road, Minneapolis, MN 55416
 Tel: +1-952-941-0306
 Inquiry: www.puretemp.com/contact
 Website: www.puretemp.com
 © Entropy Solutions, LLC. All Rights Reserved



IMPORTANT NOTE: The preceding data is based on tests and experience which Entropy Solutions believes reliable, and is supplied for informational purposes only. Entropy Solutions expressly disclaims any liability whatsoever for damage or injury which results from the use of the preceding data and nothing contained therein shall constitute a guarantee, warranty, or representation (including freedom from patent liability) by Entropy Solutions with respect to the data, the product described, or its fitness for use for any specific purpose, even if that purpose is known to Entropy Solutions. Individual requirements may vary and each purchaser is urged to perform their own tests, experiments, and investigations in the use of this product. For detailed safety and handling information regarding these products, please refer to the respective PureTemp Safety Data Sheet.

Figura B.6: Ficha técnica do PCM com uma temperatura de fusão de 27 °C [45].

Apêndice C

Gráficos das curvas cumulativas de energia para os três estudos

C.1 Estudo da geometria da serpentina

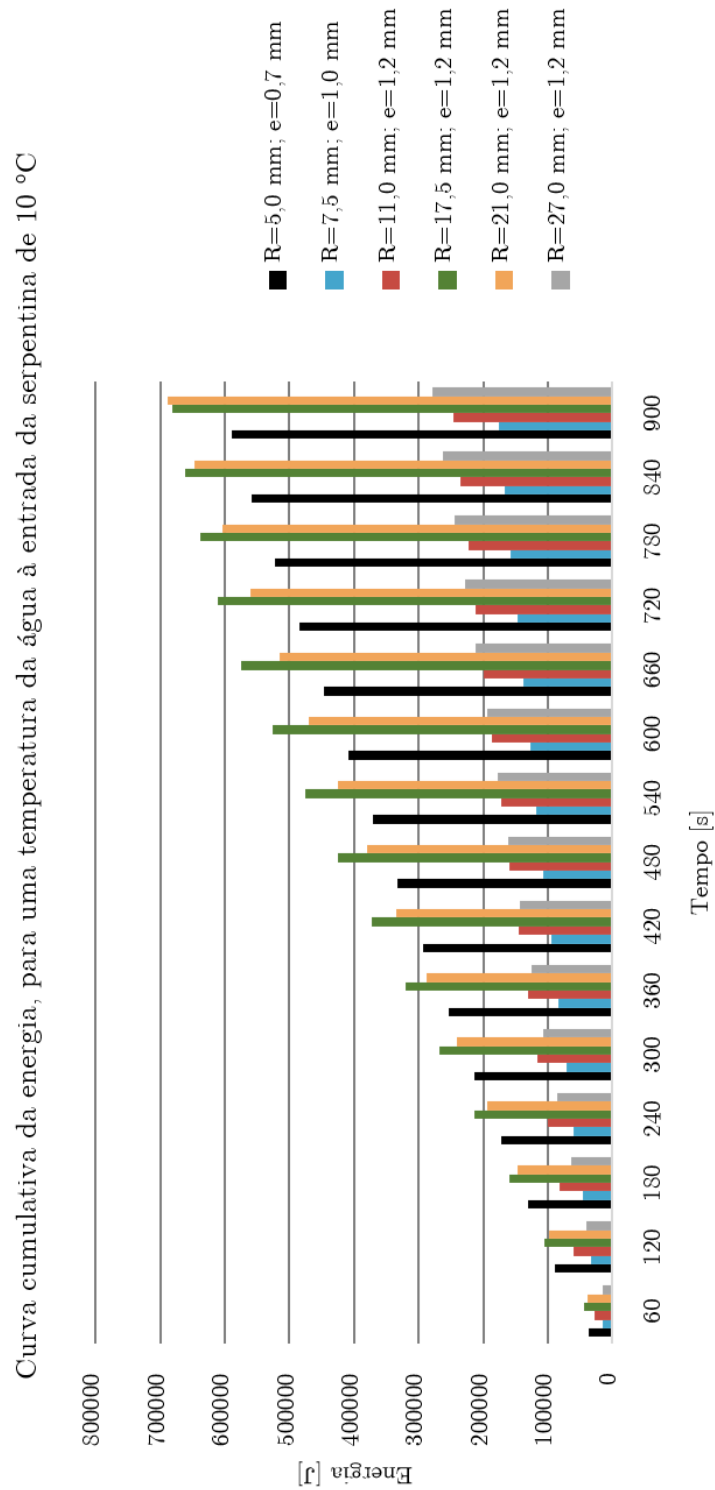


Figura C.1: Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 10 °C, em intervalos de 60 s, para cada uma das geometrias em estudo.

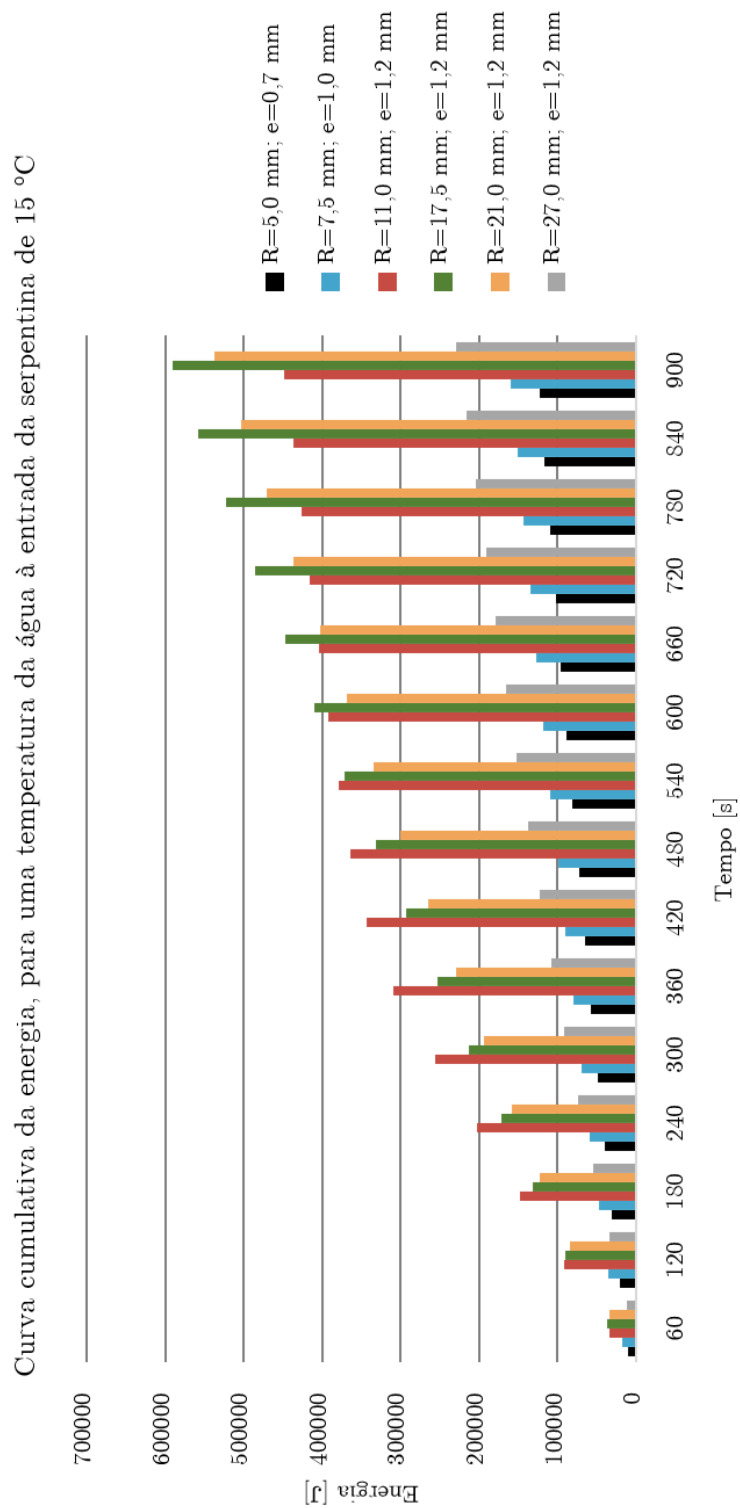


Figura C.2: Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 15 °C, em intervalos de 60 s, para cada uma das geometrias em estudo.

C.2 Estudo do caudal mássico do fluido operante

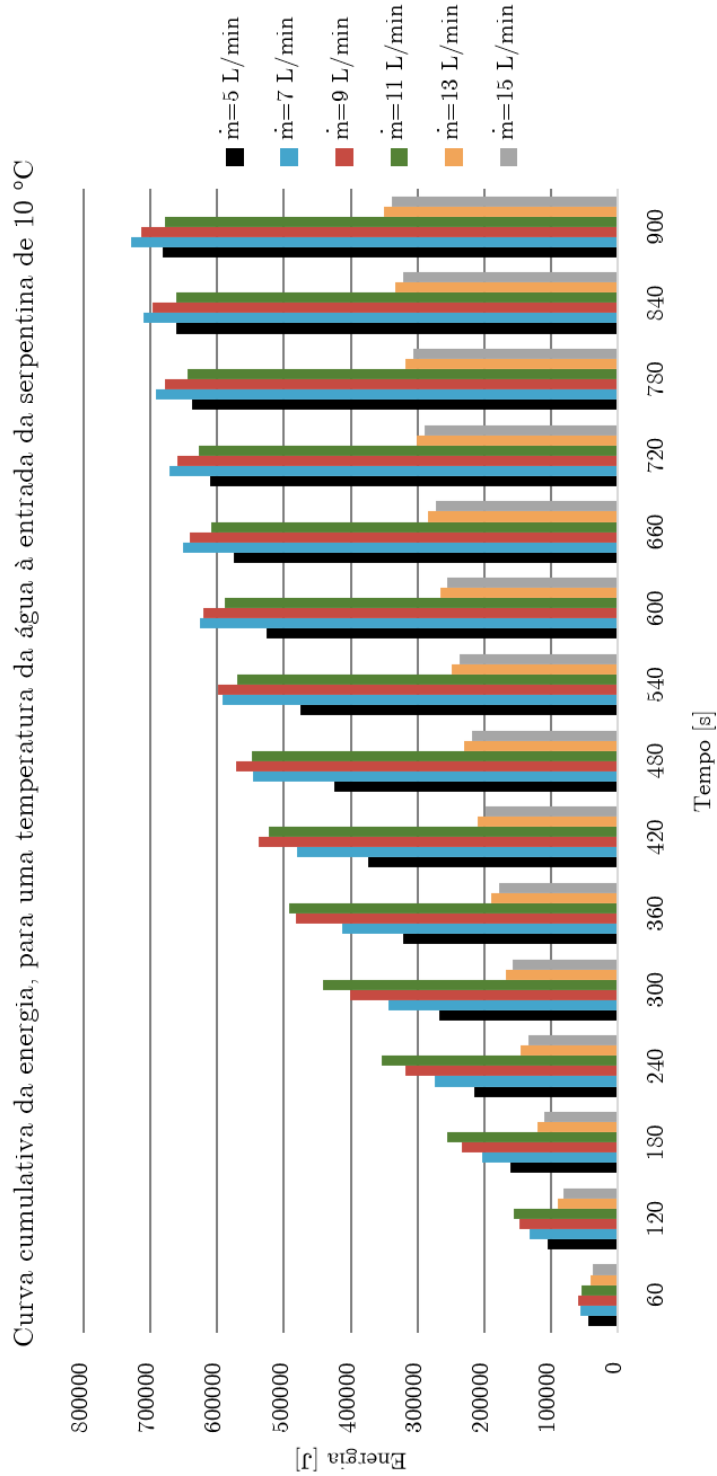


Figura C.3: Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 10 °C, em intervalos de 60s, para cada um dos caudais em estudo.

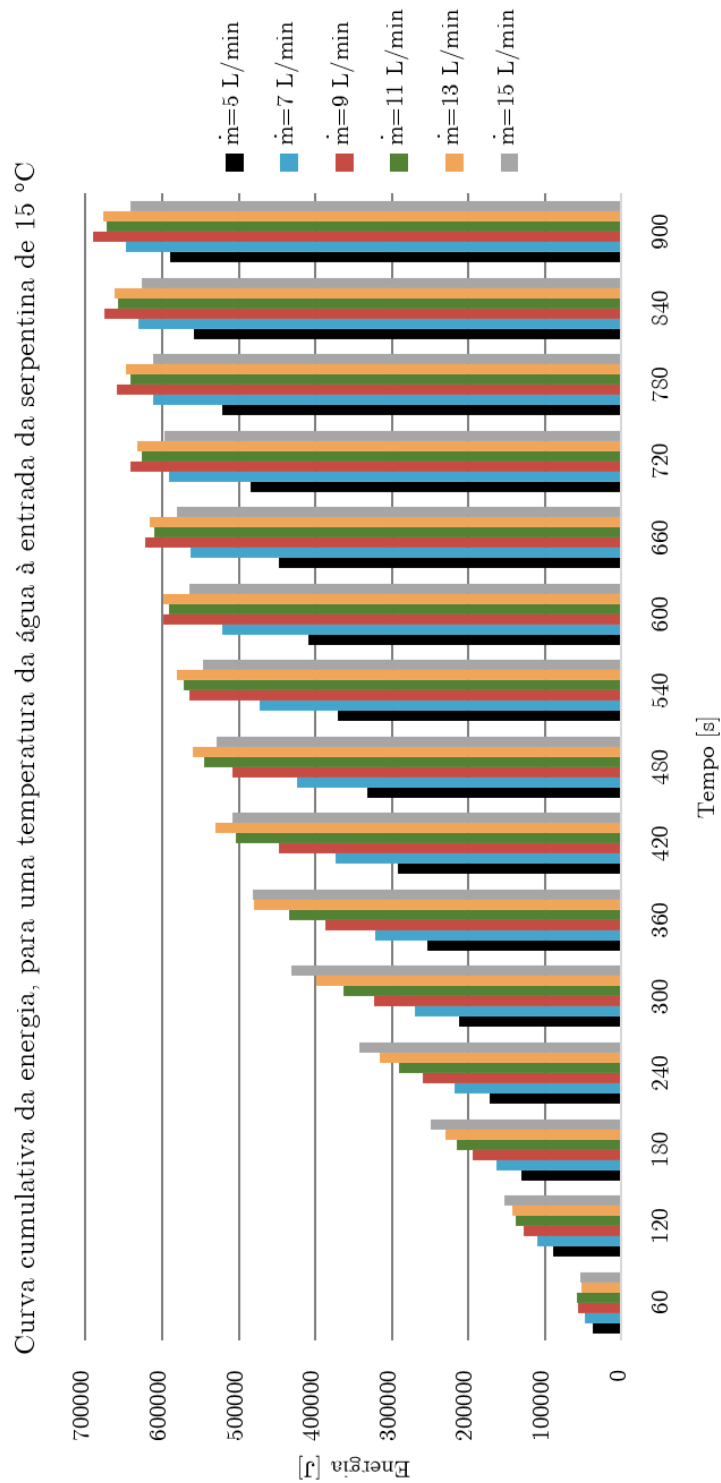


Figura C.4: Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 15 °C, em intervalos de 60s, para cada um dos caudais em estudo.

C.3 Estudo para determinar o melhor PCM

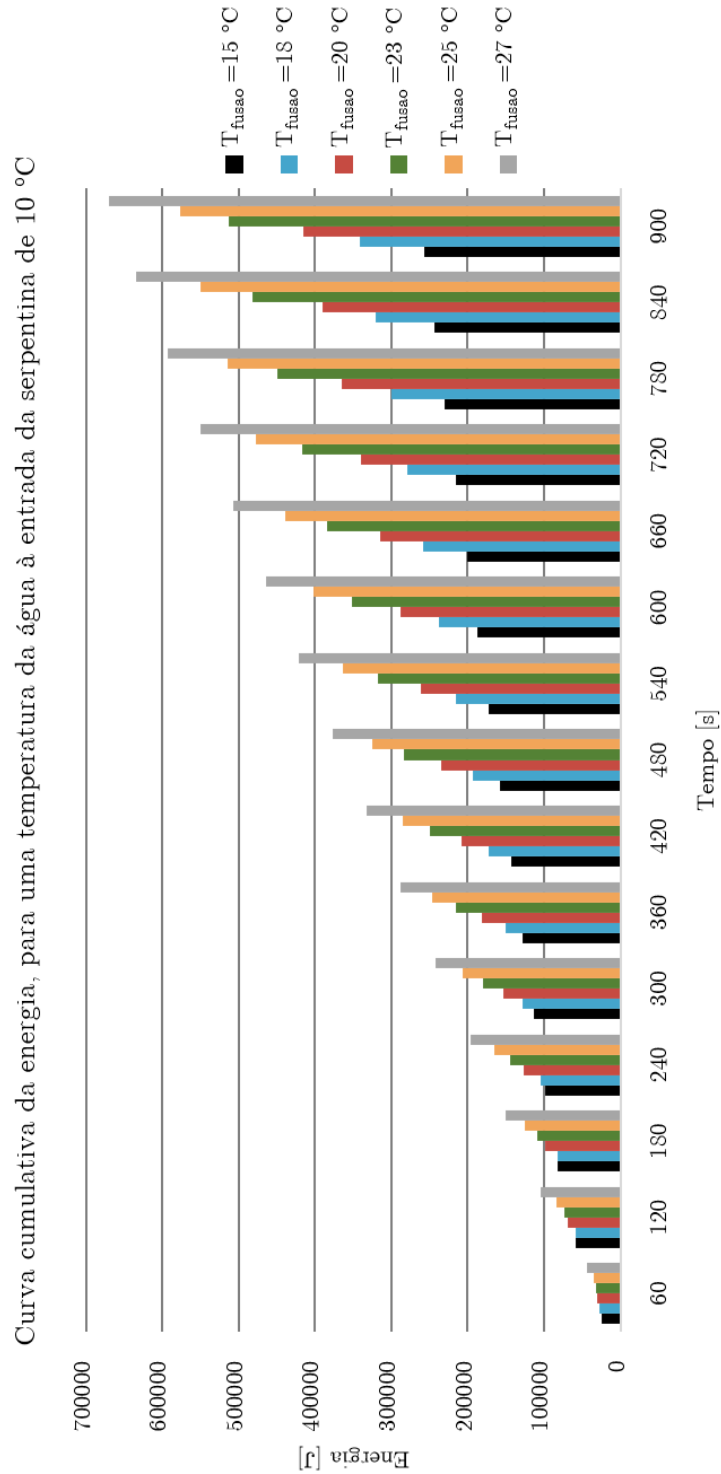


Figura C.5: Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 10 °C, em intervalos de 60s, para cada um dos PCMs em estudo.

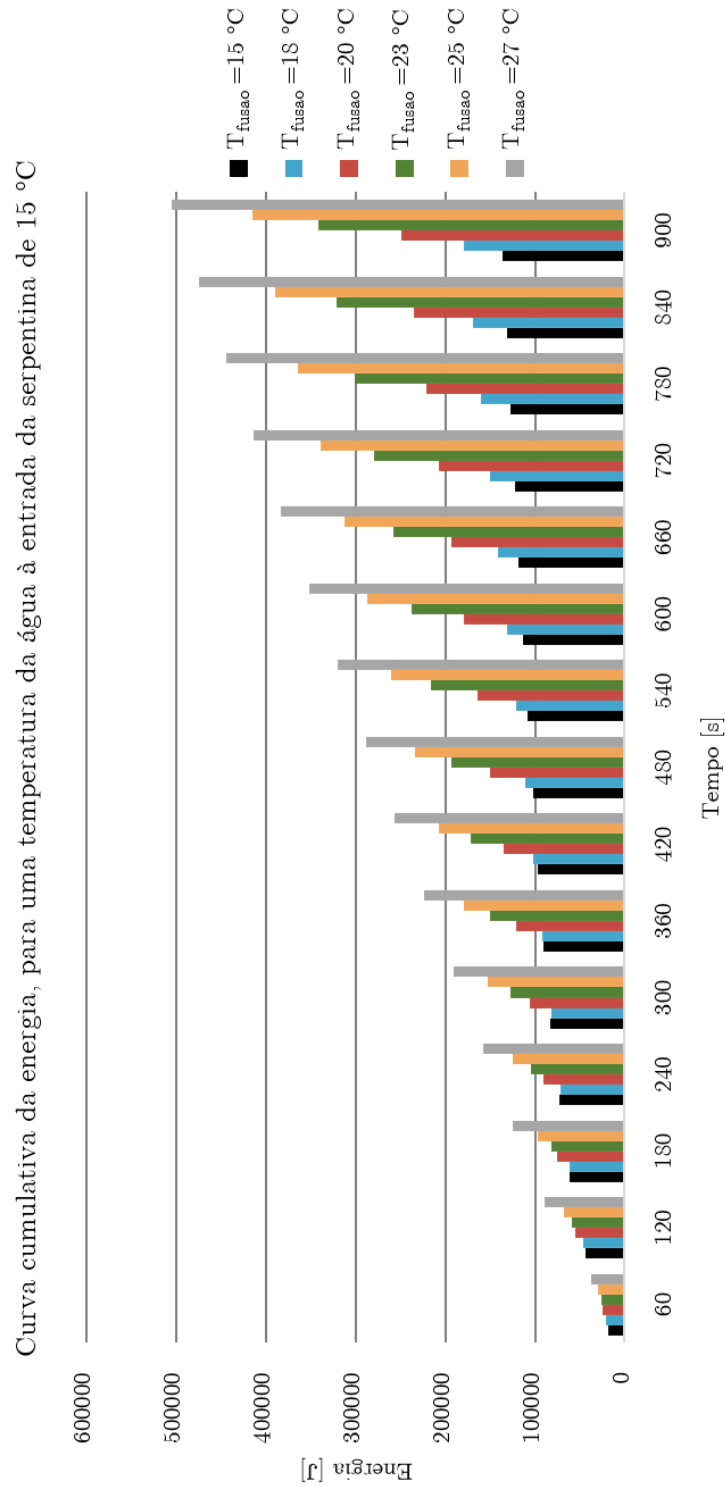


Figura C.6: Evolução da energia acumulada pela água, para uma temperatura de entrada de 15 °C, em intervalos de 60 s, para cada um dos PCMs em estudo.