



Universidade de Aveiro
2019

Departamento de Engenharia Mecânica

**Ricardo Jorge
Mendes Jacinto
Perdigão Urbano**

**Análise computacional do armazenamento energético em
materiais de mudança de fase**



**Ricardo Jorge
Mendes Jacinto
Perdigão Urbano**

**Análise computacional do armazenamento energético em
materiais de mudança de fase**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica de Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e de Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar 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

o júri

presidente

Professor Doutor Vítor António Ferreira da Costa
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

vogais

Professor Doutor Romeu da Silva Vicente
Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Nelson Amadeu Dias Martins
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Aos meus orientadores científicos, Professor Doutor Nelson Martins e Professor Doutor Fernando Neto, pela disponibilidade, orientação e aconselhamento que permitiram a realização desta dissertação.

Ao Daniel Marques pela disponibilidade e entreatajuda na aprendizagem do software ANSYS, que permitiu a elaboração desta dissertação.

Aos meus pais por estarem sempre a meu lado ao longo de todo o meu percurso académico, suportando-me de forma incondicional em todas as fases da minha vida, tornando assim possível a conclusão desta etapa.

A todos os meus amigos que me acompanharam ao longo de toda esta jornada pelo seu companheirismo, ajuda e paciência para me aturar durante estes cinco anos, bem como por todos os momentos de alegria e diversão que me proporcionaram.

Um agradecimento especial à minha namorada, Gaby, por todo o apoio e amor incondicional que me deu em todas as fases da minha vida, fazendo-me crescer como pessoa e dando-me força para ultrapassar diversas situações que jamais conseguiria suportar sozinho, tornando possível a conclusão desta etapa.

A todos os que me acompanharam ao longe deste ciclo, um grande obrigado!

palavras-chave

Materiais de Mudança de Fase, (MMF / PCM), armazenamento de calor, sistema armazenamento de AQS, análise computacional, mecânica dos fluidos computacional (MFC / CFD)

resumo

Os sistemas que requerem o armazenamento de energia térmica são necessários em inúmeras aplicações, desde os sistemas de produção de água quente sanitária aos sistemas de conversão de energias renováveis, com maior ou menor complexidade e a diferentes temperaturas. A utilização dos materiais de mudança de fase (MMF) para o armazenamento de energia térmica é uma das formas de intensificar o armazenamento de calor por tirar partido do calor latente destes materiais, por norma maior do que a sua capacidade calorífica, dita sensível. Contudo, a reduzida condutibilidade térmica de alguns PCM, nomeadamente parafinas e derivados, levanta desafios importantes relativamente à sua integração em sistemas e processos onde sejam requeridas constantes de tempo mais baixas. É neste contexto que surge a presente dissertação, na qual é proposta o estudo do armazenamento energético usando estes materiais integrados em sistemas de permuta destinados ao aproveitamento de energia térmica a baixa temperatura, para o pré aquecimento da água de alimentação a tanques de armazenamento de águas quentes sanitárias (AQS).

Para se estudar o comportamento de diferentes configurações para o sistema proposto, recorreu-se à análise computacional de escoamentos com troca de calor, recorrendo a um software comercial ANSYS (Fluent). Com o objetivo de melhorar propriedades dos materiais de mudança de fase, misturou-se à parafina utilizada uma malha de aço que funcionou como uma alheta tridimensional porosa. Conseguiu cumprir-se o objetivo de analisar, para diferentes casos, qual a combinação de parafina e malha de aço que otimizasse as propriedades do material, aumentando em qualquer um dos casos a sua condutividade térmica e acelerando o processo de transferência de calor, e a quantidade de água fornecida pelo sistema respeitando determinados critérios referentes ao ponto de paragem do processo de descarga, independentemente do critério adotado existe uma melhoria significativa com a utilização da malha de aço.

keywords

Phase change material (PCM), heat storage, heat transfer to a flowing fluid, sanitary hot water storage system, computational analysis, computational fluid dynamics (CFD)

abstract

Systems that require heat energy storage are required in an increasing number of applications, from sanitary hot water production systems to renewable energy conversation systems, with higher or lower complexity and different temperatures. The use of phase change materials (PCM) for the thermal energy storage is one way to enhance the heat storage by taking advantage of their latent heat, that is, as a rule higher than the sensitive heat capacity. Nevertheless, the low thermal conductivity of some PCM, namely paraffins and their derivatives, brings some challenges to their integration in systems and procedures that require lower time constants. It is in this context that arises this dissertation, in which is proposed to study the energy storage utilizing this materials integrated in exchange systems intended to low temperature thermal energy harnessing, to pre-heat the water that charges the sanitary hot water systems tanks.

In order to study the behaviour of different system configurations resorted to heat exchange flows computational analysis, by utilizing the commercial software ANSYS (Fluent). With the objective of enhance the properties of phase change materials, it was mixed to the paraffin a steel mesh that worked as a three-dimensional porous fin. Was able to meet the objectives of analysing, for different cases, which paraffin and steel mesh combination optimize the material properties, always enhancing the thermal conductivity and the heat transfer process, and the amount of water provided in order to some criteria referring the discharge process stopping point, regardless of the selected one there is a significant improvement when the steel mesh is utilized.

Índice Geral

Índice Geral.....	x
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Tabelas.....	xiv
Abreviaturas e Símbolos	xv
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Contextualização.....	2
1.2. Objetivo geral do trabalho	5
1.3. Revisão bibliográfica	5
1.3.1. Armazenamento de energia, fontes renováveis e redes elétricas inteligentes	5
1.3.2. Modos de armazenamento de energia térmica	6
1.3.3. Armazenamento de energia térmica.....	8
1.3.4. PCM e suas características	10
1.3.5. Classificação dos PCM.....	11
1.3.6. Propriedades físicas dos PCM.....	19
1.3.7. Melhoria das propriedades dos PCM.....	25
1.3.8. Transferência de calor em sistemas multiescala	30
1.4. Síntese	31
1.5. Organização do documento	32
Capítulo 2 - Estudo da transferência de calor em sistemas AQS	33
2.1. Sumário.....	34
2.2. Introdução	34
2.3. Métodos analíticos	46
2.4. Simplificações tipicamente utilizadas	50
2.5. Simulação computacional em mecânica dos fluidos com transferência de calor (CFD)	50
2.5.1. Métodos Computacionais	51
2.5.2. Definição e discretização do domínio de cálculo	58
2.5.3. Aplicações comercial Ansys/Fluent	58
2.6. Síntese	59
Capítulo 3 - Caso de estudo / aplicação a um modelo de referência.....	61
3.1. Sumário.....	62
3.2. Formulação do problema	62

3.3.	Definição de variáveis	68
3.3.1.	Parede exterior	68
3.3.2.	PCM e malha metálica.....	68
3.3.3.	Tubo interior.....	70
3.3.4.	Fluido operante.....	70
3.4.	Modelação do sistema	70
3.4.1.	Geometria.....	70
3.4.2.	Criação da malha.....	71
3.4.3.	Nomeação de secções	73
3.4.4.	Modelos Físicos.....	74
3.4.5.	Propriedades dos materiais	75
3.4.6.	Condições de Fronteira	75
3.4.7.	Métodos de discretização e resolução de equações	77
3.4.8.	Controlos e relatórios.....	83
3.4.9.	Resultados e critérios de aceitação	84
3.5.	Estudo Paramétrico e análise dos resultados	84
3.6.	Síntese	104
Capítulo 4	- Conclusão e Trabalhos Futuros	107
	Referências	111
	Anexos	115
	Anexo A.1 Ficha técnica da parafina utilizada.....	115
	Anexo A.2 Fração de líquido no ciclo de descarga de 600 em 600 segundos ...	116
	Anexo A.3 Distribuição da temperatura do sistema de 600 em 600 segundos para o ciclo de descarga	120

Índice de Figuras

Figura 1- Hipocausto romano. (Carlos, 2013)	2
Figura 2- Esquematização de um hipocausto romano. (Carlos, 2013).....	3
Figura 3- Ilustração piso radiante. (Reis, 2019).....	3
Figura 4-Consumo mundial de energia. (World Energy Balances, 2019).....	4
Figura 5- Produção de eletricidade através de fontes renováveis. (World Energy Balances, 2019)	6
Figura 6- Armazenamento de calor latente e sensível. (Mehling e Cabeza, 2008) 8	
Figura 7- Ilustração de sistema Concentrated Solar Power. (U.S Department of Energy's Office, 2013).....	9
Figura 8- Funcionamento PCM. (Lynlee, 2017).....	10
Figura 9- Classificação de PCM. (Yilbas et al., 2017)	11
Figura 10- Gamas de temperaturas dos PCM. ((JIN), [s.d.]).....	12
Figura 11- Exemplificação de microcápsulas. (Mehling e Cabeza, 2008)	18
Figura 12- Exemplos de macro encapsulamento: esquerda, através de bolsas, e direita, recipiente metálico. (Mehling e Cabeza, 2008).....	18
Figura 13- Variação da condutividade térmica em cristais dielétricos com a temperatura. (Polezhaev, 2011)	21
Figura 14- Exemplificação de subarrefecimento. (Mehling e Cabeza, 2008)	23
Figura 15- Diferentes tipos de histerese. (Mehling e Cabeza, 2008).....	25
Figura 16- Técnicas para melhoramento da transferência de calor. (Yilbas et al., 2017)	26
Figura 17- Configuração física de um sistema com alhetas no tubo interior. (Mat et al., 2013)	27
Figura 18- Esquematização de um reservatório calorífico com alhetas. (Gharebaghi e Sezai, 2008)	27
Figura 19- Unidades de armazenamento de calor latente: (a) PCM rodeia os tubos com HTF, (b) o HTF passa por tubos com PCM. (Shabgard et al., 2010).....	28
Figura 20-Eschema de múltiplos PCM num sistema tubular. (Yilbas et al., 2017)29	
Figura 21- Diferentes formas de transferência de calor. (Bergman et al., 2011)..	34
Figura 22- Associação da transferência de calor por condução com a difusão de energia devido a atividade molecular. (Bergman et al., 2011).	35
Figura 23- Transferência de calor por condução unidimensional. (Bergman et al., 1966).....	36
Figura 24- Exemplificação de transferência de calor num cilindro oco. (Bergman et al., 1966).....	37
Figura 25- Diferentes tipos de convecção:(a) Convecção forçada, (b)Convecção natural, (c) Vaporização, (d) Condensação. (Bergman et al., 2011)	38
Figura 26- Transferência de calor por radiação: (a) na superfície e (b) entre a superfície e a vizinhança. (Bergman et al., 2011).	40
Figura 27-Transferência de calor através de uma parede plana. (a) Distribuição de temperaturas. (b) Circuito térmico equivalente. (Bergman et al., 2011).	42
Figura 28- Circuito térmico equivalente para uma parede composta em série. (Bergman et al., 2011).....	43
Figura 29- Circuito térmico equivalente para resistência em série e paralelo. (Bergman et al., 2011).....	44

Figura 30- Distribuição de temperaturas para uma parede cilíndrica composta. (Bergman et al., 2011).....	45
Figura 31- Ilustração resistência de contacto. (Bergman et al., 2011).	46
Figura 32- Perfil de velocidade de um escoamento. (Versuti, 2011)	47
Figura 33- Localização de pontos para a série de Taylor. (Ashgriz e Mostaghimi, 2002)	53
Figura 34- Elemento binodal linear. (Ashgriz e Mostaghimi, 2002)	55
Figura 35- Volume finito em uma dimensão. (Ashgriz e Mostaghimi, 2002)	57
Figura 36- Ilustração sistema AQS.....	62
Figura 37-Ilustração do sistema AQS a analisar completo.....	63
Figura 38- Protótipo Bosch completo.	64
Figura 39- Protótipo Bosch serpentina.	65
Figura 40- Geometria modelada.....	71
Figura 41- Mesh utilizada.	73
Figura 42- Nomes Secções.	73
Figura 43- Funcionamento do algoritmo segregated. (ANSYS, [s.d.].....	77
Figura 44- Avaliação do centroide de uma célula.....	81
Figura 45- Variação da fração de líquido ao longo do processo de descarga para diferentes porosidades.	88
Figura 46- Variação da taxa de transferência de calor entre o PCM e o tubo de cobre ao longo do processo de descarga para diferentes porosidades.	89
Figura 47- Variação da taxa de transferência de calor entre o tubo de cobre e a água ao longo do processo de descarga para diferentes porosidades.	90
Figura 48- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,25.	91
Figura 49- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,35.	92
Figura 50- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,45.	92
Figura 51- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,55.	93
Figura 52- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,65.	93
Figura 53- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,75.	94
Figura 54- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 1,0.	94
Figura 55- Temperatura média da água à saída para as diferentes porosidades.	96
Figura 56- Variação da fração de líquido em todo o ciclo.	101
Figura 57- Variação da taxa de transferência de calor na zona PCM-Tubo em todo o ciclo.	101
Figura 58- Variação da taxa de transferência de calor na zona Tubo-Água em todo o ciclo.	102
Figura 59- Variação da temperatura média de saída da água em todo o ciclo. .	102
Figura 60- Processo de carga de 90%_0,35 quando o PCM se encontra completamente fundido.	103

Índice de Tabelas

Tabela 1-Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns PCM parafínicos. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma et al., 2009).....	13
Tabela 2- Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns matérias não parafínicos. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma et al., 2009).....	13
Tabela 3- Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns ácidos gordos. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma et al., 2009).	14
Tabela 4-Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns saís hidratados. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma et al., 2009).	15
Tabela 5- Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns PCM metálicos. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma et al., 2009).	16
Tabela 6- Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de algumas misturas eutéticas. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma et al., 2009).....	16
Tabela 7- Propriedades de materiais considerados para alhetas. (Liu, Saman e Bruno, 2012).....	26
Tabela 8- Propriedades do aço da base de dados do ANSYS.....	69
Tabela 9- Variação das propriedades da mistura em função da porosidade.	69
Tabela 10- Teste de independência da malha.	72
Tabela 11- Propriedades da água e do cobre da Base de dados do ANSYS.	75
Tabela 12- Resultados número de Rayleigh.	78
Tabela 13- Métodos de solução.	83
Tabela 14- Critérios de convergência residuais.	84
Tabela 15- Resultados balanço energético $v=3,53$ m/s.....	86
Tabela 16- Resultados balanço energético.	87
Tabela 17- Comparação entre a Energia libertada entre a zona PCM-Tubo e Tubo-Água.....	95
Tabela 18- Comparação dos valores de energia libertada na zona PCM-Tubo... 95	95
Tabela 19- Comparação dos valores de energia libertada na zona Tubo-Água... 96	96
Tabela 20- Temperatura média da água à saída para toda a simulação.	97
Tabela 21- Valores dos resultados para o primeiro critério de paragem.	98
Tabela 22- Valores dos resultados para o primeiro critério de paragem.	99
Tabela 23- Valores da quantidade de água fornecida para cada critério.	100
Tabela 24- Tempos de carga para cada um dos casos seleccionados.....	104

Abreviaturas e Símbolos

Abreviaturas

AQS – Águas quentes sanitárias
CAD – Computer Aided Design
CAES - Compressed Air Energy Storage
CFD – Computacional Fluid Dynamics
CSP – Concentrated Solar Power
HP - Heat Pipes
HTF – Heat Transfer Fluid
LHTES – Latente Heat Thermal Energy Storage
MMF- Materiais de Mudança de Fase
PCM - Phase Change Material
SIMPLE – Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations
SIMPLEC – SIMPLE-Consistent
TES – Thermal Energy Storage

Lista de Símbolos

A	área; constante de correlação para condutividade térmica
c	calor específico; velocidade da onda
C	constante de integração
c_p	calor específico a pressão constante
$c_{p,l}$	calor específico a pressão constante para a fase latente
$c_{p,m}$	calor específico a pressão constante da mistura
$c_{p,s}$	calor específico a pressão constante para a fase sólida
c_v	calor específico a volume constante
C_v	concentração volumétrica
C_w	concentração volúmica do sólido
d	diâmetro dos poros
D	diâmetro
dt	variação do tempo
dT	variação da temperatura
dU	variação da energia interna
dV	variação de volume
E	poder emissivo
F	força
g	aceleração gravítica
G	irradiação
G_{abs}	taxa de absorção
h	coeficiente de transferência de calor por convecção
H_{pc}	entalpia de fusão
J_f	fluxo de massa
k	condutividade térmica
k_f	condutividade térmica do fluido

k_m	condutividade térmica da mistura
k_s	condutividade térmica do sólido
L	distância intermolecular
m	massa
m_m	massa da mistura
n	número de moles
nb	células vizinhas
n_x	vetor normal à fronteira
N_{faces}	número de faces
N_i	função de forma
Nu	número de Nusselt
p	pressão
Pr	número de Prandtl
q	taxa de transferência de calor
q''	fluxo de calor
Q	calor
$Q_{Latente}$	calor latente
$Q_{Latente,m}$	calor latente mistura
$Q_{Latente, PCM}$	calor latente PCM
$Q_{sensível}$	calor sensível
r	raio
$\bar{R}\phi$	fator de normalização
Ra	número de Rayleigh
Re	número de Reynolds
R_t	resistência térmica
$R_{t,c}$	resistência térmica de contacto
S_h	calor através de reação química e qualquer outra fonte de calor volumétrico definida
T	temperatura
T_l	temperatura em que o PCM está no estado completamente líquido
T_s	temperatura da superfície; temperatura em que o PCM está no estado completamente sólido
T_{set}	temperatura do topo do reservatório
T_{viz}	temperatura da vizinhança
U_s	velocidade do som
v	velocidade
V	volume
V_{40}	volume de água a 40°C
V_{40exp}	volume de água a 40°C obtido experimentalmente
$V_{90\%}$	volume de água fornecido após se descarregar 90% da energia armazenada no PCM
V_{293K}	volume de água fornecido com temperatura média de 293K
x_{ent}	comprimento da zona de entrada
Y_j	fração mássica

Letras Gregas

α	absortividade; difusividade
β	porosidade
Γ	fronteiras do domínio; coeficiente de difusão
δQ	calor recebido
ε	emissividade
θ_p	temperatura média de saída da água de um sistema AQS
θ_p'	forma normalizada de θ_p
θ_c	temperatura média de entrada da água de um sistema AQS
κ	coeficiente de expansão térmica
μ	viscosidade dinâmica
μ_m	viscosidade dinâmica da mistura
μ_{pcm}	viscosidade dinâmica do PCM
ν	viscosidade cinemática
ρ	densidade
ρ_l	densidade do líquido
ρ_m	densidade da mistura
ρ_s	densidade do sólido
σ	constante de Stephan-Boltzmann
τ	tensor das tensões da viscosidade
φ	quantidade de matéria que atravessa um volume de controlo
Φ	dissipação; fração volúmica
Ω	domínio

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Contextualização

Desde os primórdios da humanidade que a energia se utiliza de diversas formas e com diferentes utilidades. No período paleolítico, o homem era o principal conservador energético optando, deste modo, por um registo de atividades diurno, havendo desde cedo uma preocupação com a obtenção de uma fonte calorífica e de iluminação artificial que o permitisse continuar, ou concluir, as suas atividades após o pôr do sol. O primeiro contacto com o fogo surgiu, naturalmente, ao observar árvores atingidas por relâmpagos ou atividades vulcânicas. Com isto, o Homem primitivo obteve a solução para o seu problema, uma vez que com este seria capaz de colmatar a falta de calor e luz em período noturno, transportando-o para as suas habitações. Contudo, ainda não era possível o ser humano controlar todo o seu potencial, apenas mais tarde aprendeu a dominar e produzir o fogo para seu benefício através da fricção entre duas pedras ou pedaços de madeira, que através do atrito criado pelo movimento de fricção produziam faísca e, por sua vez, fogo. (Infopédia, [s.d.]

Há cerca de 2000 anos, começaram a surgir técnicas para o armazenamento de calor, nomeadamente as desenvolvidas pelos Romanos. Estes começaram a utilizar materiais cerâmicos, como azulejos e tijolos, sob o piso dos edifícios com o intuito de armazenar a energia calorífica proveniente da água, previamente aquecida, e dos vapores quentes dos fornos da casa. Esta metodologia é designada de hipocausto (Figura 1 e Figura 2) e é considerada a primeira estrutura projetada para o armazenamento de energia.



Figura 1- Hipocausto romano. (Carlos, 2013)

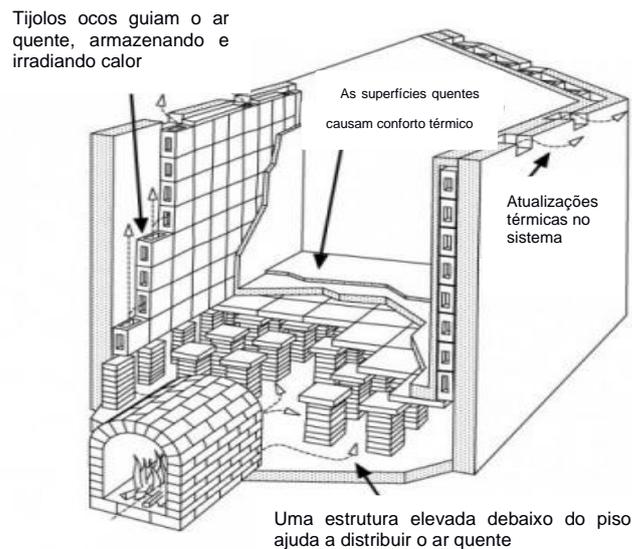


Figura 2- Esquematização de um hipocausto romano. (Carlos, 2013)

A evolução desta técnica deu-se até aos dias de hoje, onde é utilizada uma estrutura semelhante, denominada de piso radiante (Figura 3). Esta consiste também, num sistema de aquecimento sob o soalho instalado, normalmente, durante a construção do edifício, uma vez que possibilita uma maior variedade de soluções. Consiste numa rede tubular alimentada por uma fonte de energia elétrica, ou de água quente.



Figura 3- Ilustração piso radiante. (Reis, 2019)

Com a revolução industrial, a utilização da energia, bem como a sua diversidade no que diz respeito às fontes de aquisição, adquiriu uma nova dimensão, devido ao crescimento da produção e do consumo energético desta época necessária para colmatar o avanço tecnológico (Figura 4). O aumento das emissões de gases de estufa, recorrentes da utilização de combustíveis fósseis, levaram a uma expansão de fontes de energia “limpas”, ou seja, energias obtidas

a partir de fontes naturais, consideradas inesgotáveis e que não contribuem, ativamente, para a emissão de gases poluentes. Esta temática é cada vez mais importante nos dias de hoje, criando uma necessidade insaciável por fontes de energia alternativas, bem como a exigência de uma racionalização dos consumos.

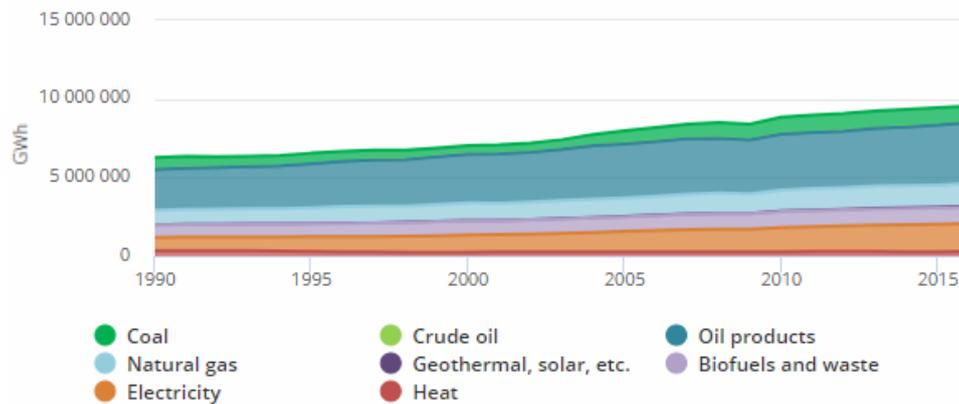


Figura 4-Consumo mundial de energia. (World Energy Balances, 2019)

O armazenamento de energia térmica, interligado com a utilização de formas de energias renováveis, é uma forma efetiva de equilibrar o desnível entre procura e oferta de energia. Existem três formas de armazenamento de energia térmica: sensível, latente e química. A segunda é considerada como sendo a mais efetiva e vantajosa, devido à sua grande capacidade de retenção de calor, ao envolver o calor latente proveniente da fusão, a temperatura constante, da mudança de fase do material. O armazenamento de calor latente tem sido utilizado em diversas aplicações como: sistemas solares térmicos, controlo dos picos elétricos e recuperação de resíduos térmicos industriais. Por outro lado, o facto da mudança de fase se dar a uma temperatura constante, leva a que este tipo de materiais possa ser utilizado para controlar a temperatura de operação de um dado sistema. Este é um parâmetro essencial para casos como arrefecimento de equipamentos eletrónicos ou para sistemas térmicos. (Zhang *et al.*, 2015)

Este tipo de materiais, materiais de mudança de fase (PCM, do inglês phase change material), têm vindo a ser utilizados para diversas aplicações, tendo como principal objetivo uma otimização dos sistemas já existentes, exemplos da aplicação destes materiais são: implementação em edifícios, com vista a melhorar o conforto térmico; armazenamento de energia para climatização; transporte de bens e medicamentos; sistemas de águas quentes sanitárias, de modo a melhorar a quantidade de calor armazenada ou em sistemas de cozinhas solares.

Apesar dos PCM possuírem uma possibilidade de aplicação e propriedades vantajosas para o processo de armazenamento de energia, como uma elevada densidade energética, estabilidade química e grande variedade de temperaturas de

fusão, existe uma necessidade eminente de melhorar a condutividade térmica nestes materiais, tendo sido investigadas diversas técnicas como: inserção de alhetas, malhas metálicas, nanotubo de carbono, etc. (Atal *et al.*, 2016)

Posto isto, a escolha de qual PCM utilizar, para uma dada aplicação, depende da sua finalidade e das suas condições. O melhoramento das propriedades destes materiais é preponderante para um avanço tecnológico no ramo da energia, visto que é possível aumentar a eficiência e o rácio de utilização das energias renováveis.

1.2. Objetivo geral do trabalho

O objetivo deste trabalho é estudar, computacionalmente, o armazenamento de energia nos sistemas que utilizam materiais de mudança de fase, através de um dispositivo complementar a um sistema de água quente sanitária, em que se utiliza estes materiais. Procura-se ainda conhecer, compreender e identificar as propriedades mais relevantes dos materiais de mudança de fase, para que deste modo, seja possível otimizar as que forem menos favoráveis ao sistema em análise.

Relativamente aos objetivos específicos desta dissertação, procura-se compreender as propriedades da água à saída do tubo, nomeadamente a temperatura, bem como os processos de solidificação, liquidificação e transferência de calor entre o material em mudança de fase e os restantes componentes do sistema. Por fim, pretende-se analisar o efeito deste dispositivo num sistema conceptual de águas quentes sanitárias.

1.3. Revisão bibliográfica

1.3.1. Armazenamento de energia, fontes renováveis e redes elétricas inteligentes

Fontes de energia renováveis, como o vento e o sol, são intermitentes e imprevisíveis, contudo são um recurso cada vez mais procurado e utilizado com o intuito de se alcançar uma maior sustentabilidade do sistema. Paralelamente, existe uma grande dependência temporal, no que diz respeito à procura de eletricidade, que não corresponde, necessariamente, à produção por parte das fontes renováveis.

Visto que a fração de eletricidade gerada por meio de energias alternativas tem vindo a aumentar (Figura 5), surge uma necessidade cada vez maior de armazenar o excedente energético, de modo a alterar as curvas de produção de energia para que estas se aproximem o máximo possível da procura. (Soprani *et al.*, 2019)

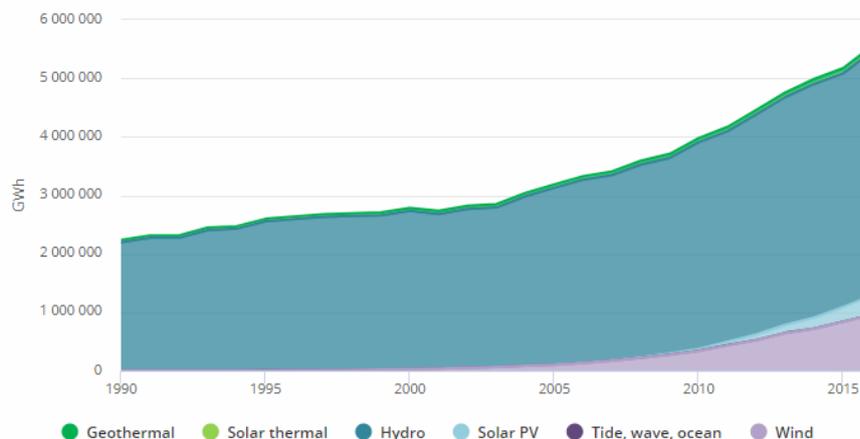


Figura 5- Produção de eletricidade através de fontes renováveis.
(World Energy Balances, 2019)

O armazenamento de energia pode ser utilizado para regulação e equilíbrio da rede elétrica, regularizando o *output* debitado por uma central energética, de modo a diminuir a diferença entre procura e oferta, tornando possível reter energia para ser utilizada posteriormente, garantindo que há energia disponível em períodos de pico de procura, ou de falha da rede, e ainda oferece a estabilidade necessária para ser possível detetar os melhores preços do mercado elétrico. Sendo assim possível armazenar energia nos períodos de baixo consumo e vendê-la no período oposto, de modo a retirar o máximo de proveito dos diferentes valores de venda e compra de eletricidade.

Há data presente, são estudadas diversas tecnologias para armazenar energia bem como: baterias sólidas, baterias de fluxo, *flywheels*, através de ar comprimido (CAES, do inglês Compressed Air Energy Storage), energia térmica (TES, do inglês Thermal Energy Storage), *pumped hydro*, eletrólise, entre outros.

Apesar das diversas opções acima referidas serem formas viáveis de se controlar a produção e os consumos de energia, a que será objeto de estudo nesta tese de mestrado é o armazenamento de energia térmica. Este tipo de sistema possibilita diversas aplicações, como a produção de eletricidade, aquecimento e outras aplicações industriais. O custo de investimento é relativamente baixo, bem como o de manutenção, para além disso apresenta um longo ciclo de vida. Um exemplo desta forma de armazenamento de energia é a “Bateria de Brayton”, um sistema baseado no funcionamento de uma turbina que opera entre dois reservatórios, um de alta e um de baixa temperatura. (Laughlin, 2017)

1.3.2. Modos de armazenamento de energia térmica

O armazenamento de energia térmica, quando feito de forma efetiva, tem um papel preponderante na satisfação dos requisitos energéticos da sociedade atual, ou seja,

quando bem implementado este tem a capacidade de aumentar a eficácia e a rentabilidade da generalidade dos sistemas energéticos, diminuindo desta forma o défice entre procura e oferta.

O método mais comum passa pela utilização do calor sensível, onde este é armazenado através do aumento de temperatura do material sem passar por uma mudança de fase. A quantidade de calor armazenado dado em função do calor específico do material (c), da diferença de temperaturas (ΔT) e da quantidade de material (m) envolvido no processo de aquecimento é demonstrado na equação (1.1).

$$Q_{sensitive} = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Este é utilizado normalmente em materiais sólidos, como pedras ou tijolos, para melhoramento do conforto térmico, sendo que, recentemente, o armazenamento de energia através de fachadas ou do solo tem aumentado cada vez mais. Pode-se recorrer também a materiais líquidos como a água, que é utilizada todos os dias para uso doméstico. Contrariamente, os materiais gasosos não são utilizados, frequentemente, nestas aplicações, visto que têm baixa capacidade volumétrica de calor.

Por outro lado, o armazenamento de energia térmica com recurso à energia latente, engloba uma mudança de fase do material utilizado seja esta sólido-sólido, sólido-líquido, líquido-gás e vice-versa. No entanto, apenas a mudança de sólido para líquido apresenta uma eficiência significativa, quando comparada com as restantes, que justifique a sua utilização. Esta mudança, é caracterizada pela fusão e solidificação do material, sendo este capaz de armazenar grandes quantidades de energia. Caso o recipiente consiga suportar a fase do material que ocupa maior volume, normalmente a líquida, a pressão não sofrerá alterações significativas, ou seja, a fusão e solidificação ocorrem a temperatura constante. Durante a fusão, quando o calor é transferido para o material, este mantém-se a temperatura constante, denominada de temperatura de mudança de fase. Quando a fusão estiver completa, os ganhos térmicos armazenados voltarão a ser sensíveis. O armazenamento de energia proveniente da fusão não pode ser detetado através da temperatura, uma vez que, este se dá a temperatura constante. A este processo dá-se o nome de armazenamento de calor latente. Uma vez que existe uma pequena variação de volume, o calor armazenado é dado pela equação (1.2).

$$Q_{latente} = \int_{T_1}^{T_{pc}} c_{p,s} \cdot dT + \Delta H_{pc} + \int_{T_{pc}}^{T_2} c_{p,l} \cdot dT \quad (1.2)$$

O calor latente, $Q_{latente}$, é o calor sensível e latente armazenado somados com a diferença de entalpias entre a fase sólida e líquida à temperatura de fusão T_{pc} , sendo assim designada de entalpia de mudança de fase, entalpia de

fusão ou calor de fusão ΔH_{pc} , $c_{p,s}$ é o calor específico a pressão constante do material no estado sólido, $c_{p,l}$ é o calor específico a pressão constante do material no estado líquido e dT corresponde à variação de temperatura ocorrida.

A utilização deste tipo de armazenamento é cada vez mais atrativa, visto que, fornece uma maior densidade de energia armazenada, tendo como exemplo a fusão de uma dada massa de água, que neste processo está envolvida cerca de 80 vezes superior ao calor sensível que seria necessário para elevar essa mesma massa de água 1°C. (Dutil *et al.*, 2011)

Na Figura 6 é possível observar os diferentes processos acima referidos, em que a linha a tracejado representa o armazenamento sensível enquanto que a outra ilustra o latente.

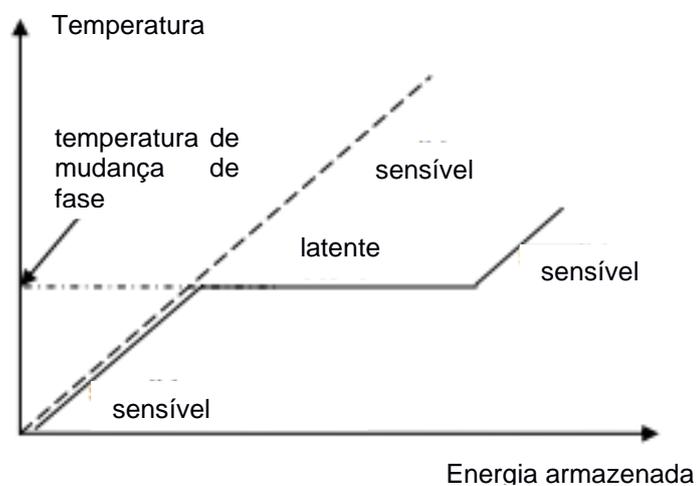


Figura 6- Armazenamento de calor latente e sensível. (Mehling e Cabeza, 2008)

Por fim, existe ainda o armazenamento de energia térmica proveniente de reações químicas, onde há uma variação de entalpia, entre os reagentes e os produtos, designada de calor da reação. Se a reação for endotérmica, esta irá absorver este calor, caso contrário, ou seja, exotérmica, vai ocorrer o oposto e irá libertá-lo. Qualquer reação, com um elevado valor de calor de reação, pode ser utilizada no armazenamento de energia térmica, desde que haja a possibilidade de armazenar os produtos da reação e de libertar o calor concentrado quando a reação prosseguir no sentido inverso.

1.3.3. Armazenamento de energia térmica

A classificação dos sistemas de armazenamento de energia térmica é feita tendo por base a temperatura a que estes operam.

Os sistemas TES que operam entre 20 °C e 100°C podem ser considerados como TES de baixa temperatura. Os materiais, tipicamente, envolvidos neste tipo de processo de armazenamento de energia são: água, sais hidratados, parafinas, ácidos gordos, etc., sendo que a água no seu estado líquido armazena calor

sensível. A maioria dos PCM orgânicos, parafinas, não-parafinas e sais hidratados têm os seus pontos de fusão neste intervalo, armazenando assim calor latente correspondente à sua mudança de fase. (Alva, Lin e Fang, 2018)

Os TES de baixa temperatura são utilizados em diversas aplicações, como por exemplo no fornecimento doméstico de água quente, este é um sistema direcionado para o utilizador que tem como principal objetivo reduzir o consumo elétrico de uma habitação. São colocados, normalmente, no topo de casas ou edifícios comerciais. Este sistema é composto por dois componentes, um coletor solar e um reservatório de água, onde será acumulado a energia térmica.(Alva, Lin e Fang, 2018)

Quanto ao armazenamento de energia térmica entre os 100°C e os 250°C, este é classificado como TES de média temperatura. Para estes casos, os materiais mais utilizados são os *sugar alcohols* e soluções químicas para armazenar a energia. Uma das aplicações comuns para os TES de média temperatura passa pelo reaproveitamento de calor desperdiçado pela indústria para, por exemplo, processos de secagem.

Por fim, para uma gama superior a 250 °C os TES são denominados como de alta temperatura. Os materiais envolvidos neste armazenamento de energia são sais, materiais terrosos, betão e metais.(Alva, Lin e Fang, 2018)

A grande utilização destes passa pela geração de potência térmica como é o caso do *Concentrated solar power* (CSP), que consiste na utilização de coletores solares dispostos conforme a zona onde estão instalados. O seu funcionamento consiste na reflexão dos raios solares em direção de um recetor, em que este os converterá em calor capaz de produzir vapor a alta temperatura e pressão, que ao passar por uma turbina irá gerar energia elétrica (Figura 7), sendo assim uma das formas de aproveitamento de energia renovável mais promissoras desta geração.

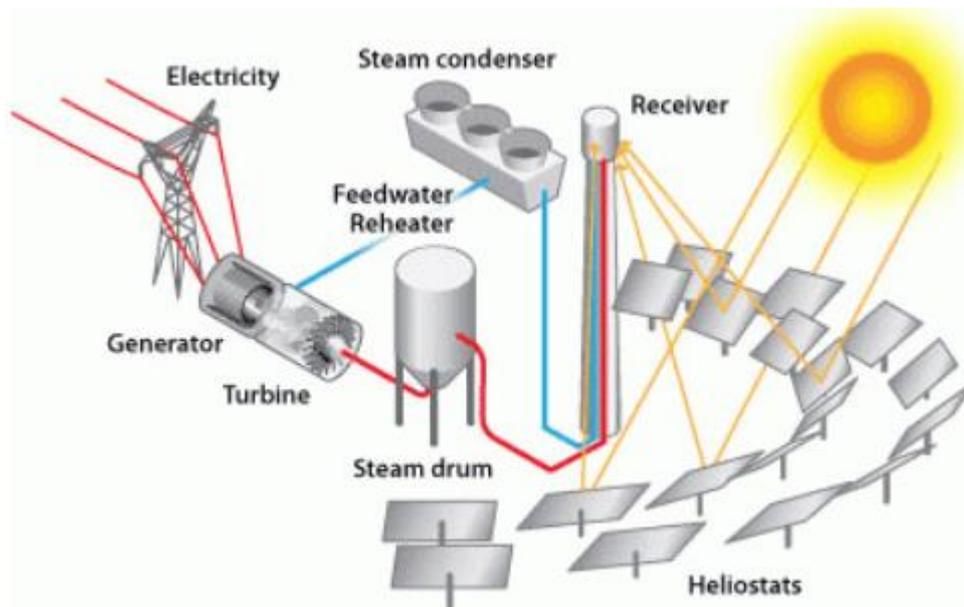


Figura 7- Ilustração de sistema Concentrated Solar Power. (U.S Department of Energy's Office, 2013)

1.3.4. PCM e suas características

Aos materiais com a aptidão de suportar esta maleabilidade, no que diz que respeito à mudança de fase sólido-líquido, dá-se o nome de *phase change material* (PCM). Estes são caracterizados pelo elevado calor de fusão, podendo assim armazenar grandes quantidades de calor latente quando se dá a mudança da fase, sendo este descarregado quando o PCM retorna ao estado sólido. A Figura 8 resume de uma forma muito simplificada o funcionamento deste tipo de materiais.

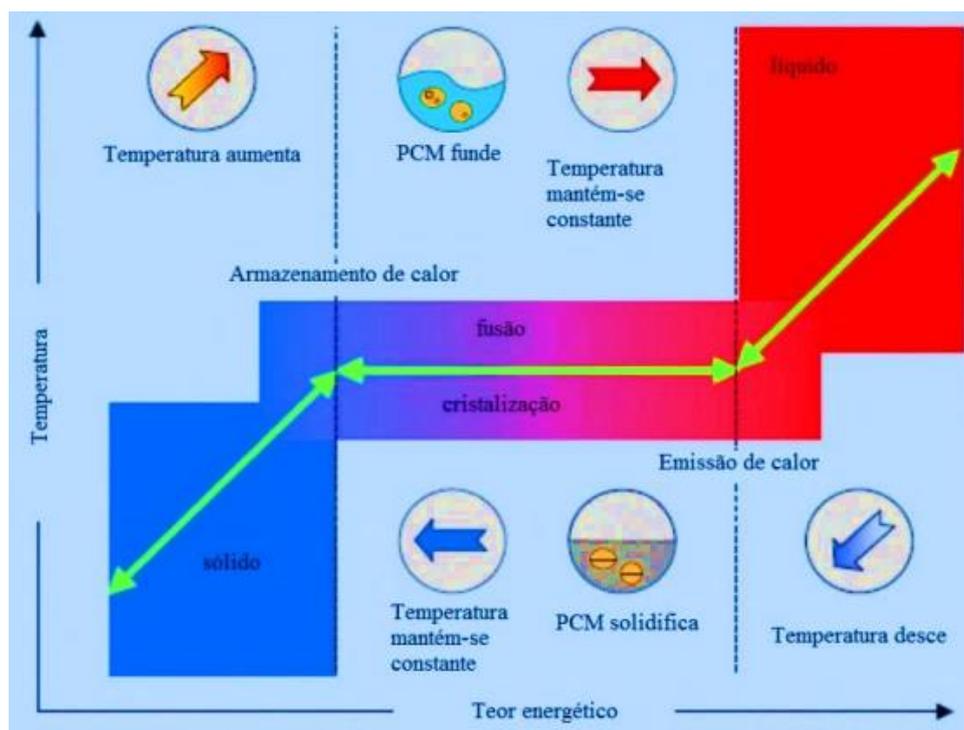


Figura 8- Funcionamento PCM. (Lynlee, 2017)

Este tipo de material, para ser utilizado nos sistemas de armazenamento de energia, deverá cumprir com algumas especificações e requisitos do sistema como:

- Temperatura de mudança de fase terá de ser adequada à sua aplicação;
- Elevado calor latente, de modo a armazenar o máximo de energia possível na sua utilização;
- Condutividade térmica relativamente elevada em ambas as fases do material para facilitar a troca de calor;
- Não sofrer uma grande variação de volume na transição entre fase;
- Possuir um processo de fusão congruente para manter constante a sua capacidade de armazenamento.

1.3.5. Classificação dos PCM

A classificação dos PCM varia com a sua natureza, estes podem ser: orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas (Figura 9). Como nela é ilustrado, os materiais orgânicos estão divididos em parafínicos e não parafínicos e os inorgânicos em sais hidratados e metálicos. As misturas eutéticas resultam de uma mistura dos outros dois tipos, resultando assim em três tipos diferentes de mistura: orgânico-orgânico, inorgânico-inorgânico e por fim a combinação orgânico-inorgânico.

Como seria expectável as diferentes categorias de PCM possuem temperaturas e entalpia de fusão diferentes sendo este uma das características mais diferenciadoras entre os diferentes tipos de PCM (Figura 10).

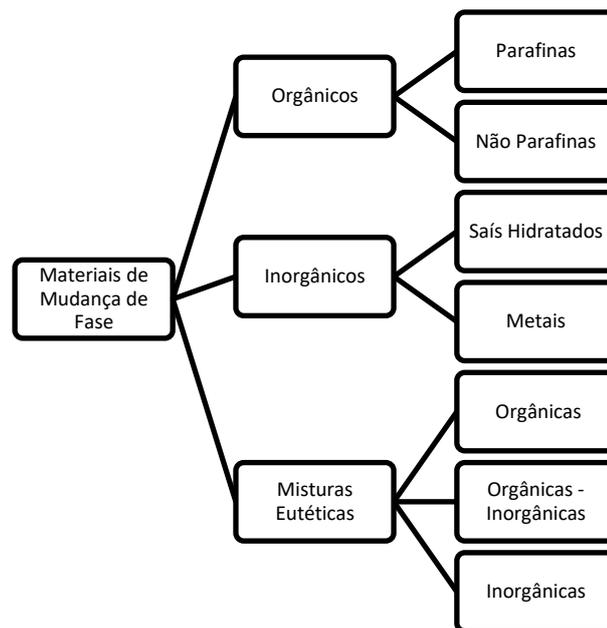


Figura 9- Classificação de PCM. (Yilbas et al., 2017)

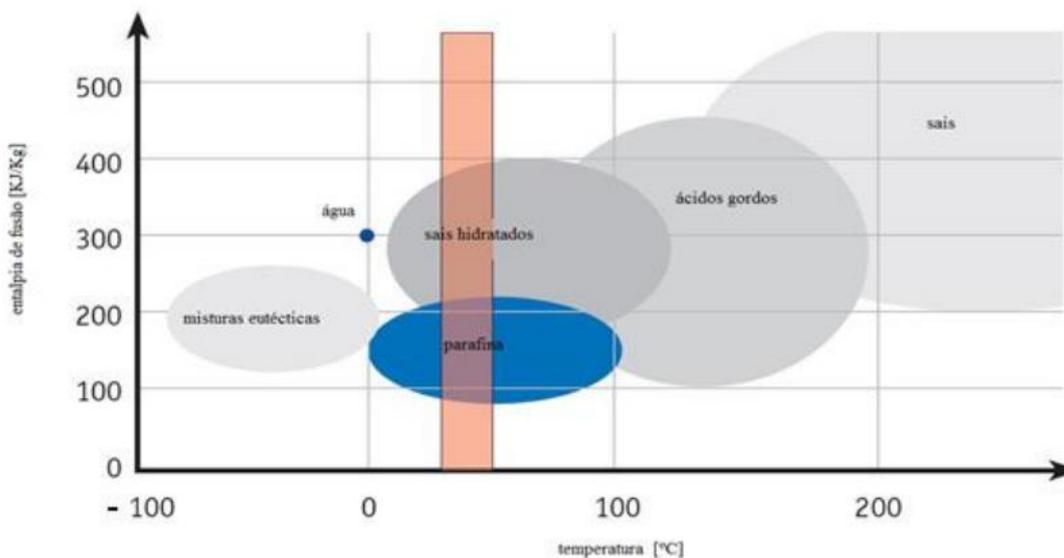


Figura 10- Gamas de temperaturas dos PCM. ((JIN), [s.d.]

1.3.5.1. PCM orgânicos

Como já foi referido previamente, os PCM orgânicos são divididos em parafinas e não parafinas. Este tipo de material é caracterizado por uma fusão congruente, ou seja, fundição e cristalização consecutiva sem haver desagregação das fases e, conseqüentemente, do seu calor latente de fusão. Os PCM orgânicos têm um elevado calor latente (maior que 180 kJ/kg) e uma grande gama de temperatura tornando-os assim, compatíveis com diversas aplicações. (Dinçer, Hamut e Javani, 2017; Jaguemont *et al.*, 2018)

No que diz respeito às parafinas, estas são constituídas por longas cadeias alcanas (carbono e hidrogénio), sendo diferenciadas pelo número de átomos de carbono presentes. O calor latente, bem como o temperatura de fusão, é tanto maior quando for a cadeia. As parafinas são qualificadas como boas armazenadoras de calor de fusão, devido à sua grande diversidade de temperaturas. São consideradas seguras, rentáveis, previsíveis, mais baratas e não corrosivas. Quando expostas a temperaturas inferiores a 500 °C são quimicamente inertes, mostrando poucas variações de volume na fase de fusão bem como pouca pressão criada pelo vapor que advém do aquecimento e fusão do material. Apesar das diversas vantagens que as parafinas apresentam, estas possuem algumas desvantagens como: baixa condutividade térmica, incompatibilidade com alguns recipientes plásticos e serem moderadamente inflamáveis. Na Tabela 1 estão representados valores de temperatura de fusão e calor latente de fusão. (Sharma *et al.*, 2009)

Tabela 1-Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns PCM parafínicos. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma et al., 2009).

Nº de Átomos de Carbono	Temperatura de Fusão [°C]	Entalpia de Fusão [kJ/Kg]
14	5,5	228
15	10	205
16	16,7	237,1
17	21,7	213
18	28,0	244
19	32,0	222
20	36,7	246
21	40,2	200
22	44,0	249
23	47,5	232
24	50,6	255
25	49,4	238
26	56,3	256
27	58,8	236
28	61,6	253

As não parafinas representam a categoria mais vasta dos PCM. Ao contrário das parafinas, que apresentam propriedades e composição idêntica. Cada um destes materiais apresentam propriedades distintas entre si. Pode ainda ser feita uma subdivisão deste grande e vasto grupo em ácidos gordos e outros materiais não parafínicos. Estes materiais são facilmente inflamáveis, pelo que não devem ser expostos a elevadas temperaturas, chamas ou agentes de oxidação. Contudo, apresentam na generalidade um elevado calor latente de fusão, baixa condutividade térmica e um nível variado de toxicidade. São exemplos dos materiais acima descritos os constituintes da Tabela 2.

Tabela 2- Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns matérias não parafínicos. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma et al., 2009).

Material	Temperatura de Fusão [°C]	Entalpia de Fusão [kJ/kg]
Formic acid	7,8	247
Caprilic acid	16,3	149
Glycerin	17,9	198,7
D-Lactic acid	26	184
Methyl palmitate	29	205
Camphenilone	39	205
Docasyl bromide	40	201
Caprylone	40	259
Phenol	41	120
Heptadecanone	41	201
1- Cyclohexylooctadecane	41	218

No que diz respeito aos ácidos gordos, que assumem a fórmula $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$, estes apresentam valores de calor de fusão equiparáveis aos das parafinas, tendo também um comportamento de fusão e cristalização sem subarrefecimento, sendo assim classificado como um bom PCM. Contudo o seu maior entrave, para além do preço, cerca do dobro da maioria das parafinas, é o facto de serem corrosivos. Exemplos de ácidos gordos usados em aplicações de armazenamento de energia de baixa temperatura são os representados na Tabela 3. (Golibersuch e Herrick, 1977; Sharma *et al.*, 2009)

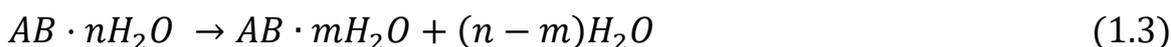
Tabela 3- Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns ácidos gordos. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma *et al.*, 2009).

Material	Fórmula	Temperatura de Fusão [°C]	Entalpia de Fusão [kJ/kg]
Acetic acid	CH_3COOH	16,7	184
Polyethylene glycol 600	$\text{H}(\text{OC}_2\text{H}_2)_n \cdot \text{OH}$	20-25	146
Capric acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8 \cdot \text{COOH}$	36	152
Eladic acid	$\text{C}_8\text{H}_7\text{C}_9\text{H}_{16} \cdot \text{COOH}$	47	218
Lauric acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10} \cdot \text{COOH}$	49	178
Pentadecanoic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13} \cdot \text{COOH}$	52.5	178

1.3.5.2. PCM Inorgânico

Nesta categoria, encontramos duas subdivisões, os sais hidratados e os PCM metálicos. Estes materiais são normalmente caracterizados, positivamente, pelo elevado calor de fusão, boa condutividade térmica, preço reduzido, não serem inflamáveis e pelo seu calor de fusão não se degradar com a utilização. Contudo estes são corrosivos com a maioria dos metais, sofrem de subarrefecimento e de degradação da fase. (Jaguemont *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2009)

Os sais hidratados são resultados de ligas de sais inorgânicos com água, formando uma estrutura sólida e cristalina que apresenta uma fórmula do tipo $AB \cdot n\text{H}_2\text{O}$. A fração de sólido-líquido corresponde à desidratação e da hidratação do sal, representando assim um processo semelhante à fusão e solidificação do ponto de vista termodinâmico. A fusão destes materiais resulta numa mistura entre um sal hidratado e algumas moléculas de água, equação (1.3), ou na sua forma anídrica, equação (1.4).



Estes têm sido alvo de vários estudos, com o intuito de serem utilizados em sistemas de armazenamento de energia. Isto deve-se às seguintes características: elevado calor latente de fusão por unidade de volume, condutividade térmica

relativamente elevada (cerca do dobro das parafinas) e poucas variações de volume na mudança de fase. São reconhecidos três comportamentos no que diz respeito à fusão dos sais: congruente, incongruente e semi-incongruente. A diferença entre os dois primeiros, reside na quantidade de sal anídrico que é dissolvido, sendo que no congruente há uma dissolução completa ao contrário do incongruente que não é inteiramente dissolvido, já no outro existe uma variação do comportamento devido à variação da composição da mistura. (Sharma *et al.*, 2009)

Um dos problemas com a maioria dos sais hidratados resulta de uma fusão incongruente, causada pelo facto da água, libertada durante a cristalização, não ser suficiente para dissolver todo o sólido presente na mistura, dando assim origem a um depósito do componente anídrico do sal no fundo do recipiente. Existe também uma grande dificuldade em combater o subarrefecimento uma vez que à temperatura de fusão, a nucleação é, geralmente, muito baixa. Outro problema na utilização deste material deve-se à espontaneidade dos sais hidratados, em contacto com poucas moles de água, durante o processo de descarga. Uma das possíveis soluções passa pela adição de agentes químicos que consigam prevenir a nucleação dos sais hidratados, conseguindo assim aumentar a solubilidade da mistura. (Sharma *et al.*, 2009)

Os sais hidratados mais comuns são os representados na Tabela 4.

Tabela 4-Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns sais hidratados. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma *et al.*, 2009).

Material	Temperatura de Fusão [°C]	Entalpia de fusão [kJ/kg]
K ₂ HPO ₄ ·6H ₂ O	14,0	109
FeBr ₃ ·6H ₂ O	21,0	105
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25,5	148
FeBr ₃ ·6H ₂ O	27,0	105
CaCl ₂ ·12 H ₂ O	29,8	174
LiNO ₃ ·2H ₂ O	30,0	296
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	189
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	32,0	267
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32,4	241
KFe(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	33	173
CaBr ₂ ·6H ₂ O	34	138
LiBr ₂ ·2H ₂ O	34	124
Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	36,1	134
FeCl ₃ ·6H ₂ O	37,0	223
Mn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	37,1	115
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	40,0	279
CoSO ₄ ·7H ₂ O	40,7	170
KF·2H ₂ O	42	162
MgI ₂ ·8H ₂ O	42	133
CaI ₂ ·6H ₂ O	42	162

No diz respeito aos PCM metálicos, este grupo é constituído por metais com baixa temperatura de fusão e metais eutéticos. Estes elementos metálicos ainda não são considerados como opções válidas devido ao seu peso. Contudo, quando

se tem em conta o calor de fusão por unidade de volume, estes materiais já começam a ser tidos em conta. A maior diferença entre os PCM metálicos e os restantes assenta na sua condutividade térmica, sendo que estes possuem valores superiores aos PCM referidos anteriormente (Sharma *et al.*, 2009). Posto isto, algumas das características deste tipo de material são: baixo calor de fusão por unidade de massa, alto calor de fusão por unidade de volume, elevada condutividade térmica, baixo calor específico e pressão de vapor relativamente baixa. Na Tabela 5 pode ver-se alguns exemplos de PCM metálicos.

Tabela 5- Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns PCM metálicos. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma *et al.*, 2009).

Material	Temperatura de Fusão (°C)	Calor Latente (kJ/kg)
Gallium	30,0	80,3
Cerrolow eutectic	58	90,9
Bi-Cd-In eutectic	61	25
Cerrobend eutectic	70	32,6
Bi-Pb-In eutectic	70	29
Bi-Pb eutectic	72	25

1.3.5.3. Misturas Eutéticas

Uma mistura eutética é composta por dois ou mais componentes, onde cada um funde e solidifica de forma congruente formando uma mistura cristalina. Geralmente, não ocorre a separação dos seus componentes, visto que estes fundem e solidificam em simultâneo numa mistura única de cristais.

Estas misturas possuem elevado calor latente por unidade de massa, boa densidade volumétrica de armazenamento, estabilidade química, uma baixa pressão de vapor à temperatura, não apresentam riscos para a saúde, uma vez que não são corrosivos ou tóxicos e apresentam ainda uma elevada condutividade térmica. A grande desvantagem deste PCM está relacionada com o seu custo de aquisição. Exemplos de misturas eutéticas são as demonstradas na Tabela 6.

Tabela 6- Temperaturas de fusão e valores de capacidade de armazenamento térmico de algumas misturas eutéticas. (Mehling e Cabeza, 2008; Sharma *et al.*, 2009).

Material	Composição (wt %)	Temperatura de Fusão (°C)	Calor Latente (kJ/kg)
CaCl ₂ ·6H ₂ O+CaBr ₂ ·6H ₂ O	45 + 55	14,7	140
Triethylolethane + water + urea	38,5 + 31,5 + 30	13,4	160
C ₁₄ H ₂₈ O ₂ + C ₁₀ H ₂₀ O ₂	34 + 66	24	147,7
CaCl ₂ + MgCl ₂ ·6H ₂ O	50 + 50	25	95
CH ₃ CONH ₂ + NH ₂ CONH ₂	50+ 50	27	163
Triethylolethane + urea	62,5 + 37,5	29,8	218
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O+Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	47 + 53	30	136

$\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_2\text{CONH}_2$	40 + 60	30	200,5
$\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{NH}_4\text{NO}_3$	53 + 47	46	95
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{NO}_3$	61,5 + 38,5	52	125,5

1.3.5.4. Encapsulamento do PCM

O encapsulamento do PCM tem como principal função conter a fase líquida do material de modo a evitar o contacto com o ambiente, facto que poderia aumentar a possibilidade de degradação. A superfície do encapsulamento desempenha também a função de transferir calor. O processo de encapsulamento requer alguns cuidados para que este tenha um bom desempenho, tais como: o material selecionado deve ser compatível com o PCM, a espessura do encapsulamento tem de ser suficiente, de modo a ser, totalmente impermeável para que a mistura se mantenha estanque. Quanto à classificação do encapsulamento esta é afetada pela dimensão deste, podendo então tratar-se de micro encapsulamento ou macro encapsulamento.

1.3.5.5. Micro encapsulamento

As microcápsulas (Figura 11) são pequenas partículas sólidas, líquidas ou gasosas, com diâmetro compreendido entre 1 μm e 1 mm que envolvem cada núcleo do PCM através de um forte revestimento polimérico.

As partículas revestidas, podem ser incorporadas em qualquer matriz que seja compatível com a membrana de encapsulamento, esta tem de ser também compatível com o PCM e com a matriz em questão. Devido ao pequeno diâmetro das partículas, o rácio entre a área da superfície e o volume é muito elevado melhorando, assim, a condutividade térmica do material. Outra das vantagens do micro encapsulamento passa pelo aumento da estabilidade, pelo facto do PCM ficar restrito a uma escala microscópica. Contudo, este processo aumenta também a possibilidade de subarrefecimento.

O micro encapsulamento pode ser aplicado em larga escala para PCM que não sejam solúveis em água devido ao processo tecnológico utilizado. Caso se utilize sais hidratados, para que estes possam ser encapsulados deve-se garantir que o revestimento é suficientemente comprimido para evitar que as moléculas de água provoquem alterações na composição do sal.

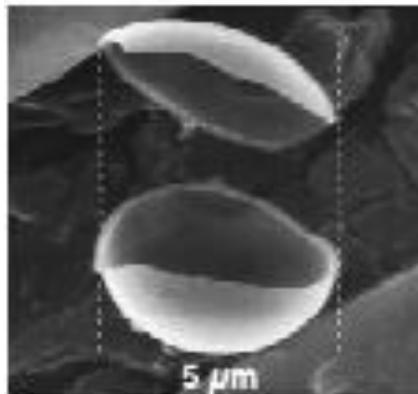


Figura 11- Exemplificação de microcápsulas. (Mehling e Cabeza, 2008)

1.3.5.6. Macro encapsulamento

Este método resulta na inclusão do PCM em diferentes tipos de embalagem, como: tubos, bolsas, painéis ou outros recipientes. Estes são geralmente feitos de metal ou plástico e podem servir como permutadores de calor ou ser colocados em produtos estruturais. Neste caso o PCM deve ser encapsulado de forma a não afetar o desempenho do material de construção.

Na macro encapsulação de sais hidratados, são utilizados, geralmente, recipientes de plástico devido à compatibilidade entre os materiais. Com os PCM orgânicos são utilizados contentores de plástico, no entanto é necessário um cuidado especial com o intuito de evitar que o plástico perca a sua rigidez. Estudos desenvolvidos nesta área, revelam que esta solução não é a mais viável devido à baixa condutividade térmica do PCM, que leva à sua solidificação nos bordos do encapsulamento. Uma possível solução passa pela utilização de recipientes metálicos, desde que estes não sejam corroídos pelo PCM, tendo estes a vantagem de possuir maior estabilidade mecânica. Podem encontrar-se alguns exemplos deste tipo de produto na Figura 12. (Mehling e Cabeza, 2008)



Figura 12- Exemplos de macro encapsulamento: esquerda, através de bolsas, e direita, recipiente metálico. (Mehling e Cabeza, 2008)

1.3.6. Propriedades físicas dos PCM

Apesar dos PCM apresentarem diferentes propriedades passíveis de serem analisadas e que contribuem para a sua caracterização, só algumas são verdadeiramente relevantes para os objetivos deste trabalho, pelo que serão especificadas nesta fase.

1.3.6.1. Temperatura de mudança de fase

Em termos químicos, a palavra fase refere-se ao estado em que a matéria pode existir. Esta pode ser sólida, líquida ou gasosa dependendo da sua temperatura e pressão, sendo o exemplo mais comum e também o mais relevante no âmbito deste trabalho, a temperatura. O ponto em que se dá a mudança de fase designa-se de temperatura de mudança de fase.

Nos PCM, a mudança de fase com maior relevo é a sólido/líquido. Apesar de existirem outros tipos de mudanças de fase capazes de armazenar e libertar energia, estes não são aplicáveis ao armazenamento de energia. Como é o caso da transição líquido/gás em que ocorrem grandes alterações no volume e na pressão. Existem também materiais que apresentam transições sólido/sólido na qual a estrutura cristalina é alterada.

1.3.6.2. Calor específico

O calor específico é definido como a quantidade de calor que é necessário fornecer, a um grama de uma substância, para conseguir elevar a sua temperatura um grau Celsius. Pode ser ainda designado como capacidade térmica mássica, devido à sua relação com a massa do corpo, presente na equação (1.5)

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{\delta Q}{dT} \quad (1.5)$$

em que m é a massa, δQ o calor recebido e dT a variação da temperatura. O calor específico é também função do processo de transferência de calor. Posto isto, a equação (1.5) pode adotar a seguinte formulação:

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{dU + pdV}{dT} \quad (1.6)$$

na qual dU é a variação da energia interna e pdV representa o trabalho. (Kuhn, 1972)

Existem dois calores específicos distintos mediante as suas condições. O calor específico a volume constante, em que não existe componente do trabalho visto que a variação de volume é nula. Deste modo, a equação (1.6) passa a ser representada por:

$$c_v = \frac{1}{m} \cdot \frac{dU}{dT} \quad (1.7)$$

O calor específico, a pressão constante, é dado pela seguinte equação:

$$c_p = \frac{1}{m} \cdot \frac{d(U+pV)}{dT} \quad (1.8)$$

onde $U + pV$ é a entalpia do sistema. (Borgnakke C., Sonntag, 2012).

A diferença entre estes dois valores, na fase sólida e na fase líquida, pode ser negligenciada. Contudo, o calor específico a pressão constante é geralmente superior ao calor específico a volume constante, isto devesse ao aumento de volume correspondente à dilatação térmica, uma parte da energia calorífica fornecida é gasta no trabalho contra o ambiente a pressão constante, sendo por isso, o aumento de temperatura num sistema a pressão constante menor ao aumento de temperatura num sistema a volume constante para a mesma energia.

O calor específico está diretamente relacionado com os graus de liberdade disponíveis da partícula, em que cada tipo de grau de liberdade permite armazenar energia potencial. Como tal, quanto maior o número de átomos, mais graus de liberdade e conseqüentemente uma maior capacidade em armazenar energia.

No caso dos PCM, pretende-se que a sua entalpia seja a mais elevada possível, garantindo uma elevada densidade no armazenamento de energia latente quando comparada com o armazenamento por energia sensível. Procurando assim que o valor de calor específico seja o mais alto possível.

1.3.6.3. Condutividade térmica

A condutividade térmica, propriedade inerente ao material, representa a quantidade de calor que o material transmite através da sua espessura, numa direção perpendicular à superfície, em regime estacionário, onde a transferência de calor depende apenas de variações da temperatura ao longo da espessura.

No caso do material utilizado se apresentar no estado sólido a sua natureza varia dependendo se este é ou não condutor. Em materiais dielétricos a energia térmica transfere-se através dos fonões, criados através de vibrações coletivas dos átomos ao nível da sua estrutura que assumem a forma de ondas de deslocamento, a interferência entre as diferentes ondas cria um novo conjunto de ondas, que são designadas de fonões. As flutuações no valor da densidade do material, criadas pelo conflito de ondas, são visíveis no seu índice de refração. Se as ondas percorrerem uma zona em que o índice de refração não é igual ao valor médio volumétrico, ocorre uma dispersão das que transportam a energia do movimento térmico. Quando maior for a temperatura, ou seja, o desvio máximo dos átomos das suas posições médias da estrutura, maior será a dispersão. A Figura 13 demonstra a variação da condutividade dos materiais dielétricos, é possível observar que para temperaturas bastantes elevadas a condutividade do material desce.

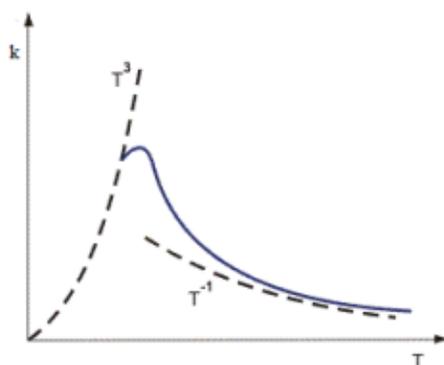


Figura 13- Variação da condutividade térmica em cristais dielétricos com a temperatura. (Polezhaev, 2011)

A condutividade térmica dos metais depende da movimentação e interação entre os elétrons livres. Esta propriedade dos metais é, geralmente, igual à soma da componente cristalina (fonões) e dos elétrons, sendo que a última é claramente dominante. (Polezhaev, 2011)

No caso dos líquidos, a condutividade térmica depende da capacidade calorífica a uma pressão constante como demonstrado na equação (1.9)

$$k = c_p \cdot U_s \cdot L \cdot \rho \quad (1.9)$$

sendo ρ a massa volúmica, c_p a capacidade calorífica a pressão constante, U_s a velocidade do som e L a distância intermolecular.

O aumento da temperatura, apesar de pouco notório, provoca uma diminuição do valor de k . De forma similar aos metais dielétricos, o aumento da pressão também provoca uma subida da condutividade, contudo a pressões superiores a 50 bar este aumento não é notório podendo assim ser negligenciado. (Polezhaev, 2011)

Quanto maior o valor da condutividade térmica de um material, melhor é a sua capacidade de transferir calor, sendo assim os metais os melhores condutores térmicos.

1.3.6.4. Viscosidade

Uma vez que não há interesse na viscosidade na fase sólida do PCM, apenas se falará neste parâmetro no que diz respeito à fase líquida. A viscosidade de um líquido é formalmente definida como uma propriedade que o permite resistir à deformação de corte, com o aumento da velocidade de deformação. Pode ser entendida como a força resultante de um fluxo líquido. (British Standards Institute, 1976)

Estes fluidos podem ser classificados como Newtonianos ou não-Newtonianos, sendo que no primeiro caso a sua viscosidade é dependente apenas da temperatura e da pressão, enquanto que no segundo para além desta

dependência existe ainda uma relação com a taxa de corte ou com a tensão de corte. Normalmente, o aumento da tensão de corte resulta numa diminuição da viscosidade.

A temperatura é argumento da viscosidade de qualquer líquido. Podendo ser a viscosidade ser função da distância entre as moléculas que constituem o fluido. Quanto maior a temperatura, maior será a distância entre estas, ou seja, haverá mais espaço para as moléculas se moverem e conseqüentemente uma menor viscosidade. (Barnes, 2002)

Do mesmo modo, quanto menor a viscosidade maior será a transferência de calor, uma vez que há menos resistência por parte da fase líquida do PCM. Uma viscosidade maior resultará a um comportamento idêntico a um sólido, diminuindo a transferência de calor. Contudo, o baixo valor da condutividade pode conduzir a problemas de subarrefecimento, sendo assim necessário arranjar um equilíbrio entre o máximo de transferência de calor e o mínimo de subarrefecimento. (Groulx e Murray, 2011)

1.3.6.5. Densidade

A densidade é definida como a quantidade de massa que é possível conter num determinado volume, ou seja, representa a proporção entre a massa de um corpo e o seu volume. Esta, é definida pela equação (1.10)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.10)$$

onde m é a massa do corpo e V o seu volume.

Os fluidos menos densos flutuam nos mais densos, no caso de não se misturarem, como é o caso da madeira, azeite ou do gelo, materiais mais densos, que flutuam na água, fluido menos denso. Em contrapartida substâncias mais densas como o alumínio ou o aço vão ter o comportamento oposto e afundam.

A densidade dos materiais é alterada com uma variação de temperatura ou de pressão. Nas fases mais relevantes para este estudo, sólida e líquida, o peso desta variação é relativamente pequeno. Com o aumento da pressão de uma substância, o seu volume diminui, aumentando a densidade. No que diz respeito à temperatura, o seu aumento provoca o efeito contrário, visto que o volume aumenta.

Para este estudo acerca dos PCM é mais relevante a diferença de densidades entre a fase sólida e fase líquida do que o valor específico da desta. Isto relaciona-se com a necessidade do PCM não dever apresentar grandes variações de volume entre estas duas fases, de modo a facilitar o seu armazenamento. O PCM deverá apresentar uma baixa densidade para permitir que tenha uma massa relativamente pequena quando comparada com o volume e, desse modo, minimizar a quantidade de material necessária. (Rozanna *et al.*, 2004; Tyagi *et al.*, 2011)

1.3.6.6. Degradação

O número de ciclos de um PCM varia entre uma utilização, no caso de ser aplicado em proteção contra o calor no caso de um incêndio, até milhares de ciclos se for aplicado na climatização de edifícios.

Um dos grandes problemas da estabilidade cíclica é a separação de fases. Quando este tipo de materiais é constituído por diferentes componentes, podem ser formadas fases com diferentes composições. Estas têm uma capacidade muito inferior de armazenamento de energia, comparativamente com a composição inicial.

O PCM a aplicar neste trabalho, para se obter o melhor desempenho possível deve, se possível, ser constituído por apenas um componente, dado que se pretende que a aplicação seja utilizada por um longo período temporal. (Mehling e Cabeza, 2008)

1.3.6.7. Subarrefecimento

Os PCM, por norma, não solidificam imediatamente ao atingir a sua temperatura de fusão, iniciando a sua cristalização a uma temperatura inferior à de fusão.

O subarrefecimento, ilustrado na Figura 14, afeta o PCM na sua fase de descarga, ou seja, na libertação de calor, uma vez que este não é libertado quando a temperatura de fusão é atingida. A principal consequência deste passa pela necessidade de reduzir a temperatura para um valor bastante inferior de temperatura de fusão para se iniciar a cristalização e a consequentemente libertação de calor latente. Em situações extremas, o PCM pode perder a sua capacidade de libertar o calor armazenado.

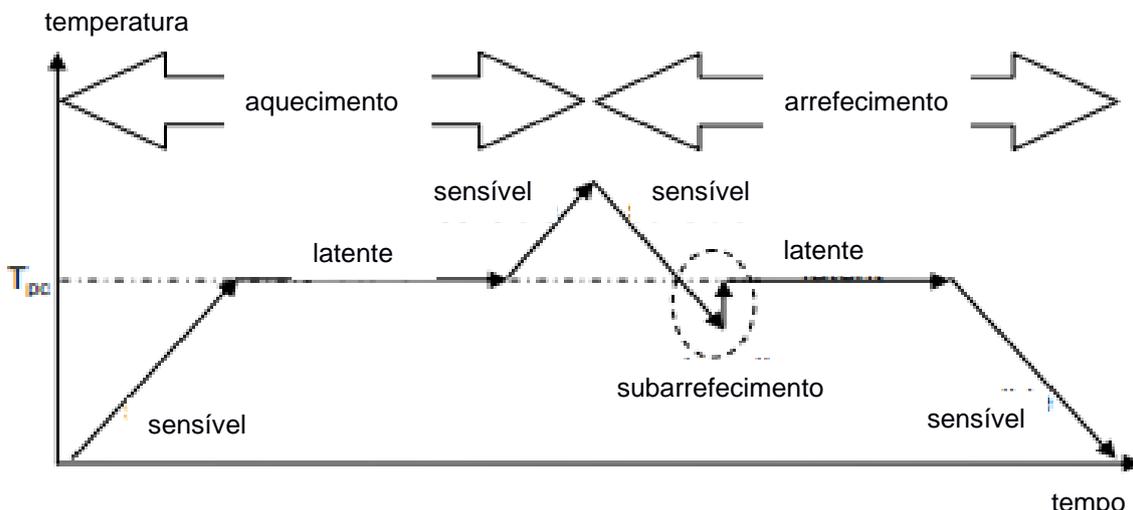


Figura 14- Exemplificação de subarrefecimento.
(Mehling e Cabeza, 2008)

Esta temática levanta uma grande questão acerca da solidificação do material, uma vez que tal não acontece imediatamente após ser atingida a temperatura de fusão. A solidificação é definida pelo crescimento da fase sólida à medida que a fase líquida solidifica. Inicialmente, existe apenas uma partícula

sólida (núcleo), para que esta cresça é necessário que o sistema liberte calor para alcançar o seu estado de mínima energia. Neste processo, há uma competição entre a energia da superfície, diretamente proporcional à sua área, numa proporção de r^2 (sendo r o raio do núcleo), e o calor libertado na mudança de fase, proporcional ao volume em r^3 . Para raios de menor dimensão existe a possibilidade do calor libertado na cristalização seja inferior ao ganho pela superfície. Posto isto, a solidificação só se inicia quando o raio do núcleo for suficientemente grande. Com base no que foi referido anteriormente, existem dois tipos de nucleação:

- Nucleação homogénea: que inicia apenas devido ao próprio PCM. Isto inclui a nucleação por temperaturas suficientemente baixas ou, então uma segunda possibilidade, em que partículas do PCM sólido são adicionadas ao PCM subarrefecido;
- Nucleação heterogénea: que não se inicia devido ao próprio PCM. Na origem da nucleação heterogénea podem estar aditivos especiais intencionalmente adicionados ao PCM, mas também impurezas ou fendas na parede do recipiente que contém o PCM sólido.

A solução mais comum para diminuir o subarrefecimento passa pela utilização de aditivos (nucleadores), para que o PCM tenha uma nucleação heterogénea. A maioria destes apresenta uma estrutura cristalina idêntica à do PCM sólido, permitindo o crescimento da sua fase sólida a uma temperatura superior para prevenir a degradação. Uma estrutura cristalina idêntica implica que a temperatura de fusão também seja idêntica. Por isso, para que esta seja uma solução estável, os nucleadores têm de estar a uma temperatura superior à de fusão do PCM entre 10 a 20 °C. (Günther *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2010)

1.3.6.8. Histerese

Normalmente, não se obtém os mesmos resultados na medição das propriedades dos PCM nos processos de aquecimento e arrefecimento. A este comportamento dá-se o nome de histerese. Esta diferença pode também ser causada pelas condições de medição, sendo designada de histerese aparente.

Para se conseguir diferenciar estes dois casos é necessário ter condições isotérmicas na amostra. Para além disso, a velocidade dos processos deve ser reduzida bem como o tamanho da amostra, contudo esta redução na quantidade de material analisado contraria a necessidade de a amostra ser representativa do material.

De todas as propriedades acima referidas, aquela que provoca mais regularmente a histerese real é o subarrefecimento. Este efeito não provoca aumento do fluxo de calor para temperaturas, mas elevadas no aquecimento nem para as temperaturas mais baixas no arrefecimento. Uma razão para a ocorrência de histerese é quando a transferência de calor é demasiado devagar no arrefecimento, porque a estrutura cristalina se forma muito lentamente ou porque são necessários processos de difusão para obter uma amostra homogeneizada. Outra razão para a histerese é a mudança da fase sólida entre o início e o fim da

solidificação, visto que se pode ter uma fase amorfa ou uma estrutura cristalina diferente. (Mehling e Cabeza, 2008)

Na Figura 15 pode-se observar a diferença entre os dois tipos de histerese e o subarrefecimento

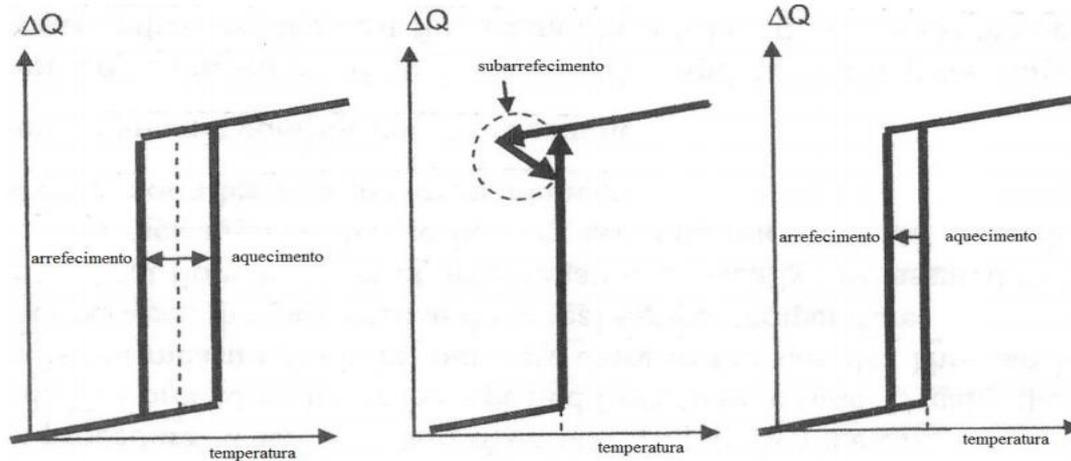


Figura 15- Diferentes tipos de histerese. (Mehling e Cabeza, 2008)

Esquerda: histerese aparente causada por condições não isotérmicas. Centro: histerese real como propriedade do material, causada por subarrefecimento. Direita: histerese real devido a libertação lenta de calor ou devido a reais diferenças entre as temperaturas de mudança de fase

1.3.7. Melhoria das propriedades dos PCM

Os PCM são materiais muito promissores para armazenamento, ou regulação, de calor baseado na absorção de calor durante o processo de fusão e na libertação desse mesmo calor durante o processo de solidificação. Porém, a sua baixa condutividade térmica é uma limitação para possíveis futuras aplicações, pelo que diferentes soluções têm vindo a ser estudadas com o objetivo de ultrapassar este problema. Consequentemente, a baixa condutividade conduz a uma fraca transferência de calor, sendo esta também uma das possibilidades de melhoria do desempenho deste material.

Existem várias possibilidades para melhorar estas propriedades, tal como é visível na Figura 16.

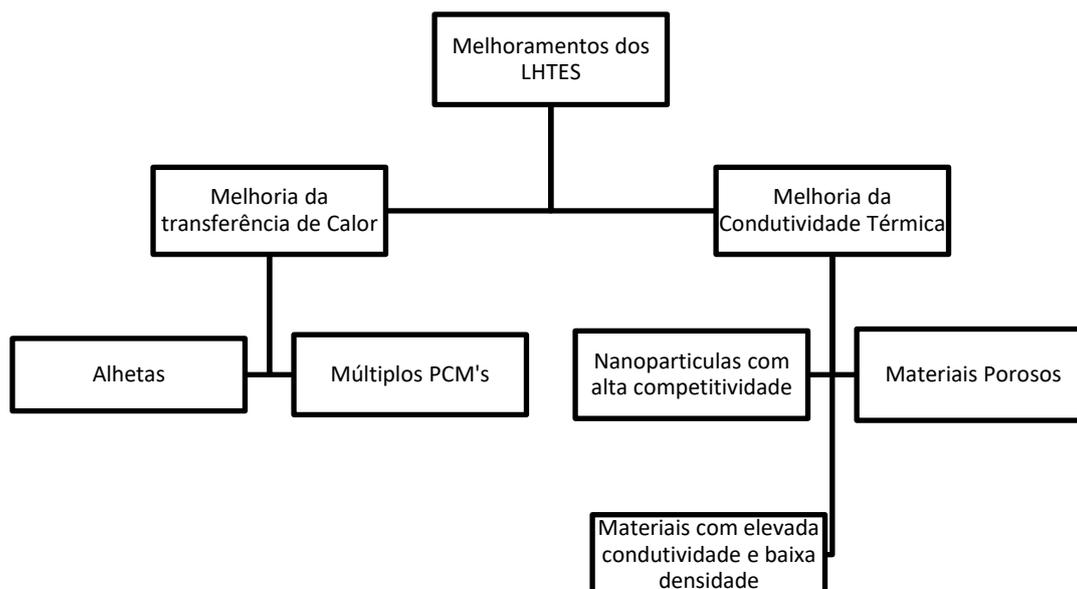


Figura 16- Técnicas para melhoramento da transferência de calor. (Yilbas et al., 2017)

1.3.7.1. Transferência de calor

As técnicas mais comuns de aprimoramento da transferência de calor, passam pela utilização de extensões como alhetas e condutas aquecidas, ou através da junção de múltiplos PCM com diferentes pontos de fusão.

As alhetas, são normalmente aplicadas para aumentar a área de transferência entre o PCM e o fluido responsável pela transferência de calor e, conseqüentemente, melhorar a performance térmica do sistema. A seleção do seu material depende da sua condutividade térmica, densidade, custo e corrosão. (Liu, Saman e Bruno, 2012)

Exemplos de materiais de alhetas e suas respectivas propriedades acima referidas encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7- Propriedades de materiais considerados para alhetas. (Liu, Saman e Bruno, 2012)

	Folha de Grafite	Alumínio	Aço Inoxidável	Aço ao Carbono	Cobre
Condutividade Térmica (W/m·K)	150	200	20	30	350
Densidade (kg/m³)	1000	2700	7800	7800	8800

Vários investigadores, têm utilizado alhetas de várias formas e configurações para diferentes tipos de armazenamento de energia térmica proveniente do calor latente (LHTES, do inglês Latent Heat Thermal Energy

Storage). Têm sido investigadas duas variações de LHTES, numa utilizasse o armazenamento e recuperação de calor, através de um fluido que realiza a transferência de calor (HTF, do inglês Heat Transfer Fluid), um exemplo desta aplicação é o demonstrado na Figura 17, enquanto que no outro o sistema serve como reservatório de calor, neste caso as alhetas encontram-se alocadas junto do PCM, tal como ilustrado na Figura 18, visto que não existe um HTF. (Yilbas *et al.*, 2017)

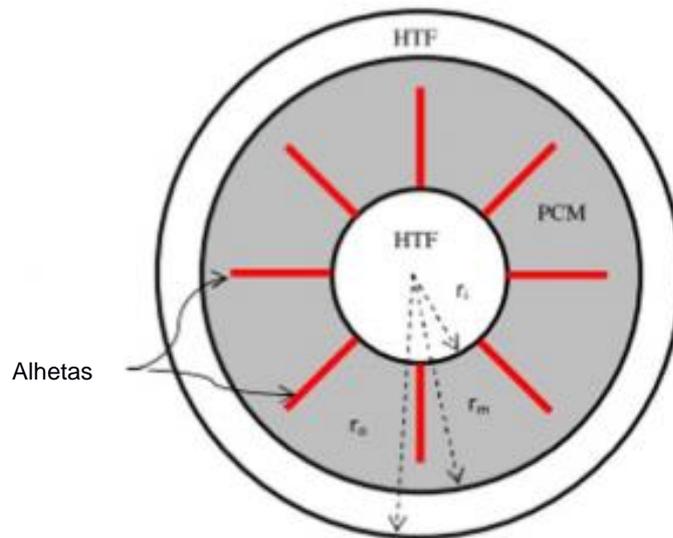


Figura 17- Configuração física de um sistema com alhetas no tubo interior. (Mat *et al.*, 2013)

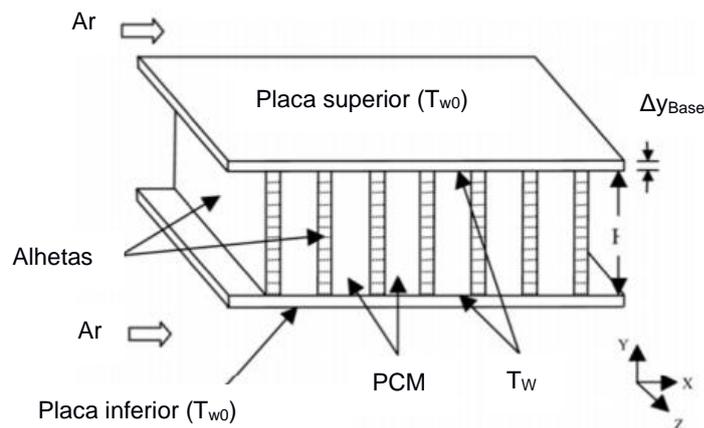


Figura 18- Esquematização de um reservatório calorífico com alhetas. (Gharebaghi e Sezai, 2008)

Existe um grande leque de estudos realizados nesta opção, havendo variações dos vários componentes do sistema (alhetas e geometria geral), processo de mudança de fase analisado, natureza do trabalho (numérica ou

experimental) e ainda a consideração do efeito do número de alhetas e da sua dimensão. Tipicamente, esta aplicação resulta num aceleração em ambos os processos de carga e descarga, num aumento da transferência de calor devido ao aumento da condutividade térmica equivalente e o aumento da quantidade de energia armazenada com o aumento do número de alhetas. (Yilbas *et al.*, 2017)

Outra possibilidade para melhorar a transferência de calor passa pela aplicação de condutas que se encontram a uma temperatura elevada (HP, do inglês Heat Pipes). Estas comportam-se como um condutor térmico, entre o HTF e o PCM, através dos processos de evaporação e condensação do seu fluido operante que ocorrem, respetivamente, no evaporador e no condensador. Este tipo de aplicação é bastante promissor em sistemas que envolvam ciclos de carga e descarga como em arrefecimento e aquecimento, recuperação de energia e reservatórios de calor, uma vez que acelera estes ciclos. Geralmente existem dois tipos de HP: um que não tem recurso a pavio, ou assistido por gravidade e outro que é assistido por pavio, ambos operam com uma grande variedade de fluidos, podendo também apresentar diferentes formas e gamas de temperatura. A utilização de HP resulta num aumento na capacidade de armazenamento de energia do sistema, permitindo que este forneça mais energia no seu ciclo de descarga, o aumento do comprimento do condensador e do evaporador, bem como o aumento do diâmetro dos HP, permitem melhorar a eficiência do sistema e reduzir o tempo que o PCM demora a fundir (Yilbas *et al.*, 2017).

Uma configuração típica deste tipo de sistemas é a ilustrada na Figura 19.

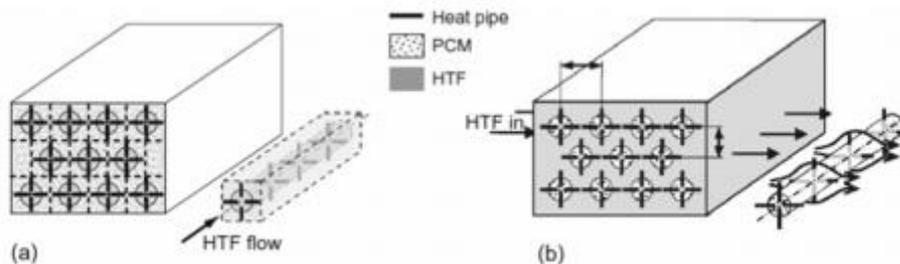


Figura 19- Unidades de armazenamento de calor latente: (a) PCM rodeia os tubos com HTF, (b) o HTF passa por tubos com PCM. (Shabgard *et al.*, 2010).

Por fim, outra possibilidade de favorecer a transferência de calor passa pela utilização de múltiplos PCM, tendo como objetivo manter a variação da temperatura, entre o PCM e o HTF, nos ciclos de carga e descarga aproximadamente constante, melhorando assim a performance do LHTES. Num sistema tubular, os múltiplos PCM, com diferentes temperaturas de fusão, são ordenados de forma decrescente segundo o seu temperatura de fusão durante o processo de carga, tal como demonstrado na Figura 20. Originando assim, um fluxo praticamente constante para o PCM. O sentido do HTF é revertido no processo de descarga, consequentemente os PCM ao ficarem organizados por ordem crescente

de ponto de solidificação mantendo assim um fluxo de calor praticamente constante.

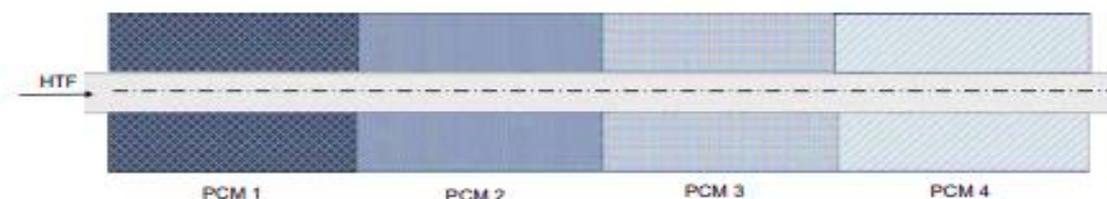


Figura 20-Esquema de múltiplos PCM num sistema tubular. (Yilbas et al., 2017)

Para este tipo de aplicação, já se estudaram várias geometrias do sistema para ciclos de carga e descarga, recorrendo também diferentes combinações de PCM, contudo esta opção é estudada maioritariamente de forma numérica, apresentando deste modo lacunas na verificação experimental. Esta solução fornece aumentos significativos na quantidade de calor armazenado e na taxa a que este é descarregado. (Yilbas *et al.*, 2017)

Todas as técnicas acima referidas têm o intuito de aumentar a transferência de calor através do aumento da área de transferência de calor. Comparando os resultados acima expostos, o método que apresenta maior número de estudos é a utilização de alhetas devido à sua simplicidade, em contrapartida pode-se observar uma pequena quantidade de estudos experimentais no que diz respeito ao recurso a múltiplos PCM e a HP apesar deste terem um grande potencial neste área.

1.3.7.2. Condutividade térmica

Melhorar a condutividade do PCM é outra opção para enaltecer a performance térmica do LHTES. Geralmente, esta pode ser aumentada através da implementação de malhas metálicas com elevada condutividade, dispersão de materiais/nanopartículas com elevada condutividade e/ou dispersão de matérias com baixa densidade na base do PCM.

Estudaram-se diversas soluções para a mistura de PCM e materiais porosos, recorrendo a diferentes tipos de ambos os componentes, com o intuito de observar o impacto desta metodologia. Os estudos desenvolvidos nesta área aplicam-se a ambos os processos de mudança de fase, podendo qualquer um deles ser alvo do estudo. A quantidade de material poroso utilizado, representada sob a forma de fração mássica, é um parâmetro relevante para a análise dos resultados obtidos, contudo vários investigadores optam por desprezar o seu efeito. Para se alcançar estes resultados pode-se recorrer a métodos analíticos, numéricos, experimentais ou a ambos de modo a aumentar a veracidade do estudo efetuado. Outra questão que surge com a utilização de materiais porosos, deve-se à dificuldade em distinguir quando é que já terminou o processo de mudança de fase, sendo assim necessário recorrer a métodos experimentais que permitam caracterizar o estado do material. A inserção de materiais porosos em PCM aumenta a condutividade térmica do sistema melhorando assim a sua performance, visto que permite ao material efetuar os ciclos de carga e descarga num menor espaço de tempo. Esta técnica é a que

manifesta maior crescimento, quando se trata de aumentar a condutividade deste tipo de materiais. (Yilbas *et al.*, 2017)

Tem havido bastantes progressos na utilização de nano-materiais, juntamente com PCM, para melhorar a sua condutividade térmica. À semelhança do que se constatou para os materiais porosos, existem vários estudos que abordam diferentes tipos de PCM, misturando-os com diferentes tipos de nanopartículas. Estes estudos podem ser aplicados a qualquer etapa do processo de mudança de fase, recorrendo a métodos analíticos, experimentais ou ambos, apesar de se notar uma clara maioria nos procedimentos experimentais. De notar que, para este tipo de aplicação, é indispensável o controlo da quantidade de material introduzida na mistura. A introdução destas partículas em materiais de mudança de fase causa um aumento notório da condutividade térmica, relativamente à de um PCM convencional, causando assim uma melhoria no processo de transferência de calor. (Yilbas *et al.*, 2017)

As partículas/estruturas metálicas possuem, geralmente, densidades relativamente elevadas, originando um depósito no fundo do recipiente que contem o PCM, fazendo assim com que o sistema ganhe um peso considerável. Posto isto, alguns investigadores ponderaram a aplicação de partículas com baixa densidade e alta condutividade. As fibras de carbono são uma das melhores opções, dentro desta categoria, para melhorar a condutividade térmica de um PCM, visto que possuem baixos valores de densidade relativamente aos metais, apresentando valores de condutividade quase iguais aos de alumínio e cobre. Possuem ainda uma elevada resistência à corrosão, sendo assim compatível com a maioria dos PCM. O resultado obtido com a introdução destas partículas é similar ao observado nas opções anteriores. (Yilbas *et al.*, 2017)

Com base nos estudos acima demonstrados, pode-se concluir que a velocidade das fases de solidificação e fusão diminui de forma considerável e que a condutividade térmica do sistema aumenta consideravelmente para qualquer uma das soluções apresentadas. Uma das grandes preocupações com este tipo de metodologia, passa por encontrar o ponto ótimo da relação de massa/ volume entre os aditivos e o PCM.

Nesta dissertação optou-se por utilizar um meio poroso, nomeadamente uma malha metálica de aço, para melhorar as propriedades do PCM.

1.3.8. Transferência de calor em sistemas multiescala

A condução de calor, numa massa embebida por um material poroso, é crítica para a compreensão dos mecanismos básicos de transferência neste sistema. A condutividade térmica efetiva é um parâmetro macroscópico que descreve o calor conduzido por este meio. James Clerk Maxwell, em 1954, desenvolveu um modelo teórico para estimar o valor da condutividade térmica efetiva de um composto com diferentes materiais, que é o caso para metais saturados de elevada condutividade em funcionamento com um qualquer fluido ou nano fluido. (Maxwell, 1954)

Posteriormente, foram propostos diversos modelos com o mesmo intuito. O modelo mais simples pode ser obtido através da contribuição de cada componente, baseado na sua fração volúmica, como é demonstrado em

$$k_m = \beta \cdot k_f + (1 - \beta) \cdot k_s \quad (1.11)$$

Contudo, este modelo não inclui a estrutura do meio poroso, posto isto o alcance desta formulação é limitado. Na verdade, esta propriedade depende de diversos fatores como por exemplo, a porosidade, o material ou a estrutura da malha. Foram desenvolvidos vários modelos teóricos para prever a condução de calor numa estrutura celular de um meio poroso. Alguns investigadores obtiveram diferentes formulações para a condutividade térmica efetiva de acordo com uma análise bidimensional da estrutura. (Xu *et al.*, 2019a)

Calmidi e Mahajan, em 1999, aplicaram o seu modelo, experimentalmente, em água e ar para obter a condutividade térmica efetiva de uma espuma metálica ERG. Estes prosseguiram com este estudo, em 2001, ao estudar as propriedades térmicas e físicas de uma mistura de malhas metálicas com água e ar. (Bhattacharya, Calmidi e Mahajan, 2002; Calmidi e Mahajan, 1999)

Boomsma e Poulikakos propuseram, em 2001, um modelo analítico que permite calcular a condutividade térmica efetiva numa estrutura celular ideal 3D de uma espuma metálica, os seus resultados vão ao encontro aos alcançados experimentalmente por Calmidi e Mahajan. (Boomsma e Poulikakos, 2001)

Wakao e Kagueli, em 1983, apresentaram uma correlação empírica que permite obter o valor de condutividade térmica efetiva ao considerar uma condução térmica anisotrópica num processo de convecção forçada. (Xu *et al.*, 2019b)

Osama e Khalid, em 2005, realizaram um estudo numérico, para melhorar a condutividade térmica da parafina ao utilizarem uma matriz metálica porosa, é possível obter o valor de condutividade térmica através de uma formulação desenvolvida pelos mesmos. (Mesalhy *et al.*, 2005)

Para todas as formulações acima referidas, o estudo da condutividade térmica equivalente foi feito para malhas metálicas com elevada porosidade.

1.4. Síntese

Com o aumento do consumo energético, recorrente da revolução industrial, a utilização de energias renováveis começou a ser cada vez mais procurada. Contudo, a sua utilização é bastante incerta, visto que é um recurso que pode não estar sempre disponível e mesmo dentro da sua disponibilidade pode exceder, ou carecer, a procura de energia momentânea. A melhor solução para se superar esta dificuldade é o armazenamento do excesso de energia produzido, de modo a que este possa ser consumido em períodos de fraca produção ou vendido à rede nos períodos de pico.

Nesta dissertação, será estudado o armazenamento de energia térmica, nomeadamente a energia latente proveniente dos materiais de mudança de fase. Estes materiais, ao atingir o seu temperatura de fusão, libertam grandes quantidade de energia latente (fase de descarga), previamente armazenada (fase de carga). Os PCM têm propriedades únicas e muito vantajosas para a sua utilização nestas aplicações como a elevada densidade energética, a estabilidade química e grande variedade de temperaturas de fusão. Porém, a condutividade térmica afeta de forma muito negativa a sua performance na zona sensível, levando a que o PCM demore muito tempo a descarregar a sua energia. Para combater esta desvantagem, podem-se utilizar diversas técnicas como a introdução de meios porosos, nanocompósitos, partículas de baixa densidade, alhetas, utilização de

múltiplos PCM e HP. Todas estas conseguem demonstrar melhorias na condutividade térmica equivalente e na transferência de calor.

A metodologia adotada nesta dissertação, passa pela utilização de um meio poroso, nomeadamente uma malha metálica de aço. Para se poder proceder a uma análise computacional, tem de se compreender o funcionamento da transferência de calor neste tipo de meios. Há diversos estudos, numéricos e experimentais, em que se combina uma grande variedade de fluidos com diferentes meios porosos, contudo estes são realizados para valores de porosidade elevados apresentado uma lacuna ao utilizar-se porosidades mais baixas.

1.5. Organização do documento

Ao longo desta dissertação procurou-se seguir um raciocínio lógico e intuitivo no que diz respeito aos temas abordados.

Inicialmente, abordou-se uma componente mais teórica e generalizada dos processos relevantes para o funcionamento do sistema e para a sua análise. Começando por se estudar os materiais de mudança de fase, ao reconhecer os diferentes tipos de material existentes e as suas vantagens e desvantagens, procurando metodologias para as solucionar.

Visto que se irá analisar um sistema de armazenamento de energia, é necessário realizar uma introdução aos processos de transferência de calor bem como a diferentes formulações analíticas aplicadas neste tipo de problemas. Uma vez que a ferramenta de análise do modelo elaborado será computacional, tem de se adquirir conhecimentos básicos relativos a diferentes métodos e formulações utilizados.

Após compreender o funcionamento do software, é possível passar à formulação do sistema, definindo-se a sua geometria e explicando o seu funcionamento de forma geral. Através desta etapa foi possível identificar as variáveis mais importantes para o funcionamento do modelo em análise. Posto isto, procedeu-se à explicação do procedimento computacional adotado para a modelação do sistema, sendo assim possível realizar as simulações pretendidas.

Para finalizar esta dissertação analisar-se-á os resultados obtidos, bem como retirar conclusões acerca do funcionamento do sistema. Tendo em conta o trabalho realizado é possível elaborar várias propostas para trabalhos futuros que procurem validar, ou melhorar, os resultados obtidos, bem como trabalhos completos ao elaborado nesta dissertação.

Por fim, encontrar-se-ão demonstradas em anexo ilustrações pertinentes para uma melhor compreensão do sistema.

Capítulo 2- Estudo da transferência de calor em sistemas AQS

2.1. Sumário

Neste capítulo procura-se compreender quais os processos de transferência de calor existentes, explorando todas as suas formulações, bem como todos as propriedades associadas a estes processos, como a resistência térmica. O escoamento de fluidos será também uma temática fundamental para a análise do funcionamento deste sistema. É essencial conhecer as várias metodologias analíticas associadas a estes processos, para se prosseguir para a elaboração do modelo pratico que ilustre o sistema a analisar. É preciso conhecer as metodologias e formulações, utilizadas em análises computacionais, que serão aplicadas na zona discretizada onde será aplicada a malha.

Após a definição do domínio de cálculo é possível proceder á elaboração do modelo recorrendo ao software ANSYS.

2.2. Introdução

Relativamente à energia térmica, uma das suas vertentes mais estudadas é a transferência de calor, esta ocorre sempre que existir uma diferença de temperaturas num meio ou entre meios. Os diferentes processos de transferência de calor são caracterizados pelo seu modo (Figura 21).

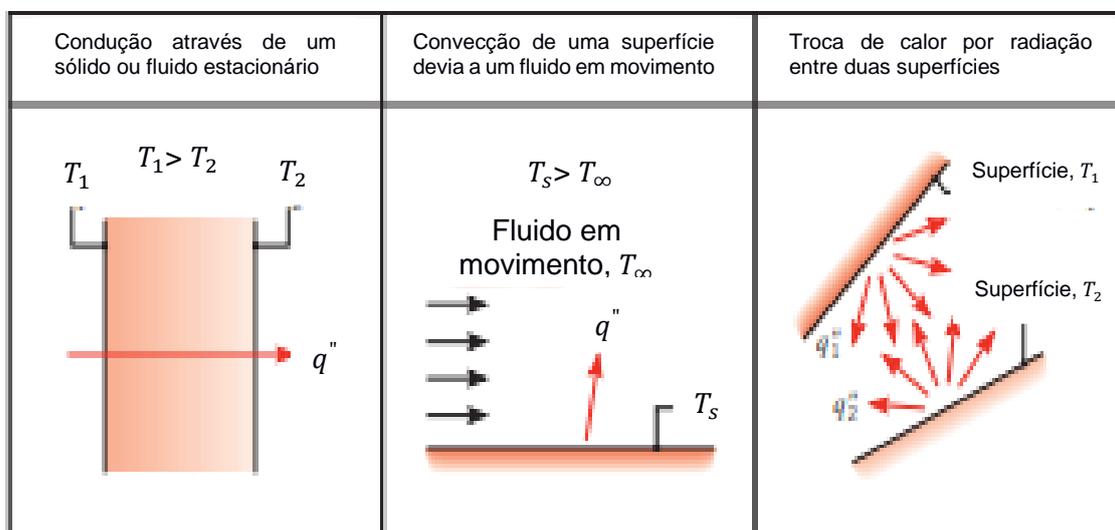


Figura 21- Diferentes formas de transferência de calor. (Bergman *et al.*, 2011).

Quando o gradiente de temperaturas ocorre num meio estacionário, sólido ou líquido, dá-se o nome de condução à transferência de calor ocorrida. Para uma melhor compreensão deste modo tem de observar o fenómeno a nível atómico, em que ocorre um fluxo decrescente de energia, ou seja, o fluxo de calor ocorrerá das partículas com maior valor energético para as com menor, através da interação

entre elas. Este fenómeno físico é explicado de forma simplificada considerando um gás compreendido entre duas superfícies a diferentes temperaturas (Figura 22), existindo assim um gradiente de temperatura. Associando diretamente a temperatura em qualquer ponto à sua energia molecular, ou seja, quanto maior for a temperatura, maior será a sua energia, é possível afirmar que haverá sempre transferência energética, visto que as partículas estão em constantes colisões entre si. Este processo é semelhante para líquidos e sólidos, apesar de as moléculas se encontrarem mais próximas, o que fará com que as interações sejam mais fortes e frequentes. (Bergman *et al.*, 2011)

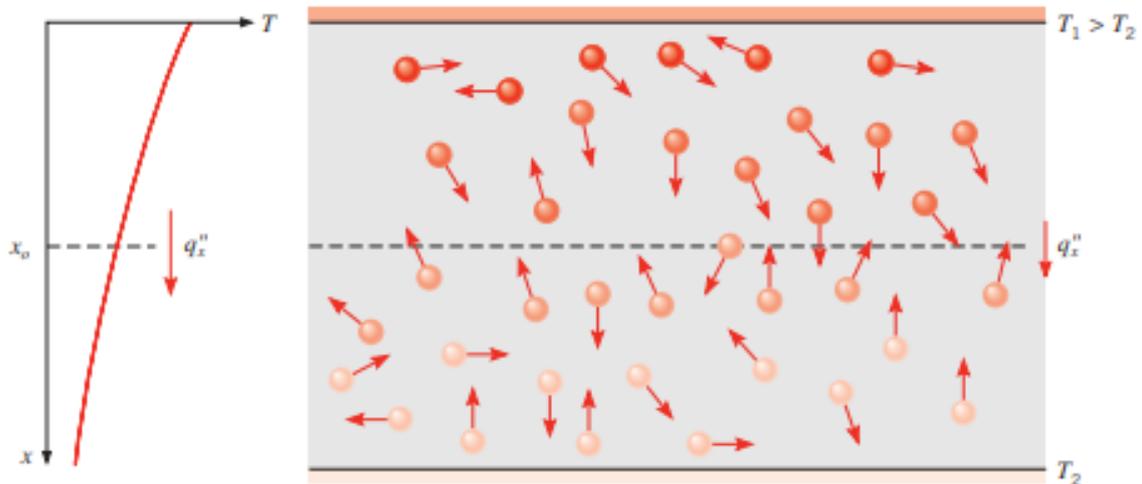


Figura 22- Associação da transferência de calor por condução com a difusão de energia devido a atividade molecular. (Bergman *et al.*, 2011).

A transferência de calor por condução, numa parede plana, pode ser quantificada, através da lei de *Fouriers*, pela equação (2.1)

$$q_x'' = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

em que o valor de transferência de calor na direção X, q_x'' , é proporcional ao gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$ nesta direção, por fim o parâmetro k representa a condutividade térmica do material. O sinal negativo é consequência do calor ser transferido na direção decrescente de temperatura. Em regime estacionário (Figura 23), onde a distribuição de temperaturas é linear, o gradiente de temperaturas pode ser definido por

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.2)$$

posto isto, o fluxo de calor é

$$q_x'' = -k \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.3)$$

ou

$$q_x'' = k \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} = \frac{k\Delta T}{L} \quad (2.4)$$

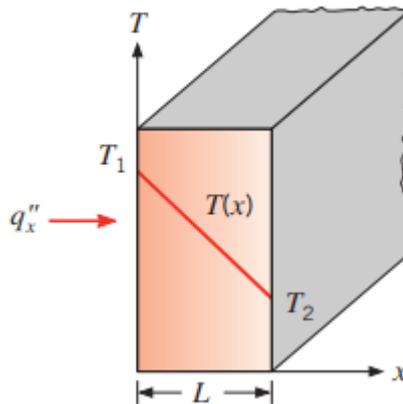


Figura 23- Transferência de calor por condução unidimensional.
(Bergman et al., 1966)

Sistemas esféricos e cilíndrico experienciam, frequentemente, gradientes de temperatura apenas segundo a sua componente radial, deste modo podem ser tratados como sistemas unidimensionais. Um exemplo típico deste tipo de sistemas é o cilindro oco, em que as superfícies interiores e exteriores estão expostas a fluidos a diferentes temperaturas (Figura 24). A equação do calor para este tipo de sistema é

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot \left(k \cdot r \cdot \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2.5)$$

neste caso k é tratado como uma variável. O significado físico deste resultado torna-se evidente se considerarmos a forma correta da lei de Fourier. A taxa de energia transferida por condução, através de qualquer superfície, cilíndrica pode ser expressa por

$$q_r = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dr} = -k \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot L) \cdot \frac{dT}{dr} \quad (2.6)$$

onde $A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L$ é a área normal à direção da transferência de calor.

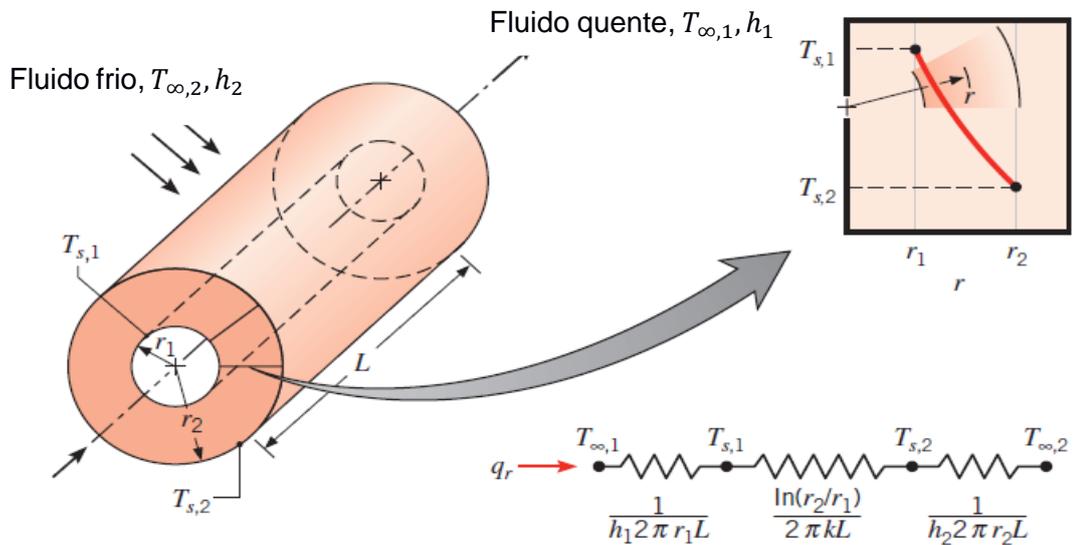


Figura 24- Exemplificação de transferência de calor num cilindro oco.
(Bergman et al., 1966).

É possível determinar a distribuição de temperaturas num cilindro ao resolver a equação 2.1, com as condições de fronteira apropriadas. Assumindo que k é constante, a equação 2.5 pode ser integrada duas vezes pode-se obter a seguinte solução geral

$$T(r) = C_1 \cdot \ln(r) + C_2 \quad (2.7)$$

para obter as constantes de integração C_1 e C_2 , consideram-se as seguintes condições de fronteira

$$T(r_1) = T_{s,1} \text{ e } T(r_2) = T_{s,2} \quad (2.8)$$

ao aplicar estas condições à solução geral, obtém-se

$$T_{s,1} = C_1 \cdot \ln(r_1) + C_2 \text{ e } T_{s,2} = C_1 \cdot \ln(r_2) + C_2 \quad (2.9)$$

resolvendo esta equação em ordem a C_1 e C_2 , alcançamos a seguinte equação para a distribuição de temperaturas

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (2.10)$$

de notar que a distribuição de temperatura associada à condução radial, através de uma parede cilíndrica, é logarítmica ao contrário do que acontece numa parede plana, às mesmas condições, em que a distribuição é linear. Caso se utilize esta

distribuição na lei de Fourier, pode-se expressar a transferência de calor da seguinte forma

$$q_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k \cdot (T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (2.11)$$

Em contraste, a convecção é um modo de transferência de calor que irá ocorrer entre uma superfície e um fluido em movimento, estando estes a diferentes temperaturas. Esta resulta da relação de dois mecanismos de transferência de calor, a agitação aleatória das moléculas e também devido ao movimento da massa de fluido em contacto com a superfície, este irá originar um maior número de moléculas em movimento simultâneo, ou a sua agregação, o que irá contribuir para a transferência de calor. Esta pode ser definida em função da natureza do fluxo do fluido (Figura 25). A convecção forçada ocorre quando o fluxo é provocado por fontes externas, como por exemplo uma ventoinha, uma bomba ou o vento (Figura 25(a)). Contrariamente, a convecção natural é causada pela diferença de densidade causada pela variação de temperaturas do fluido (Figura 25(b)). Ambas as classes referidas proveem de efeitos combinados de condução com uma massa de fluido em movimento. Normalmente a energia transferida por estes processos é a energia sensível, contudo há casos em que também está envolvida a energia latente, proveniente da mudança de fases do fluido, como é o caso de uma panela com água a ferver onde ocorre a vaporização (Figura 25(c)) ou a condensação presente no exterior de um tubo arrefecido (Figura 25(d)).

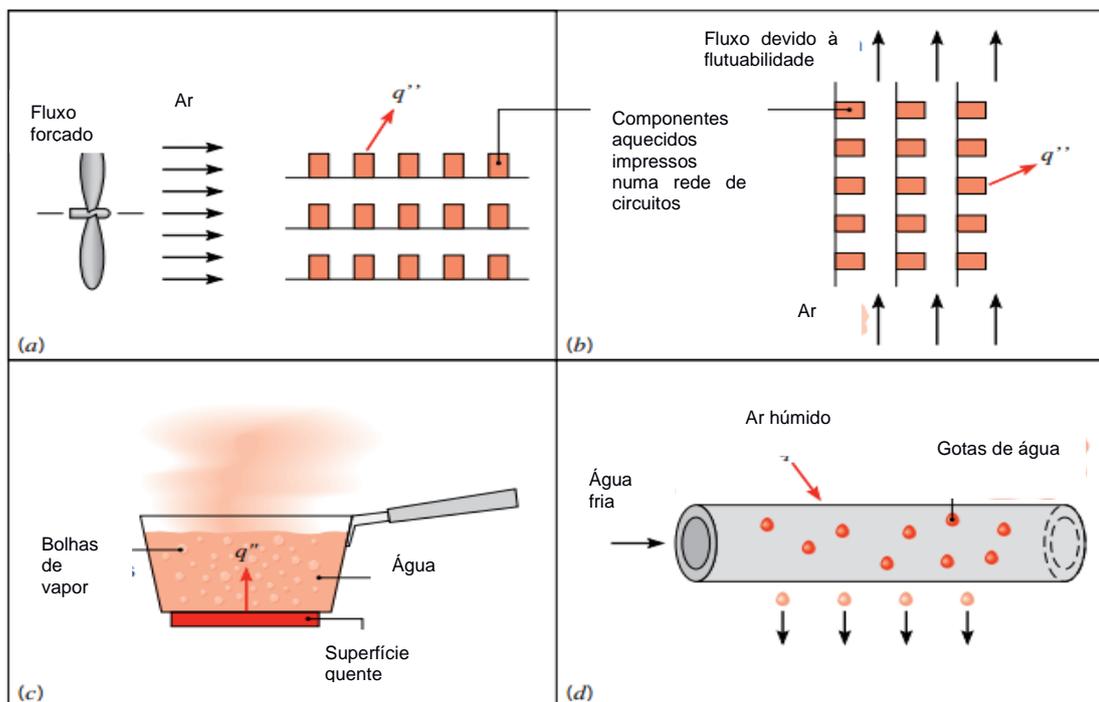


Figura 25- Diferentes tipos de convecção:(a) Convecção forçada, (b)Convecção natural, (c) Vaporização, (d) Condensação. (Bergman *et al.*, 2011)

Independentemente do tipo de convecção o fluxo de calor, q'' , é dado pela equação 2.12, conhecida como Lei do arrefecimento de *Newton*,

$$q'' = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.12)$$

nesta, T_s e T_∞ representam, respetivamente, a temperatura da superfície e do fluido e h representa o coeficiente de transferência de calor por convecção. (Bergman *et al.*, 2011)

A radiação térmica é a energia emitida por uma dada quantidade de matéria a uma temperatura superior a zero. O tipo de radiação mais comum é entre duas superfícies, contudo a emissão também ocorre em líquidos e gases. Independentemente da forma da matéria, a emissão pode dever-se à alteração da configuração dos eletrões dos átomos e moléculas constituintes. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas, ou alternativamente, fotões. De forma contrária ao que se sucede na transferência de calor por condução ou convecção, a radiação não necessita de um meio material para propagar a sua energia, pelo contrário esta até se realiza de uma forma mais eficiente no vazio. Considere-se o processo de transferência por radiação através de uma superfície ilustrado na Figura 26 (a). A Radiação que é emitida por esta é originada pela energia térmica da matéria limitada pela superfície e o fluxo a que esta é libertada por unidade de área é designada de poder emissivo, E . Existe um limite superior deste valor, dado pela lei de Stefan Boltzmann (equação 2.13).

$$E_b = \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.13)$$

onde T_s é a temperatura absoluta da superfície em graus Kelvin e σ a constante de Stefan Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$). Uma superfície que consiga atingir este limite é designada de radiador ideal ou corpo negro. (Bergman *et al.*, 2011)
O fluxo de calor emitido por uma superfície real é menos do que o de um corpo negro, nas mesmas condições de temperatura é dado por

$$E_b = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.14)$$

com ε a representar uma propriedade inerente à superfície designada de emissividade. Os valores desta variam entre 0 e 1, esta propriedade é uma forma de medir quão eficiente é a superfície relativamente a um corpo negro. A radiação também pode incidir numa superfície através do seu meio envolvente, ou de uma fonte especial como por exemplo o sol. Independentemente da fonte de radiação, o fluxo a que esta incide numa unidade de área da superfície é designado de irradiação G . Uma porção, ou toda, desta irradiação pode ser absorvida pela superfície, aumentando deste modo a energia térmica do material. A taxa a que a energia é absorvida, por unidade de área da superfície, pode ser avaliada através de uma propriedade designada de absorvidade α . Isto é,

$$G_{abs} = \alpha \cdot G \quad (2.15)$$

o valor de α varia entre 0 e 1. Caso a absorvidade seja menor que 1 a superfície é opaca e uma porção de irradiação será rejeitada, se esta for semitransparente, porções de irradiação podem ser transmitidas. Contudo, enquanto que a variação da absorção e emissão da radiação aumenta e diminui, respectivamente, a energia térmica, a quantidade de radiação refletida e transmitida não tem qualquer efeito no valor de energia. De notar que o valor de α depende da natureza da irradiação, bem como da própria superfície. (Bergman *et al.*, 2011)

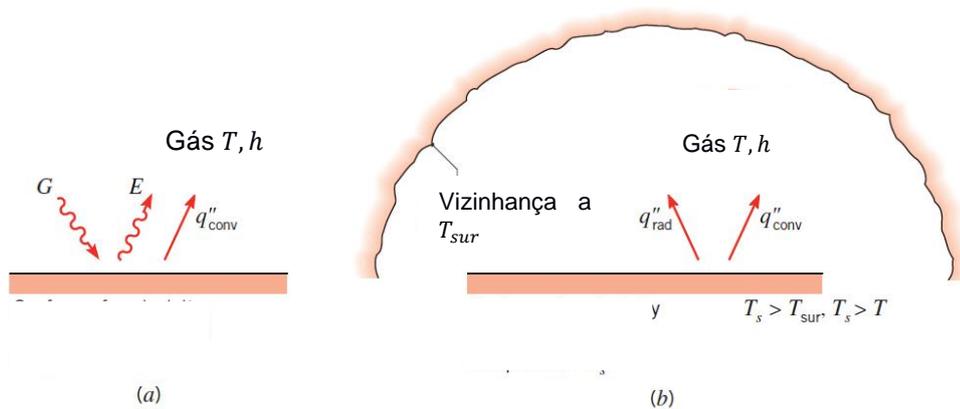


Figura 26- Transferência de calor por radiação: (a) na superfície e (b) entre a superfície e a vizinhança. (Bergman *et al.*, 2011).

Em alguns problemas de engenharia, os líquidos podem ser considerados opacos à transferência de energia por radiação enquanto que os gases podem ser considerados transparente. Relativamente aos sólidos, estes podem ser considerados opacos (caso dos metais) ou semitransparente (como por exemplo pequenas camadas poliméricas ou alguns materiais semicondutores). Um caso particular acontece, frequentemente, quando se envolve a troca de radiação entre uma pequena superfície, a uma temperatura T_s , e uma outra de dimensões muito superiores, rodeando assim a pequena superfície, que opere a uma temperatura constante (Figura 26 (b)). Esta vizinhança pode ser, por exemplo as paredes de uma sala ou de uma fornalha em que a sua temperatura difere da temperatura da superfície. O fluxo de transferência de calor por radiação pode ser dado por:

$$q_{rad}'' = \frac{q}{A} = \varepsilon \cdot E_b \cdot (T_s) - \alpha \cdot G = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (2.16)$$

esta expressão representa a diferença entre a energia térmica que é libertada devido à emissão de radiação e a absorção de radiação. Para diversas aplicações é conveniente expressar a transferência de calor da seguinte forma

$$q_{rad} = h_r \cdot A \cdot (T_s - T_{viz}) \quad (2.17)$$

onde, pela equação a, o coeficiente de transferência de calor por radiação, h_r , é dado pela equação 2.18. (Bergman *et al.*, 2011)

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s - T_{viz}) \cdot (T_s^2 + T_{viz}^2) \quad (2.18)$$

Foram introduzidas três formas de transferência de calor. Como é evidente pelas equações 2.4, 2.12 e 2.17, estas podem ser expressas por

$$q = q'' \cdot A = \frac{\Delta T}{R_t} \quad (2.19)$$

onde ΔT representa uma diferença significativa na temperatura, A é a área normal à direção da transferência de calor e R_t a resistência térmica. Esta assume diferentes formas para os modos de transferência de calor. Para uma parede plana a resistência térmica para a condução pode ser definida como

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (2.20)$$

sendo L o comprimento característico e A a área. Para o sistema cilíndrico ilustrado anteriormente na Figura 23 a resistência térmica por condução radial através da parede cilíndrica,

$$R_{t,cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k} \quad (2.21)$$

uma resistência térmica também pode ser associada ao processo de transferência de calor por convecção na superfície, através da lei de Newton do arrefecimento (Equação 2.22).

$$R_{t,conv} \equiv \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (2.22)$$

A radiação entre uma superfície e a sua vizinhança pode também ser relevante caso o coeficiente de transferência térmica por convecção for pequeno, como por exemplo na convecção natural num gás. A resistência térmica por radiação pode ser definida através da equação 2.23. (Bergman *et al.*, 2011)

$$R_{t,rad} = \frac{T_s - T_{viz}}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r \cdot A} \quad (2.23)$$

A representação em circuitos é uma ferramenta valiosa para a conceptualização e quantificação de problemas de transferência de calor. O circuito térmico equivalente, para uma parede plana com convecção na superfície é demonstrada na Figura 27. O fluxo de calor, pode ser determinado ao considerar separadamente cada elemento do sistema. Visto que q_x é constante ao longo do sistema, tem-se

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{\frac{1}{h_1 \cdot A}} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\frac{L}{k \cdot A}} = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{h_2 \cdot A}} \quad (2.24)$$

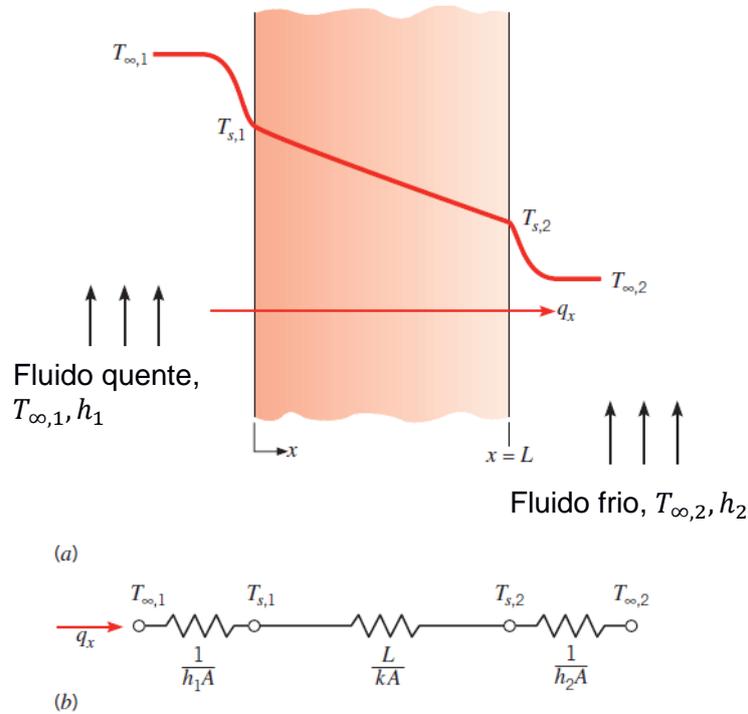


Figura 27-Transferência de calor através de uma parede plana. (a) Distribuição de temperaturas. (b) Circuito térmico equivalente. (Bergman *et al.*, 2011).

relativamente à diferença total de temperatura, $T_{\infty,1}$, $T_{\infty,2}$ e a resistência térmica total, R_{tot} , o fluxo de calor pode ser também expresso como

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (2.25)$$

visto que as resistências, condução e convecção, se encontram em série devem ser somadas, posto isto a resistência total é dada pela equação 2.26. (Bergman *et al.*, 2011)

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 \cdot A} + \frac{L}{k \cdot A} + \frac{1}{h_2 \cdot A} \quad (2.26)$$

No caso da parede ter mais do que uma secção, será tratada como uma parede composta. Estas envolvem um número variável de resistências, em série ou em paralelo, dependendo do número de camadas de diferentes materiais. Considerando uma composição idêntica à demonstrada na Figura 28,

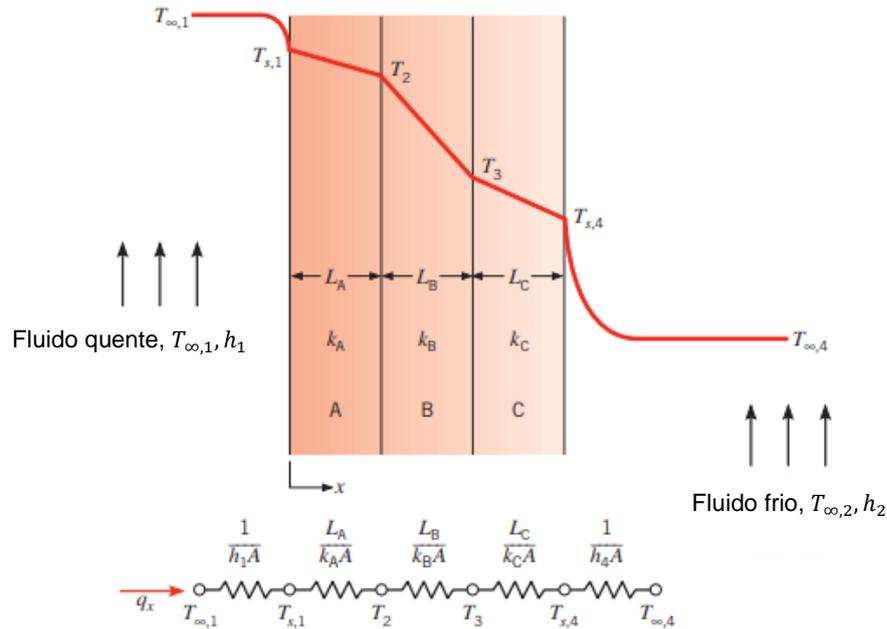


Figura 28- Circuito térmico equivalente para uma parede composta em série. (Bergman *et al.*, 2011).

o fluxo de calor pode ser expresso por,

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\Sigma R_t} \quad (2.27)$$

onde $T_{\infty,1} - T_{\infty,4}$ é a diferença total de temperatura e o somatório inclui todas as resistências térmicas. Portanto,

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\left[\left(\frac{1}{h_1 \cdot A} \right) + \left(\frac{L_A}{k_A \cdot A} \right) + \left(\frac{L_B}{k_B \cdot A} \right) + \left(\frac{L_C}{k_C \cdot A} \right) + \left(\frac{1}{h_4 \cdot A} \right) \right]} \quad (2.28)$$

em sistemas com este tipo de composição é conveniente utilizar o coeficiente total de transferência de calor U , que é definido por uma expressão análoga à Lei do arrefecimento de Newton. Deste modo,

$$q_x = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.29)$$

onde ΔT representa a diferença total de temperatura. O coeficiente total de transferência de calor está relacionado com o total das resistências térmicas, das equações 2.27 e 2.29 obtém-se que $U \cdot A = \frac{1}{R_{tot}}$. Posto isto, para a parede compósita da Figura 27,

$$U = \frac{1}{R_{tot} \cdot A} = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_1} \right) + \left(\frac{L_A}{k_A} \right) + \left(\frac{L_B}{k_B} \right) + \left(\frac{L_C}{k_C} \right) + \left(\frac{1}{h_4} \right) \right]} \quad (2.30)$$

de um modo geral, podemos afirmar que:

$$R_{tot} = \Sigma R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{U \cdot A} \quad (2.31)$$

As paredes compostas por diversos materiais podem ainda ter uma configuração em que as resistências se encontram em série-paralelo tal como é demonstrado na Figura 29.

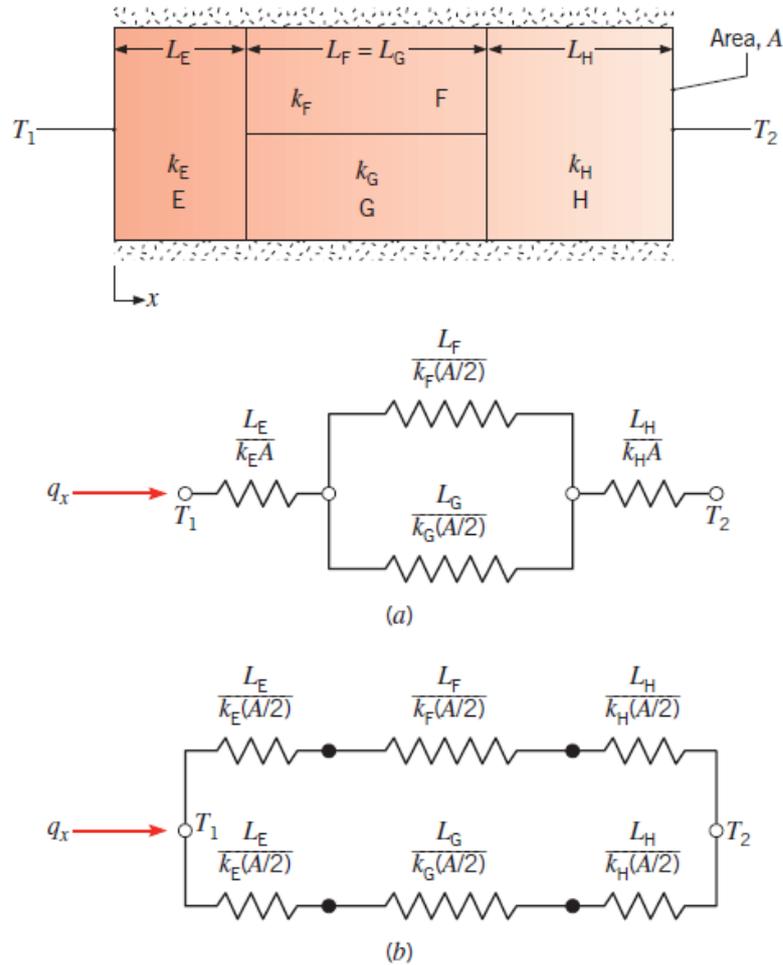


Figura 29- Circuito térmico equivalente para resistência em série e paralelo. (Bergman *et al.*, 2011).

Considere-se agora o sistema compósito da Figura 30, de forma similar ao que se sucedeu para a formulação da transferência de calor por condução através de uma parede plana serão negligenciadas as resistências de contacto para a obtenção da taxa de transferência de calor, expressa por

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L \cdot h_1} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2 \cdot \pi \cdot k_A \cdot L} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot L} + \frac{\ln(\frac{r_4}{r_3})}{2 \cdot \pi \cdot k_C \cdot L} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot L \cdot h_4}} \quad (2.32)$$

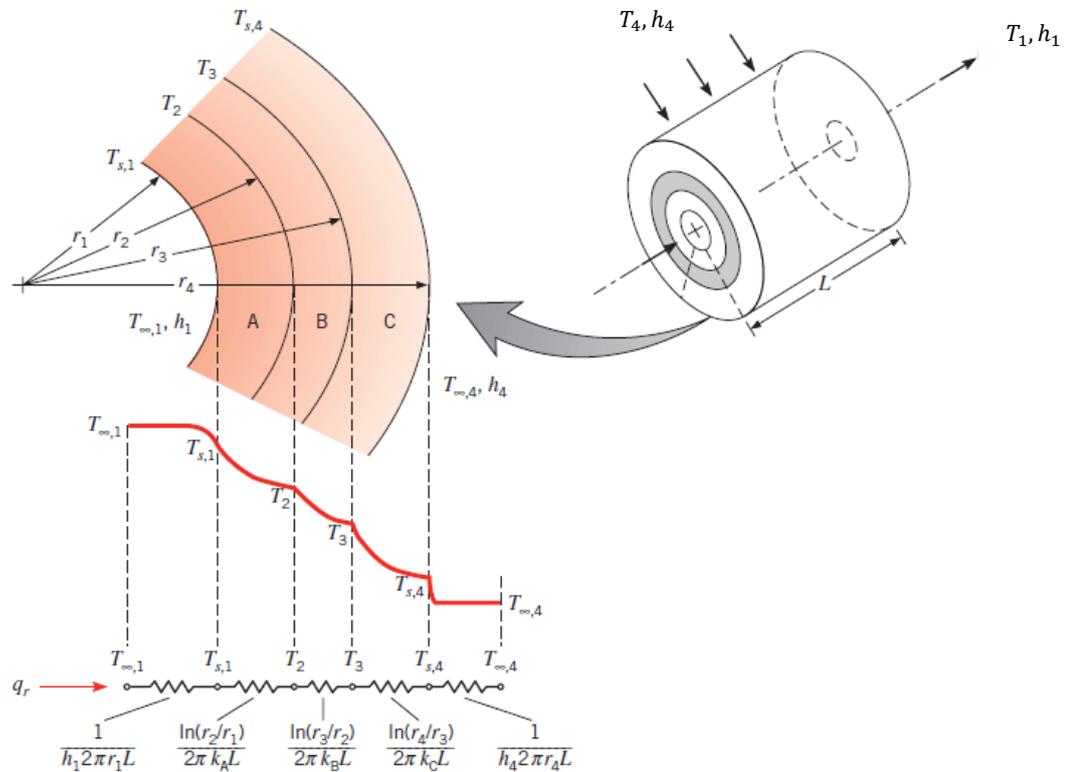


Figura 30- Distribuição de temperaturas para uma parede cilíndrica composta. (Bergman *et al.*, 2011).

Este resultado pode também ser expresso em função do coeficiente de transferência de calor total (Equação 2.33).

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{R_{tot}} = U \cdot A \cdot (T_{\infty,1} - T_{\infty,4}) \quad (2.33)$$

Apesar de ter sido negligenciada até ao momento, é importante reconhecer que em sistemas compostos, a queda da temperatura ao longo da interface dos materiais pode ser apreciável. Esta diferença de temperatura é designada de resistência térmica de contacto, $R_{t,c}$. O efeito é demonstrado na Figura 31 e para uma unidade de área, esta resistência é definida por

$$R_{t,c}'' = \frac{T_A - T_B}{q_x} \quad (2.34)$$

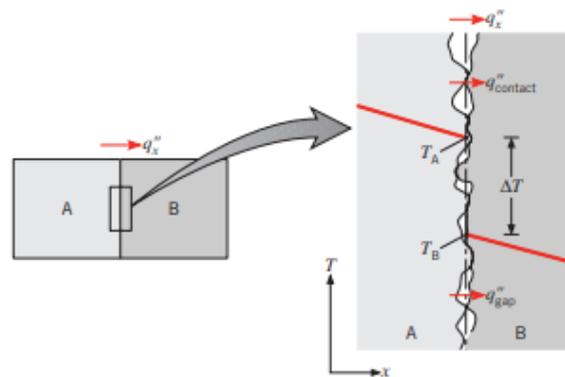


Figura 31- Ilustração resistência de contacto. (Bergman *et al.*, 2011).

A existência de uma resistência de contacto finita é associada, principalmente, aos efeitos da rugosidade da superfície. Os pontos de contacto encontram-se intercalados com brechas, normalmente preenchidas por ar. Posto isto, a transferência de calor é feita por condução pelos pontos de contacto e por convecção e/ou radiação pelas brechas. (Bergman *et al.*, 2011)

De entre os diferentes tipos de transferência de calor acima referidos, aquele que será predominante nesta dissertação é a condução. Desta forma, os materiais utilizados neste problema terão de ser propícios a este fenómeno, ou seja, possuir um elevado valor de condutividade térmica para aumentar o calor transferido, de outro modo deve também procurar diminuir-se a resistência térmica proveniente do material. Caso tal não seja possível, por exemplo PCM, deve procurar-se melhorar as suas propriedades de modo a obter um melhor funcionamento do sistema.

O problema será modelado com recurso a um software indicado para este tipo de problemas, ANSYS. A modelação do sistema deve ser simplificada o máximo possível de modo a diminuir o peso computacional do sistema bem como para facilitar a compreensão do funcionamento do sistema e dos seus resultados.

Estes serão analisados com o auxílio de diversos softwares de modo a conseguir estabelecer relações entre diversas variáveis e propriedades relevantes do sistema.

2.3. Métodos analíticos

O sistema a analisar envolve diversos conhecimentos, no que diz respeito à mecânica dos fluidos e a alguns princípios de termodinâmica.

Na componente termodinâmica, é necessário compreender as formulações acima descritas relativas aos processos de transferência de calor, desde os seus fluxos às resistências térmicas associada a cada componente do sistema.

A transferência de calor ao longo de uma dada superfície, representa a potência que este corpo recebe ou emite, dependendo da direção do fluxo. Com base nestas trocas entre os diferentes elementos, é possível criar um balanço energético entre a quantidade de energia que entra no sistema e a que saí. De uma

forma simples, a energia que entra terá de ser igual à soma da energia que sai e das perdas de energia.

Relativamente à mecânica dos fluidos, este sistema baseia-se num escoamento de fluidos ao longo de um tubo, posto isto é relevante compreender a dinâmica associada a este tipo de processo. Osborne Reynolds, começou a estudar o escoamento de fluidos em tubos, bem como as suas propriedades. Para identificar o tipo de escoamento, este propôs um parâmetro adimensional conhecido com número de Reynolds,

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad (2.35)$$

em que ρ é a massa volúmica, u a velocidade media do escoamento, D o diâmetro do tubo e por fim μ a viscosidade do fluido.

Através deste é possível determinar se o escoamento é laminar, transiente ou turbulento. Caso o número de Reynolds se encontre entre 2100 e 2300 o escoamento será considerado laminar, para valores superiores a 4000 poderá considerar-se como turbulento, entre estas duas gamas de valores será considerado transiente, podendo ser considerado laminar ou turbulento dependendo das suas propriedades. O perfil de velocidade de escoamento na entrada de um sistema é tipicamente conforme demonstrado na Figura 32. (Vilanova, 2011)

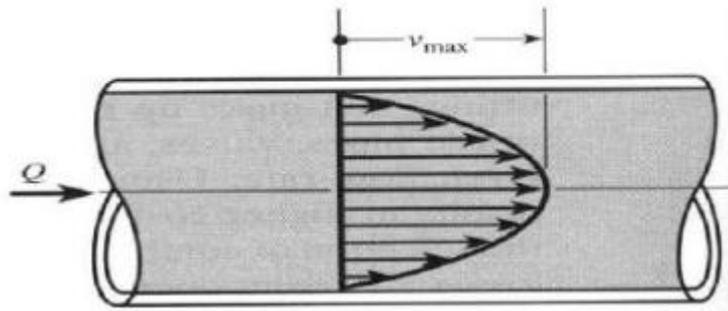


Figura 32- Perfil de velocidade de um escoamento. (Versuti, 2011)

À medida que a fluido avança na sua direção de escoamento, os efeitos da viscosidade são compreendidos através da aderência de uma camada deste à parede do tubo, criando assim tensões de cisalhamento entre as camadas adjacentes. A camada do escoamento que é influenciada por esse efeito é chamada de camada limite. A velocidade desta junto à parede do tubo é nula e cresce na direção do centro do tubo onde se encontra o seu máximo. O perfil de velocidade apresenta, num determinado comprimento do tubo, um comportamento variável que vai de um perfil uniforme na entrada até assumir um perfil parabólico. Neste ponto pode dizer-se que o escoamento está completamente desenvolvido. A região onde o perfil é variável é designada de região de entrada. O comportamento desta, x_{ent} , depende se o escoamento é laminar ou turbulento, esta é determinada pelas seguintes equações para escoamento laminar e turbulento, respetivamente: (L.M.Rodrigues, 2013; Vilanova, 2011)

$$\frac{x_{ent}}{D} = 0,05Re \quad (2.36)$$

$$10 \leq \frac{x_{ent}}{D} \leq 60 \quad (2.37)$$

Do ponto de vista térmico é necessário aplicar as formulações enunciadas no capítulo anterior, contudo para este tipo de sistemas para se determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção é necessário recorrer a outra variável adimensional, o número de Nusselt. A formulação deste depende do regime do escoamento. No caso de se estar perante um escoamento laminar, o número de Nusselt é constante ao longo de toda a região completamente desenvolvida, contudo o seu valor depende das condições térmicas da superfície, podendo variar entre um fluxo de calor uniforme ou para uma temperatura da superfície uniforme, assumindo então, respetivamente, as seguintes formulações,

- Fluxo de calor uniforme

$$Nu_D = \frac{h \cdot D}{k} = 4.36 \quad (2.38)$$

- Temperatura uniforme

$$Nu_D = \frac{h \cdot D}{k} = 3.66 \quad (2.39)$$

para um escoamento turbulento o número de Nusselt assume outro comportamento caso se esteja perante uma superfície suave e em condições completamente turbulentas (número de Reynolds superior a 10000), utiliza-se a equação de Dittus-Boelter como uma primeira aproximação:

$$Nu_D = 0.023 \cdot Re_D^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^n \quad (2.40)$$

A variável n pode assumir dois valores, 0.3 ou 0.4, dependendo da relação entre a temperatura da superfície e a temperatura de entrada do fluido, caso o fluido esteja a uma temperatura superior deve assumir-se o valor de 0.3, caso contrário utiliza-se 0.4. Nesta dissertação ter-se-á um escoamento laminar, considerando que teremos uma temperatura da superfície aproximadamente constante.

O número de Prandtl, Pr , é adimensional e representa a razão entre a difusividade de momento e a térmica de um fluido, expressando deste modo a relação entre a difusão de quantidade de movimento e a difusão de quantidade de calor dentro do próprio fluido, sendo assim uma medida de eficiência nas camadas limites hidrodinâmicas e térmicas. Este é definido como:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (2.41)$$

Estas formulações possíveis para o número de Nusselt são referentes a valores locais, ou seja, para uma dada região do tubo, contudo deve ser utilizado

um valor que represente todo o tubo de uma forma equilibrada, o número de Nusselt médio. Esta depende da seguinte correlação,

$$[Re_D \cdot \frac{Pr}{L}]^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \quad (2.42)$$

Caso esta seja superior a 2, o número de Nusselt médio pode se determinar por

$$\overline{Nu}_D = 1.86 \cdot \left(\frac{Re_D \cdot Pr}{L}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \quad (2.43)$$

Contudo caso a relação seja inferior a 2, pode afirmar-se que o número de Nusselt médio é igual ao valor local, ou seja, 3.66. Deste modo é possível determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção e, conseqüentemente, a resistência térmica criada pela transferência de calor por convecção no fluido. O número de Nusselt, estabelece a relação entre os princípios termodinâmicos e a mecânica dos fluidos.

Neste tipo de modelos é necessário verificar se o efeito da convecção natural no processo de transferência de calor por condução, principalmente quando esta ocorre no sentido ascendente. Pensando num sistema simplificado constituído por apenas duas placas, caso a superior esteja a uma temperatura mais baixa que a inferior, o processo de aquecimento acontecerá da inferior para superior. A densidade das células é afetada diretamente pela temperatura a que estas se encontram, em que com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição da densidade. Posto isto, para o sistema referido as células mais densas, com menor temperatura, encontram-se junto à placa superior, enquanto que as menos densas estão na zona oposta. Devido a esta diferença de densidades, e graças ao efeito da gravidade no sistema, as células com uma densidade menor começaram a deslocar-se para uma posição inferior enquanto que as que possuem uma densidade menor percorrem o trajeto inverso. A este fenómeno dá-se o nome de convecção Rayleigh-Bénard, neste as células possuem o movimento regular acima descrito, sendo estas designadas de células de Bénard. Contudo este efeito só acontecerá caso as forças da gravidade sejam dominantes relativamente à força de amortecimento da viscosidade. O balanço entre estas duas forças é dado através de um parâmetro adimensional, o número de Rayleigh. Este é definido como:

$$Ra = \frac{b \cdot d^3}{\kappa \cdot \nu} = \frac{g \alpha (T_{hot} - T_{cold}) \cdot d^3}{\kappa \cdot \nu} \quad (2.44)$$

em que, T_{hot} é a temperatura da superfície quente;

T_{cold} a temperatura da superfície fria;

d o diâmetro dos poros;

g a aceleração devido à gravidade;

α a difusividade térmica;

ν a viscosidade cinemática;

κ o coeficiente de expansão térmico.

Este é o critério que define o aparecimento destas células, caso o número de Rayleigh apresente valores superiores a 1708 o sistema encontra-se instável devido ao relevo da força da gravidade, surgindo assim as células de Bénard.

2.4. Simplificações tipicamente utilizadas

De modo a facilitar a análise deste tipo de sistemas, existem diversas simplificações que se podem adotar. Há várias características que se mantêm praticamente inalteradas ao longo dos anos apesar dos avanços tecnológicos que estes já sofreram. Como por exemplo melhorias na estratificação da água, ou seja, na subdivisão de diferentes camadas de água consoante a sua temperatura, sendo assim possível retirar o máximo proveito da água que se encontra a temperatura superior.

Uma das características que é praticamente idêntica em todos os sistemas AQS é a sua forma cilíndrica. Contudo, existem também outras formas possíveis como por exemplo um cilindro oval em que a base é formada por uma elipse e não por uma circunferência, ou até mesmo um cubo. Esta é uma grande vantagem para o tipo de análise realizado nesta dissertação visto que permite a simplificação do sistema a nível dimensional uma vez que qualquer destas geometrias é axissimétrica, isto é, apresenta simetria relativamente a um ou mais eixos, é assim possível reduzir a dimensão do problema em metade, ou em alguns casos um quarto. Do ponto de vista térmico, pode considerar-se também que a transferência de calor ocorrerá apenas na direção radial, bem como desprezar a existência das resistências de contacto.

Existem também outros tipos de simplificação nestes estudos, como por exemplo, considerar que os valores das propriedades físicas dos materiais são constantes ignorando assim a sua alteração face à variação de temperatura e pressão típicas de um regime transitório. Esta pode ser adotada caso não se obtenha dados suficientes, relativamente às propriedades do material a diferentes temperaturas, por parte do fornecedor ou caso não seja possível realizar ensaios experimentais que permitam calcular as mesmas.

2.5. Simulação computacional em mecânica dos fluidos com transferência de calor (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) é a ciência que permite prever o fluxo do fluido, a transferência de calor e de massa, reações químicas e outros fenómenos, relacionados com o escoamento de fluidos, ao resolver equações matemáticas que regem estes processos utilizando processos numéricos. Normalmente, esta metodologia é mais rápida e tem uma melhor relação custo-benefício do que testes experimentais e para problemas mais complexos acaba por ser mais confiável do que estudos analíticos.

2.5.1. Métodos Computacionais

As equações que governam a movimentação do fluido são assentes em três princípios fundamentais de massa, momento e conservação de energia,

$$\text{Continuidade: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2.45)$$

$$\text{Momento: } \rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} - \nabla p + \rho \cdot \mathbf{F} \quad (2.46)$$

$$\text{Energia: } \rho \frac{De}{Dt} + p(\nabla \cdot \mathbf{V}) = \frac{\partial Q}{\partial t} - \nabla \mathbf{q} + \Phi \quad (2.47)$$

onde ρ é a densidade do fluido, \mathbf{V} o vetor velocidade do fluido, $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ representa o tensor das tensões devido à viscosidade, p a pressão, \mathbf{F} as forças, e a energia interna, Q ao termo representativo da fonte térmica, t o tempo, Φ a dissipação e $\nabla \cdot \mathbf{q}$ é a perda de calor por condução. A lei de Fourier para a transferência de calor por condução pode ser utilizada para descrever \mathbf{q} como:

$$\mathbf{q} = -k \cdot \nabla T \quad (2.48)$$

sendo k o coeficiente de transferência térmica por condução e T a temperatura. Dependendo da natureza física que governa a movimentação do fluido um ou mais termos podem ser negligenciados. Por exemplo, se o fluido for incompressível e o coeficiente de viscosidade, μ , bem como, os coeficientes de transferência térmica por condução forem constantes, a continuidade, o momento e equações energéticas serão reduzidas às seguintes equações:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2.49)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \mu \cdot \nabla^2 \mathbf{V} - \nabla p + \rho \cdot \mathbf{F} \quad (2.50)$$

$$\rho \frac{De}{Dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + k \cdot \nabla^2 T + \Phi \quad (2.51)$$

a presença de cada termo e as suas combinações determinam apropriadamente o algoritmo que permite alcançar a solução bem como o procedimento numérico. (Ashgriz e Mostaghimi, 2002)

Existem três classificações de equações diferenciais parciais: elípticas, parabólicas e hiperbólicas. As equações associadas a cada classificação comportam-se de diferente forma, numérica e fisicamente. Particularmente, a direção em que são transmitidas as mudanças no sistema. Serão assim descritas cada classe recorrendo a simples exemplos:

- Elíptica:

A equação de Laplace é um exemplo deste tipo de equações elípticas,

$$\nabla^2 v = 0 \quad (2.52)$$

v representa a velocidade do fluido. Um fluxo incompressível e sem rotação de um fluido é representado por este tipo de equação.

- Parabólica:

A movimentação instável do fluido devido a uma aceleração causada por uma placa lisa num fluido incompressível exemplifica a equação parabólica:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nu \cdot \nabla^2 v \quad (2.53)$$

onde ν é a viscosidade cinemática. Neste tipo de equações, os acontecimentos propagam-se no futuro e é esperada uma convergência monótona para o regime estacionário.

- Hiperbólica:

As propriedades qualitativas das equações hiperbólicas podem ser explicadas pela seguinte equação conhecida como *wave equation*:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (2.54)$$

onde c é a velocidade da “onda”. Neste caso, os valores da solução dependem das condições iniciais. O sinal de propagação da velocidade é finito. Os limites contínuos e a definição de valores iniciais podem dar aso a descontinuidade. Dependendo do fluxo, as equações que regem a movimentação do fluido podem conter as três classificações. (Ashgriz e Mostaghimi, 2002)

Para resolver estas equações, deve ser gerado um método numérico análogo através de um processo denominado discretização. Neste processo, cada termo nas equações diferenciais, que descrevem o fluxo, é escrito de forma a que seja possível programar um computador para os calcular. Existem várias técnicas para a discretização numérica. Serão introduzidas as três técnicas mais comuns: método das diferenças finitas, método dos elementos finitos e método dos volumes finitos. Existe ainda um método espectral que é utilizado em CFD.

O método das diferenças finitas, utiliza a expansão da serie de Taylor para calcular as derivadas de uma variável através da diferença de valores, que esta assume em dados pontos do espaço ou tempo. A utilização desta série para discretizar a derivada de uma variável dependente, por exemplo, a velocidade v , relativamente a uma variável independente, coordenada X , é demonstrada na Figura 33. A curva nesta figura representa a variação da velocidade devido a x . Após a discretização, a curva $v(x)$ pode ser representada por um conjunto de pontos discretos, v_i 's. Estes pontos podem ser relacionados entre si usando a expansão da serie de Taylor. Considerando dois pontos, $(i+1)$ e $(i-1)$, uma pequena distância Δx a partir do ponto central, (i) . Portanto, a velocidade v_i pode ser

expressa em termos da expansão da série de Taylor, relativamente ao ponto (i) como:

$$v_{i+1} = v + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) \cdot \Delta x + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right) \cdot \frac{(\Delta x)^2}{2} + \left(\frac{\partial^3 v}{\partial x^3}\right)_i \cdot \frac{(\Delta x)^3}{6} + \dots \quad (2.55)$$

e

$$v_{i-1} = v - \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) \cdot \Delta x + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right) \cdot \frac{(\Delta x)^2}{2} - \left(\frac{\partial^3 v}{\partial x^3}\right)_i \cdot \frac{(\Delta x)^3}{6} + \dots \quad (2.56)$$

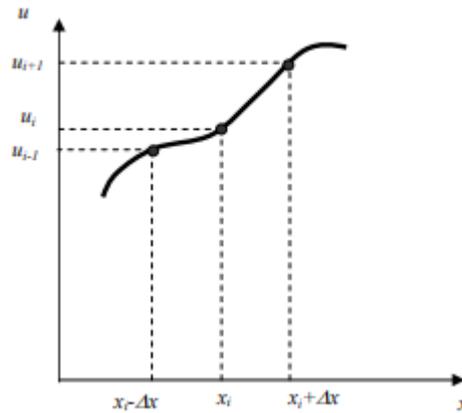


Figura 33- Localização de pontos para a série de Taylor. (Ashgriz e Mostaghimi, 2002)

Estas equações são exatas, matematicamente, se o número de termos for infinito e Δx muito pequeno. Ignorar estes termos, conduz a uma fonte de erros relativamente aos cálculos numéricos à medida que a equação das derivadas é truncada. Este erro é denominado de erro por truncatura e é definido por:

$$\sum_{n=3}^{\infty} \left(\frac{\partial^n v}{\partial x^n}\right)_i \cdot \frac{(\Delta x)^{n-1}}{n!} \quad (2.57)$$

Ao subtrair, ou adicionar, estas duas equações, podem ser encontradas duas equações, para a primeira e segunda derivadas, para a posição central. Estas derivadas são, respetivamente:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_i = \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2 \cdot \Delta x} - \left(\frac{\partial^3 v}{\partial x^3}\right)_i \cdot \frac{(\Delta x)^3}{6} \quad (2.58)$$

e

$$\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)_i = \frac{v_{i+1} - 2 \cdot v_i + v_{i-1}}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x)^2 \quad (2.59)$$

As derivadas podem também ser formadas ao considerar as equações 2.55 e 2.56 isoladamente. Ao se observar a equação 2.55, a derivada de primeira ordem pode ser enunciada por

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_i = \frac{v_{i+1}-v_i}{\Delta x} - \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)_i \cdot \frac{(\Delta x)}{2} \quad (2.60)$$

esta é denominada também por diferença *Forward*. De forma similar, da equação 2.56 pode ser formada outra derivada de primeira ordem,

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i = \frac{u_i-u_{i-1}}{\Delta x} - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_i \cdot \frac{(\Delta x)}{2} \quad (2.61)$$

denominado de diferença *Backward*. Conforme pode ser observado pelas expressões, as fórmulas podem ser classificadas de duas formas: pela relação geométrica entre os pontos, nomeadamente, *Central*, *Forward* e *Backward* ou pela precisão das expressões, por exemplo, a diferença central é de segunda ordem relativamente à precisão, enquanto que as outras diferenças são de primeira ordem, sendo os termos de ordem superior negligenciados. É possível obter aproximações de ordem superior ao aplicar a expansão da serie de Taylor para mais pontos. Por exemplo, um grupo de três pontos resultara uma aproximação de segundo grau para as diferenças *Forward* e *Backward*, ao invés de uma de primeiro grau:

Diferença *Forward*:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_i = \frac{1}{2 \cdot \Delta x} \cdot (-3v_i + 4v_{i+1} + v_{i+2}) + O(\Delta x)^2 \quad (2.62)$$

Diferença *Backward*:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_i = \frac{1}{2 \cdot \Delta x} \cdot (v_{i-2} - 4v_{i+1} + 3v_i) + O(\Delta x)^2 \quad (2.63)$$

ao aumentar o número de pontos, verificar-se-á um aumento de forma análoga à acima referida, por exemplo, no caso de ser um conjunto de 4 pontos as diferenças passarão para terceiro grau. Estas equações são utilizadas para criar uma analogia numérica das equações diferenciais parciais, que descrevem o fluxo. Para aplicar este método de discretização, em toda a zona onde existir fluxo, são considerados vários pontos nesse domínio para a simulação. Posteriormente, em cada um destes pontos as derivadas das variáveis do fluxo são escritas em forma diferencial, relacionando os valores de cada variável com cada ponto em seu redor. Quando este processo é aplicado todos os pontos do domínio, é obtido um conjunto de equações, sendo estas resolvidas numericamente. (Ashgriz e Mostaghimi, 2002)

Relativamente ao método dos elementos finitos, o domínio do fluido é dividido num número finito de subdomínios, conhecidos como elementos. É assumida uma função simples para a variação de cada variável em cada elemento. O somatório da variação da variável, em cada elemento, é utilizado para descrever

todo o fluxo do domínio. Considerando um elemento com dois nós, pontos terminais de cada elemento, como demonstrado na Figura 34, em que a variável v varia linearmente dentro do elemento. Para esta variação linear de v , a sua primeira derivada, em ordem a x , é uma constante, podendo assim ser definida uma derivada de segunda ordem. Visto que a maioria dos problemas nos fluidos incluem as segundas derivadas, esta técnica é projetada para solucionar este problema. Primeiramente, a equação diferencial parcial é multiplicada por uma função desconhecida, posteriormente toda a equação é integrada relativamente ao seu domínio. Por fim, os termos que necessitam de ter a ordem da sua derivada serão integrados parcialmente.

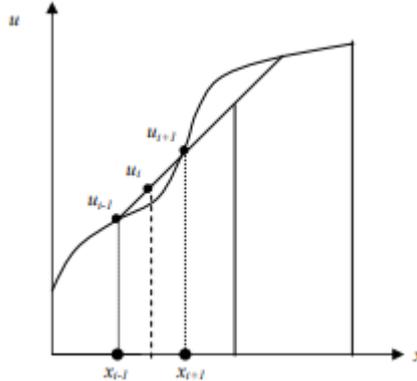


Figura 34- Elemento binodal linear. (Ashgriz e Mostaghimi, 2002)

Será dado como exemplo a aplicação deste método à equação de Laplace a uma dimensão:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = 0 \quad (2.64)$$

onde a velocidade v é função das coordenadas espaciais x . A equação 2.64 será multiplicada por alguma função W e integrada em ordem ao seu domínio denominado de Ω :

$$\int W \cdot \left[\frac{d^2 v}{dx^2} \right] d\Omega = 0 \quad (2.65)$$

a equação 2.64 pode ser integrada por partes, resultando em:

$$\int \left[- \frac{dW}{dx} \cdot \frac{dv}{dx} \right] d\Omega + \int \left[W \cdot \frac{dv}{dx} \cdot n_x \right] d\Gamma = 0 \quad (2.66)$$

com Γ a definir as fronteiras do domínio Ω e n_x é o vetor normal, para fora, à fronteira Γ . A derivada de segunda ordem na equação 2.65 é assim transformada e produtos de derivadas de primeira ordem. A equação 2.66 é assim utilizada para produzir a forma discreta da equação diferencial parcial para os elementos do domínio. Sendo assim, esta equação é denominada de forma variacional da equação diferencial 2.64. Contudo, esta técnica reduz a ordem as derivadas, introduzindo os termos correspondentes às fronteiras do domínio na equação 2.66, dividindo o domínio em vários elementos assumindo a função da variação da variável v em cada elemento.

Caso seja assumido que cada elemento possui dois nós, a variação de v em cada elemento é dada por

$$v_i = v_{i-1} + (v_{i+1} - v_{i-1}) \cdot \left[\frac{x_i - x_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \right] \quad (2.67)$$

ou

$$v_i = v_{i-1} \cdot \left[\frac{x_{i+1} - x_i}{x_{i+1} - x_{i-1}} \right] + v_{i+1} \cdot \left[\frac{x_i - x_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \right] \quad (2.68)$$

os termos dentro dos parêntesis são conhecidos por funções de forma, N_i . Os valores nodais v_{i-1} e v_{i+1} da variável u denominados por v_i . Posto isto, a variável v pode ser definida por

$$v_i = N_{i-1} \cdot v_{i-1} + N_{i+1} \cdot v_{i+1} \quad (2.69)$$

Portanto, a função de forma correspondente aos dois nós do elemento, definido pela equação 2.67, são

$$N_{i-1} = \frac{x_{i+1} - x_i}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (2.70)$$

e

$$N_{i+1} = \frac{x_i - x_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (2.71)$$

É assim possível determinar as derivadas da variável u :

$$\frac{dv}{dx} = \sum_{i=1}^m \frac{dN_i}{dx} \cdot v_i \quad (2.72)$$

onde m é o número de nós do elemento. Para se resolver a equação (2.66) será necessário descrever a função W . Existem vários métodos para alcançar este objetivo. Contudo, o mais comum é o método de Galerkin em que a variável W toma o valor dos fatores de forma de cada elemento. Este pode ter várias equações dependendo do número de nós que este possuir. (Ashgriz e Mostaghimi, 2002; Habault, 1999)

A formulação acima referida é baseada na variação linear das variáveis em cada elemento. Se forem utilizadas variações de ordem superior, quadráticas ou cúbicas por exemplo, irão aparecer segundas derivadas e serão necessários mais pontos para descrever estes elementos.

O método mais popular em CFD é o método dos volumes finitos. A principal razão para tal deve-se a este conseguir resolver alguns problemas que os outros dois métodos apresentam. Geralmente, este método representa um caso especial em que a função W é igual a 1 em todo o domínio. A Figura 35 demonstra a configuração típica de um volume finito, nesta o centroide do volume, ponto P, é o ponto de referência ao qual se pretende discretizar a equação diferencial parcial. Os volumes vizinhos são denominados por W, volume do lado oeste, e E, volume

do lado este do volume P. Para um caso unidimensional, como o ilustrado nesta figura, o volume com centroide P terá duas faces limitadoras em w e e.

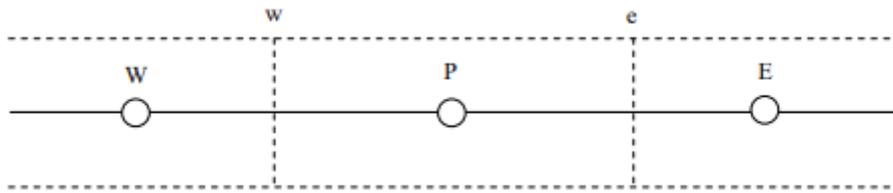


Figura 35- Volume finito em uma dimensão. (Ashgriz e Mostaghimi, 2002)

A segunda derivada da variável pode ser escrita como a diferença entre as primeiras derivadas da variável em avaliação:

$$\left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right]_p = \frac{[(\frac{\partial v}{\partial x})_e - (\frac{\partial v}{\partial x})_w]}{x_e - x_w} \quad (2.73)$$

a primeira derivada do volume pode ser definida como a diferença entre os valores da variável com os dos centroides da sua vizinhança:

$$\left[\frac{\partial v}{\partial x} \right]_e = \frac{v_E - v_P}{x_E - x_P} \quad (2.74)$$

$$\left[\frac{\partial v}{\partial x} \right]_w = \frac{v_P - v_W}{x_P - x_W} \quad (2.75)$$

Pode-se aplicar esta técnica à equação 2.64 para obter a sua formulação para o volume finito. O método acima referido é também conhecido por método da célula centralizada (CC), onde os fluxos das variáveis estão alojados no centro da célula computacional. Neste método o agrupamento das variáveis conduz a uma implementação mais simplificada. Por outro lado, este agrupamento é mais suscetível a erros de truncatura. Tradicionalmente este método utiliza malhas regulares de modo a promover uma maior eficiência computacional. Contudo, recentemente tem-se utilizado grelhas irregulares em simulações com geometrias complexas. (Ashgriz e Mostaghimi, 2002; Suhas, 1980)

Por fim, outro método para gerar uma formulação numérica passa por usar as series de Fourier ou os polinómios de Chebyshev para aproximar as funções desconhecidas. Esta técnica é designada de método espectral. A serie de Fourier ou as séries polinomiais de Chebyshev, são válidas ao longo de todo o domínio computacional. Esta é a principal diferença deste método e os métodos das diferenças finitas e o dos elementos finitos, em que as aproximações são locais. Ao substituir a parte desconhecida por estas series, são utilizadas certas limitações são utilizadas para gerar equações algébricas para os coeficientes de Fourier ou de Chebyshev. (Németh, 1965)

2.5.2. Definição e discretização do domínio de cálculo

O domínio de cálculo, ou seja, a zona onde se aplicará a malha, será a base para os cálculos efetuados. Posto isto, a sua definição e qualidade serão preponderantes para uma melhor qualidade dos resultados.

Tendo em conta o tipo de simulação que será realizado, deve-se procurar simplificar ao máximo a dimensão do sistema, de modo a ser possível obter os melhores resultados possíveis sem despende de uma quantidade excessiva de tempo.

Em sistemas de AQS, tal como já foi referido anteriormente, é possível simplificar a geometria do sistema visto que os reservatórios são axissimétricos, sendo assim possível reduzir o sistema a metade da sua geometria total, relativamente ao seu eixo de simetria. Para além desta simplificação é ainda possível reduzir a dimensão do sistema, isto é, converter o sistema de tridimensional para bidimensional, desprezando assim uma das grandezas.

No caso de se tratar de um cilindro, ou conjunto de cilindros concêntricos, o sistema pode ser reduzido a um agrupamento de retângulos, caso se mantenha o comprimento do cilindro, ou em contrapartida num conjunto de círculos caso esta variável seja ignorada. A seleção da vista que se pretende, varia com a geometria e aplicação do sistema bem como com o objetivo global do estudo.

2.5.3. Aplicações comercial Ansys/Fluent

Devido à grande quantidade de cálculos a serem executados para solucionar o problema em questão, existem duas abordagens para a utilização do software. Este pode ser criado pelo próprio utilizador, sendo assim destinado a resolver o problema em questão, ou este pode ser de uso comercial podendo assim ser utilizado para a resolução de diversos problemas. Será assim utilizado um software comercial.

O software escolhido foi o ANSYS, este já demonstrou diversas vezes ser o melhor software para este tipo de simulações, para além disso encontrava-se disponível para utilizar no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

A utilização de CFD pode ser bastante pesada computacionalmente, tal como se sucede para este caso. A duração da simulação pode demorar vários dias, semanas ou meses no caso de o computador não possuir potência necessária. Para esta tese, foi disponibilizado o acesso a uma Workstation do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro visto que o computador disponível não conseguia desempenhar corretamente as funções.

Tal como a maioria das simulações computacionais, o CFD pode ser dividido em três processos: pré-processamento, cálculo, pós-processamento.

- Pré-processamento
 - Definir o domínio de interesse (Geração do CAD)
 - Discretização do domínio num número finito de elementos mais pequenos (Criação da mesh)
 - Definição de condições de fronteira
 - Atribuição das propriedades dos materiais
 - Seleção dos modelos físicos a usar
 - Definição métodos das soluções
- Solução
- Pós-processamento
 - Análise e visualização dos resultados ao utilizar diversos métodos para extrair informações valiosa

Uma simulação CFD gera dados que descrevem o escoamento de um fluido. A análise e compreensão destes é essencial para resolver o problema original.

Este tipo de software pode ser utilizado para diversas aplicações. Uma das aplicações mais frequentes é a que está a ser utilizada nesta dissertação, a fluidodinâmica, permitindo simular o comportamento do escoamento de fluidos nas mais diversas aplicações.

Outras áreas exploradas por este software são: análise estrutural, eletromagnetismo, 3-D design, Mecânica e Multifísica (combinação de diversas aplicações como por exemplo simulações mecânicas, térmicas, eletromagnéticas e de escoamento de fluidos).

2.6. Síntese

Neste capítulo foi possível observar as diferenças dos diferentes tipos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) no que diz respeito à sua formulação e funcionamento. Associada a cada um destes processos está a resistência térmica do material, esta representa, de uma forma simplificada, a permeabilidade deste relativamente à transferência de calor. Posto isto, é necessário selecionar materiais que sejam propícios a este tipo de processos. Visto que o processo de transferência de calor dominante é a condução, é essencial que o material apresente um valor, razoavelmente elevado de condutividade térmica.

Para se analisar este tipo de sistemas é necessário realizar uma pesquisa relativamente a soluções analíticas possíveis. Uma vez que se trata, resumidamente, do escoamento de um fluido através de um tubo, foi indispensável adquirir conhecimentos acerca das propriedades de um escoamento, como por exemplo, velocidade de escoamento, número de Reynolds, Nusselt e Rayleigh, que alteram o comportamento do sistema. Para uma análise analítica é ainda necessário realizar balanços energéticos, relativos às transferências de calor entre os diversos componentes do sistema. Foram ainda analisadas possíveis simplificações do sistema tendo por base a simetria, dimensão e estrutura.

Uma vez que a análise deste problema será efetuada recorrendo a processos de simulação computacional, teve de se conhecer as metodologias

existentes e frequentemente utilizadas, para solucionar as equações do sistema, por este tipo de softwares. São utilizados usualmente três metodologias distintas, uma baseada nas diferenças entre diferentes pontos no espaço (método das diferenças finitas), a segunda começa por dividir o domínio num número finito de elementos para, posteriormente, analisar a variação de cada variável em cada um destes (método dos elementos finitos), por fim ainda se pode utilizar um outro que compara valores dos centroides da célula pretendida com o das células vizinhas (métodos dos volumes finitos). Para se aplicar qualquer um destes métodos acima referidos é necessário de definir o domínio de cálculo em que estes serão aplicados.

Por fim, fez-se uma breve revisão acerca do software utilizado para a modelação e análise do problema, definindo aqueles que são os parâmetros de entrada e saída deste tipo de problemas utilizando exemplos de aplicação.

Capítulo 3- Caso de estudo / aplicação a um modelo de referência

3.1. Sumário

Neste capítulo começar-se-á a abordar o caso de estudo ao descrever a sua forma e funcionamento. Para tal, é necessário identificar todas as variáveis do sistema, bem como os parâmetros que serão alvo de foco para uma análise mais detalhada, quer estes sejam *inputs* ou *outputs* do sistema.

Após se conhecer todas as variáveis do problema, é possível passar à sua modelação recorrendo a um software de análise computacional. Será feita uma descrição do trabalho executado nesta ferramenta, bem como o seu funcionamento.

Numa fase final do capítulo, serão analisados e discutidos os resultados obtidos do software, de modo a conseguir alcançar os objetivos propostos inicialmente, bem como retirar conclusões acerca do trabalho realizado.

3.2. Formulação do problema

O fornecimento de água quente é indispensável para diferentes aplicações essenciais ao dia-a-dia de cada pessoa, como por exemplo a higienização e a confeção de alimentos. A sua produção e distribuição pode ser feita através do sistema ilustrado na Figura 36.

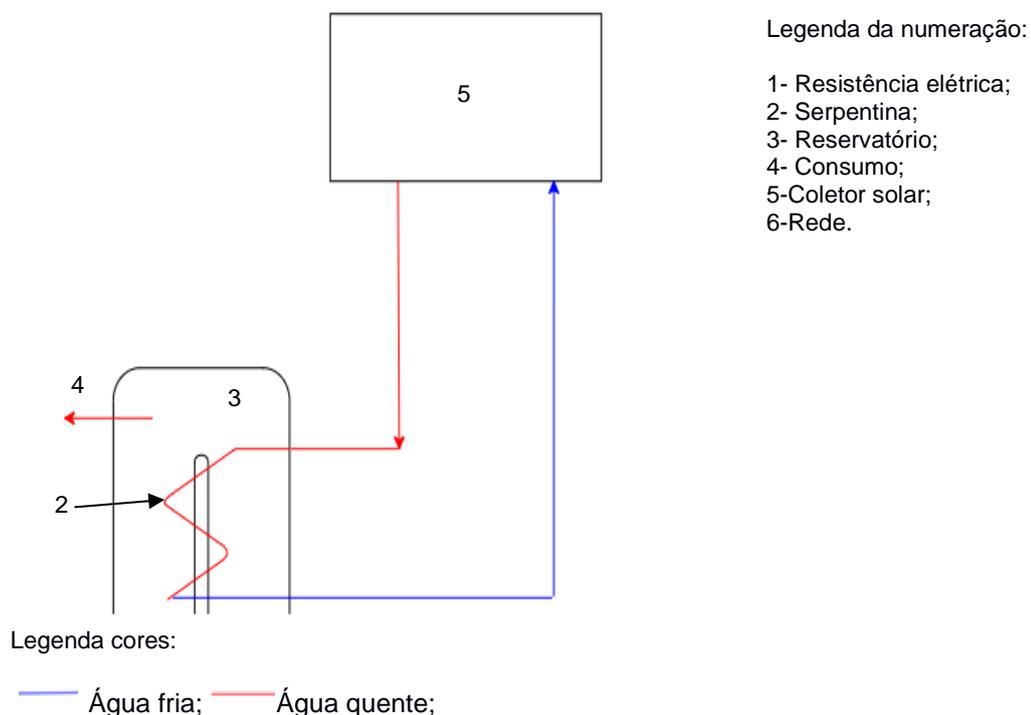


Figura 36- Ilustração sistema AQS.

O funcionamento deste sistema consiste na distribuição da água aquecida no coletor solar ao reservatório com o intuito de aquecer o seu volume proveniente da rede. Posto isto, esta irá arrefecer sendo reabastecida ao coletor solar. O volume de água do reservatório aquecido poderá então ser distribuído para consumo.

Uma das problemáticas deste sistema consiste na sua dependência da eficácia do coletor solar, no sentido em que para se aquecer a água do reservatório é necessário que o coletor solar consiga fornecer água a uma temperatura suficientemente elevada. Como a radiação solar não é uma fonte de energia controlável, optou-se por utilizar um sistema complementar, recorrendo a materiais de mudança de fase, que permita aproveitar a água proveniente do coletor solar a uma temperatura inferior à aceitável para que esta seja fornecida ao reservatório. Todo o funcionamento deste sistema será controlado por válvulas de 3 vias com sensores de temperatura. O esquema completo do modelo a analisar encontra-se ilustrado na Figura 37.

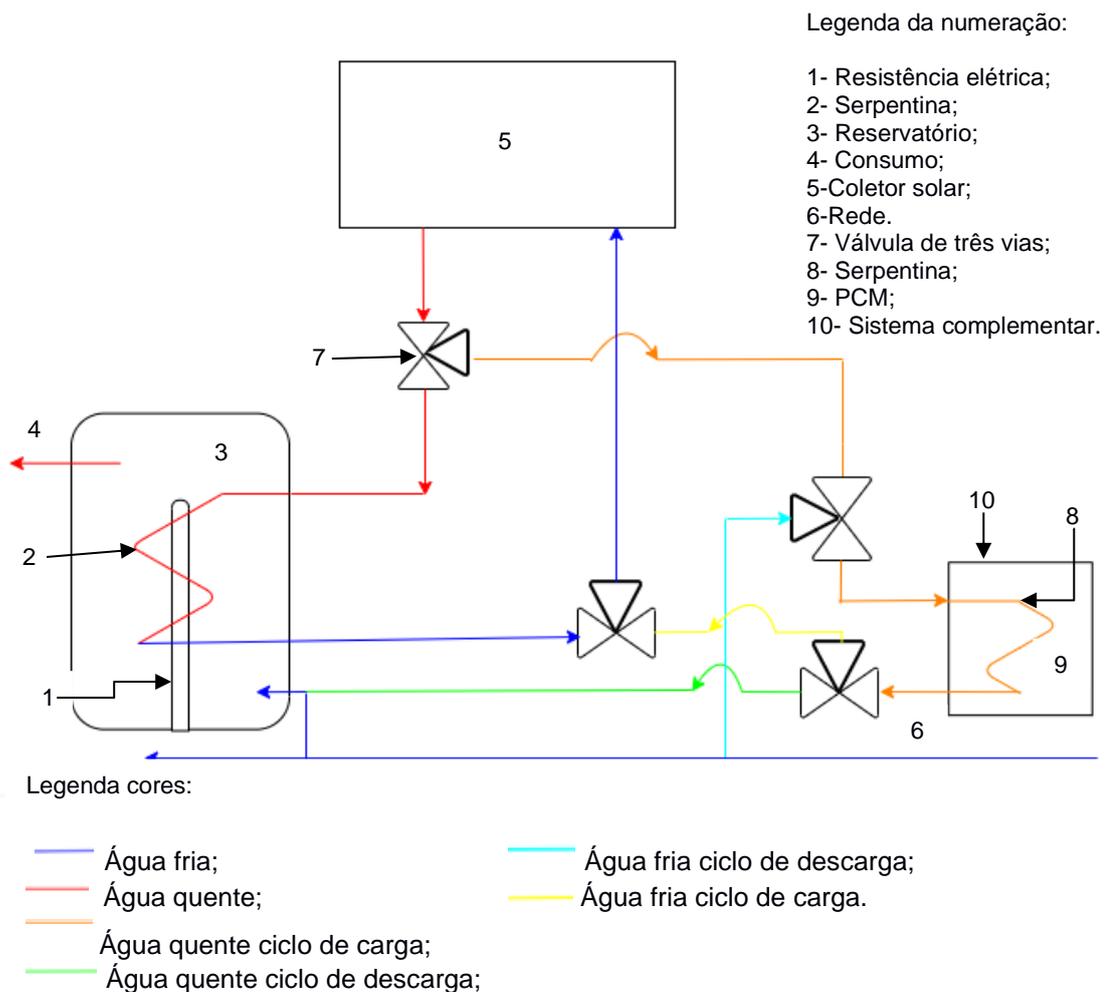


Figura 37-Illustração do sistema AQS a analisar completo.

O sistema a analisar nesta tese de mestrado, projetado e facultado pela Bosch (Figura 38 e 39), consiste de forma sucinta no escoamento de água ao longo de uma serpentina de cobre que se encontra embebida numa mistura de parafina e malha metálica. Este componente será responsável pelo aquecimento da água, que inicialmente será proveniente da rede, ao libertar a energia nele armazenado previamente. O sistema encontra-se selado, na direção radial, por um cilindro de maior dimensão e nos topos por tampas. Este modelo terá como principal função substituir, a partir de determinado momento, a fonte de água fria que de um sistema de AQS, com o intuito de aumentar a quantidade de água a 40°C que este consegue distribuir.

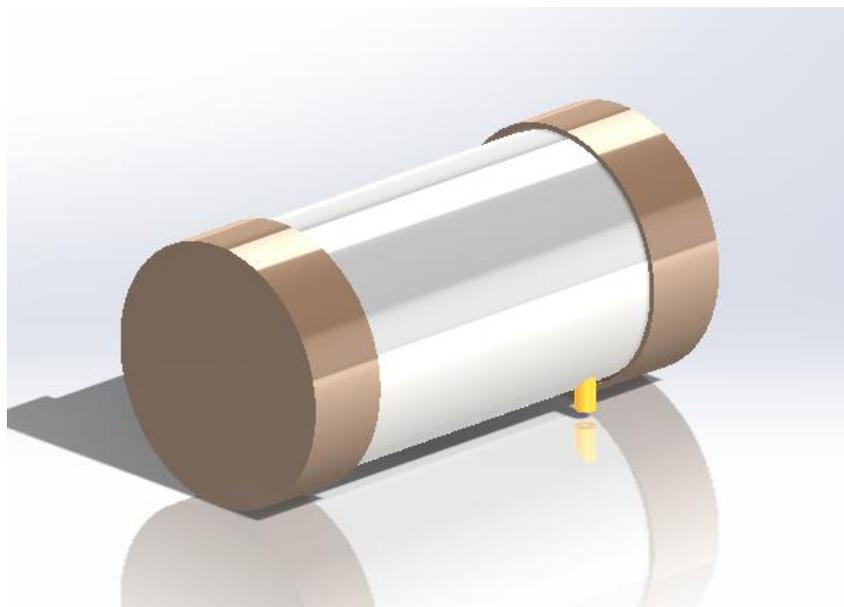


Figura 38- Protótipo Bosch completo.

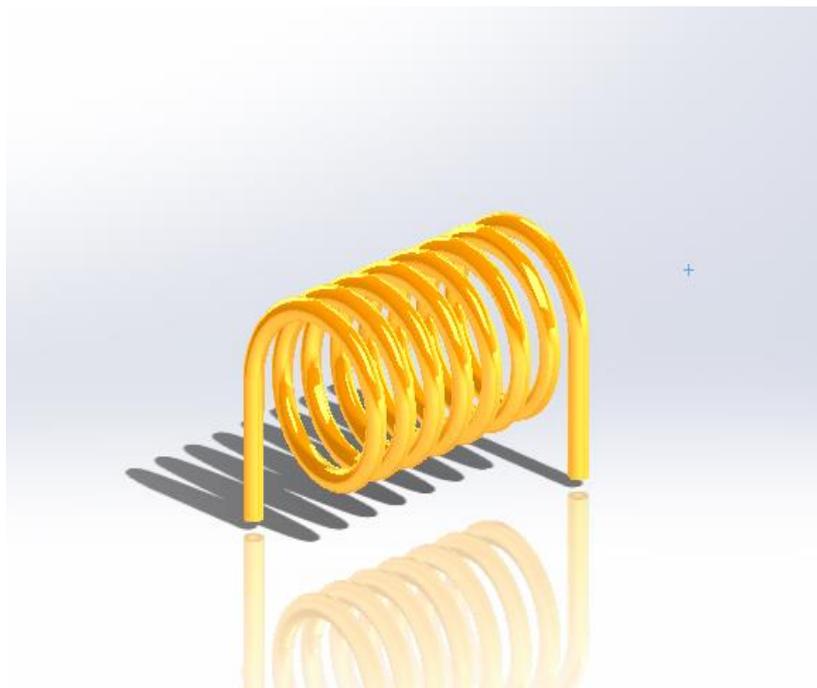


Figura 39- Protótipo Bosch serpentina.

Considerando um ciclo completo de utilização, carga e descarga, a água será inicialmente fornecida por uma fonte de água quente, acoplada ao sistema, visto que o PCM se encontrará abaixo da sua temperatura de fusão, portanto na fase sólida, nesta etapa pretende-se carregar a mistura de PCM e malha metálica. Após o sistema alcançar o ponto desejado para inverter o processo em execução, a fase de carga do PCM termina, passando assim à descarga do mesmo. A serpentina receberá água proveniente da rede com o intuito de aquecer para que esta seja fornecida ao reservatório de água quente. Ambos os processos, carga e descarga, são sustentados, principalmente, pela transferência de calor por condução da mistura para a serpentina e desta para a água. Estas mudanças de fornecimento de água são ativadas através de sensores e reguladas por válvulas de três vias.

Apesar da descrição do funcionamento deste sistema se revelar bastante simples, este pode tornar-se bastante complexo computacionalmente devido à sua geometria, dimensão e coexistência de materiais com diferentes estados físicos, como é o caso da mistura de PCM e malha metálica em que se pode ter os dois materiais no estado sólido (Parafina solidificada) ou um material sólido e um líquido (Parafina fundida).

Decidiu-se aplicar então algumas das simplificações acima referidas, no capítulo 2.3, para este tipo de sistemas procurando simplificar a sua análise computacional.

Como é visível, a geometria apresenta a peculiaridade do tubo, onde passa a água, ser em forma de serpentina, o que representa um grande esforço computacional devido à estrutura complexa. Posto isto, simplificou-se o sistema ao alongar-se a serpentina de modo a deixá-la completamente esticada. Definiu-se uma zona de influência em redor deste tubo com raio igual ao espaçamento entre

cada “loop” da serpentina, de modo a se reduzir as dimensões do sistema. A parte exterior desta zona terá as mesmas propriedades isoladoras que o cilindro exterior do protótipo inicial.

A dimensão do problema foi reduzida para 2D, dando prioridade à vista lateral dos cilindros podendo assim, observar o avanço mudança de fase longitudinalmente. Para além desta medida optou-se ainda por modelar apenas metade do sistema segundo o eixo dos XX dada a sua simetria.

Relativamente à zona onde se encontra o PCM juntamente com a malha metálica, serão necessárias várias simplificações envolvendo as suas propriedades. A modelação desta zona implicaria um grande esforço computacional que pode ser poupado ao tratar-se esta junção como uma mistura, em que cada elemento possui o seu peso. Para tal, será necessário recorrer a expressões analíticas que permitam determinar estes valores.

As propriedades sujeitas a este tipo de análise são: densidade, condutividade térmica, calor específico a pressão constante, viscosidade e a quantidade de calor latente na mistura.

A densidade da mistura consegue ser calculada através da seguinte equação:

$$\rho_m = \frac{100}{\left(\frac{C_w}{\rho_s}\right) + \left[\frac{100-C_w}{\rho_L}\right]} \quad (3.1)$$

onde ρ_m = densidade da mistura,
 ρ_s = densidade do sólido,
 ρ_L = densidade do líquido,
 C_w = concentração mássica do sólido.

O termo C_v representa o mesmo valor, mas em relação ao volume. Portanto C_w pode ter um valor de 50 %, enquanto que o C_v é de apenas 15%. O termo fração volúmica, representado por Φ , é igual a $C_v/100$. A razão volúmica representa a relação entre os volumes de sólidos e líquido. Posto isto, as seguintes equações para o cálculo da fração volúmica e razão volúmica são:

$$\text{Fração Volúmica: } \Phi = \frac{C_v}{100} \quad (3.2)$$

$$\text{Razão Volúmica: } \frac{\Phi}{1-\Phi} \quad (3.3)$$

A concentração volúmica C_v e a concentração mássica podem ser relacionadas através da razão entre a densidade do sólido e da mistura pela seguinte equação:

$$C_v = C_w \cdot \frac{\rho_m}{\rho_s} \quad (3.4)$$

A viscosidade de uma mistura diluída pode ser calculada através de uma aproximação envolvendo a fração volúmica Φ e a viscosidade do líquido através de:

$$\mu_m = \mu_L \cdot (1 + 2.5\Phi) \quad (3.5)$$

com μ_m = viscosidade da mistura,
 μ_L = viscosidade do líquido,

A equação acima enunciada é válida apenas para um escoamento laminar e no caso do sólido estar representado por partículas sólidas. Para além disso a equação 3.5 não se aplica caso a concentração volúmica exceda 1 %. Para valores de concentrações superiores a viscosidade da mistura pode ser calculada usando uma versão modificada por D. G. Thomas da equação 3.5.

$$\mu_m = \mu_L \cdot [1 + 2.5\Phi + 10.05\Phi^2 + 0.00273 \exp(2.5\Phi)] \quad (3.6)$$

O valor de calor específico da mistura pode ser calculado ao realizar o somatório do produto das concentrações mássicas de cada elemento pelo seu respetivo calor específico, tal como é demonstrado na seguinte equação:

$$C_{p,m} = \left(\frac{m_1}{m_m}\right) \cdot C_{p,1} + \left(\frac{m_2}{m_m}\right) \cdot C_{p,2} \quad (3.7)$$

No que diz respeito à condutividade térmica, optou-se por utilizar a formulação proposta por Calmidi, Mahajan e Bhattacharya, para tal, optou-se por assumir que a malha metálica utilizada nesta dissertação possui as mesmas características estruturais que a utilizada neste estudo, para que a sua aplicação seja validada. A sua formulação é dada por

$$k_m = A \cdot (\beta \cdot k_f + (1 - \beta) \cdot k_s) + \frac{1-A}{\left(\frac{\beta}{k_f} + \frac{1-\beta}{k_s}\right)} \quad (3.8)$$

, com A a ser uma constante de correlação para a condutividade térmica, igual a 0,35.

A formulação adotada para a determinação de energia latente disponível, na mistura baseia-se na proporção de PCM que esta contem, através da seguinte formula:

$$Q_{Latente,m} = \beta \cdot \frac{\rho_L}{\rho_m} \cdot Q_{Latente,PCM} \quad (3.9)$$

Ao longo da definição deste problema, surgiram várias variáveis decisivas para o funcionamento do sistema. A porosidade da malha metálica é um parâmetro que está diretamente relacionada com as propriedades acima referidas da mistura, ou seja, a sua variação irá alterar os valores das propriedades. Com esta dar-se-á também uma mudança nos resultados.

A velocidade de entrada da água é outra variável de interesse, visto que a sua alteração pode alterar o escoamento de laminar para turbulento, o que afetará os valores do número de Nusselt, que por sua vez alterará os valores da resistência

térmica por convecção. Quanto maior for a velocidade mais turbulento será o escoamento, ou seja, haverá menos resistência por parte da camada limite em relação à transferência de calor. Acabando assim por acelerar o processo de solidificação e fusão, contudo este aumento da velocidade diminui também o valor da temperatura de saída da água.

Por fim, outro parâmetro de análise relevante neste problema é a quantidade de água que o sistema AQS é capaz de fornecer a uma temperatura igual ou superior a 40 °C. Esta variável, designada V_{40} , assume a seguinte formulação:

$$V_{40} = V_{40exp} \cdot \frac{\theta_p - 10}{30} \quad (3.10)$$

onde, V_{40exp} é a quantidade de água a 40 °C que se expectável;

θ_p é o valor normalizado da temperatura média à saída do sistema AQS.

o valor de θ_p é determinado através da seguinte equação:

$$\theta_p = (T_{set} - 10) \cdot \frac{\theta'_p - \theta_c}{T_{set} - \theta_c} + 10 \quad (3.11)$$

em que, T_{set} é a temperatura da água no cimo do reservatório;

θ_c a temperatura média da água à entrada;

θ'_p a temperatura média da água à saída do reservatório.

3.3. Definição de variáveis

Nesta secção pretende-se abordar cada componente do sistema de modo a poder descrevê-los do ponto de vista geométrico, apenas será considerado o raio visto que todos os componentes possuem o mesmo comprimento, 2300 mm, físico (as suas propriedades físicas e térmicas) e caso seja relevante a sua temperatura de operação. Para facilitar este processo, os componentes serão analisados do exterior para o interior.

3.3.1. Parede exterior

Começando então pela parede exterior, esta apresenta meramente funções de retenção do seu interior, bem como do calor proveniente do PCM, fazendo assim com que este seja todo transportado em direcção ao interior. Este componente apresenta um raio de 25 mm. Visto que este tubo não possui nenhuma função direta no sistema foi considerado irrelevante uma análise de parâmetros físicos bem como as temperaturas de operação.

3.3.2. PCM e malha metálica

De seguida encontra-se a zona anelar que contem a mistura de PCM e malha metálica. Geometricamente falando esta coroa cilíndrica está compreendida entre o tubo exterior e o tubo da serpentina, apresenta, tal como todos os elementos do

sistema, um comprimento de 2300 mm, o raio externo igual ao raio do tubo exterior e raio interior de 6 mm. No que diz respeito às propriedades físicas, estas serão calculadas com base nas formulações acima referidas.

O PCM utilizado nesta tese de mestrado é a parafina RT28HC. A seleção deste material deveu-se à colaboração com outra dissertação que consistia na análise experimental do mesmo protótipo, sendo assim possível comparar e validar os resultados obtidos nesta dissertação. A seleção desta parafina teve como critérios de seleção a sua temperatura de fusão, o facto de esta ser relativamente inferior à temperatura inicial considerada para o sistema, quando este já se encontra pronto para o processo de descarga, permite aproveitar a parte sensível da transferência de calor da mistura. De notar que esta linha de PCM da RUBITHERM apresenta características como: elevada capacidade de armazenamento de energia, a libertação desta energia é feita a temperaturas relativamente constante, inexistência de subarrefecimento e um longo tempo de vida. A ficha técnica, proveniente do fornecedor, encontra-se no Anexo A1. Esta identifica todas as propriedades relevantes do PCM para a sua modelação.

A malha metálica utilizada foi uma palha de aço inoxidável as propriedades desta foram retiradas da base de dados do ANSYS FLUENT, estas encontram-se representadas na Tabela 8.

Tabela 8- Propriedades do aço da base de dados do ANSYS.

Densidade [m ³ /kg]	Calor específico [J/kg·K]	Condutividade térmica [W/m·K]
8030	502,48	16,27

Para além destas propriedades, existe ainda outra bastante relevante para este caso de estudo. A porosidade da malha metálica representa a quantidade de líquido presente nos poros de um material sólido.

Tal como se referiu anteriormente, a junção destes dois materiais será considerada uma mistura, aplicando as formulações previamente referidas para o cálculo das suas propriedades. A variação do valor da porosidade afetará as propriedades da mistura como é visível na Tabela 9.

Tabela 9- Variação das propriedades da mistura em função da porosidade.

Porosidade	Densidade [m ³ /kg]	Calor específico [J/kg·K]	Condutividade Térmica [W/m·K]	Viscosidade [kg/m·s]	Entalpia Latente [kJ/kg]
0,25	6222,50	550,61	4,79	1,98	8,10
0,35	5499,50	578,74	4,09	0,39	12,83
0,45	4776,50	615,35	3,45	0,09	18,99
0,55	4053,50	665,03	2,84	0,03	27,35
0,65	3330,50	736,29	2,24	0,01	39,35
0,75	2607,50	847,07	1,65	0,01	57,90
1,00	800,00	2000,00	0,20	0,0024	252,00

3.3.3. Tubo interior

O tubo interior possui um raio exterior de 6mm e interior de 3mm. O material utilizado nesta zona foi o cobre, de forma similar à malha metálica as propriedades utilizadas para este material foram as da base de dados do ANSYS FLUENT. De notar que o cobre possui um valor de condutividade térmica muito alto, 380 W/m·K, relativamente ao PCM e à água, sendo um elemento essencial para as permutas de calor entre estas duas zonas.

3.3.4. Fluido operante

Por fim, o último componente deste sistema é o seu fluido operante, a água. Esta zona possui uma variável única, relativamente aos elementos acima referidos, a velocidade de entrada do fluido. Inicialmente, definiu-se esta como 3.53 m/s.

Relativamente às temperaturas de operação do sistema, estas variam consoante a temperatura da água. Considerando que a mistura se encontra a uma temperatura inicial de 10 °C, ou seja, o PCM encontra-se totalmente no estado sólido (descarregado), a água será fornecida ao sistema pelo painel solar a uma temperatura de aproximadamente 40 °C, deste modo o PCM irá fundir (carregar) armazenando assim energia. Na fase seguinte proceder-se-á a descarga desta mesma energia, para tal é necessário arrefecer a mistura até à sua temperatura de fusão para que esta liberte todo o calor latente armazenado para que este processo seja possível é fornecida água ao sistema, proveniente da rede, a uma temperatura de 10°C. Durante estes processos, carga e descarga, a temperatura da água é mantida constante até que os mesmos se finalizem, relativamente à temperatura da mistura de PCM e palha de aço esta irá variando consoante a temperatura da água.

3.4. Modelação do sistema

A modelação deste sistema teve como linha orientadora o procedimento indicado anteriormente no capítulo 2.4.3, em que primeiramente serão indicadas as etapas de pré-processamento, depois as metodologias de solução e por fim as técnicas de pós-processamento.

3.4.1. Geometria

O primeiro passo para a modelação do sistema passa pela sua representação geométrica, tal como descrita na secção anterior, no DesignModeler (aplicação do ANSYS). A geometria deve ser o mais simples possível e captar apenas as características principais do sistema.

Uma vez que a geometria desenvolvida tem um comprimento muito grande, optou-se por demonstrar, sempre que possível, apenas uma pequena parte da geometria. Neste caso, não há qualquer vantagem em se demonstrar todo o

modelo, visto que este é igual ao longo de todo o seu comprimento. Na Figura 40 encontra-se demonstrada a zona inicial da geometria modelada.

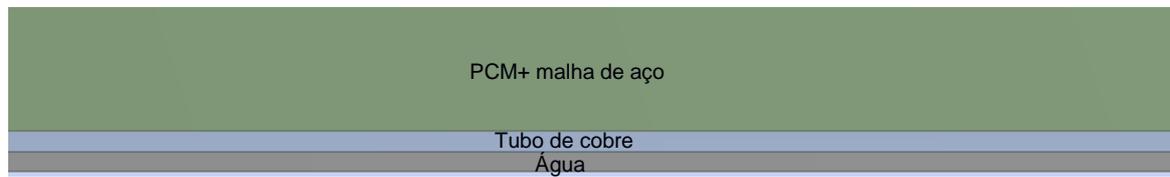


Figura 40- Geometria modelada.

3.4.2. Criação da malha

Tal como já se referiu anteriormente, é necessário dividir o domínio num número finito de células ou elementos, este processo é designado de *meshing*. A *mesh* tem um grande impacto na qualidade, precisão e tempo da solução inclusive se esta converge ou não.

3.4.2.1. Detalhes da malha

O modelo CAD é bastante simples, 1 *part* e 3 *bodies* (PCM e malha, tubo de cobre e água). Dada a planificação deste problema, bem como as simplificações tomadas, a criação da *mesh* simplifica-se, principalmente devido à conversão de 3D para 2D, fazendo assim com que os elementos sejam quadriláteros ou triangulares. Visto que o sistema é representado como um conjunto de três retângulos sobrepostos, os elementos serão quadriláteros visto que se consegue uma adaptação ideal de cada elemento sem haver necessidade de criar irregularidades em qualquer umas das zonas.

3.4.2.2. Parâmetros de malha

Com o intuito de controlar o crescimento da malha em regiões de grande curvatura ou proximidade entre superfícies, tem de se seleccionar uma *size function*. Existem cinco tipos de *Size Function*:

- *Adaptive*: Os elementos são organizados através do tamanho global dos elementos, os contornos são refinados em regiões com curvatura;
- *Curvature*: O tamanho dos contornos e das faces são determinados pela curvatura do angulo normal. Superfícies com elevada curvatura geram uma mesh mais refinada;
- *Proximity*: Controla o tamanho da *mesh* em regiões onde duas superfícies estejam próximas uma da outra;
- *Proximity e Curvature*: Combinação de Proximity e Curvature;

- *Uniform*: É definido um valor máximo e mínimo para o elemento e não são adicionados quaisquer refinamentos automáticos.

Entre estas funções a assumida por predefinição é a *Curvature*. Contudo *Uniform* é escolhido devido à simplicidade do sistema.

3.4.2.3. Teste de independência da malha

Este teste é realizado com o intuito de validar a *mesh* utilizada. Para tal, altera-se alguns parâmetros desta e verifica-se o efeito desta medida nos resultados. Para esta dissertação os resultados em análise serão a temperatura e a fração líquida. Sendo assim possível, concluir se os resultados são dependentes da qualidade da malha. Numa situação ideal, aumentar a qualidade da *mesh* não trará nenhuma alteração aos resultados, neste caso esta estará perfeitamente refinada, devendo optar-se pela opção mais grosseira, ou seja, a que possuir elementos de maior dimensão. Desta forma não se terá uma malha muito pesada computacionalmente não comprometendo a qualidade dos resultados.

A característica a ser avaliada com este teste é o tamanho do elemento. Inicialmente tentou-se reduzir indefinidamente as dimensões do elemento, contudo o esforço computacional para criar a *mesh* bem como para solucionar o modelo revelou-se demasiado grande, não sendo assim possível concluir o estudo num tempo razoável. Para este teste definiu-se a velocidade de entrada da água em 3,53m/s, que corresponde a um caudal volúmico em 6L/min. Os resultados deste teste encontram-se dispostos na tabela seguinte.

Tabela 10- Teste de independência da malha.

Teste	Tamanho do elemento [mm]	Temperatura de saída da água[K]	Fração de líquido	# nós
0,00	1,00	307,672	0,998	59 864,00
1,00	0,80	314,305	0,999	92 158,00
2,00	0,70	306,253	0,998	118 635,00
3,00	0,65	283,191	0,825	141 614,00
4,00	0,60	283,190	0,825	161 133,00
5,00	0,55	283,189	0,825	192 416,00
6,00	0,50	283,189	0,825	230 200,00
7,00	0,45	283,189	0,825	286 440,00

Como se pode observar para valores inferiores a 0,55 mm não há qualquer alteração dos valores das duas propriedades observadas, sendo esta a mais grosseira das 3 opções optou-se por utilizar este tamanho do elemento. De notar que estes testes foram realizados numa fase inicial desta tese de mestrado, sendo assim feitos com apenas PCM e não com a mistura de PCM e malha metálica. Deste modo, a malha utilizada é a demonstrada na Figura 41.

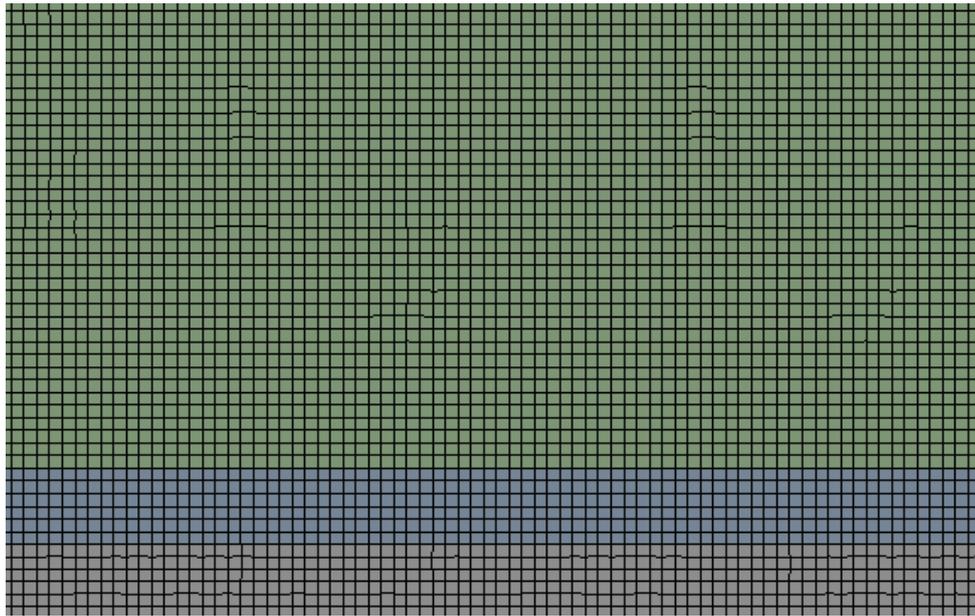


Figura 41- Mesh utilizada.

3.4.3. Nomeação de secções

Com o intuito de facilitar a utilização do utilizador, deram-se nomes às diferentes zonas do sistema. Este processo é bastante importante para uma boa definição das condições de fronteira do sistema, visto que, caso não se realize este processo o Fluent dará nomes de forma automática, o que num sistema com diversos componentes e zonas de contacto pode gerar dificuldades. O nome dado a cada secção encontra-se ilustrado na Figura 42. De notar que a secção F, referente à zona de saída da água se encontra na extremidade oposta à secção G, contudo caso se dispusesse toda a geometria modelada seria impossível observar de forma precisa a localização das restantes secções.

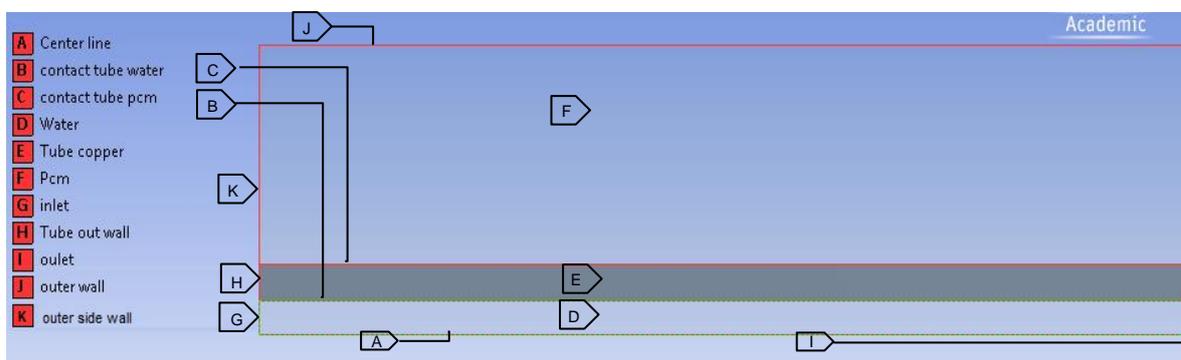


Figura 42- Nomes Secções.

3.4.4. Modelos Físicos

Dada a natureza do problema utilizou-se a seguinte equação para calcular a energia no sistema:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot E) + \nabla \cdot (\vec{v} \cdot (\rho \cdot E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \cdot \nabla T - \sum_j h_j \cdot \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (3.12)$$

onde k_{eff} é a condutividade efetiva ($k + k_t$, onde k_t é a condutividade térmica turbulenta, definida de acordo com o modelo de turbulência utilizado), e \vec{J}_j é o fluxo de difusão do elemento j .

Os três primeiros termos do segundo membro, da equação acima enunciada, representam a transferência de energia através de condução, difusão e dissipação através da viscosidade, respetivamente. S_h inclui o calor através de reação químicas e quaisquer outras fontes de calor volumétrico definidas.

Na equação 3.13,

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (3.13)$$

onde h é a entalpia sensível, esta é definida consoante o fluido. Para um gás ideal,

$$h = \sum_j Y_j \cdot h_j \quad (3.14)$$

por outro lado, caso seja um fluido incompressível,

$$h = \sum_j Y_j \cdot h_j + \frac{p}{\rho} \quad (3.15)$$

nestas duas equações Y_j é a fração mássica de j e

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (3.16)$$

com $T_{ref}=298.15$ K.

Relativamente ao *Viscous Model*, não é possível definir este até se realizar o estudo paramétrico para velocidade de entrada da água, visto que esta irá influenciar o número de Reynolds, ou seja, a turbulência do escoamento. Contudo, caso este seja turbulento optar-se-á pelo modelo *k-ε turbulence model*, caso contrário, ou seja, o escoamento seja laminar, deve optar-se por utilizar o modelo *Laminar*.

Tendo em conta os materiais utilizados nesta dissertação, e seu modo de funcionamento, foi necessário ativar o modelo *Solidification and Melting*.

O ANSYS Fluent pode ser utilizado para resolver problemas que envolvam solidificação e fusão a uma dada temperatura ou num intervalo de valores.

Este modelo não procura encontrar, explicitamente, a frente sólido-líquido, ou seja, a quantidade exata de cada uma das duas fases, pelo contrário o Fluent utiliza uma formulação baseada na relação entre a entalpia e a porosidade para encontrar a fração de líquido na mistura, isto é, a quantidade de volume da célula

que se encontra na fase líquida, associando este valor ao domínio da respetiva célula. Este valor é calculado a cada iteração baseado no seu balanço da entalpia.

A zona “viscosa” é a região em que a fração de líquido se encontra entre 0 e 1. Esta é modelada, aproximadamente, como um meio poroso, no qual a porosidade decresce de 1 até 0 à medida que o material solidifica. Ao atingir este objetivo, a porosidade é nula e, conseqüentemente, a velocidade também toma o valor 0.

Para a utilização deste método é ainda necessário definir a *mushy zone constant*, nesta dissertação utilizou-se o valor predefinido de 100000 visto que é recomendado utilizar um valor entre 10^4 e 10^7 . Quanto maior for este valor, mais íngreme será a curva de amortecimento e, conseqüentemente, a velocidade atingirá mais rapidamente o zero.

3.4.5. Propriedades dos materiais

Tal como já se referiu anteriormente, neste sistema utilizou-se uma mistura de PCM e malha metálica de aço, um tubo de cobre e o fluido operante será água.

As propriedades do cobre, água e do aço são retiradas da base de dados do ANSYS Fluent. Quanto às propriedades da mistura de PCM e malha metálica, tal como já se referiu, encontram-se ilustradas na Tabela 9. Na Tabela 11 é possível observar as propriedades utilizadas para a água e o cobre.

Tabela 11- Propriedades da água e do cobre da Base de dados do ANSYS.

	Água	Cobre
Densidade [m ³ /kg]	998,2	8978
Calor específico[J/kg·K]	4182	381
Condutividade térmica [W/m·K]	0,6	387,6
Viscosidade[kg/m·s]	0,001003	-

3.4.6. Condições de Fronteira

Para se prosseguir com a simulação, foi necessário a definição de condições de fronteira para todas as zonas acima referidas na Figura 38, começando de forma sequencial do tubo exterior até ao interior.

PCM

Interior do PCM: Nesta zona definiu-se a condição de fronteira como sendo de *interior*. Esta adota as condições atribuídas anteriormente definidas, onde apenas se identificou o material utilizado, neste caso PCM/mistura de PCM e malha metálica.

Paredes exteriores laterais e superior: Estas têm função meramente isoladora térmica e mássica. Posto isto, definiu-se ambas as paredes,

relativamente ao seu momento, como sendo *Stationary Walls* e *No Slip* nas condições de cisalhamento. Do ponto de vista térmico estas estruturas são adiabáticas indicando assim que o fluxo ao longo destas seria 0 ao longo de toda a simulação.

Zona de contacto entre PCM e tubo: Esta zona de ligação entre diferentes secções foi definida como *wall*. Ao definir este tipo de condição, num modelo a duas dimensões, o ANSYS cria de forma automática uma “sombra” da superfície seleccionada, esta representa a outra face da parede que não está ilustrada no modelo. Posto isto as condições que forem definidas para a superfície seleccionadas têm também de ser introduzidas na sua *shadow*. Para esta zona definiram-se apenas condições do ponto de vista térmica ao definir-se a espessura da parede.

Tubo de cobre

Interior do cobre: Utilizou-se a mesma definição acima referida para a zona interior do PCM.

Paredes exteriores laterais: As paredes laterais, à semelhança das referidas acima, têm apenas a função isoladora do tubo de cobre, não permitindo que este liberte energia pela zona lateral. Deste modo, as condições definidas foram as mesmas que nas paredes que isolam o PCM.

Zona de contacto entre o tubo e a água: Para esta zona utilizou um raciocínio análogo ao referido no contacto entre o PCM e o tubo. Posto isto, definiu-se a mesma condição de fronteira bem como a mesma espessura de parede.

Água

Interior da Água: Foi atribuída a condição de *interior* pelos mesmos motivos acima referidos para as outras zonas com esta condição de fronteira.

Inlet: Para condição de fronteira para a zona de entrada optou-se por definir a condição de fronteira como *velocity-inlet*. Para esta condição é necessário definir um método para a especificação da velocidade (*Velocity Specification Method*), dado que o sistema só apresenta velocidade numa direção optou-se por definir este método como *Components*, ao seleccionar esta opção é possível indicar a componente em que esta existe. Neste caso, será a componente axial. Para além destas definições, relativamente ao momento é necessário definir a temperatura de entrada do fluido, sendo esta variável com o ciclo que esteja em operação.

Outlet: Para esta zona optou-se por utilizar a condição de fronteira *outflow*, visto que são desconhecidas condições de temperatura e velocidade à saída do tubo.

Linha central: Esta representa o eixo de simetria da geometria axissimétrica do sistema, posto isto definiu-se a condição de fronteira como *axis*.

3.4.7. Métodos de discretização e resolução de equações

Para resolver o sistema acima descrito em todo o seu domínio, e suas equações, é necessário utilizar métodos numéricos.

Primeiramente é necessário discretizar o domínio, tal é realizado com o método dos volumes finitos (FVM), descrito com mais detalhe no capítulo 2.4.1. este método funciona da seguinte forma:

1. Divisão do domínio em volumes de controlo
2. Formulação de equações de balanço para cada volume de controlo
3. Utilização do teorema divergente, os termos dos integrais volúnicos são convertidos para integrais de superfície
4. Os integrais de superfície são avaliados como fluxos
5. Visto que o fluxo a entrar numa superfície é idêntico ao que sai da célula adjacente, este método é conservativo.

Existem dois grandes métodos para linearizar e resolver as equações do sistema: o *Pressure-Based Solver* e o *Density-Based Solver*.

O primeiro é utilizado para casos em que haja uma baixa velocidade do fluido, de forma contraria o segundo é usado quando se utilizar fluidos compreensíveis a grande velocidade. Neste estudo optou-se por utilizar a opção baseada na pressão.

Existem dois tipos de algoritmos para este tipo de abordagem: o *segregated algorithm* e o *coupled algorithm*. Nesta dissertação optou-se por utilizar o primeiro visto que este resolve as equações de forma sequencial, enquanto que o segundo o cálculo é feito em simultâneo. O algoritmo selecionado pode ser descrito pelo fluxograma da Figura 43.

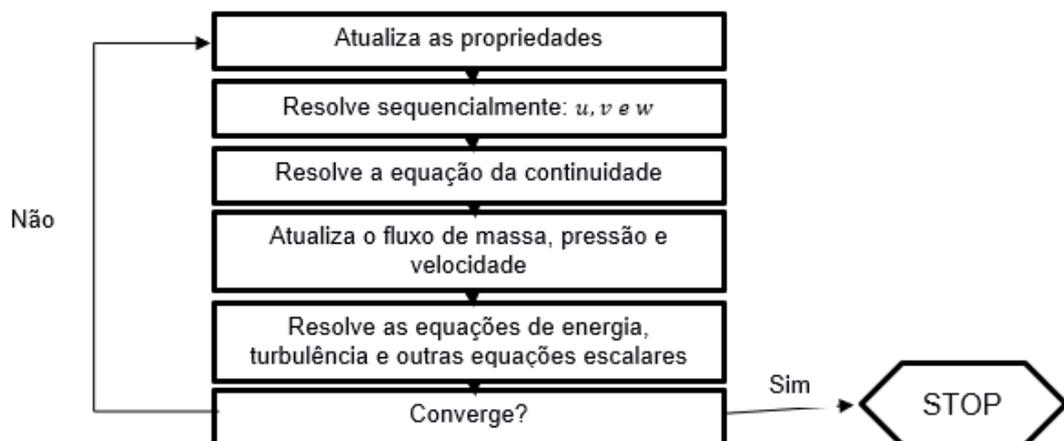


Figura 43- Funcionamento do algoritmo *segregated*. (ANSYS, [s.d.])

Relativamente à velocidade optou-se por uma formulação absoluta visto que não existem elementos em rotação. (ANSYS, [s.d.]

Para o tempo, selecionou-se a opção “transitório” visto que o problema a ser solucionado depende diretamente do tempo.

Tal como se referiu anteriormente, selecionou-se a opção *axisymmetric*.

Por fim, averiguou-se a influência da gravidade nesta simulação. Para tal, procedeu-se ao cálculo do número de Rayleigh na zona em que se encontra PCM e a malha metálica com o intuito de estudar a convecção em cada um dos poros. Aplicando a fórmula 2.44 acima enuncia com as seguintes propriedades:

- $g = 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]}$
- $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} = 0,00048 \text{ [1/K]}$
- $\Delta T = 12 \text{ [K]}$
- $d = 0.00018 \text{ [m]}$

Para diferentes porosidades irão obter-se diferentes valores de viscosidade e de difusividade térmica. Os resultados do número de Rayleigh face a esta variação encontram-se ilustrados na tabela seguinte.

Tabela 12- Resultados número de Rayleigh.

Porosidade	Viscosidade cinemática [kg/m·s]	Difusividade [m ² /s]	Rayleigh
0,25	5,00E-07	1,40E-06	4,71E-01
0,35	7,09E-05	1,29E-06	3,61E-03
0,45	1,88E-05	1,17E-06	1,49E-02
0,55	7,40E-06	1,05E-06	4,22E-02
0,65	3,00E-06	9,13E-07	1,20E-01
0,75	7,00E-03	7,47E-07	6,30E-05
1	3,50E-06	1,25E-07	7,52E-01

Apesar desta variação do número de Rayleigh, pode-se concluir que a força gravítica pode ser negligenciada face ao peso dominante do amortecimento viscoso.

As equações que regem a discretização do transporte escalar de uma quantidade ϕ podem ser facilmente demonstradas quando apresentadas em forma integral relativamente a um volume de controlo V :

$$\oint \rho \cdot \phi \cdot \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \cdot \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (3.17)$$

sendo:

- \vec{v} o vetor velocidade;
- \vec{A} o vetor da área da superfície;

- Γ_ϕ o coeficiente de difusão para ϕ ;
- $\nabla\phi$ o gradiente de ϕ ;
- S_ϕ é a fonte de ϕ por unidade de volume.

Se se aplicar a equação anterior a cada célula do domínio de cálculo obtém-se:

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \phi_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_f \nabla\phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (3.18)$$

- N_{faces} é o número de células adjacentes;
- ϕ_f é o valor de ϕ na face f ;
- $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ é o fluxo de massa através da face f ;
- \vec{A}_f é o vetor área da face f ;
- $\nabla\phi_f$ o gradiente de ϕ na face f ;
- V é o volume da célula

A equação 3.17 pode ser escrita de forma linearizada:

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.19)$$

onde nb se referes às células vizinhas e a é um coeficiente linearizado de ϕ .

Podem ser escritas equações similares para cada célula ou ϕ , criando um conjunto de equações algébricas que o ANSYS Fluent resolve utilizando um método implícito (Gauss-Seidel) para resolver um sistema linear de equações juntamente um método algébrico (AMG). (ANSYS, [s.d.]

Por exemplo, a equação do momento, segundo o eixo dos X, pode ser discretizada ao considerar $u = \phi$ na seguinte equação:

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot \hat{i} + S \quad (3.20)$$

A equação da continuidade integrada em função de um volume de controlo é escrita pela seguinte equação:

$$\sum_f^{N_{faces}} J_f \cdot A_f = 0 \quad (3.21)$$

em que J_f é o fluxo de massa através da face f .

O software CFD armazena valores escalares de ϕ para o centro de cada célula. Contudo, para resolver a equação 3.18 são necessários valores, relativos às faces ϕ_f . Para obter estes valores é utilizado um esquema *upwind*, este utiliza o valor da primeira célula adjacente, segundo a direção do fluxo, ϕ_1 , para derivar o valor da face, ϕ_f .

Existem diversos esquemas de *upwind*:

- *First-Order Upwind Scheme*: é o método mais simples, visto que se considera o valor ϕ_f igual ao valor central da célula adjacente;

- *Power-Law Scheme*: é baseado na solução analítica de uma equação unidimensional de convecção-difusão. O valor da face é determinado a partir de um perfil exponencial que percorre os valores das outras células.
- *Second-Order Upwind Scheme*: encontra o valor de ϕ_f com base no valor central da célula adjacente e do seu gradiente: $\phi_f = \phi_f + \nabla\phi \cdot \vec{r}$. Este esquema é o utilizado com mais frequência devido à sua estabilidade e precisão.
- *Central-Differencing Scheme*: encontra-se disponível apenas para as equações do momento quando é utilizado um modelo turbulento, determinando ϕ_f como sendo a soma das médias dos valores de ϕ e $\nabla\phi$ das células vizinhas.
- *QUICK Scheme*: (*Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics*) pode ser utilizado em *mesh* em que os seus elementos são quadriláteros ou hexaédricos. Geralmente este método demonstra uma grande precisão, contudo em zonas com grandes gradientes pode conduzir a problemas de estabilidade. Caso este método seja utilizado em *meshs* híbridas ou mal estruturadas, todas as faces que não sejam hexaédrica serão analisadas pelo *Second-Order Upwind Scheme*.
- *Third-Order MUSCL Scheme*: resulta de uma junção entre o *Second-Order Upwind Scheme* e o *Central-Differencing Scheme*.

Todos estes métodos são conservativos, assegurando a conservação global de ϕ ; limitadores, limitando os valores previsto entre valores realistas e garantem que a difusão pode ocorrer em qualquer direção, contudo a convecção pode apenas ocorrer no mesmo sentido que o fluxo.

Quanto maior for a ordem do método maior a sua precisão, contudo apresenta também uma maior instabilidade. A escolha acerca do método a utilizar depende da complexidade do problema e da precisão pretendida pelo utilizador, posto isto devido à sua boa precisão e estabilidade optou-se por utilizar o *Second-Order Upwind Scheme*.

Gradientes são necessários para obter valores escalares nas faces das células e para calcular os termos de difusão secundária bem como as derivadas da velocidade.

Uma das formas de calcular o gradiente de um escalar ϕ no centro de uma célula $c0$ é através do Teorema de Green-Gauss:

$$(\nabla\phi)_{c0} = \frac{1}{v} \sum_f \bar{\phi}_f \vec{A}_f \quad (3.22)$$

onde $\bar{\phi}_f$ representa o valor de ϕ no centroide da célula.

Existem duas formas de avaliar o resultado de $\bar{\phi}_f$, a primeira considera a média aritmética dos valores de ϕ da célula vizinha $c1$ (Green-Gauss Cell-Based Gradient Evaluation):

$$\bar{\phi}_f = \frac{\phi_{c0} + \phi_{c1}}{2} \quad (3.23)$$

a segunda utiliza a média aritmética dos valores de ϕ nos nós da face (Green-Gauss Node-Based Gradient Evaluation):

$$\bar{\phi}_f = \frac{1}{N_f} \sum_n^{N_f} \bar{\phi}_n \quad (3.24)$$

Outro método para determinar o gradiente $\nabla\phi$ é o *Least Squares Cell-Based Gradient Evaluation*, este assume que a solução varia de forma linear. Na Figura 44 encontra-se ilustrado a permuta de valores entre as células c_0 e c_1 segundo o vetor δr_i é expressa por:

$$(\nabla\phi)_{c_0} \cdot \Delta r_i = (\phi_{c_i} - \phi_{c_0}) \quad (3.25)$$

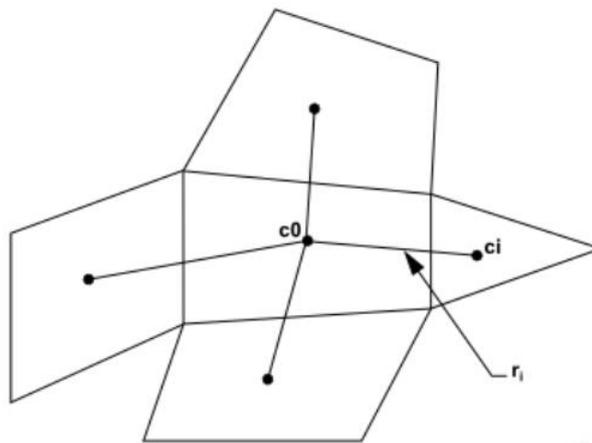


Figura 44- Avaliação do centroide de uma célula.

Mais uma vez, a escolha do método a utilizar deve ter em consideração a precisão dos resultados sem sobrecarregar o esforço computacional. Posto isto o método selecionado para este problema foi o Least Squares Cell-Based Gradient.

Em ordem a resolver a equação 3.19, é necessário saber o valor de p_f . O Ansys Fluent tem cinco esquemas disponíveis para alcançar esse objetivo:

- Linear
- Standard
- Second Order
- Body Force Weighted
- PRESTO!

O método de segunda ordem é o recomendado pelo software, tendo apenas como exceção casos em que o fluxo possua várias fases ou fluxos com grandes forças no objeto (e.g. Objeto a flutuar), visto que este não é o caso optou-se por adotar o método recomendado.

Para garantir a continuidade da equação 3.21, o fluxo na face J_f deve ser determinado através da seguinte formulação:

$$J_f = \rho_f \frac{a_{p,c0}v_{p,c0} + a_{p,c1}v_{p,c1}}{a_{p,c0} + a_{p,c1}} + d_f((p_{c0} + (\nabla p)_{c0} \cdot \vec{r}_0) - (p_{c0} + (\nabla p)_{c1} \cdot \vec{r}_1)) \quad (3.26)$$

$$J_f = \hat{J}_f + d_f(p_{c0} - p_{c0}) \quad (3.27)$$

sendo:

- p_{c0} e p_{c1} são as pressões contidas nas duas células em ambos os lados da face
- $v_{n,c0}$ e $v_{n,c1}$ as velocidades normais das duas células em ambos lados da face
- \hat{J}_f contem a influência da velocidade nestas células
- d_f é função dos coeficientes a_p da equação dos momentos médios

Para as equações de momento, é necessário conhecer a pressão envolvida no sistema e deve ser calculado o campo de velocidades em prol de satisfazer a equação da continuidade. Mesmo que não se utilize uma equação que regule a pressão, haverá sempre quatro variáveis, referentes às velocidades e pressões, e quatro equações, para os momentos e continuidade, por isso podem utilizar-se *coupling algorithms* para calcular os valores de pressão.

Os *coupling algorithms* que envolvem pressão e velocidade mais comuns são:

- SIMPLE: (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations), as equações de momento são resolvidas e é feita uma previsão inicial dos valores de pressão. Este será utilizado nas equações 3.21 e 3.25, o que levará, normalmente a um resultado errado, gerando assim um erro. Este método utiliza esse erro para gerar um novo valor de pressão que corrige o fluxo através da face;
- SIMPLEC: (SIMPLE-Consistent) é uma modificação do SIMPLE que melhora a convergência em casos em que pressão e velocidade sejam essenciais para obter uma solução;
- PISO: é recomendado em todos os sistemas que efetuem cálculos em regime transitório e para casos em que se utilize fluidos compressíveis com elevada pressão ou número de mach;

O método utilizado nesta dissertação será o SIMPLEC. A tabela abaixo sintetiza todos os métodos selecionados para este problema.

Tabela 13- Métodos de solução.

Pressure-Velocity Coupling	
Scheme	SIMPLEC
Skewness Corretion	0
Spatial Discretization	
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Energy	Second Order Upwind
Transient Formulation	Second Order Implicit

3.4.8. Controlos e relatórios

Com o intuito de observar o comportamento da solução do sistema, criaram-se os seguintes relatórios:

- Fluxo de calor médio ao longo da superfície de contacto entre a mistura de PCM e malha metálica e a superfície exterior do tubo de cobre;
- Fluxo de calor médio ao longo da superfície de contacto entre a superfície interior do tubo de cobre e a água;
- Temperatura de saída média;
- Fração líquida média na zona em que se encontra o PCM e malha metálica.

caso estes sejam expostos sob a forma de gráfico, é possível acompanhar a performance da simulação e determinar se esta deve ser abortada ou não.

Enquanto se calculam os resultados, o “erro” nas equações geradas está a ser reduzido. Este pode ser acompanhado através dos monitores residuais. É praticamente impossível atingir um valor perfeitamente nulo para este erro, posto isto, deve ser estabelecido um valor a partir do qual se pode considerar que a solução é válida, ou seja, que este convergiu. Dadas as oscilações de energia do sistema, optou-se por realizar a normalização destes monitores residuais, esta é feita de forma automatizada pelo software. Para conseguir alcançar esta normalização realiza-se, para cada variável, o quociente entre o valor residual da iteração atual e o valor residual máximo das iterações seguintes,

$$\bar{R}\phi = \frac{R_{\text{iteração } N}^{\phi}}{R_{\text{iteração } M}^{\phi}} \quad (3.28)$$

onde N representa a iteração atual e M o número de iterações consideradas para encontrar o valor residual mais alto.

Para se conseguir estabilizar os valores residuais de cada variável do sistema, optou-se por realizar este quociente de duas em duas iterações. A cada iteração, de cada célula, é calculado um novo valor para cada variável do sistema. É comum aplicar-se um fator de relaxamento U a estas variáveis, como é demonstrado por:

$$\phi^{new,used} = \phi^{old} + U \cdot (\phi^{new,predicted} - \phi^{old}) \quad (3.29)$$

O valor de U deve ser menor que 1 para impedir oscilações nos resultados, contudo caso este seja muito baixo irá abrandar o processo de convergência.

Os valores utilizados para os monitores residuais e para os fatores de relaxamento encontram-se resumidos na Tabela 14.

Tabela 14- Critérios de convergência residuais.

Valores Residuais	
Continuity	5,00E-05
X-velocity	8,50E-05
Y-velocity	9,00E-05
Energy	1,00E-06

3.4.9. Resultados e critérios de aceitação

Após terminar a simulação, deve-se verificar os resultados de modo a validá-los. Primeiro deve verificar-se se os valores residuais, estes apenas serão considerados válidos se:

- Todos os valores tiverem atingido o seu ponto de convergência definidos na Tabela 14;
- Ambos os valores residuais e das variáveis se tornarem estáveis para um valor residual da continuidade inferior a 0.1.

Nesta dissertação, para se poderem considerar válidos os resultados, devem-se cumprir as seguintes condições:

- Temperatura de saída da água entre 10°C e 50°C, visto que esta é a temperatura máxima de operação do PCM;
- Ambos os fluxos de calor devem ser superiores a zero;
- Fração de líquido deverá estar contida entre 0 e 1.

3.5. Estudo Paramétrico e análise dos resultados

A realização dos estudos paramétricos acima referidos, finalizará a formulação do modelo computacional a analisar nesta dissertação. Tendo todas as propriedades do sistema bem definidas, é possível proceder ao estudo do comportamento de diferentes parâmetros, intrínsecos do modelo, como: fração líquido na mistura, transferência de calor e temperatura de saída da água. Por fim, após se definir qual

a melhor solução, pretende-se estudar o impacto da utilização deste modelo no valor de V40 de um sistema de AQS real.

Para se conseguir determinar a velocidade a que o fluido circula no sistema foi necessário fazer um balanço energético. Neste, comparou-se a quantidade de energia que é dada à água com a energia final do processo, estes valores têm de ser iguais para que o balanço esteja correto, visto que não há geração interna de energia. Este é dado pela seguinte equação:

$$Q_{out} = Q_{in} \quad (3.30)$$

Analisando o sistema, pode-se observar que o fornecimento de calor, tal como já se referiu anteriormente, será efetuado pelo tubo de cobre, contudo a verdadeira fonte de calor será a mistura do PCM com a malha metálica. Para que a energia proveniente da mistura consiga alcançar a água terá de superar a resistência térmica equivalente do sistema, esta é dada pela soma das resistências de todos os materiais envolvidos neste processo. Relativamente ao calor no final do processo este é dado pela primeira lei da termodinâmica.

Posto isto, pode-se desenvolver ambos os termos da equação 3.30 de modo a conseguir encontrar o valor de velocidade. Este desenvolvimento é demonstrado nas equações 3.31 e 3.32:

$$Q_{in} = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{T_m - \bar{T}_{\text{água}}}{R_{\text{água}} + R_m + R_{\text{cobre}}} = \frac{T_m - \left(\frac{T_{out} - T_{in}}{2}\right)}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{água}} \cdot L \cdot h_{\text{água}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{cobre}}}{r_{\text{água}}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{cobre}} \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_m}{r_{\text{cobre}}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_m \cdot L}} \quad (3.31)$$

onde: T_m é a temperatura da mistura;
 T_{out} a temperatura à saída da água;
 T_{in} a temperatura de entrada da água;
 $r_{\text{água}}$ o raio associado à resistência térmica da água;
 L comprimento do tubo;
 $h_{\text{água}}$ o coeficiente de convecção da água;
 r_{cobre} o raio associado à resistência térmica do cobre;
 k_{cobre} a condutividade térmica do cobre
 r_m o raio associado à resistência térmica da mistura;
 k_m a condutividade térmica da mistura;

$$Q_{out} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = v \cdot \rho \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot r^2 \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (3.32)$$

em que: v é a velocidade da água;
 ρ a densidade da água;
 r o raio do tubo interior;
 c_p o calor específico da água;
 T_{out} a temperatura de saída da água;
 T_{in} a temperatura de entrada.

Como é possível observar, nas equações 3.31 e 3.32, há três variáveis desconhecidas na resolução deste balanço energético: a velocidade do fluido, a condutividade térmica, visto que esta depende da porosidade da malha, e a temperatura de saída da água. Para conseguir realizar uma melhor análise destes parâmetros, resolveu-se o balanço energético em ordem à temperatura, conseguindo assim determinar um valor para este em função dos valores de velocidade e porosidade da mistura.

Um sistema AQS, opera, tipicamente, com um caudal mássico de 6 L/min (equivalente a uma velocidade de 3.53 m/s), contudo ao se analisar os resultados presentes na Tabela 15 é visível que, para esta velocidade, independentemente do valor de porosidade adotado, não se verifica um valor de promissor para a temperatura máxima de saída.

Tabela 15- Resultados balanço energético $v=3,53$ m/s.

Porosidade	k_m [W/m · K]	Velocidade [m/s]	T_{out} [°C]
0,25	3,22	3,53	15,79
0,35	4,13	3,53	17,12
0,45	4,64	3,53	17,82
0,55	4,73	3,53	17,95
0,65	4,42	3,53	17,53
0,75	3,74	3,53	16,55
1,00	0,2	3,53	10,42

Posto isto, procurou-se melhorar este parâmetro ao diminuir a velocidade de entrada do fluido. Esta decisão é de extrema importância para o rumo desta dissertação, uma vez que o sistema desenvolvido terá de ter um caudal mássico igual ao de um sistema AQS típico (neste caso assumido como 6 L/min), ou seja, o facto de se diminuir a velocidade e, conseqüentemente, o caudal mássico implica que se tenha de aumentar o número de tubos do sistema, de modo a que o caudal seja atinja o valor pretendido. Posto isto, passou-se a considerar que o sistema, até então desenvolvido, representa na verdade uma porção do sistema final.

Para se encontrar o valor de velocidade a utilizar, limitou-se o número de tubos utilizados a 25. Ao se analisar o balanço acima enunciado, pode-se observar que o valor da temperatura será maior com a diminuição da velocidade de entrada, optando assim por se utilizar a velocidade de 0,14 m/s, correspondente a 0,24 L/min. Para esta velocidade o escoamento será laminar visto que o número de Reynolds é inferior a 2000. Procedeu-se então, novamente, à realização do balanço energético. Os resultados do novo balanço podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16- Resultados balanço energético.

Porosidade	k_m [W/m · k]	Velocidade [m/s]	T_{out} [°C]
0,25	3,22	0,14	35,24
0,35	4,13	0,14	36,09
0,45	4,64	0,14	36,43
0,55	4,73	0,14	36,49
0,65	4,42	0,14	36,29
0,75	3,74	0,14	35,77
1,00	0,20	0,14	17,85

De acordo com os resultados da Tabela 15 e 16, pode-se observar que a utilização de uma velocidade de entrada de 0.14 m/s juntamente uma porosidade de 0,55 é a que potencia a temperatura à saída da água. Contudo, a diferença entre os valores obtidos é irrisória e por isso mesmo não é possível retirar uma conclusão definitiva, relativamente a qual porosidade se deve utilizar, visto que os valores de temperatura obtidos correspondem ao máximo que é possível atingir, podendo induzir em erro relativamente a qual destes é a melhor solução para o sistema.

Para se conseguir determinar o efeito da porosidade no modelo, de uma forma mais precisa, é necessário realizar diversos testes computacionais. Com estes, pretende-se observar o comportamento da fração de líquido da mistura, da transferência de calor e da temperatura à saída da água, ao longo do tempo de simulação, para os diferentes valores de porosidade anteriormente referidos.

Este estudo realizou-se para o processo de descarga do PCM, definindo a temperatura inicial de todo o sistema (mistura, cobre e água) como sendo de 40 °C. A simulação decorreu até ao instante em que a transferência de calor do tubo de cobre para a água é igual a 0.

Nesta análise, comparou-se o intervalo de porosidades definido com o caso em que só se teria PCM, de modo a se poder observar o efeito da malha metálica no sistema, no comportamento dos seguintes parâmetros:

- Tempo até o material ter mudado completamente de fase;
- Calor, total e médio, transferido da mistura para o tubo de cobre;
- Calor, total e médio, transferido do tubo de cobre para a água;
- Temperatura média;

o valor total de calor será ainda calculado através de formulações analíticas, para comprovar que o sistema está a operar corretamente do ponto de vista térmico, verificando se os valores obtidos computacionalmente são idênticos aos esperados analiticamente.

Ao longo desta análise procurar-se-á expor os resultados sob a forma gráfica, de forma a conseguir observar, de forma mais explícita, a variação dos valores relativamente à porosidade, contudo será ainda elaborada uma tabela final em que se fará um resumo dos resultados obtidos.

Para se poder analisar o primeiro parâmetro de interesse, deve-se atender à fração de líquido do material. Ao longo do processo de simulação, esta começará

em 1,0, ou seja, está completamente líquido e terminará nos 0,0 em que já se encontrará totalmente sólido, tal como se pode verificar no gráfico da Figura 45, onde se compara a variação da fração de líquido da mistura de PCM com malha metálica em ordem ao tempo de simulação.

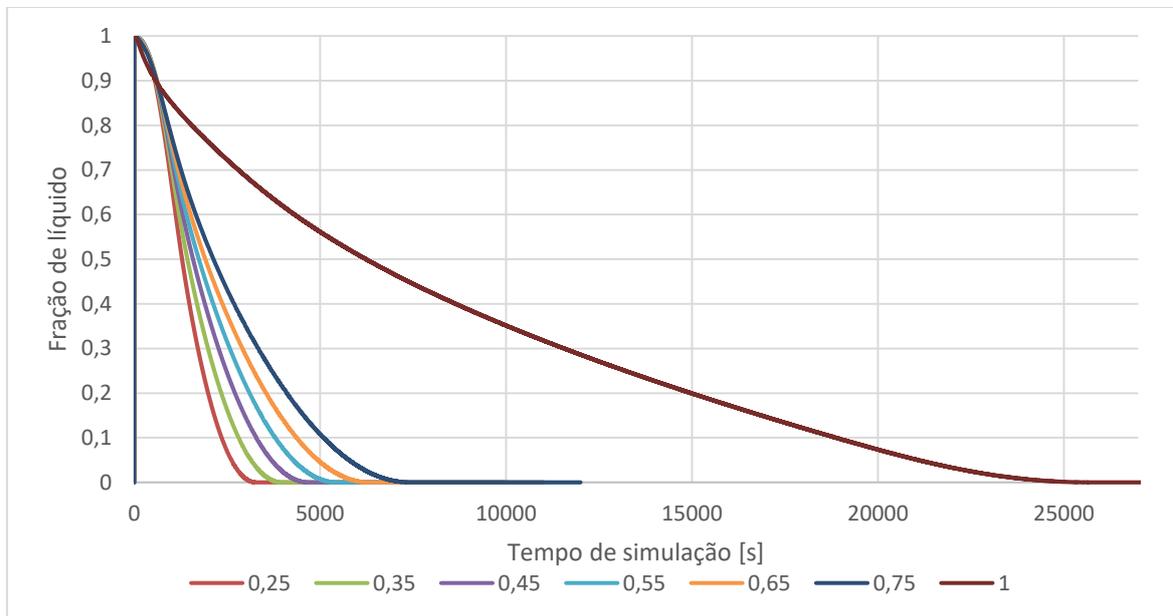


Figura 45- Variação da fração de líquido ao longo do processo de descarga para diferentes porosidades.

Através deste gráfico, é possível concluir que quanto maior for a porosidade da malha metálica mais tempo demorará a que este esteja completamente sólido. Este comportamento já seria espectável, visto que a porosidade representa a quantidade de PCM na mistura, ou seja, quanto maior for este valor mais material haverá para solidificar, demorando assim mais tempo a alcançar o final do processo. Este efeito deve-se também à diminuição da condutividade térmica com o aumento da porosidade, diminuindo deste modo a quantidade de calor transferido. É possível distinguir três fases de transferência de calor da mistura para o tubo de cobre. Numa fase inicial, onde a reta ainda não apresenta declive, a fração líquida é de 1,0, contudo já ocorre transferência de calor entre estas duas superfícies sob a forma sensível, a fase latente da transferência de calor inicia-se quando a reta começa a apresentar declive. Por fim quando o material já se encontra totalmente sólido, observa-se novamente transferência de calor sensível. A evolução da fração de líquido ao longo do tempo de simulação, para uma malha de aço com porosidade 0,35, encontra-se ilustrada no Anexo A.2. Para se obter estes *countours* as simulações foram espaçadas em intervalos de 600 segundos.

Analisou-se, de forma análoga, o comportamento da transferência de calor através das duas superfícies de interesse, o contacto entre a zona inferior da mistura de PCM com a face exterior do tubo de cobre e da face interior deste com a água. Os valores destas foram extraídos através de relatórios, previamente referidos, relativos ao valor do integral, em ordem à área, do fluxo de calor através destas superfícies de contacto.

Inicialmente serão comparados os valores da transferência de calor para as diferentes porosidades em cada uma das superfícies. Posteriormente, vai-se comparar estes valores para a mesma porosidade, procurando observar alguma discrepância, entre as duas zonas, que não seja perceptível numa primeira análise.

Os resultados obtidos para a primeira análise são os ilustrados nas figuras 46 e 47.

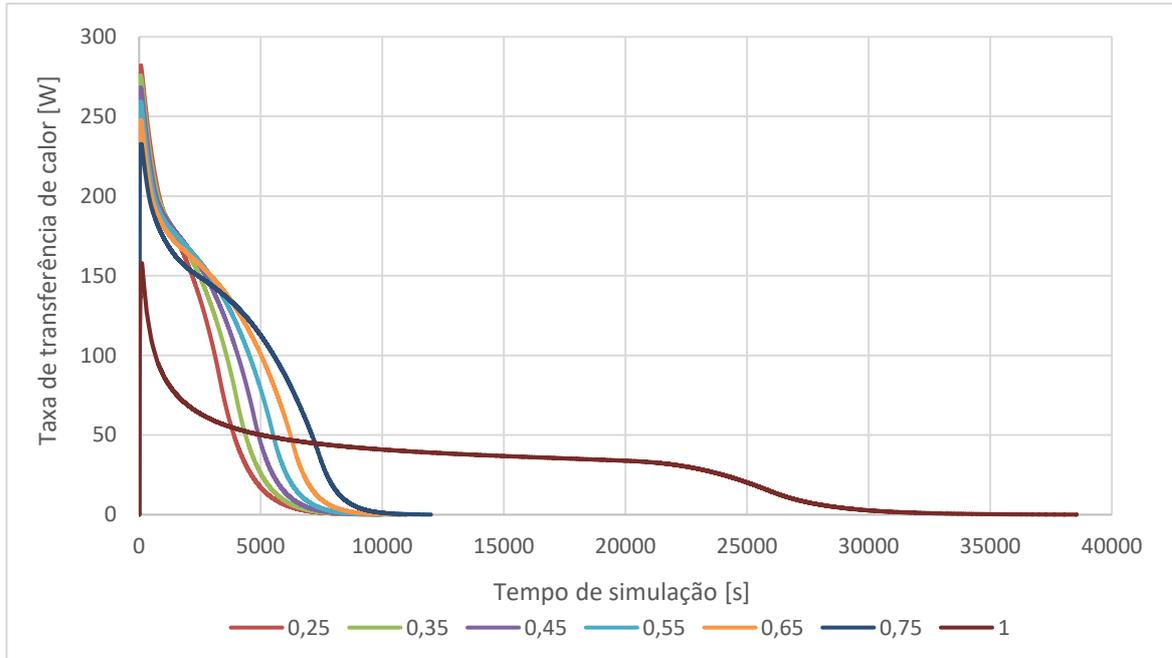


Figura 46- Variação da taxa de transferência de calor entre o PCM e o tubo de cobre ao longo do processo de descarga para diferentes porosidades.

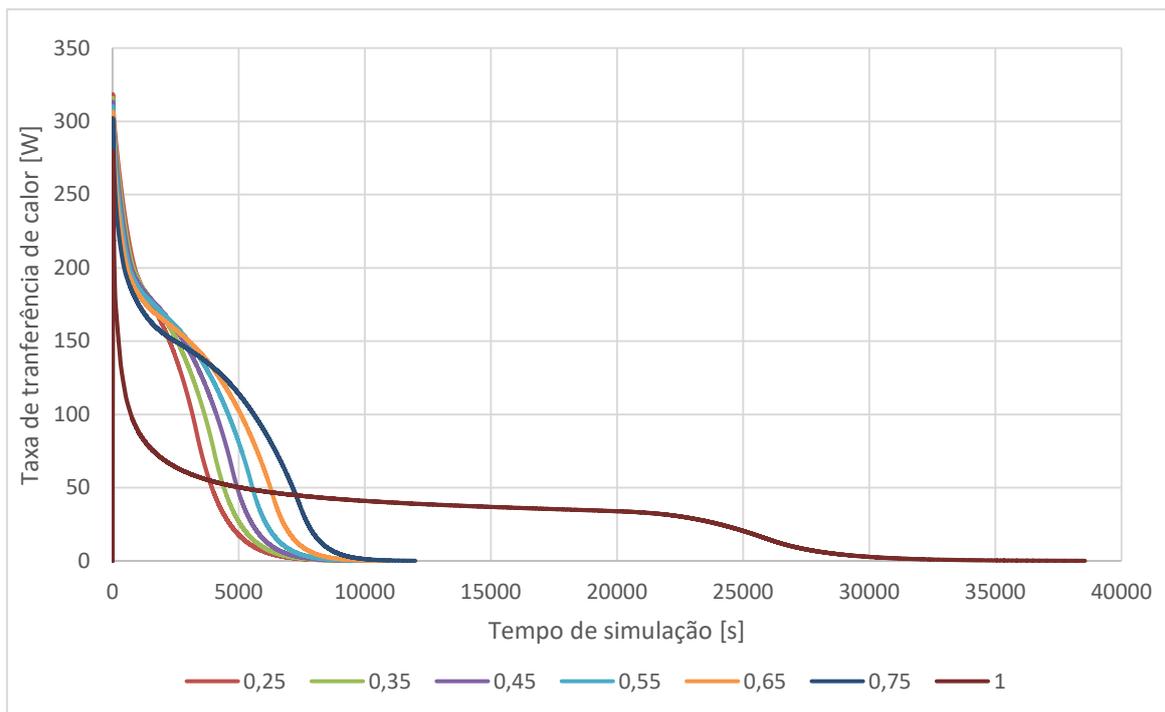


Figura 47- Variação da taxa de transferência de calor entre o tubo de cobre e a água ao longo do processo de descarga para diferentes porosidades.

Como é notório, ambos os gráficos, tal como seria de esperar, possuem uma silhueta idêntica ao longo de toda a simulação, visto que a transferência de calor do tubo para a água é diretamente influenciada pela energia proveniente da mistura de PCM.

Uma diferença visível está no pico inicial, em que para o primeiro gráfico existe uma diferença neste valor, tendo um comportamento decrescente com o aumento da porosidade, esta variação é expectável visto que este pico advém da transferência de calor sensível, por meio de condução, da mistura para o tubo de cobre. Deste modo, a propriedade que terá um grande relevo é a condutividade térmica da mistura, tendo esta uma influência direta e proporcional na condução de calor, isto é, quando maior o seu valor, maior será a transferência de calor (para as mesmas condições de variação de temperatura). Tal como já se observou na Tabela 9, com o aumento da porosidade ocorre também uma diminuição da condutividade térmica. Este comportamento não se observa no segundo gráfico, visto que o material responsável pela transferência de calor é o cobre, que mantém as suas propriedades constantes para todas as simulações.

Relativamente à distribuição da transferência de calor ao longo do tempo para cada porosidade, é visível que, tal como já se referiu, numa fase inicial existe uma relação linear entre a porosidade e a quantidade de calor transferido. Contudo, quando a fase latente do processo começa a dominar, mudando de forma mais notória o declive do gráfico, é visível um avanço maior para as porosidades mais elevadas, visto que estas são as que possuem mais quantidade de PCM e por sua vez mais energia latente para libertar quando o material começa a solidificar. Esta relação pode ser comprovada caso se observe a área abaixo de cada uma das curvas, visto que a energia libertada em todo o processo é dada pelo produto entre

a transferência de calor (potência) e o tempo, em que com o aumento da porosidade se observa também um aumento da área, tal como tinha sido demonstrado na Tabela 9 em que se pode observar a mesma relação.

A segunda análise acima referida advém da necessidade de verificar se o sistema encerra corretamente os seus balanços energéticos no tubo de cobre. A energia que entra neste componente tem de ser igual ao que calor que sai do mesmo. A ilustração deste balanço é visível através dos gráficos presentes entre as Figuras 48 e 54.

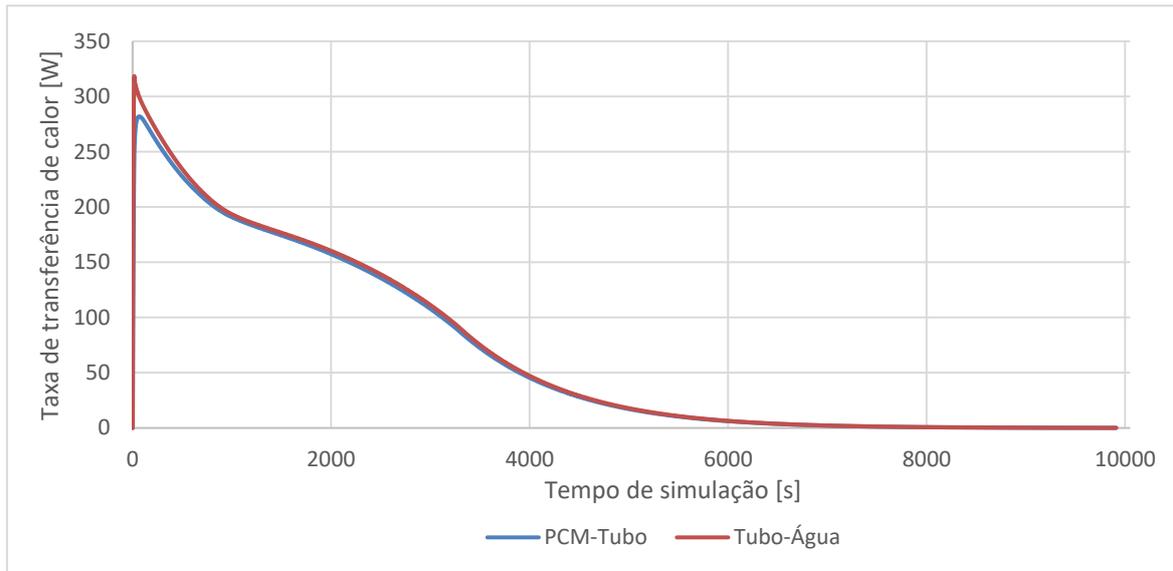


Figura 48- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,25.

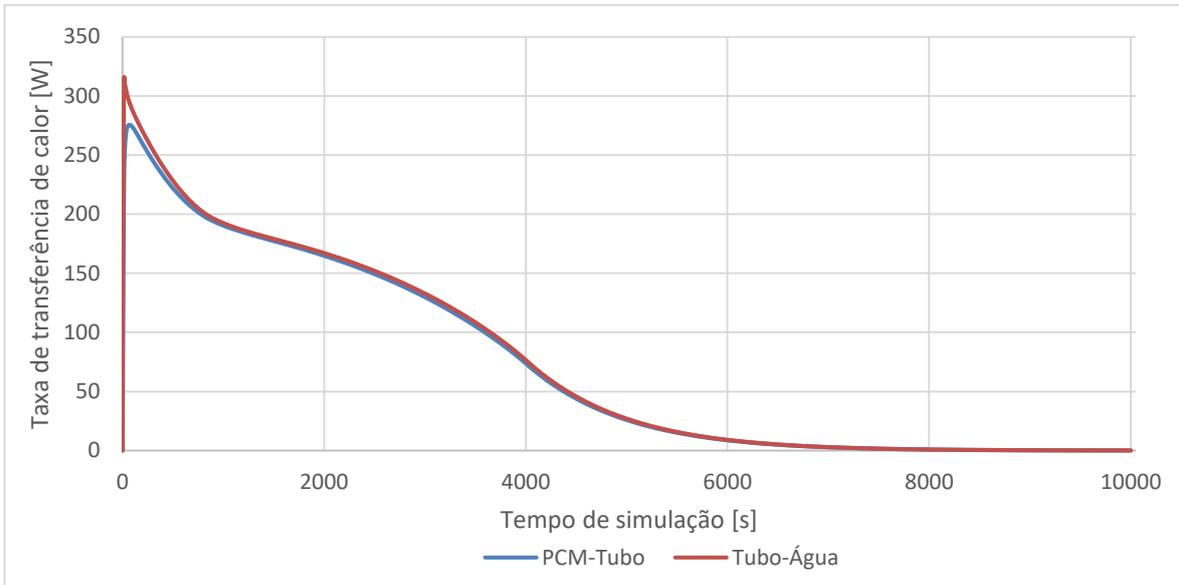


Figura 49- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,35.

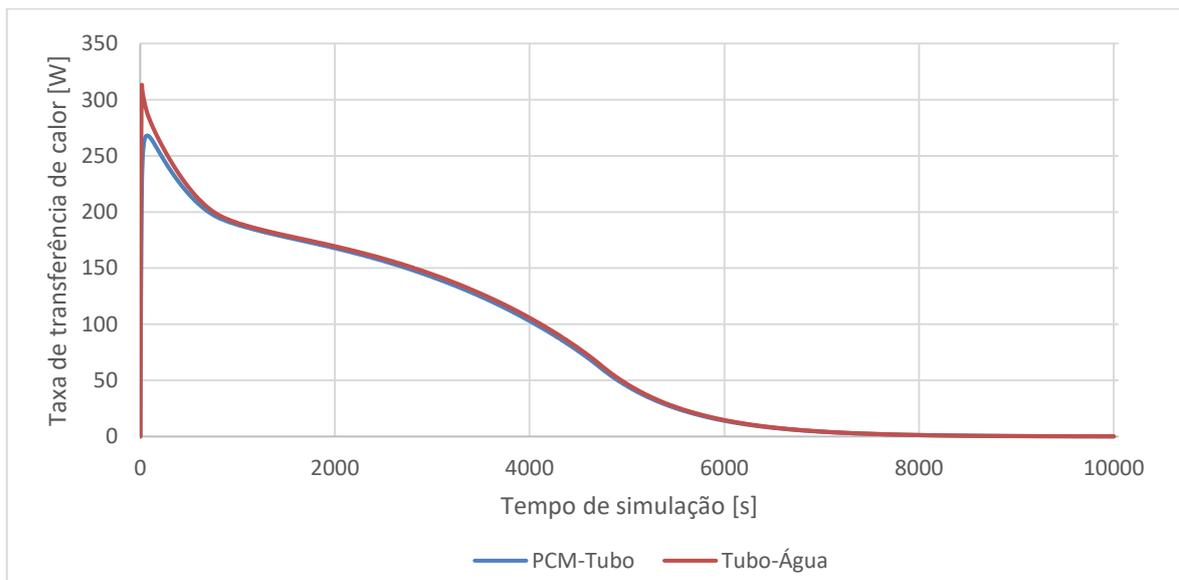


Figura 50- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,45.

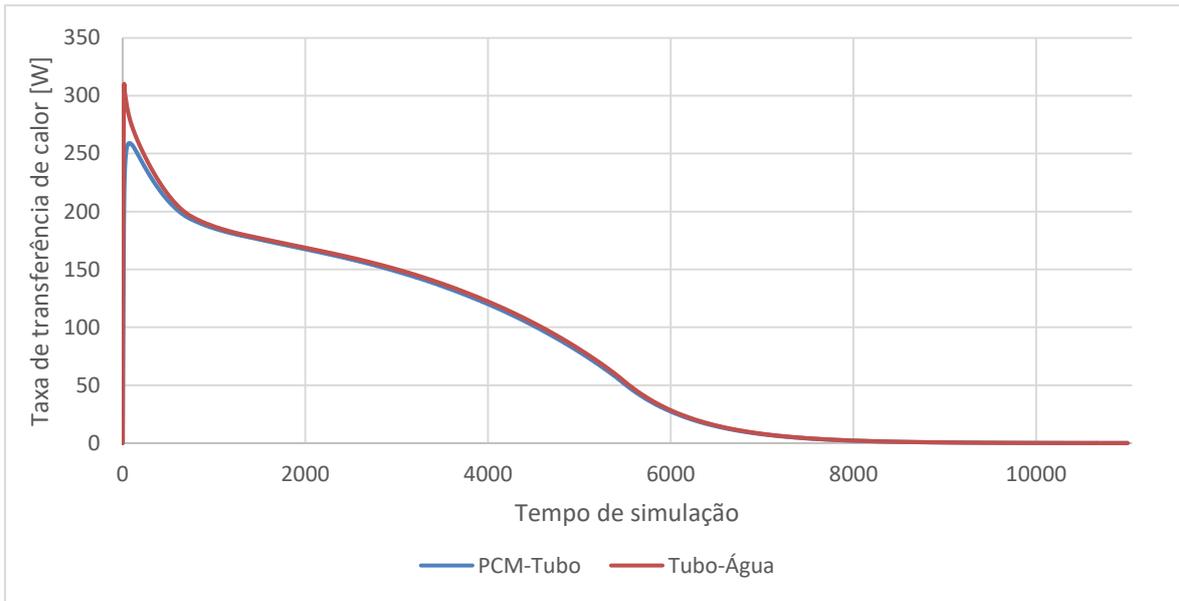


Figura 51- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,55.

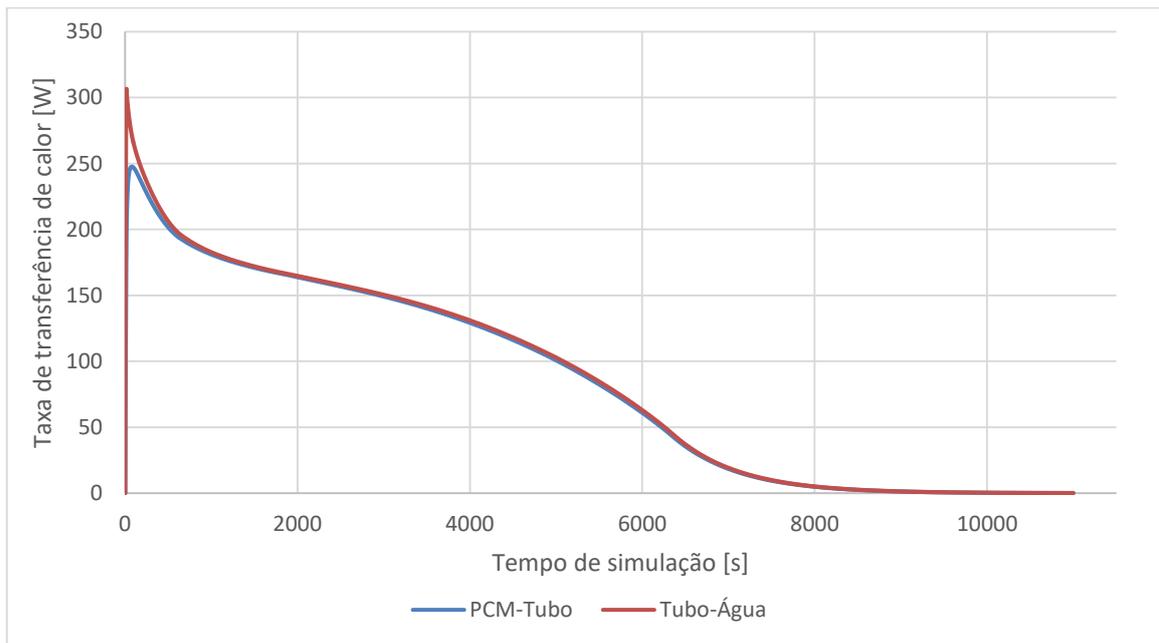


Figura 52- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,65.

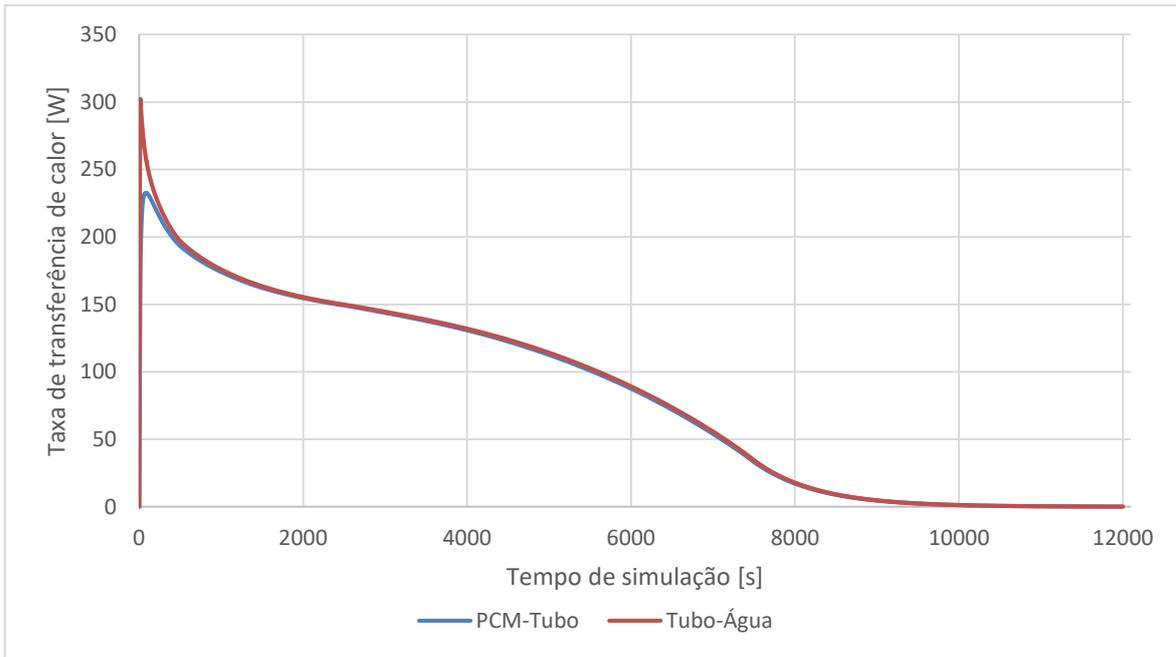


Figura 53- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 0,75.

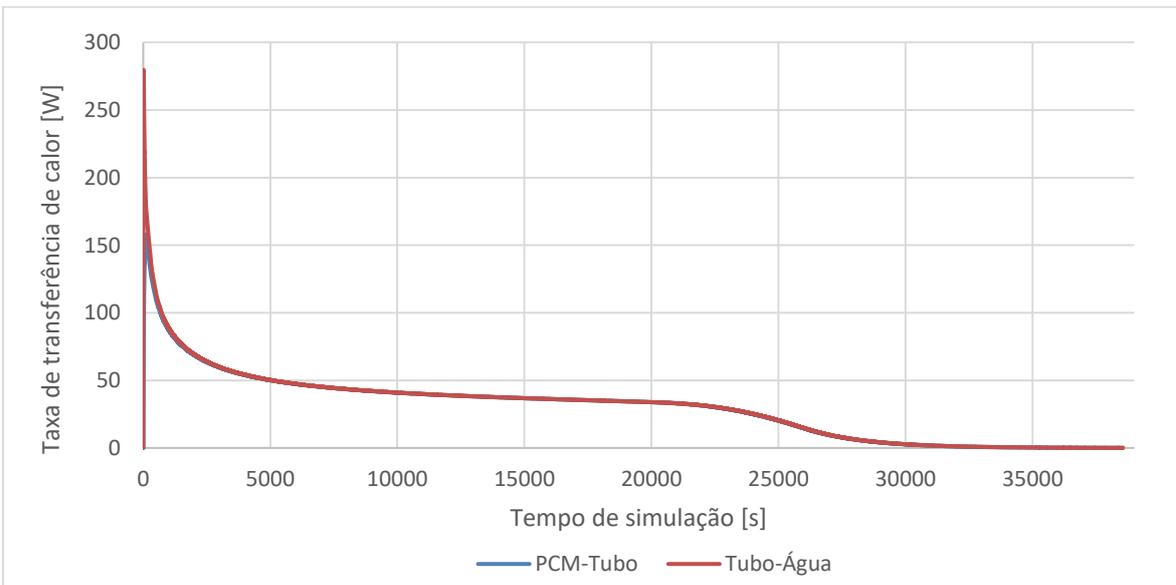


Figura 54- Comparação da taxa de transferência de calor nas zonas PCM-Tubo e Tubo-Água para uma porosidade de 1,0.

Como se pode observar, todos os gráficos têm um comportamento idêntico, no sentido em que as curvas representativas da transferência de calor nas duas zonas são, ao longo da maioria do tempo de simulação, coincidentes tendo apenas uma pequena discrepância na fase inicial em que o calor transferido do tubo para a água é superior ao que este recebe, devido à condução inicial realizada apenas pelo cobre e a possíveis erros de cálculo por parte do software que podem estar

associados a diversos fatores como: a definição do tamanho da malha, erros na elaboração da malha ou residuais. Esta pequena diferença é visível na Tabela 17.

Tabela 17- Comparação entre a Energia libertada entre a zona PCM-Tubo e Tubo-Água.

Porosidade	Calor PCM-Tubo ANSYS [kJ]	Calor Tubo-Água ANSYS [kJ]	Diferença [kJ]	Erro [%]
0,25	658,09	677,69	19,60	3%
0,35	724,19	743,80	19,60	3%
0,45	790,21	809,81	19,61	2%
0,55	856,24	875,85	19,61	2%
0,65	922,13	941,76	19,63	2%
0,75	986,93	1006,57	19,64	2%
1,00	1152,31	1172,02	19,72	2%

Por fim, compararam-se os valores acima demonstrados, obtidos pelo software, com os seus resultados analíticos. Para a zona entre o tubo e a água utilizou-se a formulação descrita na equação (3.32), enquanto que para o contacto entre o PCM e o tubo se utilizou a seguinte equação:

$$Q_{in} = V_m \cdot \rho_m \cdot (c_{p,m} \cdot \Delta T_s + Q_{Latente,m} + c_{p,m} \cdot \Delta T_l) \quad (3.33)$$

em que: V_m é o volume da mistura;

ΔT_s a diferença de temperatura quando o material está totalmente sólido;

ΔT_l a diferença de temperatura quando o material está totalmente líquido.

Os resultados obtidos são os expostos nas tabelas seguintes.

Tabela 18- Comparação dos valores de energia libertada na zona PCM-Tubo.

Porosidade	Calor PCM-Tubo ANSYS [kJ]	Calor PCM-Tubo Analítico [kJ]	Diferença [kJ]	Erro [%]
0,25	658,09	691,92	33,83	5%
0,35	724,19	750,00	25,80	4%
0,45	790,21	808,06	17,85	2%
0,55	856,24	866,18	9,88	1%
0,65	922,13	924,18	2,05	0%
0,75	986,93	981,20	5,73	1%
1,00	1152,31	1127,40	24,89	2%

Tabela 19- Comparação dos valores de energia libertada na zona Tubo-Água.

Porosidade	Calor Tubo-Água ANSYS [kJ]	Calor Tubo-Água Analítico [kJ]	Diferença [kJ]	Erro [%]
0,25	677,69	702,32	24,63	4%
0,35	743,80	770,10	26,31	3%
0,45	809,81	837,80	27,98	3%
0,55	875,85	905,51	29,66	3%
0,65	941,76	973,08	31,32	3%
0,75	1 006,57	1 039,52	32,95	3%
1,00	1 172,02	1 209,09	37,07	3%

A diferença entre a metodologia analítica e computacional apresenta valores relativamente baixos, podendo assim ser desprezada. Esta pode ser justificada através de erros de cálculo por parte do software ou pelas simplificações utilizadas, como por exemplo, manter-se as propriedades físicas constante com a variação da temperatura.

Passou-se então para a análise da temperatura média da água à saída. De forma semelhante ao que se realizou para as outras análises, os valores desta variável obtiveram-se através de relatórios relativamente ao valor médio desta ao longo da superfície de saída.

Na Figura 55 encontra-se ilustrado o gráfico comparativo dos valores de temperatura média para cada valor da gama de porosidades em análise. Para além destas curvas, foram ainda traçadas duas retas referentes ao limite superior e inferior da temperatura ao longo da simulação.

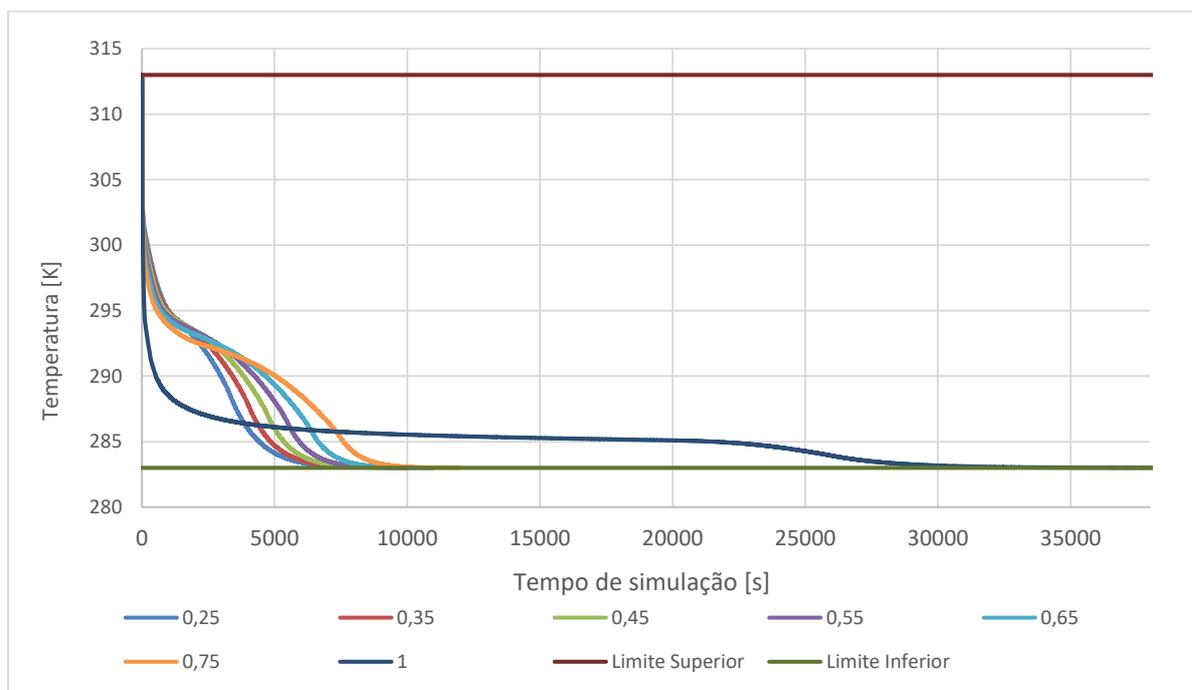


Figura 55- Temperatura média da água à saída para as diferentes porosidades.

Como se pode observar, este gráfico tem um comportamento idêntico ao observado anteriormente para a transferência de calor, tal como seria de esperar, visto que a variação de temperatura da água está diretamente relacionada com o calor que esta recebe. Atendendo à equação 3.31, é possível observar que todos os valores são constantes à exceção da transferência de calor e da temperatura de saída, ou seja, existe uma relação proporcional entre a quantidade de calor transferida e a temperatura à saída da água. À semelhança do que se observou anteriormente, numa fase inicial a transferência de calor é predominantemente sensível, deste modo as porosidades menores, devido a uma maior condutividade térmica, são as que têm capacidade de transferir uma maior quantidade e, conseqüentemente, uma maior temperatura média. Quando se observa o ponto de inflexão das curvas presentes no gráfico, passa a haver um domínio da fase latente do processo, em que a temperatura média é superior para as porosidades elevadas, visto que, estas são as que contêm mais PCM e, deste modo, mais energia disponível. No Anexo A.3, encontra-se demonstrada a variação da temperatura média, de todos os componentes do sistema, ao longo de toda a simulação para uma malha metálica com porosidade 0,35. Para se obter os *contours* presentes neste, de forma análoga ao que se realizou no Anexo A.2, realizaram-se simulações espaçadas por 600 segundos.

Na tabela seguinte encontra-se ilustrada a variação da média da temperatura média da água à saída do sistema para todo o ciclo.

Tabela 20- Temperatura média da água à saída para toda a simulação.

Porosidade	Tempo [s]	Temperatura média da água à saída [K]
0,25	9908	287,31
0,35	10000	287,68
0,45	10000	288,09
0,55	10350	288,31
0,65	11000	288,37
0,75	11880	288,31
1,00	37920	284,93

Para o caso em análise, em que o sistema opera até já não haver transferência de calor entre o tubo de cobre e a água, a porosidade que apresenta melhores resultados seria a de 0,65, contudo ao se observar o gráfico da Figura 50, pode-se constatar que este valor é muito influenciado por uma fase final do processo, em que a temperatura desce abruptamente, devido à pouca transferência de calor. Posto isto, optou-se por definir um ponto crítico a partir do qual se alteraria o processo de funcionamento do sistema, de descarga para carga. Consideraram-se dois critérios de seleção, um em que se procura um melhor aproveitamento da energia armazenada pela mistura e outro em que se dá prioridade à temperatura de saída da água.

Para o primeiro caso, definiu-se que o ponto em que o sistema atinge 90% do seu fluxo total, desprezando deste modo os últimos 10% de transferência de calor que o sistema fornece à água.

Os resultados obtidos para esta opção estão ilustrados na tabela seguinte.

Tabela 21- Valores dos resultados para o primeiro critério de paragem.

Porosidade	Calor PCM-Tubo ANSYS [kJ]	90% do Calor PCM-Tubo ANSYS [kJ]	Tempo até se obter 90% do Fluxo [s]	Temperatura média [K]	Aumento de Temperatura [K]
0,25	658,09	592,28	3630,00	293,57	6,26
0,35	724,19	651,77	3970,00	293,59	5,92
0,45	790,21	711,19	4380,00	293,43	5,35
0,55	856,24	770,61	4860,00	293,09	4,78
0,65	922,13	829,92	5450,00	292,73	4,36
0,75	986,93	888,24	6250,00	292,01	3,71
1,00	1152,31	1037,07	22510,00	285,92	0,98

Esta medida, tal como seria de prever, provoca uma melhoria significativa no valor médio da temperatura, bem como uma redução no tempo de simulação até se atingir o ponto pretendido. Os pontos extremos desta melhoria são os valores limite de porosidade, em que para 0,25 se obtém o maior aumento de temperatura e para 1,0 o menor. Apesar da porosidade que beneficia mais deste critério de seleção ser a mais baixa, esta não é a que apresenta a temperatura média mais elevada. Posto isto, caso se pretenda utilizar esta metodologia para determinar o ponto de alteração do ciclo, deve-se seleccionar a mistura com porosidade 0,35.

Para segundo critério de seleção, estudou-se qual seria a melhor opção caso se desse prioridade à temperatura média de saída da água, independentemente da quantidade de energia que se extraiu da mistura. Para se efetuar esta análise, teve de se definir um objetivo relativamente à temperatura média desejada, optou-se por estabelecer este valor em 293 K. Neste estudo comparou-se, para as diferentes porosidades, o tempo que levaria até se atingir a temperatura desejada e ainda a quantidade de fluxo restante, bem como a fração de líquido para este espaço temporal. Os resultados obtidos encontram-se representados na Tabela 22.

Tabela 22- Valores dos resultados para o primeiro critério de paragem.

Porosidade	Tempo para Temperatura média=293K [s]	Calor restante [%]	Fração líquido [%]
0,25	3950	6,00	0,00
0,35	4360	6,60	0,00
0,45	4740	7,00	0,00
0,55	5000	8,50	0,01
0,65	5070	13,60	0,04
0,75	4650	26,30	0,14
1,00	670	93,00	88,90

Neste estudo, pode verificar-se que há um aumento gradual do tempo para atingir a temperatura média pretendida até se atingir o valor máximo para uma porosidade de 0,65, a partir deste é notória uma queda deste parâmetro para as porosidades superiores. Relativamente às outras duas variáveis dispostas na tabela, é possível observar uma tendência crescente com o aumento da porosidade em ambas. Atendendo ao gráfico da Figura 41, onde se compara a transferência de calor da mistura de PCM e malha metálica para o tubo de cobre para as diferentes porosidades, este comportamento é o esperado visto que na zona de análise, entre os 3950 e os 5070 segundos, já se deu a mudança comportamental dos gráficos devido à maior quantidade de energia latente disponível e ao seu domínio no processo da transferência de calor, este aumento implica que as porosidades maiores demorem mais tempo para libertar toda o calor armazenado, restando assim mais fluxo e fração líquida nesta fase do processo de descarga.

Como se pode observar através desta análise, a solução ótima é variável consoante o tipo de critério adotado, sendo que para o primeiro em que se dá prioridade ao aproveitamento da energia armazenada a porosidade ideal seria a de 0.35, visto que é a que consegue fornecer ao sistema água a uma temperatura mais elevada até se atingir o ponto crítico, enquanto que para o segundo critério de seleção, onde se fixa a temperatura de saída em 293K, a melhor solução será aquela que consiga encontrar-se em funcionamento durante mais tempo para este valor. Deste modo, a porosidade de 0.65 é a solução mais viável.

Após se selecionar as melhores soluções, para os dois critérios, é possível proceder à análise do último parâmetro aplicável ao processo de descarga, o V_{40} . Pretendia-se comparar o valor de V_{40} de um sistema real de AQS, no qual a fonte de água fria é proveniente da rede e toma o valor de 283 K, com o caso em que se utilizava o modelo desenvolvido como fonte de água fria. Contudo devido à falta de dados experimentais válidos, para se estabelecer esta relação, optou-se por adaptar este critério. Face às duas hipóteses anteriormente referidas, utilizaram-se os parâmetros de $V_{90\%}$ e V_{293K} que definem, respetivamente, a quantidade de água que é disponibilizada até se atingir 90% da energia disponível e a quantidade fornecida a uma temperatura média de 293 K. Para se calcular este valor, visto que o caudal mássico da água é constante (0,24 L/min), é apenas necessário multiplicar este pelo tempo de simulação. Os casos em análise serão definidos da seguinte forma:

A_B

em que, A corresponde à hipótese para o ponto crítico e B à porosidade selecionada. Os casos selecionados, com base no que se referiu anteriormente, são: 90%_0,35, 90%_1,0, 293K_0,65 e 293K_1,0. Na tabela seguinte encontram-se demonstrados os resultados para as respetivas opções.

Tabela 23- Valores da quantidade de água fornecida para cada critério.

Porosidade	$V_{90\%}$ [L]	V_{293K} [L]
90%_0,35	397	-
90%_1,0	2251	-
293K_0,65	-	507
293K_1,0	-	67

Relativamente aos valores de $V_{90\%}$, é possível constatar que utilizar só PCM permite fornecer mais 467% litros de água, comparando com a melhor solução deste critério. Contudo, apesar de se conseguir extrair uma maior quantidade de água do sistema, a sua temperatura média, tal como já se observou anteriormente, será inferior em 7.68 K. Quanto ao V_{293K} , há uma clara vantagem por parte da opção que utiliza malha metálica, visto que esta consegue disponibilizar 657 % mais água a uma temperatura de 293 K do que no caso de se utilizar apenas PCM. De notar que ambos os resultados são bastante influenciados pelo tempo de descarga do sistema, visto que a quantidade de água que o sistema consegue fornecer, independentemente do critério de seleção utilizado, depende diretamente deste.

Para finalizar a análise deste modelo, procedeu-se à simulação do ciclo de carga do sistema até que se obtenha as condições iniciais do processo anterior. A análise deste processo, começou pela simulação do ciclo de descarga até ao ponto de paragem, após esta etapa estar concluída alterou a temperatura de entrada da água de 283 K para 313 K. O processo de carga decorreu até se obter uma temperatura uniforme de 313K. Esta simulação foi feita para as mesmas opções descritas na análise aos valores de $V_{90\%}$ e V_{293K} .

O comportamento do ciclo completo destes casos para cada uma das variáveis anteriormente analisadas no processo descarga encontra-se ilustrado entre as figuras 56 e 59.

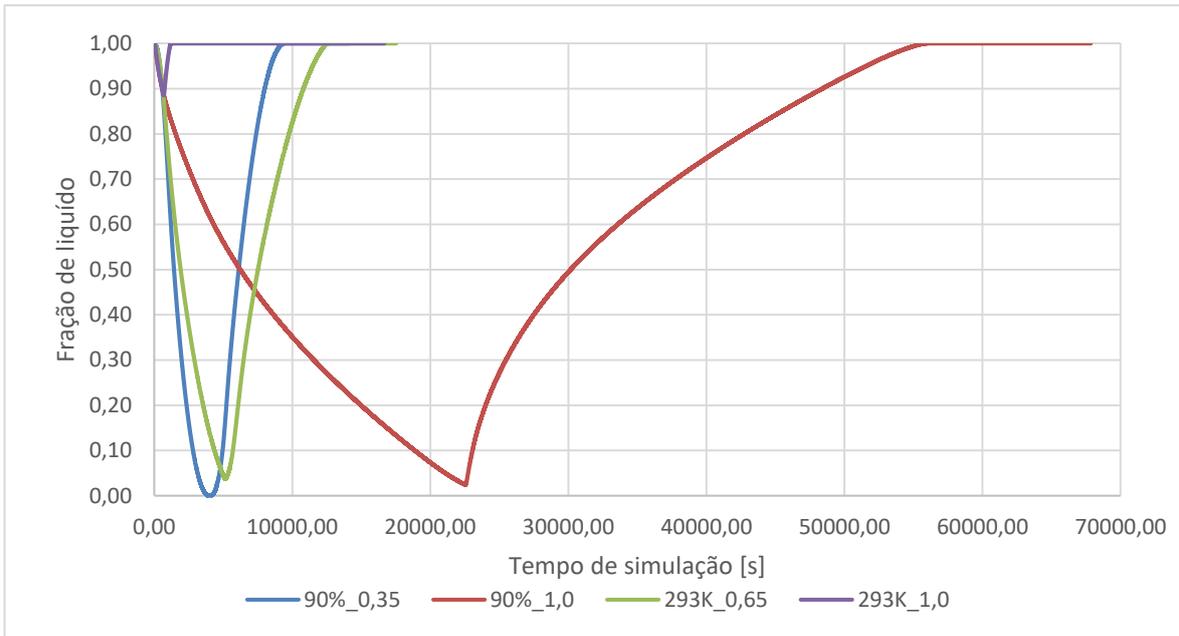


Figura 56- Variação da fração de líquido em todo o ciclo.

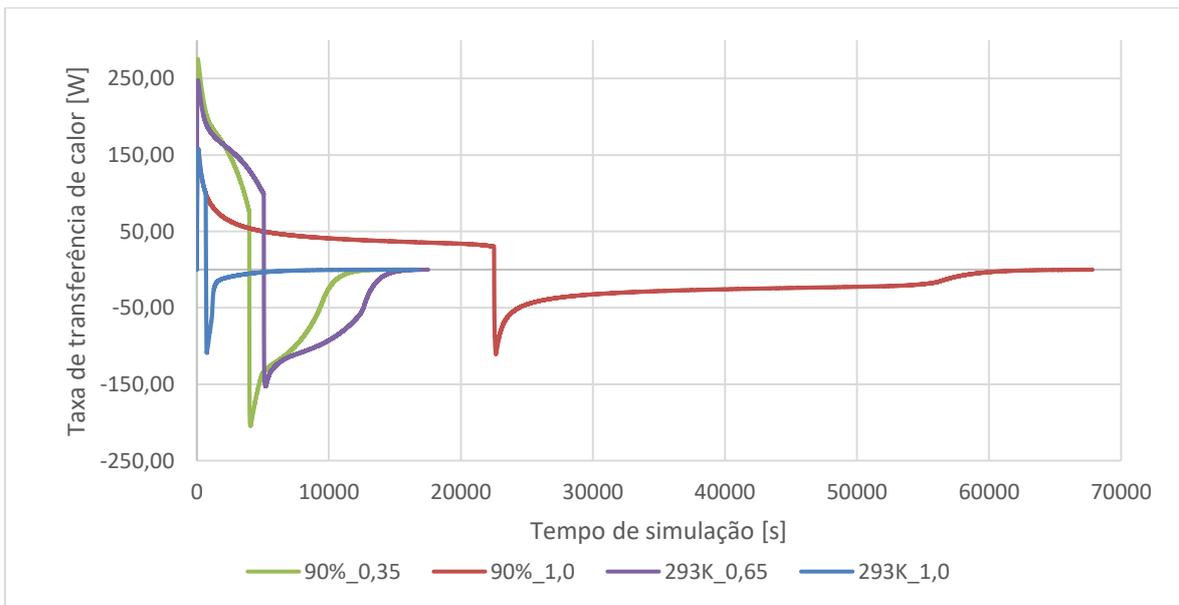


Figura 57- Variação da taxa de transferência de calor na zona PCM-Tubo em todo o ciclo.

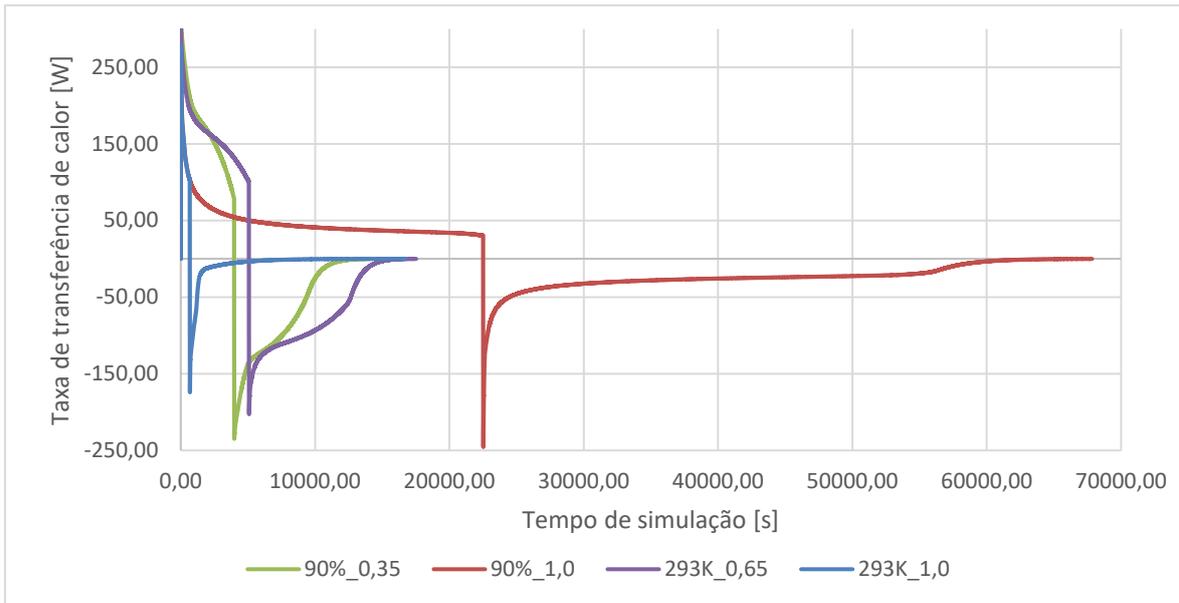


Figura 58- Variação da taxa de transferência de calor na zona Tubo-Água em todo o ciclo.

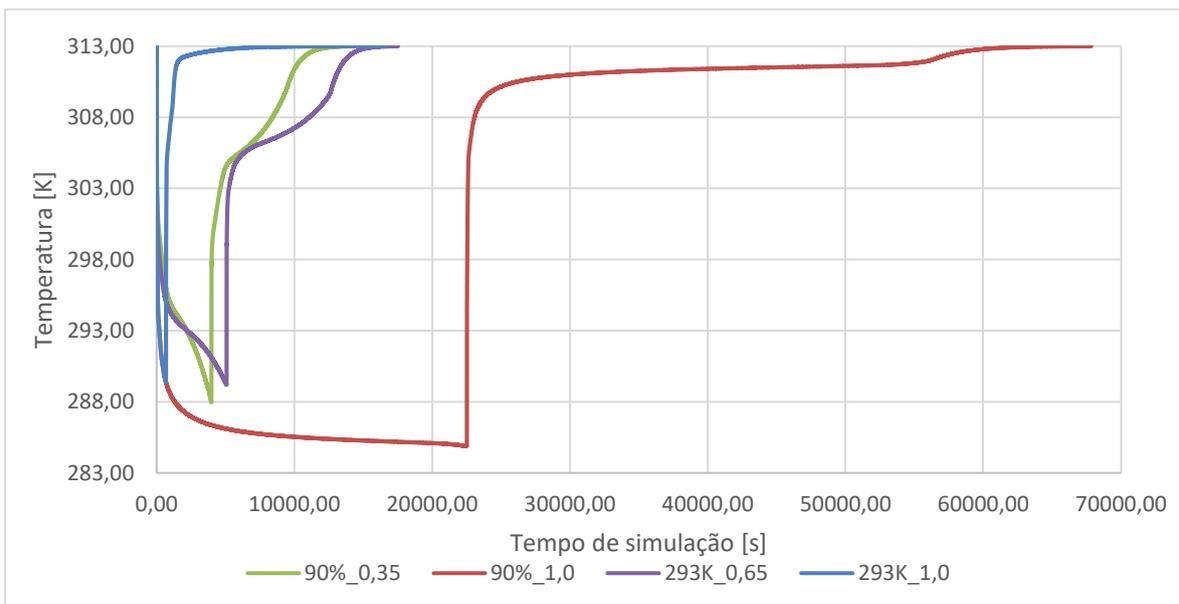


Figura 59- Variação da temperatura média de saída da água em todo o ciclo.

A alteração do ciclo dá-se a partir da alteração drástica do declive no gráfico, tendendo este para o infinito, devido à mudança drástica da temperatura de entrada da água. Este efeito só é notório para a transferência de calor e para a temperatura de saída da água, tal não se aplica à fração de líquido visto que, esta alteração repentina não terá um impacto instantâneo nesta. Após se iniciar o ciclo de carga, pode-se averiguar que o comportamento do sistema é praticamente simétrico ao observado anteriormente, quando se analisou o processo de descarga até ao instante que a transferência de calor do tubo de cobre para a água fosse 0.

Pode-se também constatar, que o processo de carga é muito mais moroso que o de descarga, esta diferença deve-se, em grande parte, ao facto de se

procurar atingir exatamente as mesmas condições para ambos os ciclos, obtendo um equilíbrio térmico em todo o sistema. Como se pode observar na Figura 59, tendo como exemplo o caso 90%_0,35, o PCM já se fundiu completamente ao fim de 5479 segundos, apesar da simulação se prolongar até aos 10120 segundos, contando apenas o processo de carga. Esta grande diferença deve-se à dificuldade em aquecer a zona final do PCM, visto que nesta zona a água já transferiu alguma da sua energia apresentando-se a uma temperatura substancialmente inferior à de entrada, ou seja, sendo a temperatura menor também transferirá uma menor quantidade de calor para o tubo de cobre, causando assim uma diferença de temperatura menor. Na Figura 60 encontra-se ilustrada a segunda metade do sistema e é possível observar a temperatura do sistema no instante em que todo o PCM está fundido. De notar que a primeira metade do sistema já se encontra toda estabilizada a 313 K de PCM.

Neste espaço temporal, desde os 5479 até aos 10120 do processo de carga, dá-se apenas a transferência de aproximadamente 6% de toda a energia que o PCM consegue armazenar até atingir a temperatura uniforme de 313K. O sistema demora assim quase o mesmo tempo a transferir esta pequena quantidade de energia como a transferir os restantes 94%.

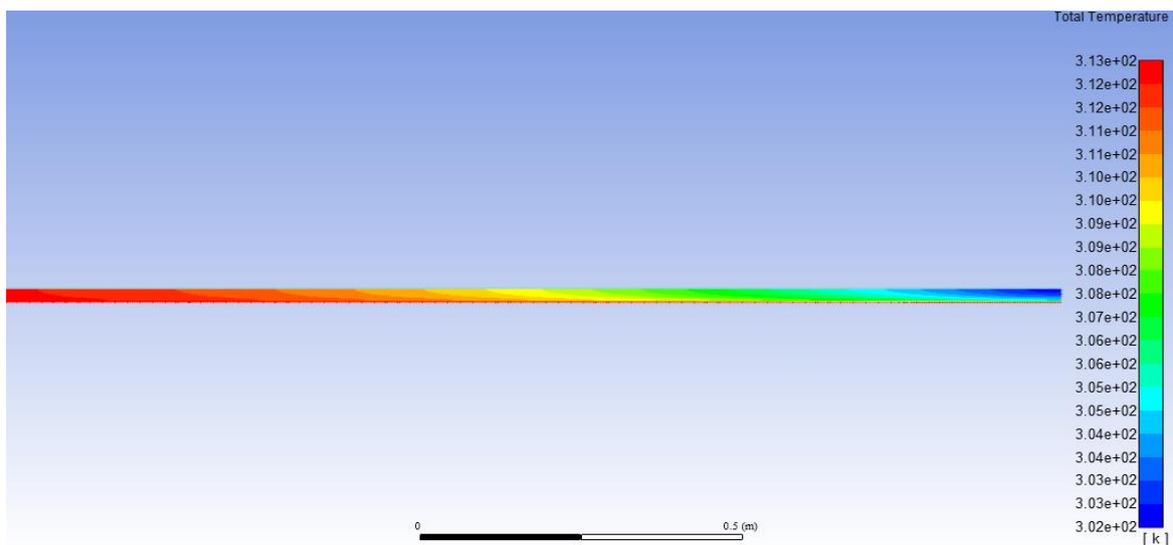


Figura 60- Processo de carga de 90%_0,35 quando o PCM se encontra completamente fundido.

Na tabela seguinte encontra-se resumido os tempos de carga para todas as opções analisadas.

Tabela 24- Tempos de carga para cada um dos casos selecionados.

Porosidade	Tempo de carga [s]
90%_0,35	10120,00
90%_1,0	45332,00
293K_0,65	12452,00
293K_1,0	15686,00

Para a primeira opção, é notório que o tempo de carga, à semelhança do que ocorre para o processo de descarga, é substancialmente menor para o caso em que se utiliza malha metálica, reduzindo o tempo de carga do PCM em 348%. Este efeito deve-se, de forma intuitiva, ao aumento do valor da condutividade térmica proveniente da utilização da malha metálica facilita a transferência de calor da água para o tubo de cobre e deste para a mistura.

Quanto à segunda opção, não faz sentido realizar-se uma comparação relativamente ao tempo de carga, visto que as duas opções não operam até ao mesmo ponto energético. De notar que, apesar da 293K_1,0 descarregar apenas 7% de toda a sua energia armazenada numa primeira etapa, demora mais tempo que a 293K_0.65 devido à sua condutividade térmica ser muito reduzida.

Analisando de uma forma global os resultados obtidos, é possível afirmar que a junção da malha metálica ao PCM, tal como seria de esperar, apresenta melhorias na condutividade térmica e na transferência de calor por parte deste material, acelerando ambos os seus processos de carga e descarga.

No primeiro caso, em que se pretende utilizar 90% da energia armazenada no material, sendo o critério de seleção a temperatura média da água à saída do sistema. Para a porosidade selecionada (0,35), há uma melhoria de 1945% no valor da condutividade térmica, dá-se uma melhoria de 7,68 K relativamente ao caso em que se utiliza apenas PCM, no que diz respeito ao tempo de carga e descarga ocorre uma melhoria de 348% e 467%, respetivamente.

No segundo, em que se procura obter uma temperatura média de 293 K, independentemente da energia utilizada, sendo a seleção do melhor caso o tempo de operação do sistema até se atingir esta temperatura, a porosidade selecionada foi 0,65 e para esta há um aumento de 1019% no valor da condutividade térmica. Há uma melhoria de 4400 segundos do tempo de descarga, correspondendo a um aumento de aproximadamente 656 %, relativamente ao caso em que só se utilize PCM.

3.6. Síntese

O sistema a analisar nesta dissertação consiste numa serpentina de cobre, onde passará água, contida num cilindro com funções meramente isoladoras, esta estará embebida numa mistura de parafina com uma malha metálica de aço. Para facilitar a análise computacional deste modelo aplicaram-se diferentes simplificações do ponto de vista dimensional (3-D para 2-D), geométrico (modelou-se apenas metade da geometria), físico (propriedades constantes para diferentes temperaturas) e ainda a determinação de propriedades equivalentes para a mistura utilizada.

Ao longo da formulação do problema surgiram diversas variáveis que necessitam de especial a análise, como é o caso da porosidade da malha metálica

e a da velocidade de entrada do fluido. Para a primeira consideraram-se valores entre 0,25 e 0,75 e ainda o caso em que só se tenha PCM, ou seja, porosidade igual a 1,0. Para a velocidade de entrada do fluido, começou-se por admitir que a velocidade seria de 3.54 m/s, correspondente a um caudal convencional para um sistema AQS de 6 L/min. Contudo, para esta a temperatura à saída da água não era ideal, para o objetivo desta dissertação, uma vez que apesar de ocorrer um aumento de temperatura, este não era suficiente para ser alvo de um estudo mais aprofundado. Para combater este efeito procurou-se diminuí-la para um valor consideravelmente inferior. Ao reduzir esta propriedade, influenciou-se de mesma forma o caudal de água que entraria para o sistema de AQS, tornando este substancialmente inferior ao de saída. Para solucionar este problema, optou-se por alterar o sistema, ou seja, em vez de o sistema possuir apenas um tubo, com as dimensões anteriormente definidas, passará a ter 25 iguais a este onde circulará água à velocidade de 0.14 m/s, correspondente a um caudal de 0,24 L/min, garantindo assim um caudal volúmico de 6L/min.

Com a definição desta propriedade foi possível proceder a uma análise completa do sistema e observar o impacto que a porosidade da malha metálica tem no seu desempenho. Para tal, analisaram-se os valores obtidos no ciclo de descarga relativamente à fração de líquido da mistura de PCM e malha de aço, transferência de calor desta zona para o tubo de cobre e deste para a água e ainda a temperatura média da água à saída.

Todas as variáveis acima referidas estão relacionadas entre si, comportando-se todas de forma idêntica. Numa fase inicial, predomina a transferência de calor sensível, este processo é favorável às porosidades mais baixas, uma vez que estas têm condutividade térmica superior, a partir de um certo ponto, em que começa a dar-se o domínio da fase latente da transferência de calor, ocorre uma alteração do declive das curvas e uma inversão das mesma, visto que as porosidades mais elevadas são as que têm mais energia armazenada pois têm mais PCM contido na mistura.

Com base nos resultados obtidos inicialmente, em que se deixava o modelo descarregar toda a sua energia, não era possível obter conclusões válidas e relevantes para esta dissertação, visto que a temperatura de saída da água era muito baixa. Posto isto, optou-se por selecionar duas hipóteses para o fim do ciclo de descarga distintas. O primeiro baseia-se em aproveitar a energia armazenada pelo PCM, levando a que este descarregue 90% desta, o critério de seleção será a temperatura média de saída da água. Quanto ao segundo, procura-se obter uma temperatura de 293 K independentemente da quantidade de energia libertada.

Para estas hipóteses as porosidades selecionadas foram, respetivamente, 0,35 e 0,65. Comparou-se cada uma destas com o caso em que se utiliza apenas PCM de modo a quantificar as melhorias da malha metálica no sistema.

Após se relacionar todas as hipóteses acima referidas é possível afirmar que a introdução da malha metálica, tal como esperado, melhora o processo de transferência de calor visto que, o tempo para conclusão dos processos de carga e diminui drasticamente, apresentando taxas de transferência mais elevadas e comprova-se um aumento drástico dos valores da condutividade térmica, relativamente ao caso em que se utiliza apenas PCM. Pode-se verificar o mesmo comportamento relativamente à quantidade de água que é possível fornecer, seguindo os critérios de seleção referidos.

Capítulo 4 - Conclusão e Trabalhos Futuros

O aumento do consumo energético tem levado a uma procura cada vez maior de fontes de energia alternativas em particular renováveis, contudo, estas apresentam uma grande intermitência relativamente à sua disponibilidade. As variações de oferta e procura levam a uma necessidade crescente em armazenar energia para que esta seja utilizada sempre que necessário. O armazenamento de energia latente, com recurso a materiais de mudança de fase, tem vindo a ser cada vez mais estudado devido à sua grande variedade e versatilidade, sendo este o objeto central desta dissertação. A parafina, PCM utilizado neste estudo, tem como principal desvantagem a baixa condutividade térmica. Para melhorar as características térmicas dos sistemas onde esta possa ser integrada, nomeadamente a condutividade térmica e a transferência de calor, combinou-se este material com uma malha metálica de aço. As propriedades deste compósito foram calculadas através de formulações analíticas que permitissem determinar o valor equivalente destas propriedades, simplificando o problema no que se refere à sua análise computacional.

O sistema a analisar consiste num permutador tubular composto por dois tubos de cobre concêntricos, em que o fluido operante (água) escoia no tubo interior estando o espaço compreendido entre os dois tubos preenchido pelo compósito malha de aço e PCM. Todos estes componentes estão envolvidos por um cilindro isolante exterior, e ligações ao circuito de AQS nos topos. Da formulação do problema surgiram duas variáveis que influenciam diretamente o comportamento do sistema, a velocidade de entrada do fluido e a porosidade da malha metálica.

Após se completar a modelação computacional deste modelo, foi possível iniciar as simulações e proceder à análise de resultados. Nesta, foram apresentados os resultados do estudo paramétrico analítico relativo à velocidade de entrada do fluido, bem como ao efeito da porosidade em todos os parâmetros a analisar. Começou-se por observar o ciclo de descarga e o conseqüente o aquecimento da água, analisando, para as diferentes porosidades, os valores de fração de líquido no PCM, a transferência de calor entre os componentes do sistema e a temperatura média da água à saída. Uma vez que os resultados não eram satisfatórios optou-se por definir critérios de paragem que otimizassem o funcionamento do sistema. Após se selecionar as porosidades que apresentam melhores resultados, para cada um dos critérios, calculou-se o volume de água fornecido por estas.

Na sequência do trabalho desenvolvido é possível afirmar que se conseguiu alcançar os objetivos anteriormente traçados, apesar de não se ter verificado experimentalmente os resultados obtidos, visto que se conseguiu definir quais as principais desvantagens dos materiais utilizados, eliminando-as, e analisar os processos de transferência de calor associados ao armazenamento de energia recorrendo a materiais de mudança de fase. Tendo por base todo o trabalho realizado é possível retirar as seguintes conclusões desta dissertação:

- **Malha metálica de aço melhora as propriedades do PCM:** a utilização da malha de aço consegue dissolver a baixa condutividade térmica, característica da parafina, aumentando o seu valor em 724% para o caso em que se utiliza menos malha metálica e 2295% para o caso contrário. Com este aumento obtém-se também uma melhoria na transferência de calor ao acelerar os processos

de carga e descarga do material, sendo esta melhoria variável dependendo da hipótese selecionada para a alteração do ciclo. Para a primeira, em que se dá prioridade à energia libertada, o tempo do processo de descarga é reduzido entre 260% e 565%, sendo a maior porosidade a que apresenta a menor melhoria e vice-versa. O tempo de carga foi apenas calculado para a porosidade que apresenta os melhores resultados, neste caso a de 0,35 visto que é a que fornece uma maior temperatura da água, e para o caso de se utilizar apenas PCM, obtendo uma redução de 348% do tempo do processo. Para a segunda hipótese, onde se fixou a temperatura média de saída da água, verifica-se um aumento do tempo de descarga variável entre 490% e 657%, sendo o menor valor correspondente à menor porosidade e o maior à porosidade que apresenta melhores resultados para este critério, ou seja, consegue fornecer água a 293K durante um maior período temporal.

- **A utilização da malha metálica melhora a quantidade de água que pode ser fornecida:** Após se selecionar as porosidades que apresentam melhores resultados, para ambas as opções, procedeu-se ao cálculo do volume de água que estas poderiam fornecer, respeitando os seus critérios de mudança de processo, com parando estes valores, com os obtidos caso se utiliza-se só PCM. Para a primeira opção, apesar de se averiguar que utilizando apenas PCM se consegue fornecer mais 1854 L, a temperatura média da água, que é o critério de seleção definido, é 7,68K inferior, relativamente ao caso em que se utiliza uma malha de aço com porosidade de 0,35. Na segunda hipótese, pode observar-se um aumento do volume de água de 440 L face à utilização de apenas PCM.

- **Versatilidade do sistema utilizado:** Ao longo de toda a dissertação foi notória a versatilidade que este sistema possui. É possível definir diversos critérios de paragem para os diferentes ciclos de carga e descarga, que dependem exclusivamente da sua utilização. Nesta dissertação, optou-se por utilizar a temperatura média da água e a quantidade de energia libertada, contudo seria possível realizar o mesmo estudo caso se definisse critérios como, por exemplo, a fração de líquido ser igual a 0. Mesmo para os critérios utilizados é possível haver variações destes, alterando os valores escolhidos para cada uma das opções.

Devido à divergência desta dissertação com a sua versão experimental, não foi possível verificar de forma experimental as formulações utilizadas e os resultados obtidos. Indo de encontro a esta lacuna, no futuro seria interessante proceder-se à análise experimental do modelo computacional desenvolvido nesta dissertação, acoplando-o a um sistema real de AQS com o intuito de averiguar o efeito deste modelo no V_{40} do mesmo, podendo assim cumprir com o objetivo em falta. Seria também interessante analisar o funcionamento deste modelo de forma isolada, de modo a verificar se os valores obtidos são validados de forma experimental.

Para esta dissertação, utilizou-se apenas a combinação de um tipo de PCM com uma malha metálica de aço. Devido à grande variedade dos dois componentes, seria interessante realizar outras misturas diferentes, ou optar por outras soluções para a melhoria das propriedades do PCM, comparando os resultados obtidos para a mesma metodologia. Seguindo esta linha de pensamento,

seria também interessante observar o impacto que o material da serpentina tem no processo de transferência de calor, bem como das temperaturas iniciais do sistema.

Ao longo da dissertação foi possível observar situações em que o tempo de simulação é prolongado em demasia devido à dificuldade em conseguir levar o calor às zonas finais do tubo. Posto isto, seria relevante estudar a distribuição de temperaturas ao longo de toda a superfície da água, de modo a se conseguir averiguar se, para o sistema adotado, há um sobredimensionamento da serpentina, ou seja, qual seria o comprimento do tubo de cobre que daria um melhor desempenho ao sistema, averiguando deste modo, a partir de que comprimento é que a diferença nos resultados, do ponto de vista térmico e da quantidade de água disponibilizada, pode ser desprezada reduzindo assim a quantidade material utilizado e as dimensões do sistema.

Referências

(JIN), Joint Implementation Network - **Energy Storage: Phase Change Materials for Thermal Energy Storage** [Em linha] [Consult. 21 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:http://www.climatetechwiki.org/technology/jiqweb-pcm-0>.

ALVA, Guruprasad; LIN, Yaxue; FANG, Guiyin - An overview of thermal energy storage systems. **Energy**. . ISSN 03605442. 144:2018) 341–378. doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037.

ANSYS - Ansys help 19.0. [s.d.].

ASHGRIZ, Nasser; MOSTAGHIMI, Javad - An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Em **Fluid Flow Handbook**. Toronto, Ontario : [s.n.]

ATAL, Aditya *et al.* - Effect of porosity of conducting matrix on a phase change energy storage device. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 93:2016) 9–16. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.033.

BARNES, Howard A. - **Viscosity**. 1^a ed. ed. [S.I.] : Aberystwyth: The University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2002. ISBN 0-9538032-2-8.

BERGMAN, Theodore L. *et al.* - **Fundamentals of heat and mass transfer**. 7^a ed. New Jersey : Sons, John Wiley &, 2011. ISBN 9780470501979.

BHATTACHARYA, A.; CALMIDI, V. V.; MAHAJAN, R. L. - Thermophysical properties of high porosity metal foams. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 45:5 (2002) 1017–1031. doi: 10.1016/S0017-9310(01)00220-4.

BOOMSMA, K.; POULIKAKOS, D. - On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 44:4 (2001) 827–836. doi: 10.1016/S0017-9310(00)00123-X.

BORGNAKKE C., SONNTAG, R. E. - **Fundamentals of Thermodynamics**. 8^a ed ed. [S.I.] : New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 978-1-118-13199-2.

BRITISH STANDARDS INSTITUTE - **Methods for determination of the viscosity of liquids**. [S.I.] : British Standards Institute, 1976

CALMIDI, V. V.; MAHAJAN, R. L. - The Effective Thermal Conductivity of High Porosity Fibrous Metal Foams. **Journal of Heat Transfer**. 1999). doi: 10.1115/1.2826001.

CARLOS - **Hipocausto: O piso radiante com mais de 2000 anos** [Em linha], atual. 2013. [Consult. 22 set. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://nergiza.com/hipocausto-el-suelo-radiante-con-mas-de-2000-anos/>.

DINÇER, Ibrahim; HAMUT, Halil S.; JAVANI, Nader - **Thermal management of electric battery systems**. [S.l.] : Wiley, 2017. ISBN 9781118900215.

DUTIL, Yvan *et al.* - A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 15:1 (2011) 112–130. doi: 10.1016/j.rser.2010.06.011.

GHAREBAGHI, Maryam; SEZAI, I. - Enhancement of heat transfer in latent heat storage modules with internal fins. **Numerical Heat Transfer; Part A: Applications**. . ISSN 10407782. 53:7 (2008) 749 - 765. doi: 10.1080/10407780701715786.

GOLIBERSUCH, DC; HERRICK, S. - **Quantitative behavior of a new latent heat storage device for solar heating/cooling systems**. [S.l.] : Quantitative behavior of a new latent heat storage device for solar heating/cooling systems, 1977

GROULX, Dominic; MURRAY, Re - Modeling Convection During Melting of a Phase Change Material. **Proceeding of the COMSOL Conference Boston 2011**. (2011) 7p.

GÜNTHER, Eva *et al.* - Subcooling in PCM emulsions - Part 2: Interpretation in terms of nucleation theory. **Thermochimica Acta**. . ISSN 00406031. 522:1–2 (2011) 199–204. doi: 10.1016/j.tca.2011.04.027.

HABAULT, Dominique - Numerical Techniques Boundary Integral Equation Methods - Learn more about Galerkin Methods Galerkin Methods. **Acoustics**. (1999).

HUANG, Li *et al.* - Subcooling in PCM emulsions-Part 1: Experimental. **Thermochimica Acta**. . ISSN 00406031. 509:1–2 (2010) 93–99. doi: 10.1016/j.tca.2010.06.006.

INFOPÉDIA - **Artigo de apoio Infopédia - fogo** [Em linha] [Consult. 20 set. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://www.infopedia.pt/\$fogo>.

JAGUEMONT, Joris *et al.* - Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review. **Applied Thermal Engineering**. . ISSN 13594311. 132:2018) 308–320. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.097.

KUHN, Wilfried - **Physik**. 1ª ed ed. [S.l.] : Braunschweig: Westermann, 1972. ISBN 3- 141510- 96-2.

L.M.RODRIGUES - **Mecânica dos Flúídos** [Em linha], atual. 2013. Disponível em WWW:<URL:http://www.engbrasil.eng.br/pp/mf/aula10.pdf>.

LAUGHLIN, Robert B. - Pumped thermal grid storage with heat exchange
ARTICLES YOU MAY BE INTERESTED IN Pumped thermal grid storage with heat exchange. **J. Renewable Sustainable Energy**. 9:2017) 44103. doi:

10.1063/1.4994054.

LIU, Ming; SAMAN, Wasim; BRUNO, Frank - Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 16:4 (2012) 2118–2132. doi: 10.1016/j.rser.2012.01.020.

LYNLEE - **How Phase Change Materials (PCM) Works** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 21 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://steemit.com/science/@badet/how-phase-change-materials-pcm-works>.

MAT, Sohif *et al.* - Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal–external fins. **Energy Conservation and Management**. 74:2013) 223–236.

MAXWELL, J. C. - **A Treatise on Electricity and Magnetism**. New York : Oxford University Press, 1954

MEHLING, Harald; CABEZA, Luisa F. - **Heat and cold storage with PCM**. 1^a ed. Berlin : Springer, 2008. ISBN 9783540685562.

MESALHY, Osama *et al.* - Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix. **Energy Conversion and Management**. . ISSN 01968904. 46:6 (2005) 847–867. doi: 10.1016/j.enconman.2004.06.010.

NÉMETH, G. - Chebyshev expansions for Fresnel integrals. **Numerische Mathematik**. . ISSN 0029599X. 7:4 (1965) 310–312. doi: 10.1007/BF01436524.
POLEZHAEV, Yury V. - Thermal conductivity. 2011). doi: 10.1615/AtoZ.t.thermal_conductivity.

REIS, Pedro - **Vantagens e desvantagens do piso radiante** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 22 set. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-piso-radiante-145051/>.

ROZANNA, D. *et al.* - Fatty Acids as Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage: A Review. **International Journal of Green Energy**. . ISSN 1543-5075. 1:4 (2004) 495–513. doi: 10.1081/ge-200038722.

SHABGARD, H. *et al.* - High temperature latent heat thermal energy storage using heat pipes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 53:15–16 (2010) 2979–2988. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.035.

SHARMA, Atul *et al.* - Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 13:2 (2009) 318–345. doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.

SOPRANI, Stefano *et al.* - Design and testing of a horizontal rock bed for high temperature thermal energy storage. **Applied Energy**. . ISSN 03062619. 2019). doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113345.

SUHAS, Patankar - **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. ISBN 0891165223, 9780891165224.

TYAGI, V V *et al.* - Experimental study of supercooling and pH behaviour of a typical phase change material for thermal energy storage. **Indian Journal of Pure and Applied Physics**. . ISSN 0019-5596. 49:2 (2011) 117–125.

U.S DEPARTMENT OF ENERGY'S OFFICE - **Power Tower System Concentrating Solar Power Basics** [Em linha], atual. 2013. [Consult. 21 fev. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://www.energy.gov/eere/solar/articles/power-tower-system-concentrating-solar-power-basics>.

VERSUTI, Marcio - **Capítulo 7** [Em linha], atual. 2011. Disponível em WWW:<URL:https://pt.slideshare.net/EM524CFEM/captulo-7-9887943>.

VILANOVA, Luciano Caldeira - Mecânica dos Fluidos. **Revista de Ciência Elementar**. Santa Maria. 6:4 (2011). ISSN 2183-1270.

XU, H. J. *et al.* - Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications. **Chemical Engineering Science**. . ISSN 00092509. 195:2019a) 462–483. doi: 10.1016/j.ces.2018.09.045.

XU, H. J. *et al.* - Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications. **Chemical Engineering Science**. . ISSN 00092509. 2019b). doi: 10.1016/j.ces.2018.09.045.

YILBAS, Bekir S. *et al.* - **Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review** [Em linha]. [S.l.] : Elsevier Ltd, 2017 Disponível em WWW:<URL:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.169>.

ZHANG, Peng *et al.* - Experimental and Numerical Study of Heat Transfer Characteristics of a Paraffin/Metal Foam Composite PCM. **Energy Procedia**. . ISSN 18766102. 75:2015) 3091–3097. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.637.

Anexos

Anexo A.1 Ficha técnica da parafina utilizada

Data sheet



RT28HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

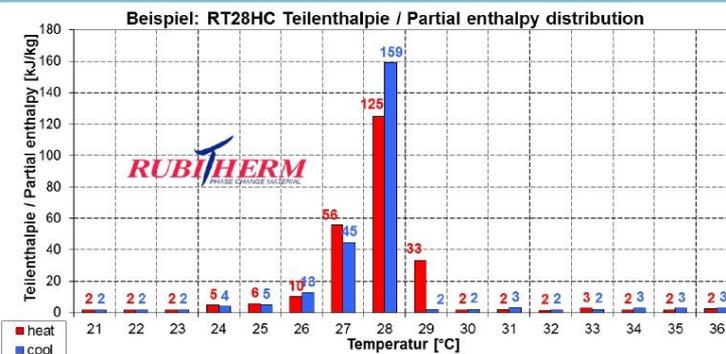
We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

	Typical Values	
Melting area	27-29	[°C]
	main peak: 28	
Congeeing area	29-27	[°C]
	main peak: 27	
Heat storage capacity ± 7,5%	250	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 21°C to 36°C.	70	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at 15 °C	0,88	[kg/l]
Density liquid at 40 °C	0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point	165	[°C]
Max. operation temperature	50	[°C]



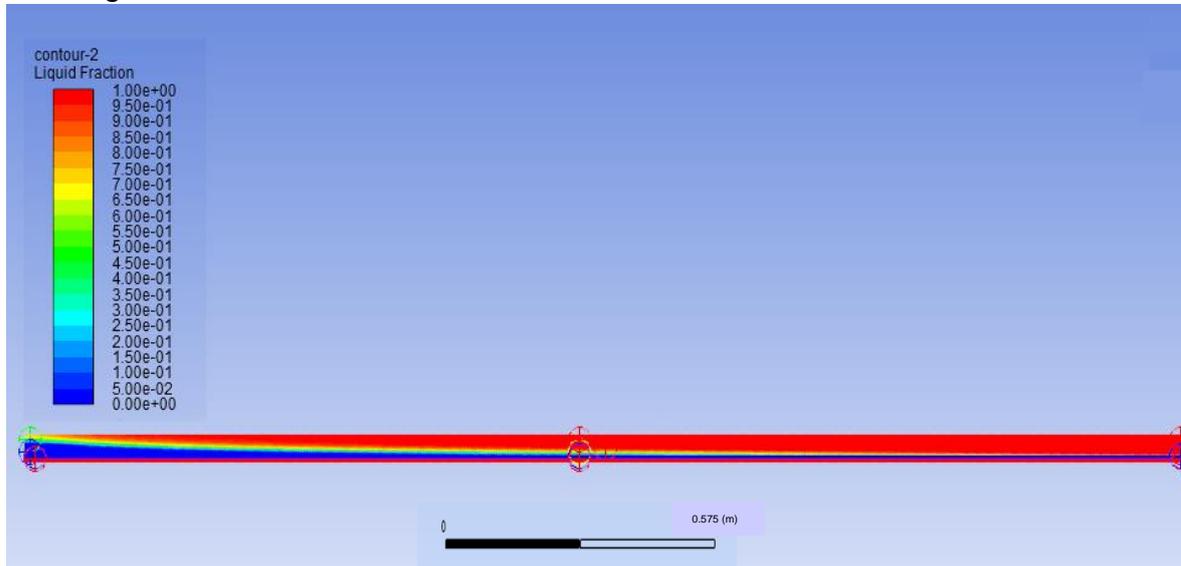
Rubitherm Technologies GmbH
 Imhoffweg 6
 D-12307 Berlin
 Tel: +49 (30) 7109622-0
 Fax: +49 (30) 7109622-22
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 06.08.2018

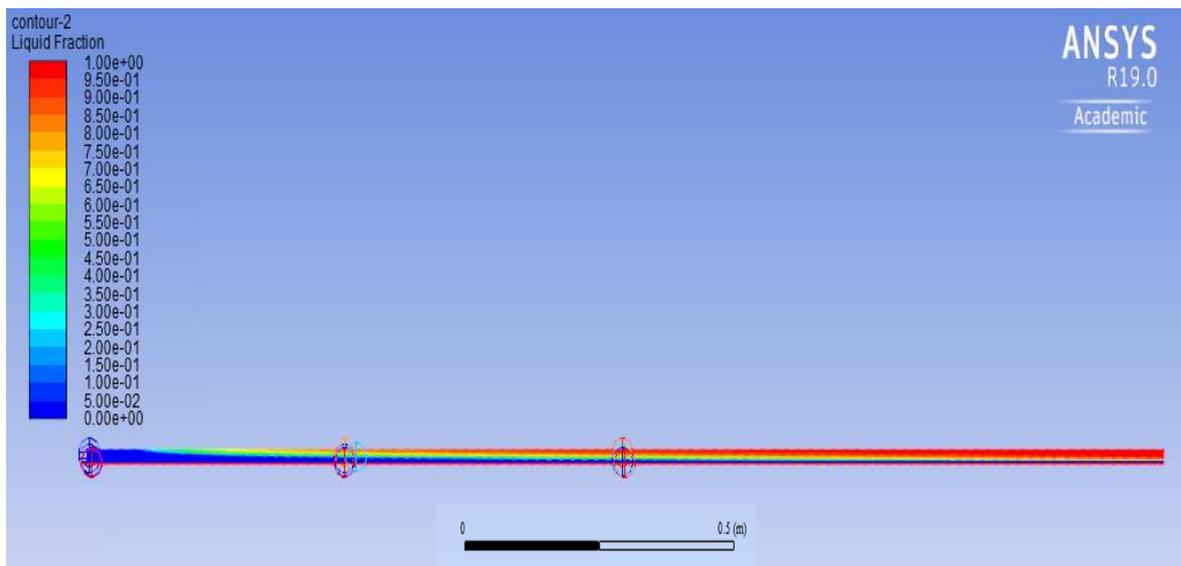
*Measured with 3-layer-calorimeter.

Anexo A.2 Fração de líquido no ciclo de descarga de 600 em 600 segundos

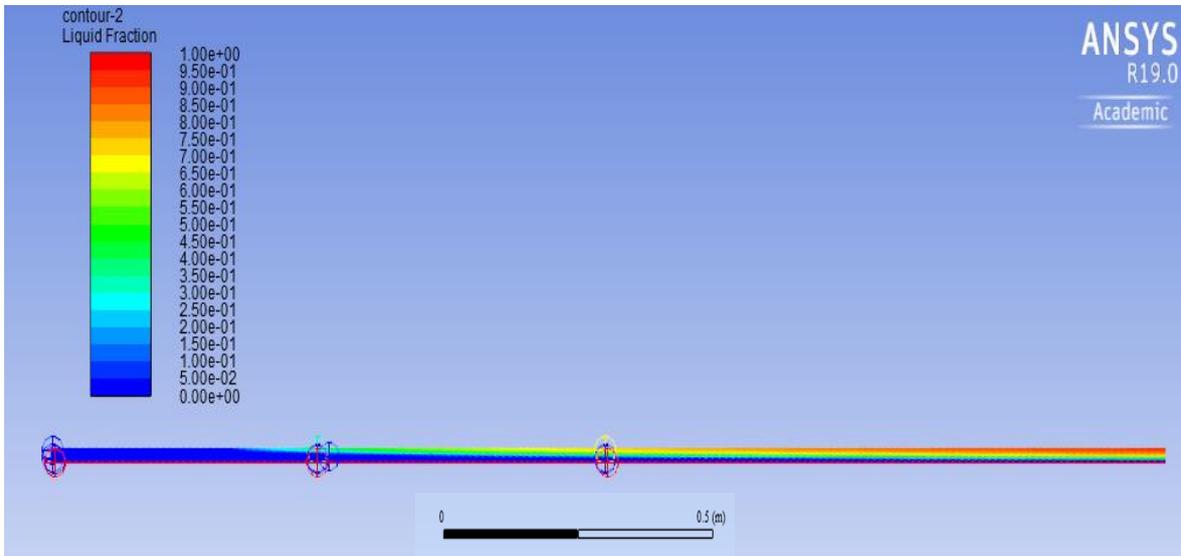
- 600 segundos



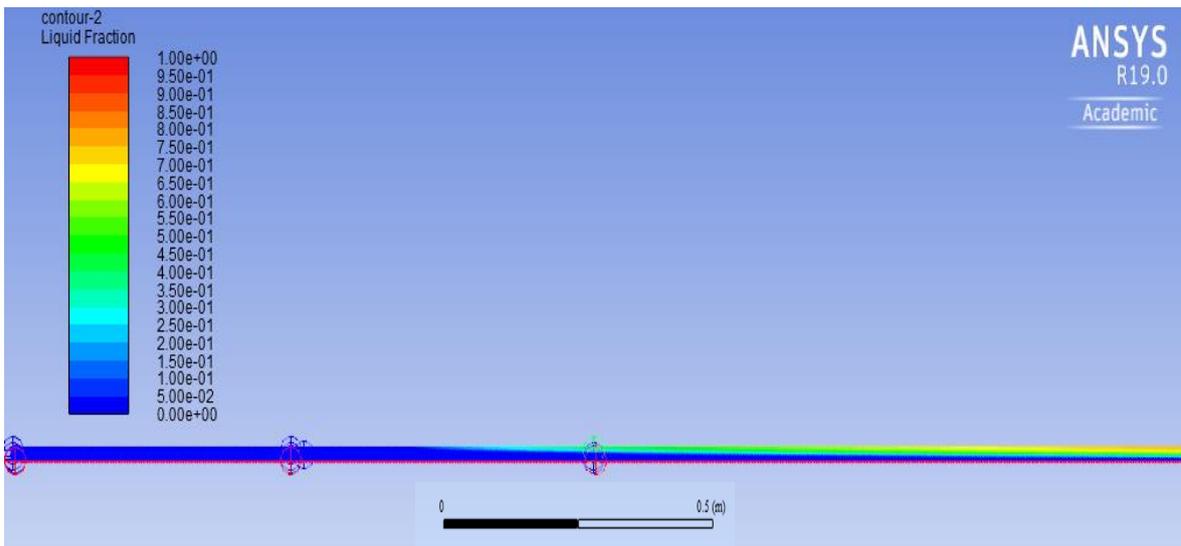
- 1200 segundos



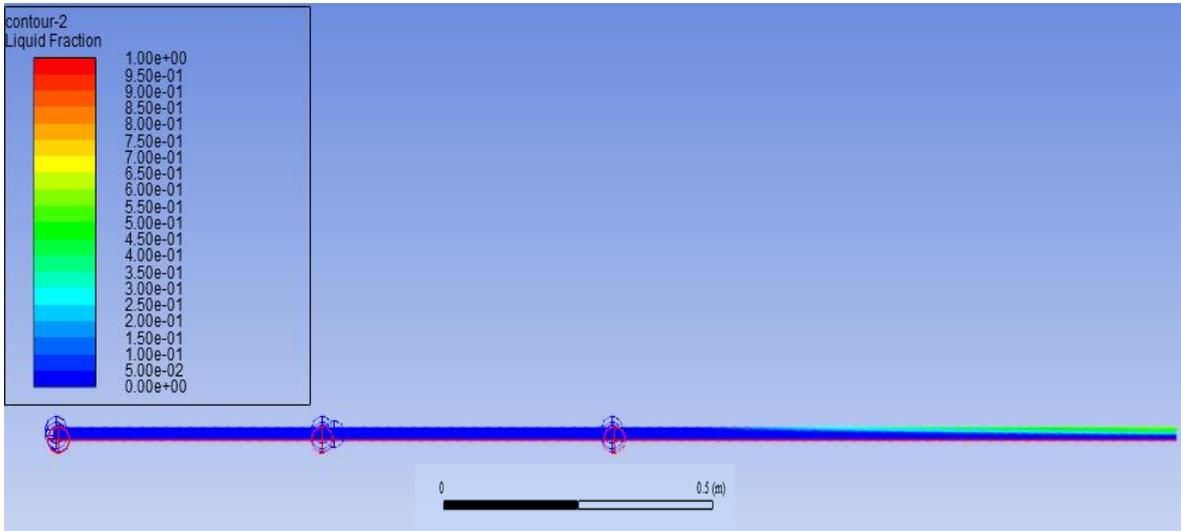
- 1800 segundos



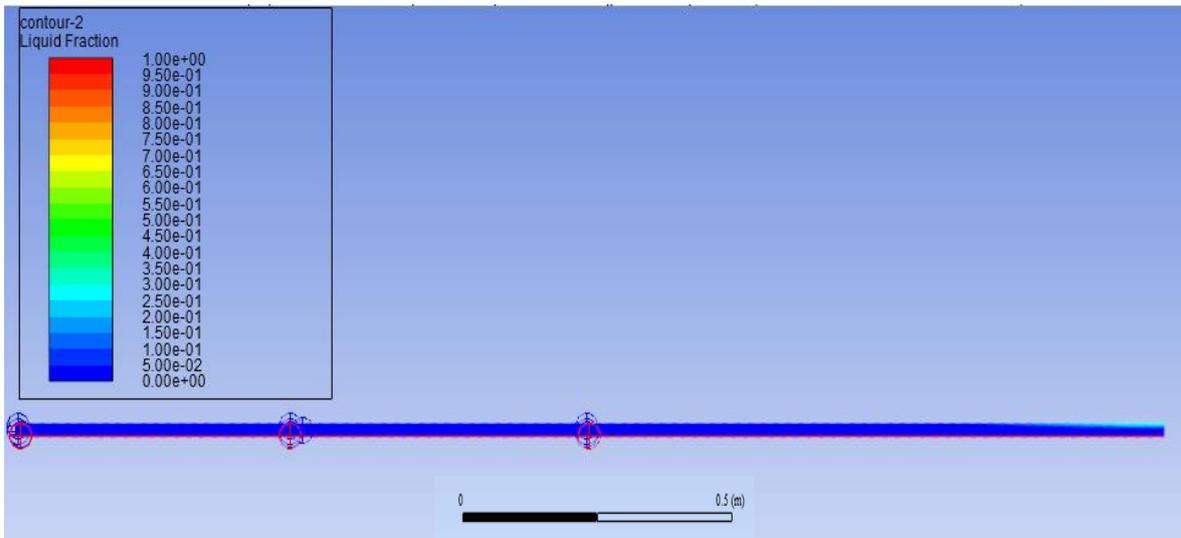
- 2400 segundos



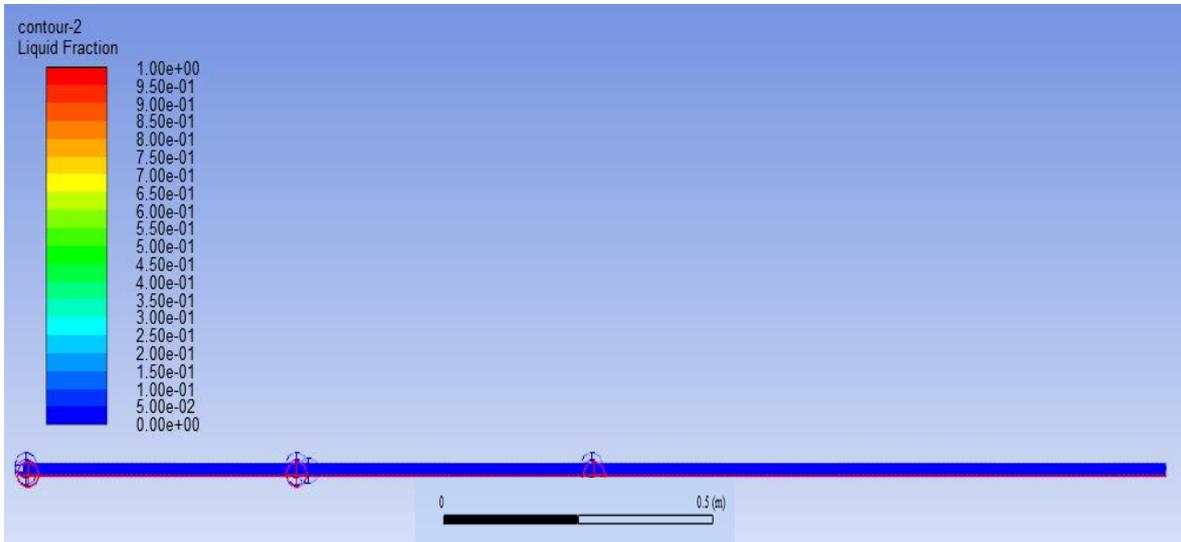
- 3000 segundos



- 3600 segundos

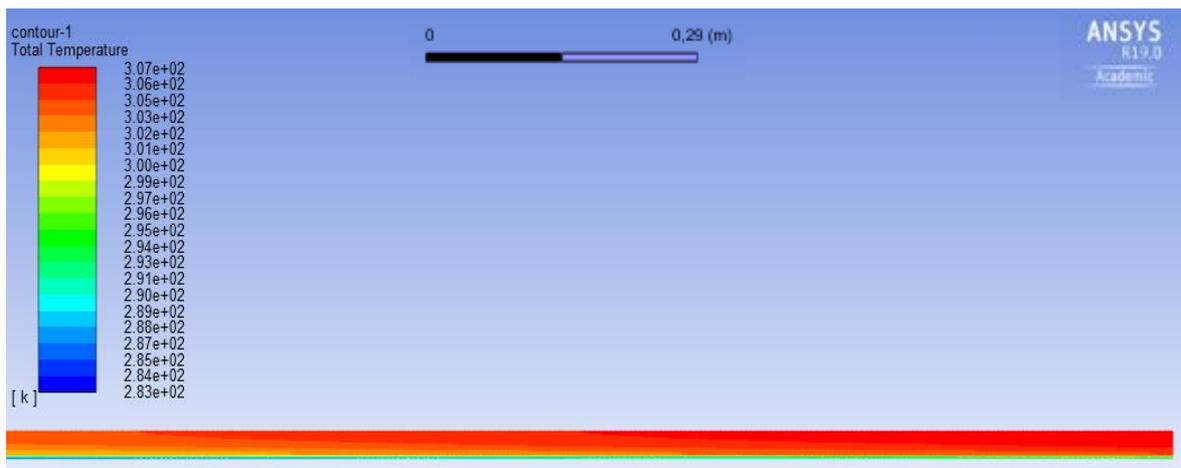
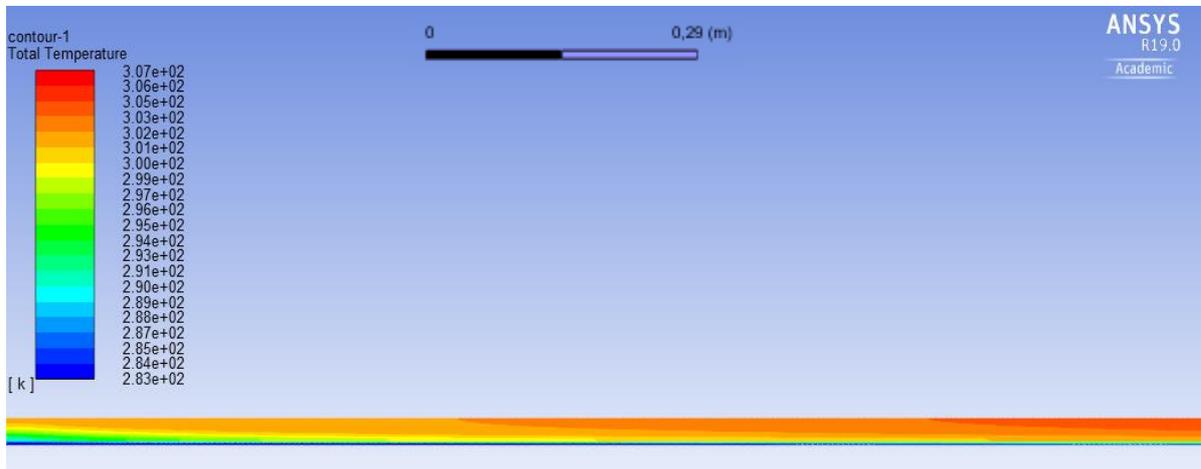


- 4200 segundos

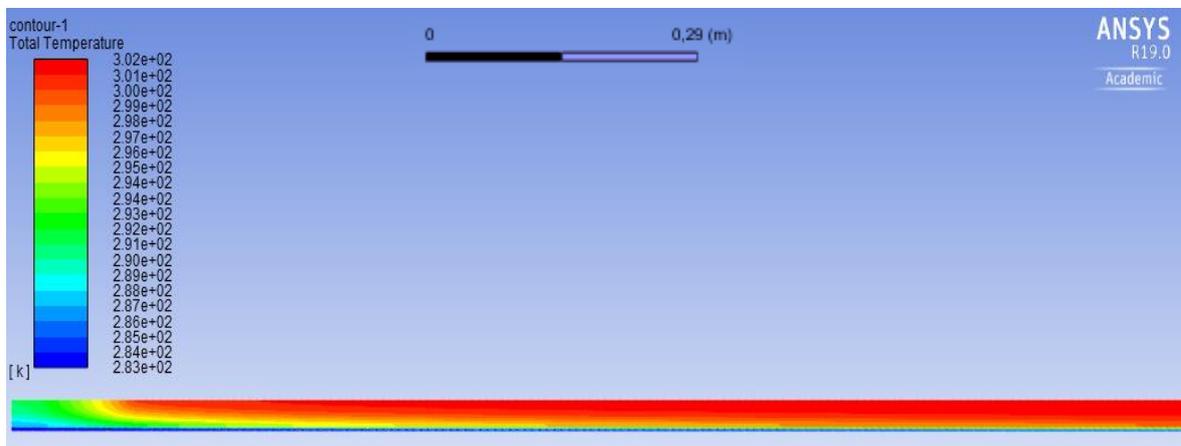


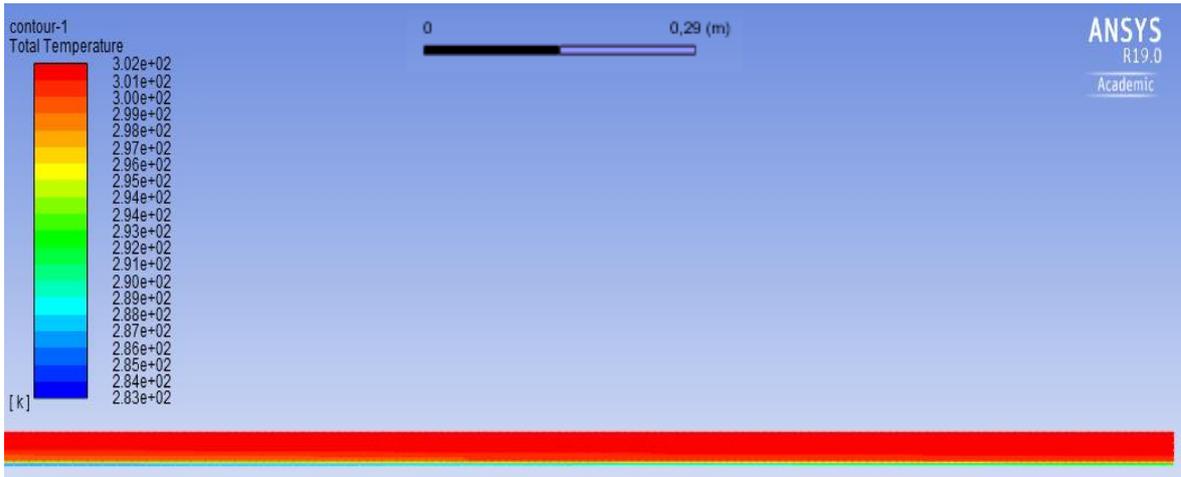
Anexo A.3 Distribuição da temperatura do sistema de 600 em 600 segundos para o ciclo de descarga

- 600 segundos

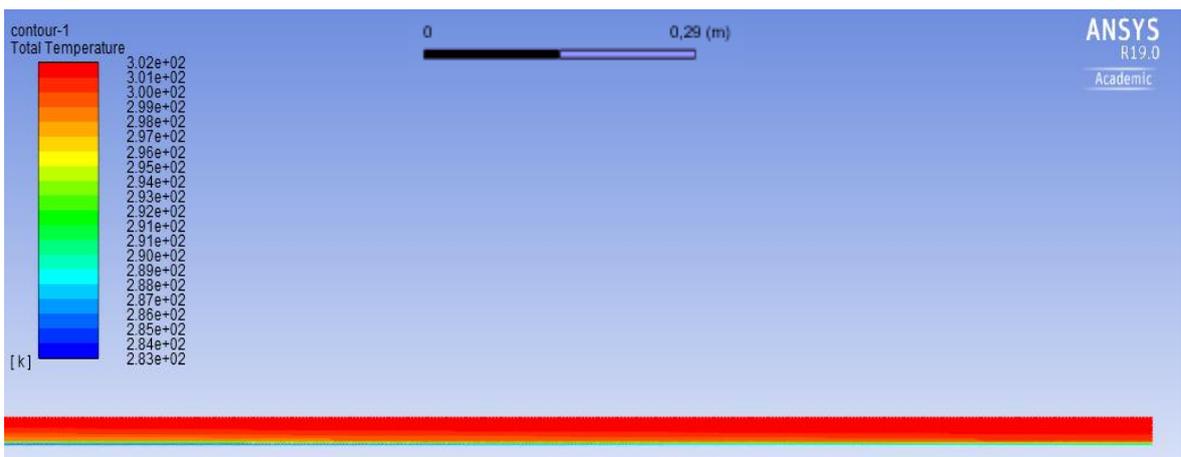
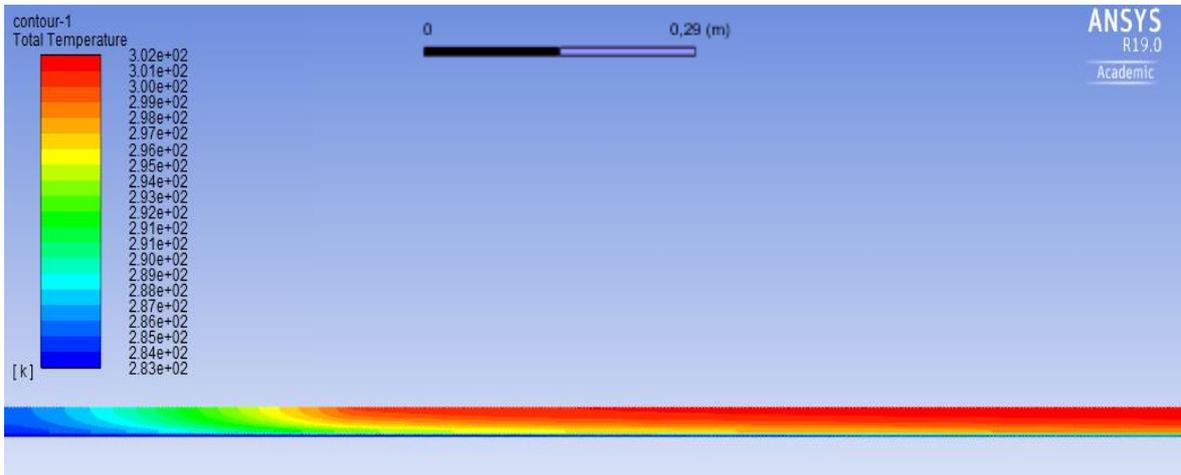


- 1200 segundos

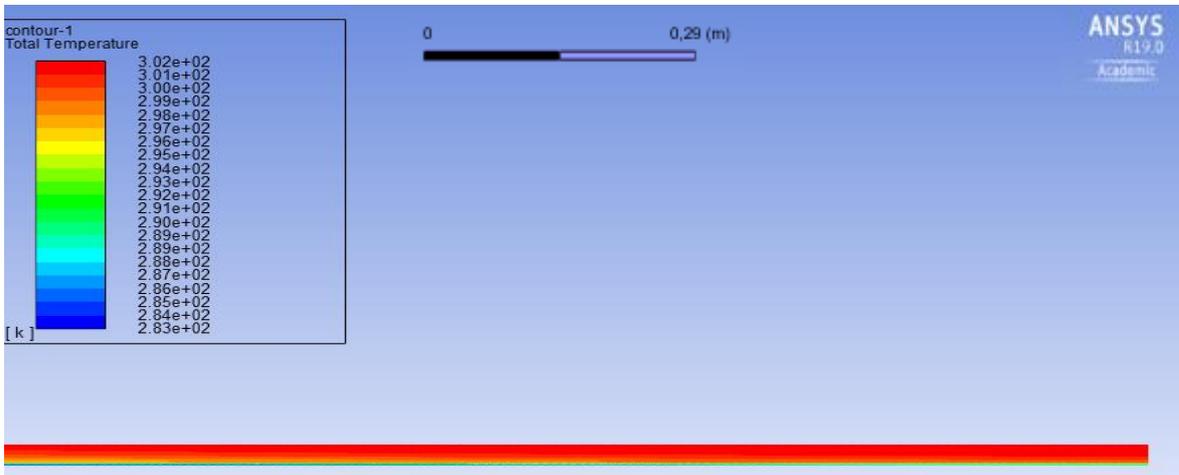
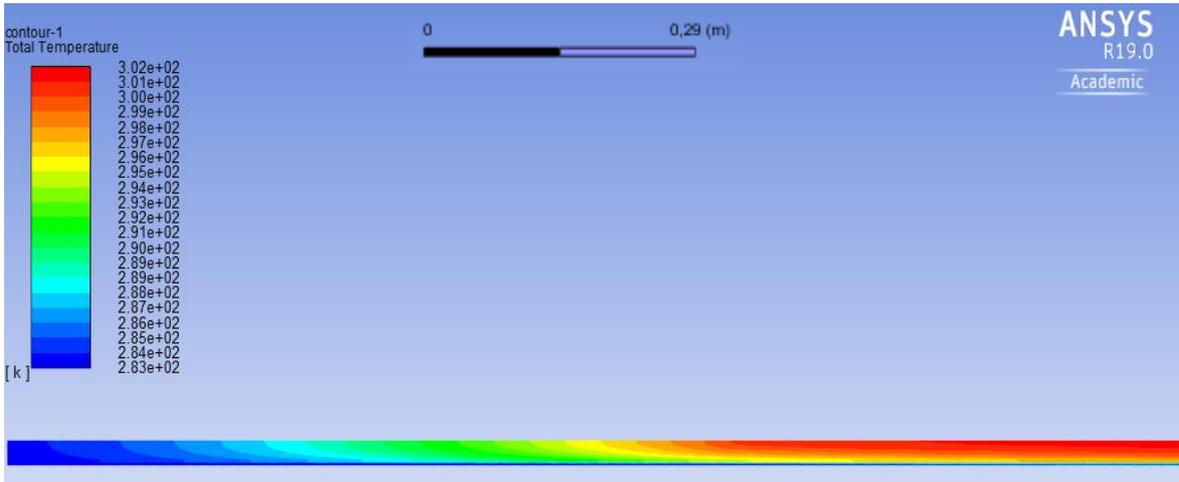




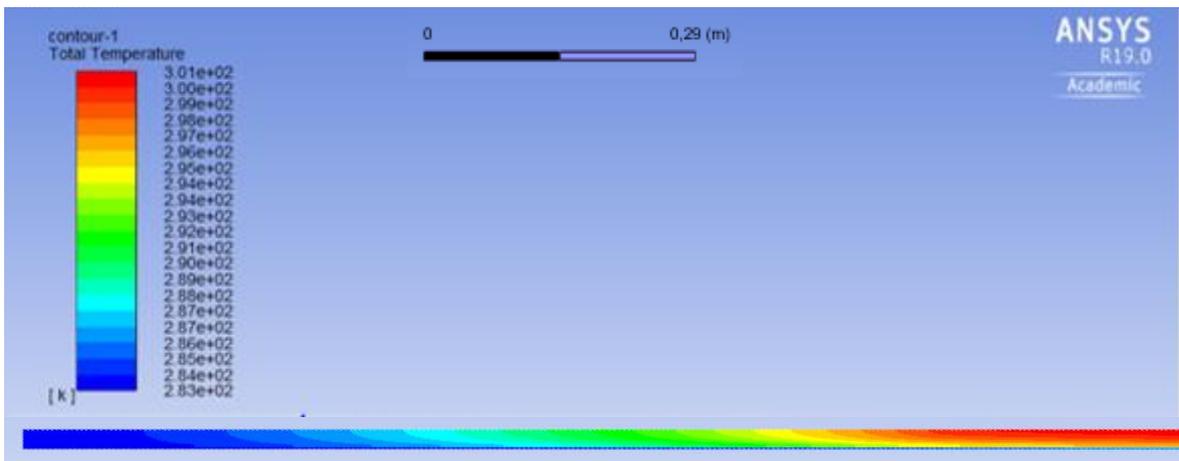
- 1800 segundos

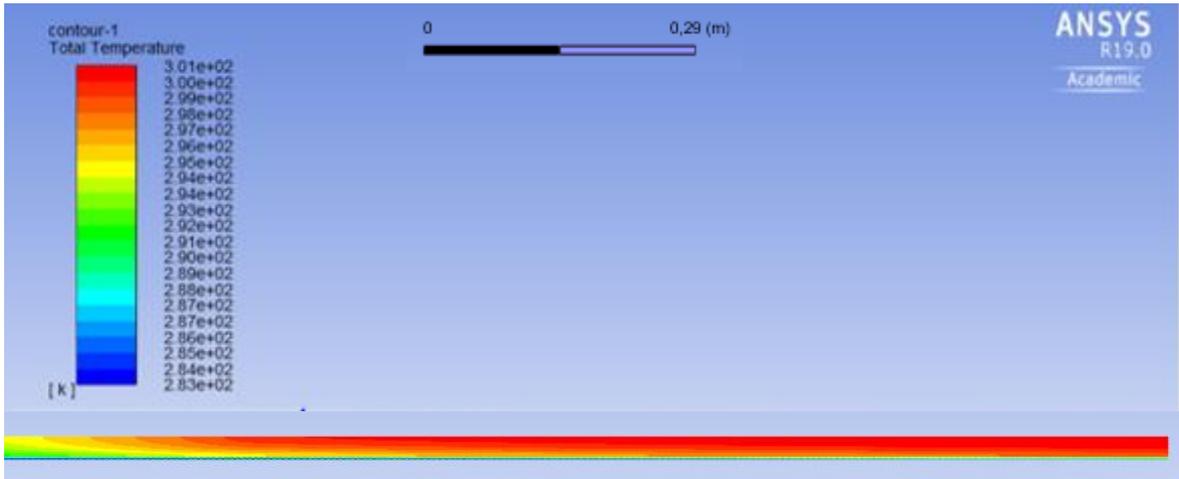


- 2400 segundos

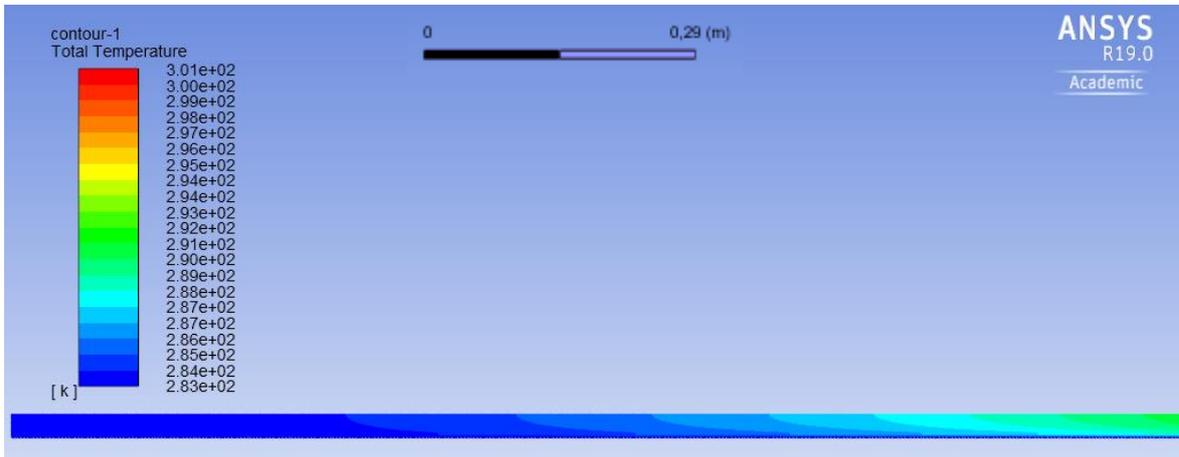


- 3000 segundos

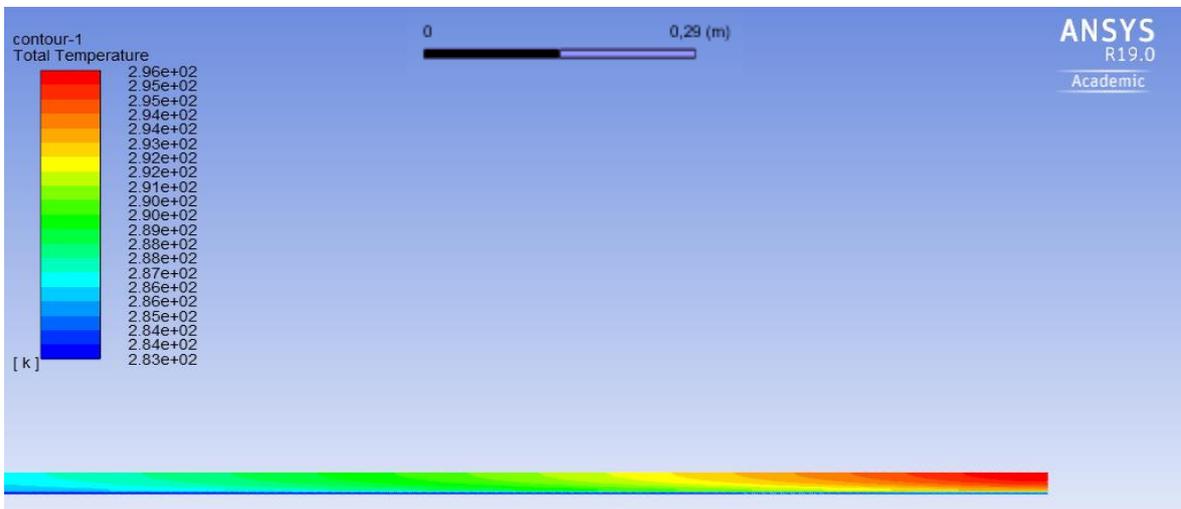
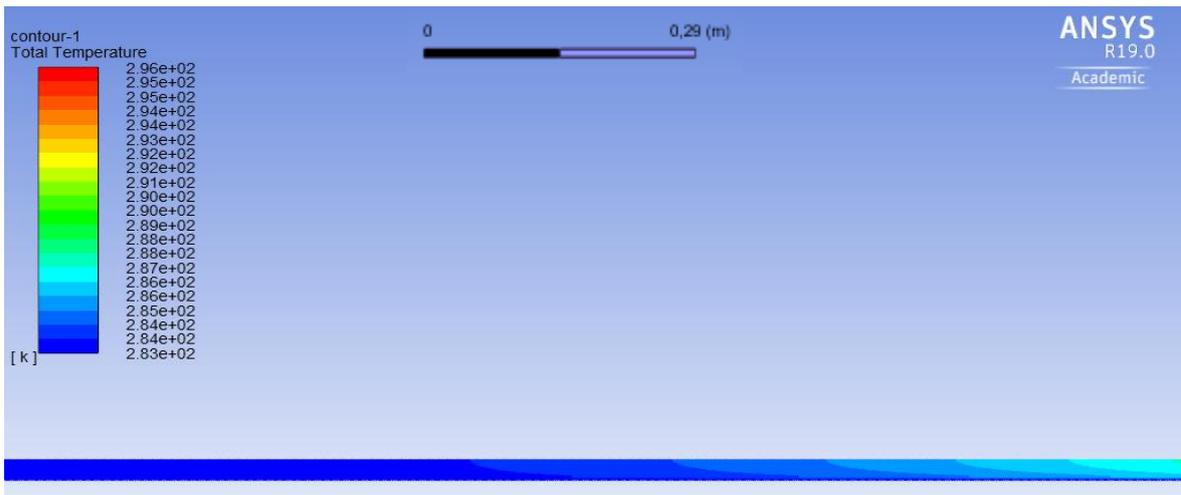




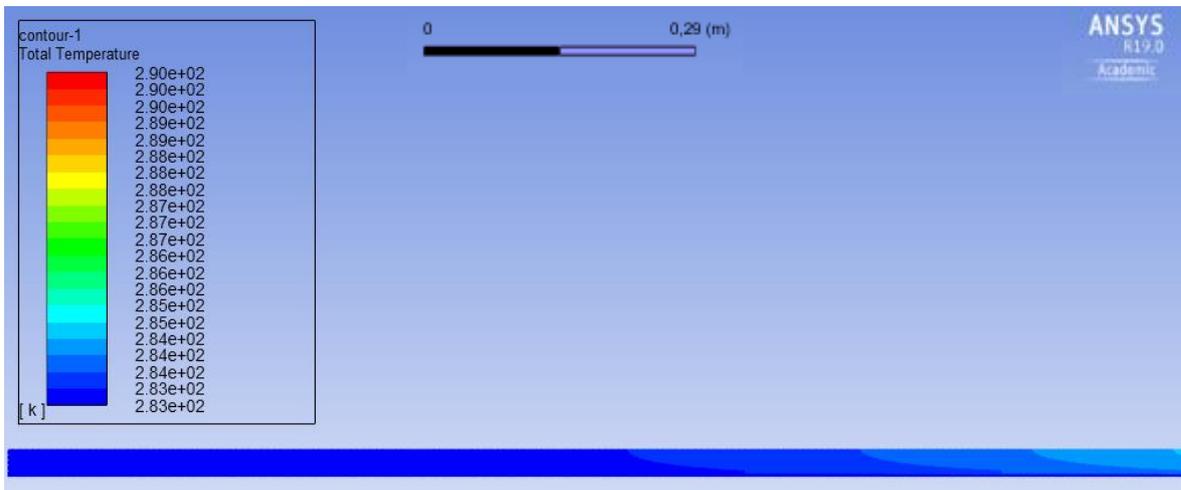
- 3600 segundos

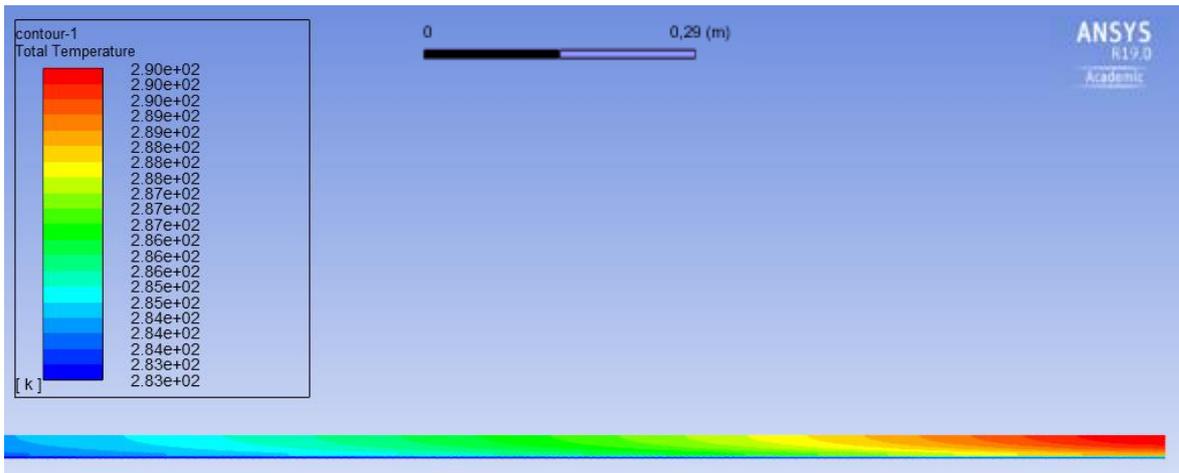


- 4200 segundos

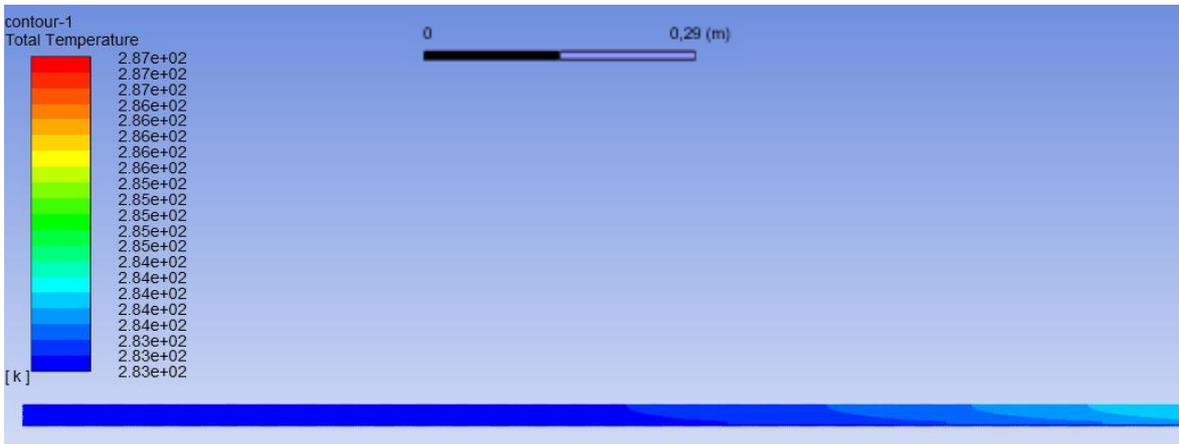


- 4800 segundos

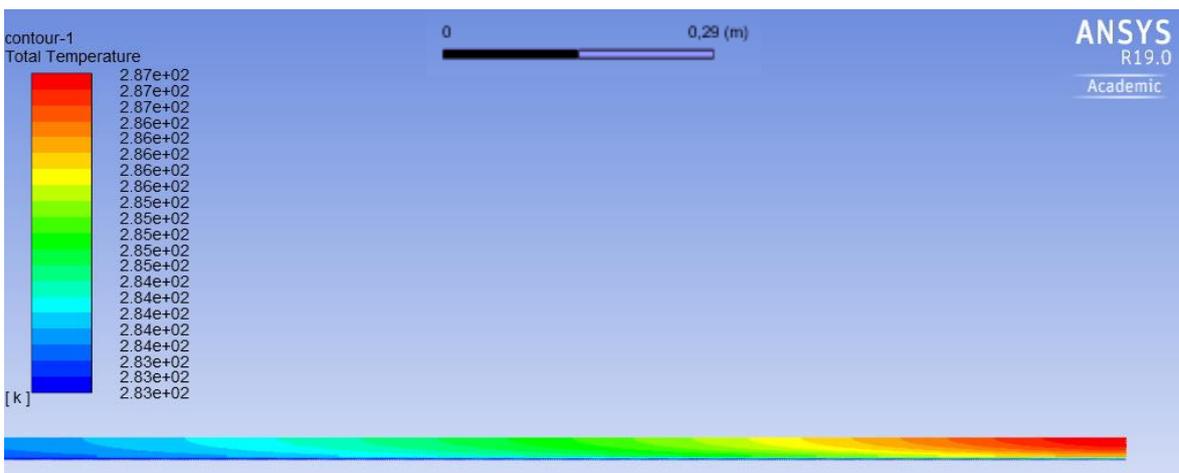


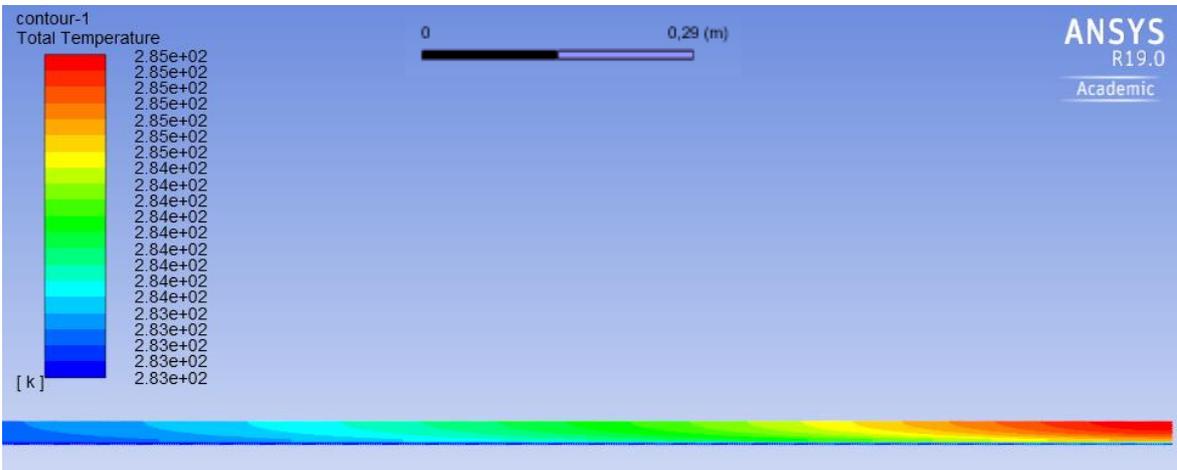
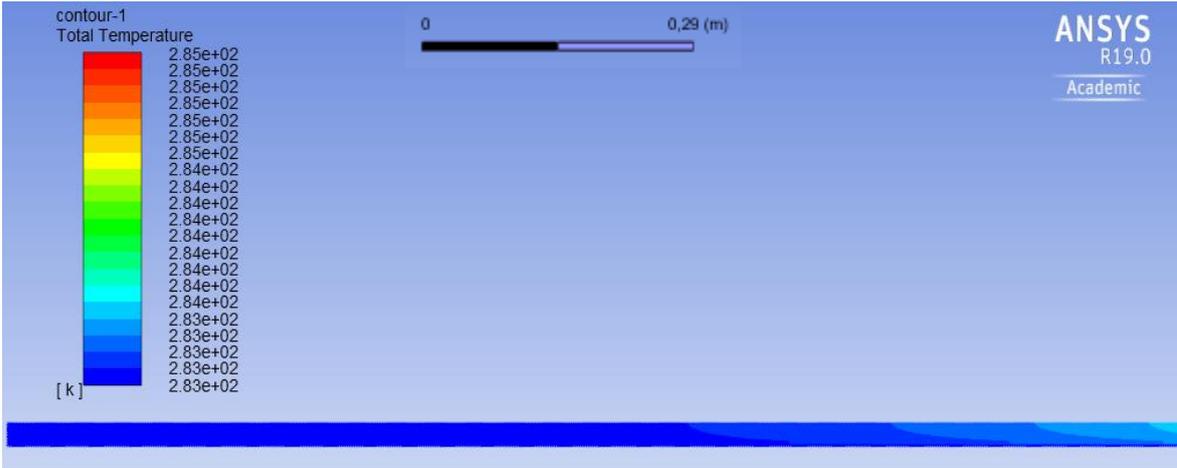


- 5400 segundos



- 6000 segundos





- 6600 segundos

