



# MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA AGROALIMENTAR POR INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM) EM EQUIPAMENTOS PRODUTIVOS

CARLOS MANUEL VALENTE QUITÉRIO SIMÃO  
Mestre em ENGENHARIA E GESTÃO DE TECNOLOGIA

DOUTORAMENTO EM TECNOLOGIAS AGROINDUSTRIAIS

Universidade NOVA de Lisboa  
Novembro, 2021





# MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA AGROALIMENTAR POR INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM) EM EQUIPAMENTOS PRODUTIVOS

CARLOS MANUEL VALENTE QUITÉRIO SIMÃO  
Mestre em ENGENHARIA E GESTÃO DE TECNOLOGIA

DOUTORAMENTO EM TECNOLOGIAS AGROINDUSTRIAIS

Universidade NOVA de Lisboa

Novembro, 2021



# MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA AGROALIMENTAR POR INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM) EM EQUIPAMENTOS PRODUTIVOS

**CARLOS MANUEL VALENTE QUITÉRIO SIMÃO**

Mestre em ENGENHARIA E GESTÃO DE TECNOLOGIA

**Orientador:** João Miguel Murta Pina

Professor Auxiliar, NOVA School of Science and Technology

**Coorientador:** Fernando Henrique da Silva Reboredo

Professor Associado com Agregação, NOVA School of Science and Technology

## **Júri:**

**Presidente:** Fernando José Cebola Lidon

Professor Catedrático, NOVA School of Science and Technology

**Arguentes:** Carlos Santos Silva

Professor Auxiliar do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Anabela Monteiro Gonçalves Pronto

Professora Auxiliar, NOVA School of Science and Technology

**Vogais:** Paulo José da Costa Branco

Professor Associado com Agregação do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Rui Pedro da Costa Neto

Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Laura Elena Aelenei

Investigadora Sénior do Departamento de Energia no Ambiente Construído do Laboratório Nacional de Energia e Geologia

João Miguel Murta Pina

Professor Auxiliar, NOVA School of Science and Technology

DOUTORAMENTO EM TECNOLOGIAS AGROINDUSTRIAIS

Universidade NOVA de Lisboa

Novembro, 2021



**Melhoria da eficiência energética na indústria agroalimentar por incorporação de materiais de mudança de fase (PCM) em equipamentos produtivos**

Copyright © Carlos Manuel Valente Quitério Simão, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*A mentes inquietas, hiperativas, com déficit de atenção e disléxicas.*



## AGRADECIMENTOS

Desenvolver este trabalho foi um processo desafiante, de aprendizagem e de partilha. De falhanços e frustrações. Mas também de pequenas vitórias e apoios inesperados. Em que o tempo teve um ritmo próprio, em que os caminhos errados tiveram que ser percorridos e os certos, quando existiram, vieram como manhãs de nevoeiro. O que foi feito, está feito. Uma pequena contribuição, para o tanto que falta.

Agradeço ao meu Orientador, Professor João Murta Pina e ao meu Coorientador Professor Fernando Reboredo, pelo apoio, orientação, conhecimento e paciência. Essenciais em tudo o que se fez.

Ao Professor Fernando Lidon pela oportunidade de desenvolver um uma nova área de conhecimento, posicionando a relevância do tema e questões de investigação num setor cuja dinâmica e necessidades compreende como poucos.

Ao Professor Luís Coelho e à Doutora Laura Elena Aelenei, que me ajudaram a alinhar e prosseguir na procura de soluções.

Expresso a minha gratidão à empresa Metalogonde, Indústria Metalomecânica Lda, em particular ao Dr. Tiago Jorge, pela partilha de conhecimento e disponibilização de meios técnicos, essenciais à conceção e ensaio do equipamento experimental e prova de conceito.

À empresa CQS Lda, pelo apoio na defesa da pertinência do tema, proporcionando as condições necessárias para realizar o trabalho.

Às empresas Novarroz Produtos Alimentares, S.A. e TFF Transportes Figueiredo & Figueiredo, lda, cujos *insights* do setor, ajudaram a refinar as questões e abriram espaço para novas hipóteses e possíveis aplicações das tecnologias e desenvolvimentos preconizados.

Expresso a minha gratidão aos meus colegas João Pardal e Diogo Ferreira, presentes em fases determinantes nos meus dias de trabalho.

À minha família, pelo amor incondicional.



## RESUMO

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), o sector agroalimentar é caracterizado por uma elevada dependência de combustíveis fósseis, sendo responsável por 5% do consumo de energia a nível mundial. Estimando-se em 3% o peso da energia no custo do produto final, a exposição à variabilidade do preço da energia é um fator de risco para o sector. Sendo parte significativa da energia consumida utilizada na produção de calor em operações de transformação de matérias-primas a baixa temperatura, inferiores a 120 °C, torna-se determinante para a eficiência energética da indústria o desenvolvimento de soluções adequadas à valorização e armazenamento de energia térmica.

A oportunidade de exploração de materiais de mudança de fase (PCM) na indústria agroalimentar, potencia o desenvolvimento de soluções de elevada estabilidade térmica e densidade energética, mais eficientes que os atuais meios de armazenamento em calor sensível. No entanto, migrar a infraestrutura tecnológica instalada, para soluções de armazenamento de calor latente, coloca incertezas que podem exigir mudanças profundas na logística industrial, equipamentos e cadeias de produção. Se esta transformação tecnológica pudesse ser alcançada, mantendo os equipamentos existentes, os processos e a dinâmica de operação, então a perceção de valor para a indústria e a disseminação de resultados seria mais fácil e rápida.

No decurso do presente trabalho procura-se demonstrar a possibilidade desta mudança de paradigma, transitando de soluções de armazenamento energético em calor sensível, baseadas em arquiteturas centralizadas e de grande volumetria, para um modelo distribuído, sustentado em materiais PCM, incorporados na estrutura dos equipamentos das linhas de produção. Na persecução desta hipótese selecionou-se, modelizou-se e simulou-se computacionalmente e demonstrou-se experimentalmente, a operação de um equipamento representativo de uma classe de máquinas industriais que operam em modelo de camisa de aquecimento.

Os resultados do estudo de caso validam a hipótese e sustentam a possibilidade de extrapolação para outros equipamentos do sector, contribuindo para: i) melhorar a eficiência energética; ii) simplificar o processo de captura e armazenamento de energia; iii) minimizar o impacto de transformação tecnológica, promovendo a adoção ao nível dos equipamentos e infraestruturas existentes; e por consequência, iv) contribuir para a redução da dependência de fontes de energia externa, emissão de gases com efeito de estufa e custo do produto final.

**Palavras-chave:** Agroindústria, Armazenamento Descentralizado de Energia Térmica, Eficiência Energética, Materiais de Mudança de Fase.



## ABSTRACT

According to the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), the agroindustry sector is characterized by a high dependence on fossil fuels, accounting for 5% of energy consumption worldwide. With an estimated contribution of 3% to the products final costs, the sector's exposure to energy price variability is an important operational risk factor.

As a significant part of the energy consumed is used in the production of heat for low temperature operations, below 120 °C, the development of adequate solutions for thermal energy recovery and storage, are crucial for the energy efficiency of the industry.

The opportunity to explore phase change materials (PCM) in the food industry boosts the development of solutions with high thermal stability and energy density, more efficient than current sensitive heat storage solutions. However, migrating the installed technological infrastructure to latent heat storage solutions poses several uncertainties, which may require profound changes in existing industrial logistics, equipment, and production chains. If this technological transformation could be achieved, keeping existing equipment, processes and operating dynamics, the perception of value for the industry and the dissemination of results, would be much easier and faster.

In the course of this work, we seek to demonstrate the possibility of this paradigm shift, moving from energy storage solutions in sensitive heat, based on centralized and large-volume architectures, to a distributed model, supported on PCM materials, incorporated in the structure of the production lines equipment's. In pursuit of this hypothesis, it was selected, modeled, computationally simulated and experimentally demonstrated the operation of a representative equipment of a class of industrial machines that operate in a heating jacket model.

The results of the case study validate the hypothesis and support the possibility of extrapolation to other agro-industrial equipment's, contributing to: i) improve the sector's energy efficiency; ii) simplify the energy capture and storage process; iii) minimize the impact of technological transformation, promoting the adoption at the level of existing equipment and infrastructure; and, consequently, iv) contribute to reducing dependence on external energy sources, greenhouse gas emissions and cost of the final product.

**Keywords:** Agroindustry, Phase Change Materials, Decentralized Thermal Energy Storage, Energy Efficiency.



# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>SÍMBOLOS</b> .....	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO .....	2
1.2. PROBLEMA DE INVESTIGAÇÃO.....	3
1.3. OBJETIVOS .....	5
1.4. ABORDAGEM E CONTRIBUIÇÕES.....	7
1.5. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	8
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>11</b>
2.1. CONSUMO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA AGROALIMENTAR .....	11
2.2. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA.....	14
2.2.1. <i>Armazenamento de energia termoquímica</i> .....	14
2.2.2. <i>Armazenamento de energia na forma de calor sensível</i> .....	15
2.2.3. <i>Armazenamento de energia na forma de calor latente</i> .....	16
2.2.4. <i>FER e a importância do armazenamento de energia térmica na flexibilidade de operação da rede energética</i> 20	
2.2.5. <i>Armazenamento de energia térmica em modelo centralizado por SHS vs. armazenamento distribuído em LHS</i> .....	22
2.3. MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM) .....	23
2.3.1. <i>Nomenclatura de PCM</i> .....	27
2.3.2. <i>Caracterização de PCM</i> .....	28
2.3.3. <i>Encapsulamento</i> .....	28
2.4. OPORTUNIDADES PARA A EXPLORAÇÃO DE PCM NA INDÚSTRIA AGROALIMENTAR.....	29
2.4.1. <i>Conjugações possíveis de operações e equipamentos, para estudo de caso</i> .....	32
2.4.2. <i>O caso do chocolate</i> .....	33

---

<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DA CLASSE DE EQUIPAMENTOS DE ESTUDO .....	37
3.2.	VALIDAÇÃO NUMÉRICA.....	39
<b>4.</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL</b> .....	<b>41</b>
4.1.	MODELIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL, CRITÉRIOS DE SIMULAÇÃO E PARÂMETROS DE CONTROLO .....	41
4.2.	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PCM PARA SIMULAÇÃO E POSTERIOR ENSAIO LABORATORIAL 45	
4.2.1.	<i>Modelo de decisão para suporte à seleção de PCM</i> .....	46
4.3.	ENCAPSULAMENTO.....	48
4.4.	SIMULAÇÃO POR ANÁLISE NUMÉRICA CFD ( <i>COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS</i> ).....	50
4.4.1.	<i>Análise térmica transitória</i> .....	52
4.4.2.	<i>Simulação paramétrica</i> .....	58
<b>5.</b>	<b>INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>61</b>
5.1.	EQUIPAMENTO LABORATORIAL.....	61
5.2.	INSTRUMENTAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE BASE DE DADOS.....	62
5.3.	PROPRIEDADES DO CHOCOLATE USADO .....	64
<b>6.</b>	<b>ENSAIOS EXPERIMENTAIS E AVALIAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS</b> .....	<b>65</b>
6.1.	CONDIÇÕES DE ENSAIO.....	65
6.2.	ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	67
6.3.	FALHAS NO DECURSO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	71
6.4.	COMPARAÇÃO ENTRE AS CONDIÇÕES DO MODELO NUMÉRICO E DO ENSAIO EXPERIMENTAL 71	
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO</b> .....	<b>73</b>
7.1.	CONCLUSÕES .....	74
7.2.	TRABALHOS FUTUROS.....	75
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>77</b>
<b>A.</b>	<b>APÊNDICE: PUBLICAÇÕES E DISSEMINAÇÃO DE CONHECIMENTO</b> .....	<b>81</b>
<b>B.</b>	<b>APÊNDICE: INFORMAÇÃO COMPLEMENTAR SOBRE PCM</b> .....	<b>83</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 CONSUMO ENERGÉTICO NA INDÚSTRIA ALIMENTAR, POR RECURSO E PAIS DA EU EM 2013 (MONFORTI-FERRARIO ET AL., 2015). .....	12
FIGURA 2.2 ARMAZENAMENTO DE CALOR SENSÍVEL. ADAPTADO DE (SARBU & SEBARCHIEVICI, 2018). .....	15
FIGURA 2.3 PROCESSOS TERMODINÂMICOS, FUNÇÃO (P,V,T). ADAPTADO DE (SHAPIRO & MORAN, 2014) .....	16
FIGURA 2.4 ARMAZENAMENTO DE CALOR LATENTE. DIAGRAMA TEÓRICO DE UMA MUDANÇA DE FASE, SOLIDA-LÍQUIDA. ADAPTADO DE (SARBU & SEBARCHIEVICI, 2018). .....	19
FIGURA 2.5 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM PROCESSO DE MUDANÇA DE FASE, SOLIDO-LÍQUIDO, VS. ARMAZENAMENTO EM CALOR SENSÍVEL. ADAPTADO DE (SARBU & SEBARCHIEVICI, 2018). .....	20
FIGURA 2.6 ARMAZENAMENTO CENTRALIZADO POR CALOR SENSÍVEL. ....	22
FIGURA 2.7 ARMAZENAMENTO EM CALOR LATENTE, DISTRIBUÍDO AO LONGO DA LINHA DE PRODUÇÃO. ....	23
FIGURA 2.8 GAMA DE TEMPERATURAS DE PCM, EM FUNÇÃO DO SEU TIPO. ADAPTADO DE (PCM UK LIMITED, 2020). .....	25
FIGURA 2.9 PCM: GRANULARIDADE E ENCAPSULAMENTO. ADAPTADO DE (COELHO, 2016; PCM UK LIMITED, 2020). .....	29
FIGURA 2.10 EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS, PASSIVEIS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA POR CALOR LATENTE. ....	31
FIGURA 2.11 EXEMPLO DE SISTEMA DE “CAMISA DE ÁGUA”. ADAPTADO DE (SUTTER, 2010). ....	32
FIGURA 2.12 PROCESSO DE TÊMPERA. ADAPTADO DE (VALDECIR ET AL., 2004). ....	34
FIGURA 3.1 A) EXEMPLO MODELO COMERCIAL (DE: <a href="https://tomric.com/equipment/selmi-chocolate-tempering-unit-plus-ex/">HTTPS://TOMRIC.COM/EQUIPMENT/SELMI-CHOCOLATE-TEMPERING-UNIT-PLUS-EX/</a> ); B) DIAGRAMA DE BLOCOS (ADAPTADO DE: <a href="https://tomric.com">HTTPS://TOMRIC.COM</a> ). ....	38
FIGURA 4.1 REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO EQUIPAMENTO DE TÊMPERA DE CHOCOLATE. ....	42
FIGURA 4.2 EQUILÍBRIO ENTRE FLUXOS DE CALOR, APÓS CARREGAMENTO DO PCM. ....	43
FIGURA 4.3 REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE HISTERESE DE UM PCM. ....	46
FIGURA 4.4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE SELEÇÃO A DOIS PCM, UM SAL HIDRATADO E UMA PARAFINA. OS CRITÉRIOS DE IMPORTÂNCIA SÃO APRESENTADOS ENTRE PARÊNTESES, PARA CADA UM DOS PARÂMETROS DE SELEÇÃO. O SAL HIDRATADO É MELHOR EM TRÊS DELES, QUANDO COMPARADO À PARAFINA. AS PONTUAÇÕES SÃO APRESENTADAS EM PORCENTAGEM, DADA PELA IMPORTÂNCIA MULTIPLICADA PELA ADEQUAÇÃO. ASSIM, O SAL HIDRATADO PONTUOU 81 E A PARAFINA 78. ....	48
FIGURA 4.5 ESTRATÉGIAS DE ENCAPSULAMENTO DO PCM S34. ....	49
FIGURA 4.6 FALHAS NA EXPLORAÇÃO DO PCM S34 ENCAPSULADO EM TABLETES PLÁSTICAS. ....	50
FIGURA 4.7 MODELO 3D E MALHA. ....	51
FIGURA 4.8 MODELO 2D EM SECÇÃO TRANSVERSAL E RESPECTIVA MALHA. ....	51
FIGURA 4.9 CASO 1: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO MODELO 2D. ....	53
FIGURA 4.10 CASO 1 (ÁGUA): EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA E FRAÇÃO LÍQUIDA DURANTE A CARGA. ....	53
FIGURA 4.11 CASO 2: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO MODELO 2D. ....	54
FIGURA 4.12 CASO 2 (ÁGUA): EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA E FRAÇÃO LÍQUIDA DURANTE A DESCARGA, APÓS CASO 1. ....	54
FIGURA 4.13 CASO 3: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO MODELO 2D. ....	55
FIGURA 4.14 CASO 3: EVOLUÇÃO 2D DA FRAÇÃO LÍQUIDA DO PCM E DO CHOCOLATE. ....	55
FIGURA 4.15 CASO 3 (ÁGUA + PCM): EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA E FRAÇÃO LÍQUIDA DURANTE A CARGA. ....	55
FIGURA 4.16 CASO 4: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO MODELO 2D. ....	56

FIGURA 4.17 CASO 4 (ÁGUA + PCM): EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA E FRAÇÃO LÍQUIDA NA DESCARGA, APÓS CASO 3. ....	56
FIGURA 4.18 CASO 4 (ÁGUA + PCM): EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA NA DESCARGA, APÓS CASO 3.....	58
FIGURA 4.19 CASO 5: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA E FRAÇÃO LÍQUIDA DURANTE A CARGA, COM O TANQUE PREENCHIDO A 100%. 58	
FIGURA 4.20 CASO 6: DESCARGA, PCM A36. ....	59
FIGURA 5.1 EQUIPAMENTO PARA TEMPERAR E MISTURAR DE MATERIAIS GRANULADOS. DA ESQUERDA PARA A DIREITA: TANQUE EXTERNO E TANQUE INTERNO; VISTA SUPERIOR DO EQUIPAMENTO; RESISTÊNCIA DE AQUECIMENTO; REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO EQUIPAMENTO. ....	61
FIGURA 5.2 DA ESQUERDA PARA A DIREITA: LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA NO EQUIPAMENTO; VISTA DA CABLAGEM QUE INTERLIGA OS SENSORES DE TEMPERATURA AO MCU; E PELLETS DE CHOCOLATE DENTRO DO TANQUE INTERNO. ....	63
FIGURA 5.3 DA ESQUERDA PARA A DIREITA: SENSOR DE TEMPERATURA; ESTAÇÃO AMBIENTAL DA SCHNEIDER ELECTRIC E MICROCONTROLADOR. ....	64
FIGURA 5.4 GRANULADO DE CHOCOLATE.....	64
FIGURA 6.1 INCLUSÃO DO PCM NO ESPAÇO DA CAMISA DE AQUECIMENTO.....	65
FIGURA 6.2 DESCARGA EM SHS, CENÁRIO #2, ONDE APENAS É USADA ÁGUA COM A MISTURA DE CHOCOLATE 1. ....	69
FIGURA 6.3 CARGA DE CALOR (# 3) E DESCARGA (# 4), UTILIZANDO O PCM, COM LHS E SHS, PARA MISTURA DE CHOCOLATE 1. ....	69
FIGURA 6.4 CARGA DE CALOR (# 5) E DESCARGA (# 6), UTILIZANDO APENAS ÁGUA PARA SHS, COM A MISTURA DE CHOCOLATE 2... ..	70
FIGURA 6.5 DETALHE DA FASE DE DESCARGA NO CENÁRIO #8, UTILIZANDO O PCM PARA LHS E SHS, COM A MISTURA 2. ....	70
FIGURA 6.6 DA ESQUERDA PARA A DIREITA: GRANULADO DE CHOCOLATE; MISTURA 1 FUNDIDA; E MISTURA 2 FUNDIDA.....	70
FIGURA 6.7 DA ESQUERDA PARA A DIREITA: DEGRADAÇÃO DA SELAGEM TÉRMICA DO INVÓLUCRO; PCM APÓS RETIRADA A FRIO, NO ESTADO SÓLIDO, CONSOLIDADA NA BASE DO ENCAPSULAMENTO, COM PONTOS DE RUTURA NO ENCAPSULAMENTO. ....	71

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 PCM: CLASSES E COMPARAÇÃO FUNCIONAL DE PCM. ....	27
TABELA 2.2 PCM: CARACTERÍSTICAS TERMOFÍSICAS DE TIPOS DE PCM. ADAPTADA DE (PCM UK LIMITED, 2020).....	28
TABELA 4.1 VALORES PARA CALCULO DE PERDAS POR CONVECÇÃO, PARA O AR AMBIENTE. ....	44
TABELA 4.2 CARACTERÍSTICAS DE PCM, FORNECIDAS PELO FABRICANTE PCM UK LIMITED, 2020. ....	45
TABELA 4.3 TABELA 4.4 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO. EXEMPLO PARA PCM S34. ....	47
TABELA 4.5 PROPRIEDADES USADAS EM SIMULAÇÃO PARA MODELIZAR O COMPORTAMENTO DO CHOCOLATE. ....	52
TABELA 5.1 CARACTERÍSTICAS E DIMENSÕES DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL. (1) O VOLUME TOTAL DO TANQUE INTERIOR INCLUI O VOLUME DAS PAREDES DE AÇO; (2) O VOLUME DA CAMISA DE AQUECIMENTO OBTÉM-SE DIMINUINDO AO VOLUME DO TANQUE EXTERIOR, O VOLUME TOTAL DO TANQUE INTERIOR, O VOLUME DA RESISTÊNCIA NA BASE E O VOLUME DE PROTEÇÃO DE NÍVEL, QUE IMPEDE O ENCHIMENTO TOTAL DA CAMISA DE AQUECIMENTO. ....	62
TABELA 6.1 SUMÁRIO DOS CENÁRIOS DE ENSAIO.....	66



---

## ACRÓNIMOS

<b>Acrónimo</b>	<b>Significado</b>
<b>CFD</b>	<i>Fluido Dinâmica Computacional (Computational Fluid Dynamics)</i>
<b>EBC</b>	<i>Energia em Edifícios e Comunidades (Energy in Buildings and Communities)</i>
<b>FAO</b>	<i>Organização para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization)</i>
<b>FER</b>	<i>Fonte de Energia Renovável (Renewable Energy Sources)</i>
<b>GEE</b>	<i>Gás com efeito de Estufa (GHG, greenhouse gas emissions)</i>
<b>IEA</b>	<i>Agência Internacional de Energia (International Energy Agency)</i>
<b>IEEE</b>	<i>Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrônicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers)</i>
<b>IWH</b>	<i>Energia Térmica Residual (Industrial Waste Heat)</i>
<b>LCA</b>	<i>Avaliação de ciclo de vida (Life Cycle Assessment)</i>
<b>tep</b>	<i>Tonelada Equivalente de Petróleo (Tonne of oil equivalent)</i>
<b>ONU</b>	<i>Organização das Nações Unidas (United Nations Organization)</i>
<b>PCM</b>	<i>Material de Mudança de Fase (Phase Change Material)</i>
<b>TCE</b>	<i>Melhorador de Condutividade Térmica (Thermal Conductivity Enhancer)</i>
<b>TES</b>	<i>Armazenamento de Energia Térmica (Thermal Energy Storage)</i>
<b>UNIDO</b>	<i>Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (United Nations Industrial Development Organization)</i>
<b>VHC</b>	<i>Capacidade Volumétrica de Armazenamento Térmico (Volumetric Heat Capacity)</i>



## SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidade (SI)
$A$	Área de Superfície.	$m^2$
$A_{Conv}$	Área de superfície, sujeita a convecção.	$m^2$
$A_i$	Área de superfície interior, sujeita a convecção.	$m^2$
$A_o$	Área de superfície exterior, sujeita a convecção.	$m^2$
$a_m$	Fração da massa total de PCM que é fundida.	%
$C$	Capacidade térmica.	$J \cdot K^{-1}$
$VHC$	Capacidade térmica volumétrica.	$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
$c$	Calor específico	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_p$	Calor específico a pressão constante	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$\bar{c}_p$	Valor médio do calor específico	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{p\ PCM}$	Calor específico do PCM a pressão constante	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{p\ w}$	Calor específico da água a pressão constante	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_v$	Calor específico a volume constante	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$e$	Espessura	mm
$H$	Entalpia total	J
$h$	Entalpia específica	$J \cdot kg^{-1}$
$h$	Coefficiente de transferência de calor	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$h_{PCM}$	Coefficiente de transferência de calor do PCM	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$h_{Choc}$	Coefficiente de transferência de calor do Chocolate	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$h_{Conv}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$h_{Conv\_Ar}, h_{Ar}$	Coefficiente de transf. de calor por convecção do ar	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$h_{Conv\_Choc}, h_{Choc}$	Coefficiente de transf. de calor por conv. do chocolate	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$h_{Conv\_PCM}, h_{PCM}$	Coefficiente de transf. de calor por convecção do PCM	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$i$	Corrente Elétrica	A
$k$	Condutividade Térmica	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$k_{316}$	Condutividade Térmica do aço 316	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$L$	Calor Latente	$J \cdot kg^{-1}$
$L'$	Comprimento	m
$M$	Massa Molar	$g \cdot mol^{-1}$

$m$	Massa de um corpo	kg
$m_f$	Fração de Massa de um corpo	kg
$m_{PCM}$	Massa de PCM	kg
$m_w$	Massa de água	kg
$n$	Quantidade, expressa em moles	mol
$P$	Potencia térmica	W
$p$	Pressão	atm
$p_v$	Pressão de vapor	atm
$Q$	Calor sensível	J
$\dot{Q}_{Cond}$	Taxa de fluxo de calor de convecção	J · s <sup>-1</sup>
$\dot{q}$	Fluxo de calor de convecção	kW · m <sup>-2</sup>
$R$	Resistência ( $\Omega$ )	$\Omega$
$R_T$	Resistência Térmica	K · m · W <sup>-1</sup>
$\bar{R}$	Constante universal de gases perfeitos	J · K <sup>-1</sup> · mol <sup>-1</sup>
$r_i$	Raio interior	m
$r_o$	Raio exterior	m
$S$	Entropia	kJ · K <sup>-1</sup>
$T$	Temperatura absoluta	K
$T_{ar}$	Temperatura do ar ambiente	°C
$T_{Choc}$	Temperatura do Chocolate	°C
$T_{ep}$	Unidade de Tonelada Equivalente de Petróleo	Tep
$T_{fus}$	Temperatura de fusão	K
$T_{PCM}$	Temperatura do PCM	K
$T_{sol}$	Temperatura de solidificação	K
$T_{tran}$	Temperatura de transição	K
$t$	Tempo	s
$U$	Energia interna	kJ
$u$	Energia interna específica	kJ · Kg <sup>-1</sup>
$V$	Volume	L
$v$	Volume específico	m <sup>3</sup> · Kg <sup>-1</sup>
$\nu$	Viscosidade cinemática	mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>
$W$	Trabalho	J
$\alpha$	Difusão térmica	cm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>
$\mu$	Viscosidade dinâmica.	g · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup>
$\rho$	Densidade	kg · m <sup>-3</sup>
$\nabla T$	Gradiente Térmico	K
$\Delta H_{fus}$	Capacidade de calor latente de fusão	J
$\Delta H_m$	Calor latente de fusão por unidade de massa	J · g <sup>-1</sup>
$\Delta Q$	Quantidade de calor (J)	J
$\Delta T$	Variação de Temperatura.	K
$\Delta t$	Intervalo de Tempo.	s

## 1

## 1.

## INTRODUÇÃO

A Agroindústria é um setor abrangente que pode ser definido como o conjunto de “atividades pós-colheita que envolvem a transformação, preparação e preservação de produtos agrícolas para consumo intermédio ou final” (UNIDO, 2009). Neste contexto, envolve a agregação de valor aos produtos agrícolas e as relações entre empresas e cadeias de abastecimento para o desenvolvimento, transformação e distribuição desses produtos (Konig, Da Silva, & Mhlana, 2013). Uma outra definição mais ampla de agroindústria (Da Silva, Baker, Shepherd, Jenane, & Miranda-da-Cruz, 2009), ficou plasmada na reunião de peritos *Expert Group Meeting on Agro-Industry Measurement*, FAO (Food and Agriculture Organization) - UNIDO (United Nations Industrial Development Organization), que ocorreu em Novembro de 2015 em Roma, onde se alargou o conceito de agroindústria para além da produção de bens destinados à alimentação humana, agregando também atividades da pesca e pecuária e atividades florestais e de produção de couros e têxteis, ou seja, setores não alimentares (FAO-UNIDO, 2015).

De acordo com a FAO, o segmento alimentar da Agroindústria é caracterizado por uma elevada dependência de combustíveis fósseis, sendo responsável por 5% do consumo de energia e por 20% das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), a nível mundial. A FAO preconiza por isso a transição destes sistemas para um paradigma energeticamente inteligente, visando torná-los energeticamente sustentáveis, com baixas emissões de GEE, maior resiliência às flutuações dos preços da energia e capazes de contribuir para a segurança alimentar e para o desenvolvimento sustentável (FAO, 2012; Sims, Flammini, Puri, & Bracco, 2015). Tal deve ser conseguido atuando em diferentes vetores, nomeadamente a eficiência energética, a integração de energias renováveis e a economia circular.

A presente dissertação foca-se no primeiro dos vetores referidos, a eficiência energética, desenvolvendo-se em torno do armazenamento e gestão de energia térmica, nas operações de processamento e transformação das matérias-primas alimentares. Para tal, será avaliada a oportunidade da incorporação de materiais de mudança de fase (PCM, *Phase Change Materials*), em equipamentos da indústria agroalimentar. Os PCM permitem armazenar energia térmica sob a forma de calor latente, o que é conseguido à custa da sua mudança de fase. Por apresentarem uma elevada densidade energética, estes materiais possibilitam uma capacidade de armazenamento em volumes idênticos, que é muito superior às soluções de calor sensível. Desta forma pretende-se melhorar a flexibilidade energética e o rendimento das operações industriais, promovendo o armazenamento local de energia e a recuperação e valorização de energia de novas fontes, fazendo-o de forma distribuída, ao longo dos equipamentos que integram a linha de produção.

Para validação das hipóteses a seguir elencadas e demonstração da prova de conceito, o trabalho contempla a modelização, projeto e ensaio de uma instalação em escala laboratorial, representativa do modelo de operação de um cluster de equipamentos reais, que operam segundo uma técnica de referência no setor agroalimentar, vulgarmente denominada de “aquecimento em banho-maria”, por meio de uma camisa de aquecimento, em que se usa calor como agente de processamento e transformação.

De igual relevo é a possibilidade de sinergias por via da integração da produção de fontes de energia renovável, visando a diminuição do consumo de combustíveis fósseis, responsáveis pela emissão de GEE.

Pretende-se assim contribuir para aumentar a eficiência energética nas cadeias produtivas do setor agroalimentar, melhorar o seu desempenho energético e promover soluções avançadas de armazenamento de energia térmica.

## 1.1. Contexto e motivação

A temperatura é uma variável essencial no processamento e transformação de matérias-primas alimentares. Numa linha industrial, o intervalo de temperaturas de operação recomendado para a manipulação de um alimento em cada estágio de processamento, é influenciado por restrições de segurança alimentar, assim como por requisitos organoléticos e nutricionais. Em muitos casos, a exposição a temperaturas de operação superiores pode conduzir à degradação das propriedades funcionais do alimento. Igualmente problemático, o processamento a temperaturas inferiores ao limite recomendado pode revelar-se, por exemplo, insuficiente para uma cozedura adequada ou para um controlo microbiológico eficiente.

De forma a garantir a operação dentro do intervalo de temperatura prescrito, as gerações de equipamentos atuais recorrem à monitorização dos valores de operação instantânea, refletindo esses dados na ativação de sistemas secundários de refrigeração ou aquecimento, que visam a reposição da temperatura dentro de um intervalo de operação pré-determinado. Além do esforço energético associado a este modelo de correção ativa, que caracteriza o estado da arte, numa outra dimensão, observa-se também ao longo das linhas de transformação o desperdício frequente de energia térmica residual (IWH, *Industrial Waste Heat*, abaixo de 120°C), por falta de soluções de captura e armazenamento local (Miah, Griffiths, McNeill, Poonaji, Martin, Leiser, et al., 2015). Este excedente energético acaba normalmente disperso de forma aleatória no ambiente envolvente, podendo, em cenários mais evoluídos, ser utilizado na climatização das instalações industriais. Contudo, mesmo nesses casos, sem influência direta no rendimento energético dos processos produtivos.

Em cenários ainda mais específicos, existem soluções de recuperação de calor residual visando a sua reintegração no processo produtivo. São disso exemplo as soluções de pré-aquecimento do ar de combustão com recurso aos produtos da mesma. Este é um tipo de recuperação e valorização energética conhecido e consolidado. Contudo, a sua eficácia encontra-se geralmente limitada a intervalos de temperatura elevada (ex. fornos de combustão), tornando-

se complexo, dispendioso e frequentemente inviável, a replicação do modelo em instalações de menor escala ou para intervalos de temperatura distintos.

Ainda numa terceira dimensão de eficiência térmica sustentada na exploração do potencial de materiais isolantes, embora existam múltiplas soluções que visam minimizar as perdas de calor recorrendo a este tipo de materiais, fazem-no promovendo a manutenção da temperatura máxima pelo maior período de tempo possível. Ou seja, além de não fazerem um armazenamento e gestão de energia, estas soluções podem revelar-se contraproducentes quando promovem a continuidade de excessos de calor, por exemplo resultante de um pico indesejado de temperatura, comprometendo assim a integridade e características organolépticas do alimento. Nestes casos o desejável seria absorver o excesso térmico e promover a rápida redução à temperatura de operação.

O ideal para a preservação da qualidade do alimento e para a eficiência energética do processo produtivo seria assim uma solução em que: i) os desvios superiores da temperatura fossem absorvidos e armazenados localmente no próprio equipamento e utilizados na compensação dos desvios inferiores, promovendo a estabilidade térmica sem recurso sistemas de correção secundários; e ii) em que se capturasse e valorizasse na forma de calor armazenado os excedentes energéticos locais.

A ser possível, uma solução com estas características permitiria uma diminuição no consumo energético, na emissão de GEE e no custo de produção.

## 1.2. Problema de investigação

O armazenamento de energia térmica (TES, *Thermal Energy Storage*) e a gestão da energia armazenada, são parte essencial no processamento e transformação de matérias-primas alimentares. As soluções de armazenamento que caracterizam o estado da arte no setor, suportam-se em modelos de calor sensível, em que a temperatura do meio de armazenamento cresce proporcionalmente ao calor armazenado. Nestas soluções a água é o material de armazenamento mais comum pelo seu baixo custo e elevada disponibilidade, encontrando-se a sua aplicabilidade limitada a temperaturas no intervalo compreendido entre os pontos de congelamento e ebulição (0 a 100°C, a 1 atm), o que, ainda assim, se adequa a muitos processos agroindustriais. Além destas características a água tem ainda a vantagem de ser um material inerte (não tóxico, não inflamável e não corrosivo por meio da adição de inibidores de corrosão), com capacidade térmica volumétrica (4,17 MJ/m<sup>3</sup>·K) superior à maioria dos meios de armazenamento de calor sensível (Cabeza, 2015). De não menos importância, a água tem também a vantagem de poder ser integrada diretamente com as gerações atuais de sistemas solares térmicos e de proporcionar elevada capacidade de estratificação térmica.

Como pontos desfavoráveis, a utilização de água para armazenamento de energia na forma de calor sensível requer reservatórios de volumetria elevada, frequentemente centralizados, em que à medida que a energia térmica armazenada cresce, crescem também de forma proporcional às perdas por convecção e radiação para o meio envolvente. Normalmente, para acomodar este tipo de solução, a indústria é confrontada com necessidades de espaço e de

investimento significativas, que, permitindo alguma capacidade de armazenamento, apresentam pouca capacidade de se reajustarem à dinâmica das linhas de produção e baixo aproveitamento energético, face ao potencial disponível (Miah, Griffiths, McNeill, Poonaji, Martin, Morse, et al., 2015).

Ao contrário das soluções de armazenamento por calor sensível, o armazenamento de calor latente permite armazenar energia térmica a uma temperatura constante, através da mudança de fase do material utilizado. Os materiais utilizados para este fim denominam-se Materiais de Mudança de Fase, sendo a água, ela própria um PCM, que permite armazenar energia térmica a 100°C na passagem para a fase gasosa, ou a 0°C na passagem para a fase sólida.

Os PCM com temperatura e entalpia de mudança de fase adequadas têm o potencial de serem integrados diretamente em equipamentos e operações agroindustriais. Esta integração é preconizada como forma de permitir maiores quantidades de energia armazenada num mesmo volume e temperatura de operação, contribuindo simultaneamente para a manutenção e regulação passiva da temperatura, ao promoverem a correção e convergência de eventuais desvios indesejados. Admite-se também que a sua utilização permita o desenvolvimento de novas soluções de flexibilidade da rede energética e de eficiência energética, baseadas em arquiteturas de armazenamento distribuído, diretamente integradas nos equipamentos da cadeia produtiva, o que a ser viável representa uma mudança de paradigma no armazenamento e consequentemente na flexibilidade energética das infraestruturas operacionais.

No contexto descrito, com a execução deste trabalho pretende-se abordar o problema de eficiência e flexibilidade energética da rede na indústria agroalimentar, na perspectiva do armazenamento de energia térmica. Nomeadamente, os problemas decorrentes de:

- i) exploração de arquiteturas de armazenamento centralizadas, que limitam a capacidade de recuperação de calor de baixa intensidade (IWH), produzido localmente, nos equipamentos ao longo das linhas de transformação e que se perde por irradiação aleatória para o ar ambiente;
- ii) consumo energético associado à necessidade de reposição do equilíbrio térmico, por sistemas ativos, em intervalos de temperatura bem definidos para a operação de equipamentos e/ou estágios de processamento;
- iii) baixa densidade térmica proporcionada pelo armazenamento em calor sensível que limita a capacidade de armazenamento dos sistemas atuais e se repercute na capacidade de valorização os excedentes de produção por Fontes de Energia Renovável (FER). Indiretamente, contribuindo para a utilização de fontes de energia não renováveis, com repercussão na emissão de GEE e no custo final de produção.

Por recurso a PCM, pretende-se explorar o armazenamento passivo de energia, de forma distribuída, em operações e equipamentos específicos da cadeia de produção, admitindo-se enquanto hipóteses a possibilidade de:

- i) absorver localmente os desvios de equilíbrio, acelerando o processo de convergência da temperatura de operação para os limites pretendidos;

- ii) aproveitar os excedentes de energia térmica irradiada num equipamento, armazenando-a no PCM e utilizando essa energia localmente, para prolongar o período de operação ideal, sem recurso a sistemas de correção secundários.
- iii) criar condições para aproveitar os excedentes pontuais de energia proveniente de FER, armazenando-a no PCM de cada equipamento, disponibilizando-a posteriormente essa energia localmente, para prolongar o período de operação ideal, sem recurso a sistemas de correção secundários.

O desenvolvimento do trabalho apresentado visa assim obter uma resposta para a seguinte questão de investigação:

*Será possível melhorar o desempenho energético do setor agroindustrial por meio do armazenamento de energia térmica em materiais PCM, com impacto reduzido nos equipamentos da cadeia produtiva?*

Face a esta questão, estabelecem-se as seguintes hipóteses:

*Se for possível encontrar um PCM adequado à temperatura e processos de operação de estágios críticos da agroindústria, deve ser viável aplicá-lo e operá-lo em equipamentos da cadeia produtiva, de forma que permita maximizar seu desempenho energético.*

e

*Se for possível desenvolver uma metodologia de seleção, encapsulamento e aplicação de materiais PCM na construção de um equipamento laboratorial, que contribua para a eficiência energética da operação que este desempenha, ela poderá ser extrapolada para a construção de equipamentos baseados em técnicas semelhantes, à escala real, com ganho na eficiência energética de toda a cadeia de produção em que este está inserido.*

### 1.3. Objetivos

O presente trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de conhecimento no domínio da eficiência energética nas cadeias produtivas do setor agroalimentar e melhorar o seu desempenho energético promovendo soluções avançadas de armazenamento de energia térmica, por recurso à utilização de materiais de mudança de fase. No decorrer do trabalho serão endereçados os seguintes objetivos:

- Estabelecer critérios de seleção de materiais de mudança de fase, com vista à sua exploração segura, na construção de equipamentos para a indústria agroalimentar;
- Selecionar um PCM e comparar as características teóricas e reais, relevantes na modelação do seu comportamento, com vista à exploração na indústria agroalimentar;

- Estabelecer critérios de encapsulamento de materiais de mudança de fase, com vista à sua conceção e exploração numa instalação experimental de cariz laboratorial;
- Desenvolver uma estratégia de encapsulamento, que minimize o impacto da adoção de soluções de armazenamento de calor latente, na infraestrutura e equipamentos produtivos existentes na indústria, de forma a potenciar a sua disseminação e adoção.
- Desenvolver um novo modelo de armazenamento de energia térmica na forma de calor latente, baseado num modelo distribuído, instalado nos equipamentos da linha de produção;
- Investigar a possibilidade de integração deste modelo com fontes de energia renovável, de forma a maximizar a flexibilidade energética da instalação produtiva;
- Simular computacionalmente a geometria e a resposta térmica de um equipamento a operar num modelo de aquecimento lento e homogéneo, em técnica de “Banho Maria”, utilizando PCM como forma de armazenamento de energia.
- Desenvolver uma instalação experimental à escala laboratorial, que permita demonstrar e validar a utilização mais eficiente da energia térmica, através de métodos de armazenamento passivo, de forma distribuída, por recurso a materiais de mudança de fase.
- Ensaiai e analisar laboratorialmente a contribuição dos materiais de mudança de fase para a diminuição das oscilações em torno do intervalo de operação ideal ( $\Delta T$ ), acelerando o retorno após desvio e promovendo a permanência no mesmo;
- Ensaiai e analisar laboratorialmente a contribuição dos materiais de mudança de fase para a redução da necessidade de sistemas secundários de correção térmica e se possível para a diminuição da emissão de GEE;

Para responder a estes objetivos, propõem-se o desenvolvimento de uma metodologia de investigação estruturada em tarefas de simulação computacional e ensaio laboratorial, que visam modelar o comportamento térmico de materiais PCM e da sua interação com uma superfície coletora, considerando diferentes geometrias de encapsulamento, e o desenvolvimento de uma instalação experimental em escala laboratorial, representativa do comportamento de um equipamento real, com relevância para a produção e armazenamento de energia térmica.

## 1.4. Abordagem e contribuições

Com o desenvolvimento desta dissertação procura-se contribuir para a melhoria do conhecimento e para o desenvolvimento de ferramentas de eficiência energética e flexibilização da gestão de redes de energia na indústria agroalimentar, por meio do armazenamento de energia térmica, com recurso a materiais de mudança de fase.

A tecnologia de armazenamento de energia térmica por recurso a PCM tem sido explorada com sucesso em setores como as telecomunicações, ou a construção e climatização de edifícios. Contudo, o desenvolvimento da tecnologia visando a sua exploração no setor agroalimentar coloca novas incertezas e desafios tecnológicos. Desde logo, ao nível da segurança alimentar no que respeita aos riscos de toxicidade e corrosão dos materiais, que requerem soluções de encapsulamento eficiente sem comprometer a capacidade de transferência de calor, mas também, ao nível da sua integração no parque tecnológico instalado e da sua contribuição para o desempenho energético das operações do setor, nomeadamente, na sua capacidade de recuperar calor proveniente de fontes de baixa intensidade distribuídas ao longo das linhas de produção, de integrar o potencial das tecnologias de FER, e de maximizar a capacidade global de armazenamento, sem que isso se traduza em alterações penalizadoras dos processos operacionais ou de manutenção.

Desta forma, na execução deste trabalho estruturou-se uma metodologia de seleção de PCM identificando-se as variáveis de influência e os critérios de desempenho específicos para as exigências do setor agroalimentar. Idealizaram-se diferentes estratégias de encapsulamento, em geometria e matérias de revestimento, visando a sua integração diretamente nos equipamentos do parque tecnológico existente. Para as soluções avançadas, criou-se uma modelização numérica em *Computational Fluid Dynamics* (CFD), que visou estimar teoricamente o desempenho e impactos sobre um equipamento de referência. Sobre o modelo desenvolvido realizou-se um estudo paramétrico que permitiu avaliar a influência das condições de contorno, propriedades do material PCM, geometria e material de encapsulamento, nas fases de carga e de descarga da solução de armazenamento térmico. O conhecimento produzido foi transposto para o ensaio experimental sobre o protótipo laboratorial de um equipamento de tempera. Com base nesta solução, validou-se a viabilidade de um novo paradigma de armazenamento de energia térmica na forma de calor latente, sobre uma arquitetura distribuída, incorporada diretamente nos equipamentos produtivos. Estes ensaios, criaram ainda uma base de casos reais para o setor agroalimentar, disponibilizando dados experimentais à comunidade científica, que era inexistente à data.

Os casos de estudo e o conhecimento produzido, foram publicados em três artigos científicos, em publicações indexadas ao referencial SCOPUS e Web of Science:

- i) "Prospects for the Improvement of Energy Performance in Agroindustry Using Phase Change Materials", apresentado na DoCEIS20 (Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems), publicado em "Technological Innovation for Life Improvement", Springer, IFIP AICT 577, pp. 277-289, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-45124-0\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-45124-0_26);

- ii) “Case Studies of Latent Heat Storage with Phase-Change Materials in the Agroindustry Value Chain”, apresentado no ICoWEFS 2021 (International Conference on Water Energy Food and Sustainability), publicado em “ Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability”, Springer, pp. 456-465, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3\\_50](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3_50);
- iii) “A Case Study for Decentralized Heat Storage Solutions in the Agroindustry Sector Using Phase Change Materials”, publicado em MDPI AgriEngineering Journal 4(1), pp. 255-278, 2022. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4010018>. Indexado ESCI.

Para o presente trabalho foram ainda dados e recebidos contributos no âmbito das seguintes dissertações de mestrado e doutoramento:

- i) Carla Silva “Avaliação do desempenho de uma embalagem termo-ativa para produtos alimentares refrigerados utilizando materiais de mudança de fase”, FCT/UNL, Mestrado em Tecnologias de Produção e Transformação Agroindustrial, 2020;
- ii) Diogo Ferreira “Plataforma IoT multi-sensor para monitorização integrada de materiais PCM”, FCT/UNL, Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2021;

## 1.5. Organização do documento

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, descritos em seguida:

- **Capítulo 1**, Introdução: Descreve-se o enquadramento e importância do consumo energético na indústria agroalimentar, abordando-se os seus problemas e a oportunidade para a aplicação de materiais de mudança de fase. Descrevem-se as motivações para este trabalho e os objetivos da investigação e identificam-se as variáveis a avaliar na persecução das hipóteses.
- **Capítulo 2**, Revisão Bibliográfica: Neste capítulo contextualiza-se o conhecimento existente ao nível do armazenamento de energia térmica, dos materiais de mudança de fase e do consumo de energia na indústria transformadora agroalimentar, procurando identificar-se o cluster de equipamentos e atividades que materializam a oportunidade de estudo e demonstração das hipóteses. São apresentados PCM comerciais e propostos critérios de seleção, numa perspetiva de relevância para a indústria-alvo.
- **Capítulo 3**, Metodologia: Considerando-se os objetivos estabelecidos, sugere-se uma metodologia de investigação que permita demonstrar as hipóteses de investigação formuladas e realizar uma prova de conceito.

- **Capítulo 4, Simulação Computacional:** São identificadas e caracterizadas as estratégias de simulação a utilizar para prever o comportamento de um equipamento com um sistema passivo de armazenamento de energia baseado em PCM. São modelados e definidos critérios de simulação para o equipamento e solução de encapsulamento dos PCM selecionados. Os resultados da simulação são apreciados na perspectiva do desenvolvimento da instalação experimental.
- **Capítulo 5, Instalação Experimental:** Caracteriza-se o equipamento usado para ensaios experimentais em contexto laboratorial, incluindo a instrumentação sensorial para recolha de dados experimentais, a base de dados de consolidação e estruturação, e a produção de indicadores de controlo e desempenho.
- **Capítulo 6, Ensaios Laboratoriais e Avaliação dos Modelos Numéricos:** São apresentados e criticados os resultados dos ensaios experimentais, em comparação com os resultados da simulação numérica. Avalia-se a relevância da prova de conceito, nomeadamente as dimensões de ganhos de eficiência e a possibilidade de disseminação.
- **Capítulo 7, Conclusões e Trabalho Futuro:** Apresenta-se um resumo geral das atividades realizadas, resultados e conclusões, assim como a proposta de contribuição deste estudo para o conhecimento existente e a sua integração com outras atividades de pesquisa e sugestões do trabalho futuro.



## 2

## 2.

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesta secção apresenta-se um enquadramento da realidade energética do setor agroalimentar, procurando relacionar a natureza do consumo de energia na indústria, com a evolução das tecnologias de produção. Num segundo estágio, caracterizam-se as variáveis envolvidas em soluções de armazenamento de energia térmica, realçando as características e oportunidade para a exploração de materiais de mudança de fase, de acordo com a sua natureza e capacidade de armazenamento de calor. Por fim, considerando a multiplicidade de equipamentos e operações realizadas no setor, seleciona-se para estudo uma classe de equipamentos que, como dominador comum, operam sobre uma técnica de aquecimento lento, prolongado e estável, procurando evidenciar sobre este cluster a oportunidade existente para ganhos energéticos por meio da incorporação de materiais de mudança de fase na conceção de novos equipamentos e ou na transformação dos existentes, fazendo-o com um mínimo impacto nos modelos de operação.

## 2.1. Consumo de energia na indústria agroalimentar

A agroindústria, enquanto contexto agregador de atividades relacionadas com a transformação de produtos e de processamento de matérias-primas provenientes da agricultura, pecuária, aquicultura ou silvicultura, incorpora a cadeia de valor entre a produção e o consumo, para fins alimentares ou não alimentares. No caso da indústria alimentar, segmento desta cadeia de valor, segundo dados do Eurostat de 2013 (Monforti-Ferrario et al., 2015), o consumo de energia na União Europeia (UE-28) após produção primária, ascendeu a 28,4 Mtep, representando em média cerca de 2,6% do consumo total de energia dos estados membros, ascendendo pontualmente a máximos próximos de 5% em países mais industrializados.

Segundo o mesmo estudo, 66% deste consumo ocorre após a produção primária, sendo possível segmentar e quantificar energeticamente a cadeia de transformação e processamento subsequentes em: processamento de alimentos (28% do consumo de energia no setor), logística (9,4%), embalagem (10,7%), uso (13%) e fim de uso (5,5%).

Numa outra segmentação, o mesmo consumo energético pode ser estruturado por natureza de operação, em: fornecimento de frio (31%), força motriz (25%), iluminação (10%), ventilação (10%), bombas e sistemas de bombagem (9%), Sistemas de ar comprimido (9%) e tecnologia de processo (6%).

Entre as fontes energéticas utilizadas no setor, identificam-se 6 grupos (Figura 2.1), sendo o gás (47,8%), a eletricidade (34%) e o petróleo (7%), os mais representativos, com as energias renováveis respondendo por apenas 3%.

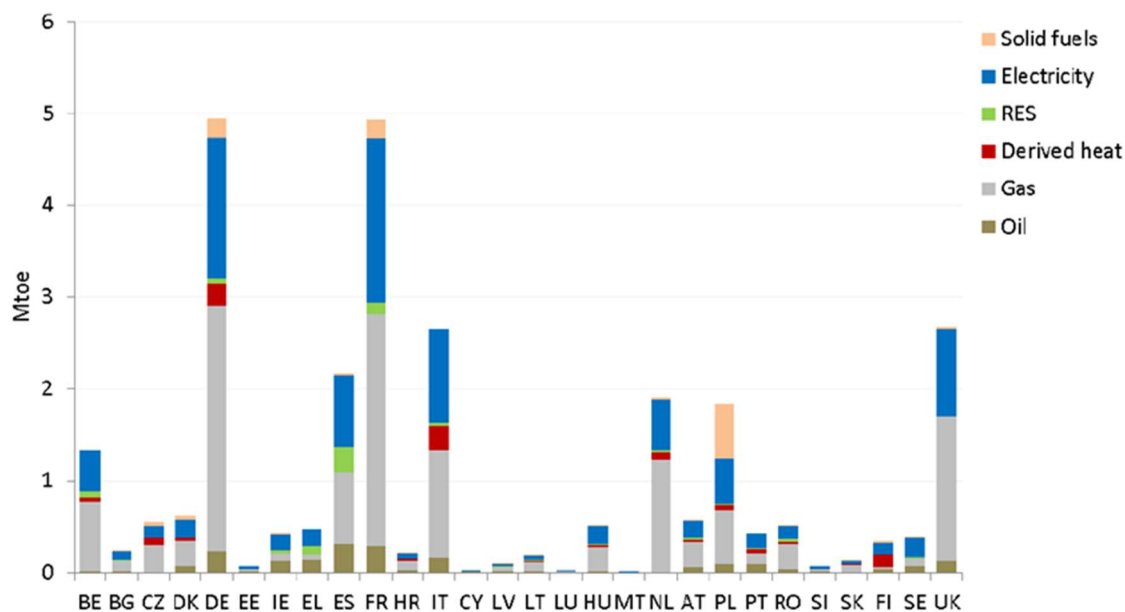


Figura 2.1 Consumo energético na indústria alimentar, por recurso e país da EU em 2013 (Monforti-Ferrario et al., 2015).

Existindo uma variabilidade na quantidade de energia necessária para o processamento de diferentes matérias-primas e produtos alimentares, esta reflete-se proporcionalmente no custo energético associado ao produto. Este valor oscila, em média, em torno de 3% do custo final do produto. O que sendo uma margem aparentemente baixa, é frequentemente referida como justificação para a dificuldade na adoção de práticas de eficiência energética no setor (Muller, Marechal, Roux, & Wolewinski, 2005). Esta percepção, contudo, tem vindo a alterar-se, quer pelo risco de exposição à variabilidade dos preços nas fontes energéticas convencionais, quer por políticas cada vez mais agressivas de sensibilização e penalização ao nível da emissão de GEE. Simultaneamente, atendendo a que o processo de produção de cada produto é normalmente replicado milhares de vezes, numa perspetiva de escala e de acumulado, a margem de 3% torna-se relevante, assumindo especial interesse quando é possível identificar e isolar equipamentos ou operações do processo produtivo, com especial contribuição para este valor.

### Soluções de eficiência energética na indústria.

O consumo de energia na atividade agroindustrial ocorre essencialmente nas formas de energia elétrica e térmica. A energia elétrica pode ser utilizada como fonte de qualquer processo de transformação de matérias primas alimentares, bem como em atividades de suporte, relacionadas por exemplo com a iluminação ou ventilação (Latini & Laid, 2017). Pode também ser utilizada como fonte de produção de energia térmica, em combinação ou alternativa a

soluções de combustão, que têm frequentemente uma utilização mais restrita e um menor rendimento.

Ainda que certos consumos energéticos não possam ser evitados, como os decorrentes de operações de secagem, cozedura ou congelamento, entre outras, a otimização energética dos processos poderá proporcionar economias substanciais. Na persecução destes ganhos de eficiência, considera-se a necessidade de identificar processos ou operações, importantes e com relevo energético.

Com esse objetivo, numa estratégia de segmentação holística das operações do setor alimentar, é possível uma diferenciação entre processos de suporte e processos de produção (Thollander & Palm, 2013), identificando:

- i) onze tipos de processos de produção: desmanche, mistura, corte, união, revestimento, formação, aquecimento, fusão, secagem ou concentração, refrigeração ou congelamento e embalagem;
- ii) sete tipos de processos de suporte suportados em serviços de energia: fornecimento de frio, força motriz, iluminação, ventilação, bombas de calor, sistemas de ar comprimido e tecnologia de processo.

Nesta linha de análise identificaram-se oportunidades de melhoria de eficiência energética, com maior visibilidade na área dos processos de suporte (Kamiński & Leduc, 2010). Nomeadamente, intervindo ao nível do dimensionamento adequado, da manutenção e da construção de sistemas de retorno, em motores e bombas, sistemas de ar comprimido, refrigeração, aquecimento e iluminação de edifícios. Estas estratégias de eficiência energética, apresentam características de aplicação transversal às diferentes áreas da indústria, possuindo em muitos casos, modelos de *break-even* e *pay-back*, já bem definidos e consolidados.

Procurando novas áreas de intervenção que extravasem os modelos conhecidos, é possível reconhecer nos desenvolvimentos tecnológicos do setor a consequência da adoção de uma outra estratégia de investigação, mais direcionada à especificidade do processo de transformação industrial, onde se estabelece como alvo de investigação o ganho energético em operações unitárias específicas. São reflexo desta estratégia direcionada, por exemplo, a introdução de ferramentas de ultrassom em processos de emulsificação e filtração e de otimização de processos de descongelamento, tendo como base a natureza organolética dos produtos. Naturalmente, a especificidade destes avanços limita a sua massificação, mas evidencia de forma inequívoca a relevância dos ganhos energéticos em nichos da operação produtiva.

Na persecução de ganhos de eficiência energética que se propõe seguir no presente trabalho, adota-se esta segunda linha de investigação, estabelecendo-se a necessidade de identificar e isolar processos ou operações individuais, envolvendo trocas de calor, que sejam especialmente importantes em atividades produtivas e simultaneamente consumidoras de energia. Assim, o foco será direcionado para processos de transformação por: aquecimento, fusão e secagem, dependentes de técnicas de armazenamento de energia térmica.

## 2.2. Armazenamento de energia térmica

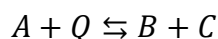
As flutuações do consumo de energia, na generalidade dos setores e em particular na indústria, concorrem diariamente com a disponibilidade do abastecimento de rede elétrica e com a capacidade de produção própria instalada, frequentemente por via de FER, repercutindo-se ao nível do custo e capacidade de operação. Esta diferença entre a produção e o consumo, coloca desafios ao nível do dimensionamento óptimos da capacidade produtiva e do desenvolvimento de soluções com capacidade de armazenar energia, que de forma económica permitam armazená-la quando o consumo é baixo, e libertá-la quando este cresce.

Entre as formas de armazenamento de energia mais eficientes, com diferenças funcionais que condicionam a sua aplicabilidade, destacam-se o armazenamento na forma potencial gravítica (ex: água em barragens), química e na forma de calor. No caso das soluções de armazenamento de energia na forma de calor, sistemas TES (*Thermal Energy Storage*), estes sustentam-se em processos físicos e químicos, que decorrem das propriedades termodinâmicas dos materiais utilizados. Entre outros fatores, a eficiência deste tipo de sistemas esta relacionada com a capacidade de armazenamento de energia por unidade de massa (densidade de energia), sendo que a energia térmica pode ser armazenada por três tecnologias diferentes: calor sensível, calor latente e energia termoquímica.

### 2.2.1. Armazenamento de energia termoquímica

As tecnologias de armazenamento de energia química são soluções baseadas em processos de sorção e termoquímicos (Jarimi et al., 2019). Sorção é o termo utilizado para agrupar os processos de adsorção e absorção. A adsorção é o processo pelo qual uma substância (sorbato) adere à superfície de outra substância (sorbente) devido a ligações de hidrogénio ou forças de van de Waals e que não implica uma alteração molecular do composto. Ao contrário, a absorção implica a incorporação de uma substância (sorbato) ao volume global de outra substância (sorbente) num estado diferente. Num processo de sorção, o calor é armazenado quebrando a força de ligação entre o sorbente e o sorbato.

O armazenamento termoquímico de energia é baseado em uma reação química reversível em três etapas, pela qual um produto químico A é transformado em outros dois produtos químicos, B + C quando adicionado calor Q:



Equação 2.1

Normalmente estes são sistemas de gás-sólido ou líquido-sólido, e os materiais utilizados denominam-se TCM (Thermochemical Materials). Numa fase inicial, é transmitido calor ao material A, que o absorve decompondo-se nos materiais B e C. Estes dois produtos são depois separados e armazenados em contentores diferentes à temperatura ambiente. Posteri-

ormente, quando o calor armazenado se torna necessário, sobe condições ambiente de pressão, temperatura e humidade adequadas, os produtos B e C reagem quimicamente, formando A e libertando o calor armazenado.

## 2.2.2. Armazenamento de energia na forma de calor sensível

No armazenamento na forma de calor sensível (SHS, *Sensible Heat Storage*), a energia térmica é armazenada num material arrefecido ou aquecido a uma determinada temperatura, que não provoca alteração de fase. Normalmente, a capacidade de armazenamento térmico por calor sensível é muito limitada, necessitando de volumes de material muito superiores, quando comparada a soluções de calor latente ou aos sistemas termoquímicos. A competitividade deste tipo de soluções resulta de se utilizarem materiais acessíveis e de baixo custo, tipicamente água, que o torna a forma mais vulgar de armazenamento de energia térmica.

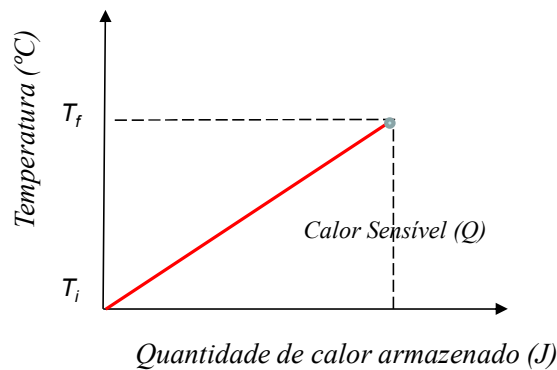


Figura 2.2 Armazenamento de calor sensível. Adaptado de (Sarbu & Sebarchievici, 2018).

A energia ( $Q$ ) armazenada numa solução de calor sensível, depende da capacidade térmica específica do material ( $C_p$ ), da variação de temperatura ( $T$ ) e da massa da amostra ( $m$ ), podendo ser determinada pela equação:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_p(T) dT$$

Equação 2.2

ou (Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009):

$$Q = m \cdot \bar{C}_p \cdot (T_f - T_i),$$

Equação 2.3

Onde  $\bar{C}_p$  é o valor médio do calor específico do material de armazenamento, entre a temperatura inicial e a temperatura final, a pressão constante.

### 2.2.3. Armazenamento de energia na forma de calor latente

O armazenamento térmico através de calor latente (LHS, *Latent Heat Storage*) recorre a materiais que mudam de fase, normalmente entre a fase sólida e a fase líquida. Durante a mudança de fase a temperatura permanece constante, enquanto a quantidade de energia armazenada (ou libertada) a nível molecular aumenta (ou diminui) substancialmente. Tradicionalmente, o fluido mais utilizado é a água (Sarbu & Sebarchievici, 2018), que tem a vantagem de ser abundante e inerte. Sabendo que a água muda de fase (sólido-líquido), a zero graus Celsius quando se encontra à pressão atmosférica, esta é usada no armazenamento de frio a esse nível de temperatura.

As propriedades que definem um estado termodinâmico são a pressão ( $P$ ), o volume ( $V$ ) e a temperatura ( $T$ ), cujas relações de dependência são estabelecidas pelas leis fundamentais da termodinâmica (Shapiro & Moran, 2014):

- i) Primeira lei da termodinâmica para sistemas fechados, que relacionando a variação da energia durante uma mudança de estado, com o trabalho realizado ( $W$ ) e quantidade de calor ( $Q$ ):

$$\Delta E = Q - W$$

Equação 2.4

- ii) Lei de Boyle-Mariotte para gases perfeitos, onde  $k$  é uma constante que relaciona a pressão e o volume de um sistema fechado a temperatura constante:

$$P \times V = k$$

Equação 2.5

- iii) Lei dos gases perfeitos: Onde ( $n$ ) é o número de mols e ( $R$ ) a constante universal dos gases ( $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$ ):

$$P \times V = n \times R \times T$$

Equação 2.6

As mudanças de estado termodinâmico de uma certa quantidade de um material são transformações em que as funções de caracterização podem alterar-se de forma isolada ou agregada (Cengel, 2009), denominando-se: isocóricas, isobáricas, isotérmicas e adiabáticas (Figura 2.3).

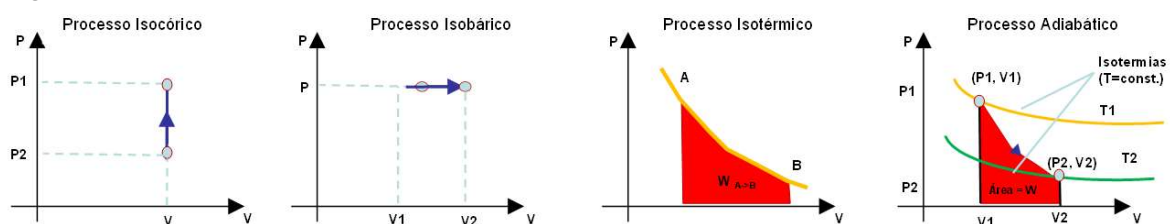


Figura 2.3 Processos termodinâmicos, função ( $p, V, T$ ). Adaptado de (Shapiro & Moran, 2014)

- i) isobárico, quando a pressão é constante, variando volume e temperatura;
- ii) isotérmico, quando a temperatura é constante, variando pressão e volume;
- iii) isocórico ou isovolumétrico, quando o volume é constante, variando pressão e temperatura;
- iv) adiabático, quando não há troca de calor com o meio externo, seja porque o corpo esteja termicamente isolado ou porque o processo ocorre de forma rápida, fazendo com que o calor trocado seja desprezável.

Num processo isobárico o trabalho realizado pela mudança de estado é (Cengel, 2009):

$$W_{1-2} = P \times (V_2 - V_1) = nR(T_2 - T_1)$$

Equação 2.7

sendo a quantidade de calor fornecida ou retirada do sistema, dependente do seu calor específico ( $c_p$ ), dada por:

$$Q_{1-2} = m c_p (T_2 - T_1)$$

Equação 2.8

Numa transformação adiabática, em que não há troca de energia com o meio externo (porém, pode ocorrer variação térmica), verifica-se normalmente uma expansão ou contração de um gás, em que todas as variáveis são alteradas ( $p, V, T$ ). Quando um gás é comprimido adiabaticamente (diminuição do volume), o trabalho é realizado por um agente externo. Com isso a energia do sistema aumenta até se igualar ao trabalho realizado, e como o sistema não realiza troca de energia com o meio, a temperatura aumenta como consequência. Na expansão adiabática (aumento do volume), o sistema utiliza parte de sua energia para realizar trabalho, o que implica a diminuição da energia interna e consequentemente na diminuição da temperatura.

A mudança de estado de um sistema encontra-se assim relacionada com a natureza do calor armazenado no mesmo, sendo de considerar diferentes tipos de calor e de características de transferência térmica, nomeadamente:

- i) Calor sensível ( $Q$ ): Calor transferido de ou para um corpo, que provoca uma variação de temperatura;
- ii) Calor latente ( $L$ ): Associado a algum tipo de alteração na estrutura física do corpo, corresponde à energia que é necessário fornecer por unidade de massa para que esta mude de fase:

$$L = Q/m$$

Equação 2.9

- iii) Capacidade Térmica (C): mede a relação entre a energia fornecida a um corpo na forma de calor e a variação de temperatura observada no mesmo:

$$C = Q/\Delta T$$

Equação 2.10

- iv) Calor específico (c): Sendo a capacidade térmica uma característica de um corpo, influenciada, por exemplo, pela sua forma, no caso do calor específico este já não é uma característica do corpo, mas da substância que forma o corpo, correspondendo à quantidade de calor recebida ou cedida por 1 g da substância, necessária para uma variação de 14,5 °C para 15,5 °C na temperatura do corpo em questão. É dado pela relação da capacidade térmica do corpo pela sua massa:

$$c = C/m$$

Equação 2.11

- v) Quantidade de Calor ( $\Delta Q$ ): Representa a variação da energia térmica num corpo, por que transitou para outro corpo ou porque mudou de natureza (por exemplo por mudança de estado);

- i) Condutividade Térmica (k): é uma constante que mede a capacidade de um material em conduzir energia térmica. A Condutividade Térmica, relaciona a quantidade de calor ( $\Delta Q$ ) conduzida por intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), através de uma barra de material de comprimento  $L'$ , com uma secção de área  $A$ , para uma diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) imposta nos extremos da barra:

$$k = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{L'}{A \cdot \Delta T}$$

Equação 2.12

Ao nível das mudanças de fase, há que considerar três transições:

- i) Líquida-gasosa (vaporização): pode tratar-se de um processo isobárico ou isocórico, consoante desenvolvido num sistema aberto ou fechado. No primeiro caso, a pressão constante, verifica-se um aumento de volume proporcional à temperatura. No segundo caso, a volume constante, verifica-se um aumento de pressão proporcional à temperatura. O processo inverso (condensação) apresenta a variação inversa das grandezas envolvidas.

ii) Solida-Líquida (fusão): processo isotérmico em que a mudança de fase é normalmente provocada por uma variação de pressão com alteração ligeira de volume entre as duas fases. Na fase de transição, mantém-se constante a temperatura do corpo (calor sensível), e praticamente inalterada a volumetria, e a pressão exercida traduz-se num crescimento do calor latente. Neste processo o calor sensível mantém-se, até à conclusão do processo de liquidificação do material, após o qual estabiliza o calor latente e se verifica o crescimento do calor sensível (Figura 2.4). O processo inverso (solidificação) apresenta a variação inversa das grandezas envolvidas.

iii) Sólida-Sólida: sendo menos comum, nestes casos, não ocorre uma mudança de estado. O armazenamento de energia decorre de uma reorganização da estrutura molecular do material.

A mudança de fase sólida-sólida envolve a menor densidade de energia, enquanto a mudança de fase líquido-gás corresponde à maior densidade de energia das três, mas tem a contrariedade de implicar expansões de volume difíceis de controlar. Por sua vez, a mudança de fase sólido-líquido apresenta elevada capacidade de armazenamento de energia latente, com pequenas alterações de volume, logo sem problemas de controlo de pressão, o que a torna desejável no armazenamento de energia latente.

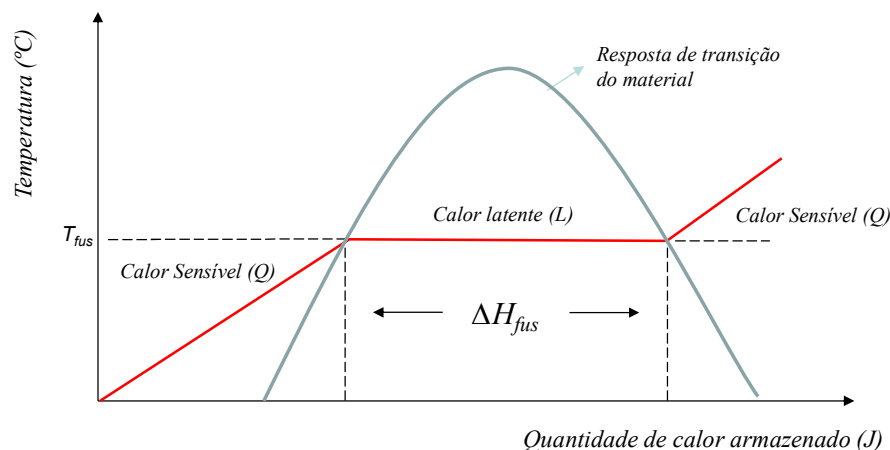


Figura 2.4 Armazenamento de Calor Latente. Diagrama teórico de uma mudança de fase, solida-líquida. Adaptado de (Sarbu & Sebarchievici, 2018).

A energia armazenada num processo de mudança de fase solida-líquida, em que o material inicia o processo à temperatura  $T_1$  e termina à temperatura  $T_2$  pode ser calculada por:

$$Q = \int_{T_1}^{T_{fus}} m \cdot C_{sp}(T) \cdot dT + \Delta H_{fus} + \int_{T_{fus}}^{T_2} m \cdot C_{lp}(T) \cdot dT$$

Equação 2.13

ou (Sharma et al., 2009):

$$Q = m \cdot [\bar{C}_{fs} \cdot (T_{fus} - T_1) + a_m \cdot \Delta H_m + \bar{C}_{fl} \cdot (T_2 - T_{fus})],$$

Equação 2.14

existindo uma contribuição de calor sensível entre  $T_1$  e  $T_{fus}$  e outra entre  $T_{fus}$  e  $T_2$ , correspondendo a componente de calor latente a  $\Delta H_{fus}$ . Sendo  $T_{fus}$  a temperatura de mudança de fase,  $\bar{C}_{sp}$  o valor médio do calor específico do material na fase sólida ( $\bar{C}_{fs}$ ), entre a temperatura inicial,  $T_1$ , e a temperatura de mudança de fase  $T_{fus}$ ,  $\bar{C}_{lp}$  é o valor médio do calor específico do material na fase líquida ( $\bar{C}_{fl}$ ), entre a temperatura de mudança de fase  $T_{fus}$  e a temperatura final  $T_2$ ,  $a_m$  é a fração da massa total de PCM que muda de fase (é fundida) e  $\Delta H_m$  é o calor latente de fusão por unidade de massa.

Como exercício de comparação, a quantidade de energia térmica possível de armazenar numa solução de calor sensível com recurso a água, face a uma solução em material PCM com iguais,  $\bar{C}_{sp}$  e  $\bar{C}_{lp}$ , seria semelhante até ao valor  $T_{fus}$ , mas inferiores após essa temperatura. Para obter valores de energia armazenada idênticos em calor sensível, seria necessário trabalhar a uma temperatura  $T'$  superior (Figura 2.5), que pode não estar disponível, ou no caso agroalimentar, comprometer as características dos alimentos manipulados.

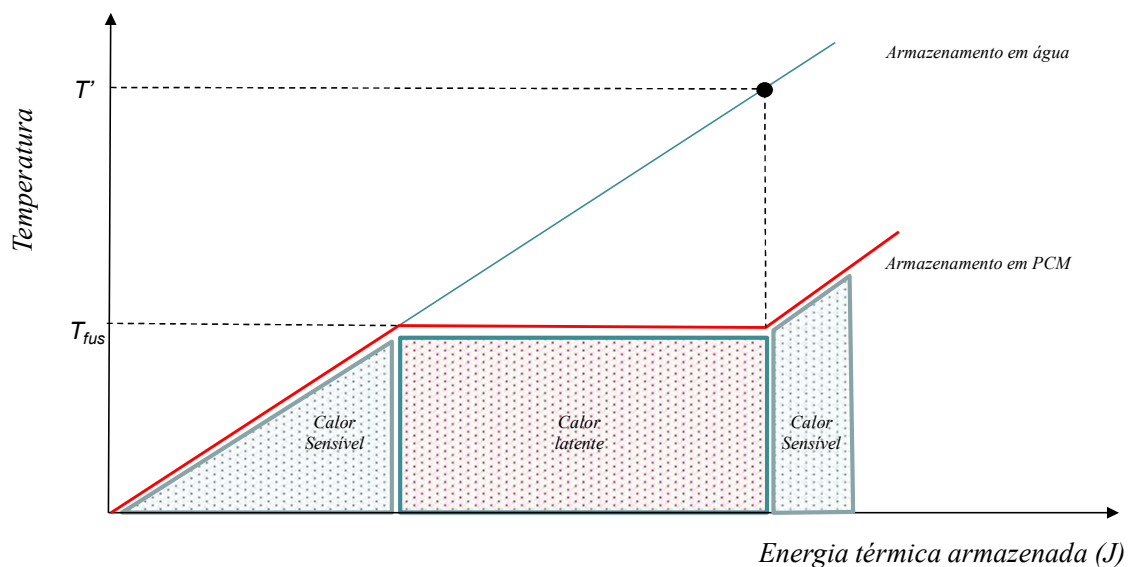


Figura 2.5 Armazenamento de energia em processo de mudança de fase, sólido-líquido, vs. Armazenamento em calor sensível. Adaptado de (Sarbu & Sebarchievici, 2018).

## 2.2.4. FER e a importância do armazenamento de energia térmica na flexibilidade de operação da rede energética

O desenvolvimento das tecnologias de produção de energia por fontes renováveis, nas suas diferentes formas (solar, eólica, geotérmica, entre outras), tem demonstrado ser um passo

importante na autossustentabilidade de vários setores, entre eles a produção industrial, com vista a operações com baixos índices de emissões de carbono. Entre os muitos desafios que se colocam à exploração deste tipo de tecnologias, destacam-se: i) o rendimento da tecnologia, na sua capacidade produtiva e ii) o armazenamento da energia produzida.

Em particular, o segundo ponto coloca questões de dimensionamento que visam não só equilibrar a capacidade produtiva com o consumo, mas também o desenvolvimento de soluções de armazenamento local de energia, que permitam reter os excessos pontuais de produção, disponibilizando-os mais tarde, quando necessário.

Com este objetivo, ainda que em escalas com aplicações diferentes, o armazenamento de energia na forma potencial gravítica e na forma de calor sensível, são duas das soluções tecnológicas mais implementadas. Face a estas soluções, o armazenamento na forma de calor latente, a uma escala de aplicação comparável com as soluções de calor sensível, poderá proporcionar uma maior capacidade de armazenamento, consequência de uma maior densidade energética. Poderá também proporcionar novas arquiteturas de armazenamento distribuído, mais flexíveis e convenientes.

Por comparação com o armazenamento por calor sensível em água, numa operação que se desenvolva a uma temperatura constante, igual ou superior à temperatura de fusão do PCM, a partir de um momento em que se atinge essa temperatura, a capacidade de armazenamento de calor no PCM é muito maior que a existente na água. O PCM continua a acumular a energia fornecida e a armazená-la na forma de calor latente, enquanto a temperatura da água iguala a da fonte exterior e deixa de armazenar calor. O PCM irá armazenar calor latente até à mudança integral de estado, altura que passa a absorver apenas calor sensível até equalizar com a fonte de temperatura externa (Figura 2.5).

Se a fonte de temperatura externa for produzida por efeito de Joule, através de alimentação por energia elétrica de rede, isto significa a interrupção do consumo quando atingida a temperatura de trabalho, sem perdas ou ganhos relevantes nos dois casos. Isto altera-se, tornando-se especialmente interessante quando a fonte de energia é de origem renovável (FER), ou complementada por uma FER. Nesse caso, o ganho de eficiência energética que se obtém decorre de se aumentar significativamente a capacidade de armazenamento, passando a aproveitar todo o potencial da FER. A melhoria da capacidade de armazenamento, torna-se por isso um requisito fundamental para a utilização total do potencial das energias renováveis instaladas. O que acontece hoje quando se atinge o consumo pleno da energia renovável produzida é: i) a interrupção da alimentação FER, com perda de eficiência por restrição de energia ("*energy curtailment*"), (Kane & Ault, 2014), ii) a transferência da energia produzida para venda à rede a custo reduzido (perda de valor), ou iii) armazenamento, em calor sensível, em depósitos centralizados de água, cuja baixa densidade energética requer volumetrias e temperaturas de trabalho muito superiores, para o armazenamento da mesma quantidade de energia, fazendo-o num modelo que favorece perdas por radiação pelas paredes dos tanques (perda de eficiência e de valor).

## 2.2.5. Armazenamento de energia térmica em modelo centralizado por SHS vs. armazenamento distribuído em LHS

Na atividade agroindustrial, o armazenamento em calor sensível, recorrendo a tanques de água aquecida pelo excedente energético, independentemente da origem (ex. FER), representa o estado da arte e maturidade tecnológica das soluções TES, que padece de todas as ineficiências anteriormente mencionadas. De entre estas, distinguem-se a exigência de volumes de armazenamento elevados (dezenas de metros cúbicos), em esquemas centralizados, o que não permite providenciar a estabilização da temperatura no meio de armazenamento, muitas vezes com perdas relevantes de calor. A estes inconvenientes, acresce a rigidez da solução, incapaz de acompanhar a dinâmica e flexibilidade das linhas de produção, ou de potenciar a recuperação de fontes de calor residual, que assim se perdem ao longo da cadeia produtiva. Na Figura 2.6 apresenta-se o esquema de uma arquitetura centralizada de armazenamento em SHS, integrando energias renováveis (solar térmica).

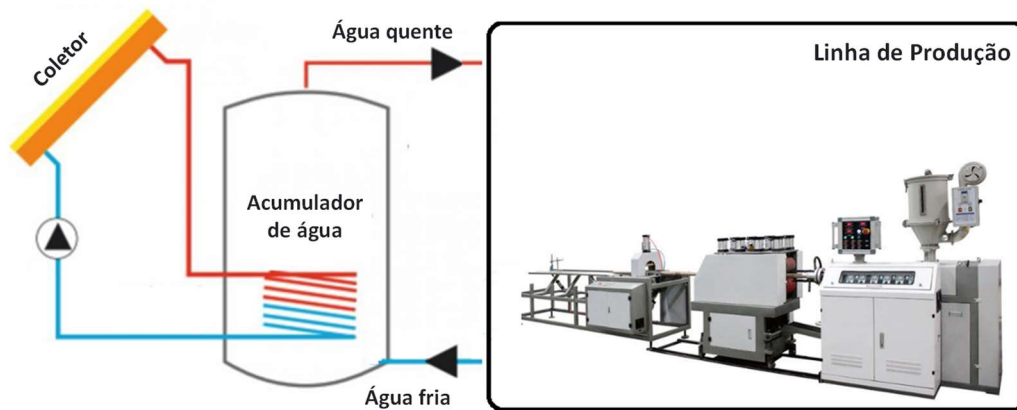


Figura 2.6 Armazenamento centralizado por calor sensível.

Considerando que grande parte das operações de transformação do setor agroindustrial dependem de alguma forma de calor, a possibilidade de armazenamento de energia térmica na forma de calor latente, num modelo descentralizado, integrado ao longo das linhas de produção (Figura 2.7), apresenta vantagens sobre vários vetores operacionais:

- i) armazenando energia na forma de calor latente, aumenta-se a estabilização passiva da temperatura de funcionamento, minimizando os riscos de degradação dos alimentos e consequentemente melhorando a qualidade dos produtos finais;
- ii) a possibilidade de um modelo distribuído incorporado nos equipamentos de produção, contribui para dar flexibilidade energética ao armazenamento e consumo na rede elétrica e reduzir os requisitos logísticos, de espaço e de infraestrutura inerentes ao armazenamento centralizado, na forma de calor sensível;

- iii) A distribuição ao longo da cadeia de produção, possibilita também um nível de proximidade que facilita o processo de recuperação e valorização de fontes de calor residual de baixa intensidade, ao longo das linhas de produção;

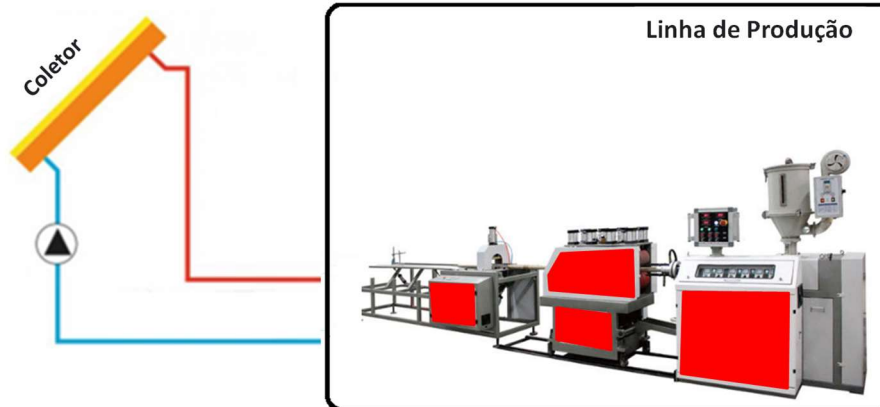


Figura 2.7 Armazenamento em calor latente, distribuído ao longo da linha de produção.

Entre outros obstáculos à conceção e adoção uma solução desta natureza, destacam-se

- i) o elevado investimento realizado no parque tecnológico existente, cuja longevidade de exploração é normalmente longa (na ordem das dezenas de anos), inviabilizando a simples substituição por uma nova geração tecnológica;
- ii) o risco de introdução de materiais que podem ser tóxicos, corrosivos e ou inflamáveis, numa indústria que exige os mais elevados critérios de segurança. Para que isso seja viável, são necessárias soluções de encapsulamento dos PCM, que garantam a segurança da operação, sem comprometer a capacidade de troca de calor necessária para a viabilidade energética, a um custo acessível.

### 2.3. Materiais de mudança de fase (PCM)

O armazenamento de energia térmica na forma de calor latente tem, provavelmente, a sua maior referência na produção de gelo (armazenamento de frio), justificável pelo facto de a água ser um fluido de baixo custo, abundante e inerte. Contudo, os parâmetros ( $p, V, T$ ) que regulam a transição da água entre os estados líquido e sólido (1 atm, 1 L, 0 °C), nomeadamente a temperatura de mudança de estado, limitam o espectro de aplicação deste fluido.

Para ultrapassar as limitações da água gelada no armazenamento de energia térmica, têm vindo a desenvolver-se outras substâncias que têm o mesmo objetivo, armazenar energia durante a mudança de fase (Pielichowska & Pielichowski, 2014). A estas substâncias atribui-se o nome de materiais de mudança de fase (*Phase Change Material*, PCM). Na sua conceção, o principal desafio colocado aos investigadores e indústria tem sido o desenvolvimento de substâncias que consigam armazenar cada vez maiores quantidades de energia, em menor massa, a diferentes níveis de temperatura, permitindo a sua exploração num espectro alargado de

setores de atividade onde se incluem a construção, o setor automóvel, a armazenagem e o transporte de alimentos e fármacos, as telecomunicações, o setor aeroespacial e a área médica, entre outras de menor relevo (Sharma et al., 2009; Ure & Mashare, 2013). Como exemplos:

- i) No setor da construção, o estudo da incorporação dos PCM tem tido maior expressão no desenvolvimento de sistemas de climatização, sistemas de aquecimento passivo e sistemas de refrigeração. Os PCM podem ser incorporados em telhados, coberturas, pisos, revestimento de paredes, janelas, caixilharias e até mesmo integrados em materiais de construção como o betão.
- ii) No setor das telecomunicações a utilização de PCM verifica-se em soluções de refrigeração de equipamentos de comunicação críticos, para proteção face a cenários extremos de catástrofe (ex. incêndios), visando preservar a operabilidade destes e a integridade dos dados.
- iii) No setor aeroespacial, os PCM têm sido utilizados na construção de cápsulas para recolha e retenção de amostras, assegurando que as mesmas permanecem nas condições originais de temperatura e isolamento, até que sejam abertas para exame e pesquisa.
- iv) Na área médica, os PCM têm sido explorados nas áreas de ambulatório e cirurgia estética, envolvendo implantes, próteses e técnicas terapêuticas, onde se procuram soluções com capacidade de adequação à dinâmica da temperatura corporal, desta forma facilitando a sua aceitação e eficiência.

De acordo com a sua natureza e comportamento, a classificação dos PCM permite dividi-los em três grupos (Sarbu & Sebarchievici, 2018), nomeadamente, orgânicos, inorgânicos e eutéticos, a seguir detalhados.

- i) Os PCM orgânicos podem ser subdivididos em parafinas, constituídas por hidrocarbonetos saturados, e não-parafinas na forma de ácidos gordos, álcoois e glicóis. Em geral, os PCM deste grupo não apresentam segregação e solidificam sem super-cooling (Oró, de Gracia, Castell, Farid, & Cabeza, 2012), ou a verificar-se este efeito não é relevante. No caso das parafinas, estas apresentam uma gama abrangente de intervalos de temperatura de mudança de fase que lhes permite uma variada aplicação, sendo a sua principal desvantagem a menor condutividade térmica (cerca de  $0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) e o facto de serem incompatíveis com alguns materiais plásticos. No segmento das não parafinas observa-se também valores baixos da condutividade térmica ( $0,15 - 0,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Em comum, os PCM deste grupo têm a desvantagem de serem inflamáveis.

- ii) Os PCM inorgânicos são essencialmente sais hidratados e metálicos. Estes últimos, contudo, apresentam temperaturas de mudança de fase na ordem das centenas de graus, que limitam a sua exploração. Os sais hidratados são constituídos por sais inorgânicos e água. A mudança de fase destes materiais envolve processos de hidratação e desidratação que, de certa forma, se assemelham aos processos de fusão e solidificação. São materiais com custos de produção habitualmente mais baixos que os PCM orgânicos, com maior calor latente por unidade de massa e volume, e que apresentam uma condutividade térmica superior. Além disso, não são inflamáveis e têm uma variação de densidade inferior aos últimos, entre os estados sólido e líquido. A sua principal desvantagem é a segregação na mudança de fase, evidenciado reações de *supercooling* e sendo também, por norma, corrosivos para os metais.
- iii) Os PCM eutéticos são compostos por duas ou mais substâncias que, durante a fase de cristalização, formam uma mistura que se comporta como uma substância única. Estes podem ser constituídos por uma grande variedade de combinação que inclui misturas de compostos orgânicos, misturas de compostos inorgânicos e materiais constituídos por compostos orgânicos e inorgânicos. Como principais vantagens, aponta-se o facto de se poderem desenvolver compostos para as temperaturas específicas das aplicações alvo e de apresentarem habitualmente valores de calor latente superiores aos demais.

A disposição dos diferentes tipos de PCM no espectro da temperatura, com base nas temperaturas de mudança de estado, evidencia claras predominâncias e conseqüentemente, a adequação a diferentes tipos de aplicações:

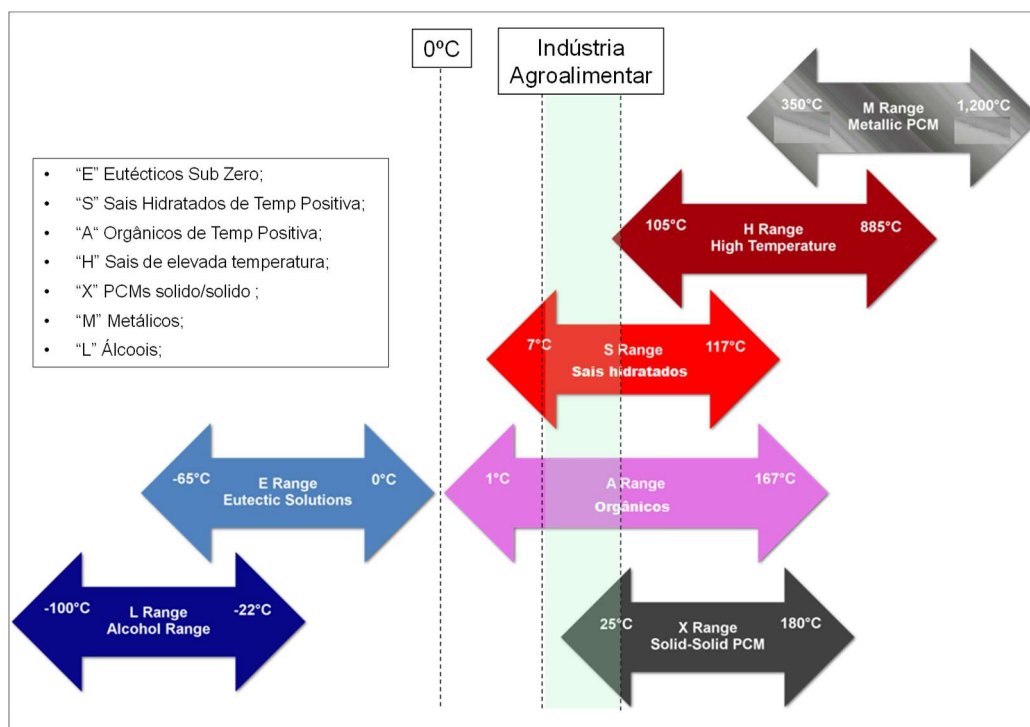


Figura 2.8 Gama de temperaturas de PCM, em função do seu tipo. Adaptado de (PCM uk limited, 2020).

Sendo vasto o espectro de aplicabilidade destes materiais, sem barreiras regulamentares ou setoriais de relevo, a sua exploração encontra-se condicionada pela disponibilidade e custo dos próprios e por um conjunto de características técnicas que condicionam a sua aplicabilidade. Entre as principais características de diferenciação (Pielichowska & Pielichowski, 2014), destacam-se:

- i) As temperaturas de mudança de fase sólido-líquido ( $T_{fus}$ ) e líquido-sólido ( $T_{sol}$ ), devendo ser temperaturas adequadas ao intervalo térmico de aplicação, com baixa histerese. Ou seja, as temperaturas devem apresentarem um reduzido intervalo durante o qual se dá o processo de mudança de fase.  
A água é ideal nesta característica porque, por ser uma substância pura, congela e liquidifica a exatamente a mesma temperatura de 0 °C. Contudo, a maioria dos PCM solidifica e liquidifica ao longo de um intervalo de vários graus centígrados, apresentando temperatura de fusão (no sentido do armazenamento de energia) diferente da temperatura de solidificação (no sentido da libertação da energia armazenada), originando um fenómeno de histerese, que se deseja ser o menor possível.
- ii) Elevado calor latente (L), por unidade de volume e massa. Quanto maior o calor latente e a densidade do material, maior a capacidade de absorver e libertar energia;
- iii) Baixa pressão de vapor para minimizar os riscos de rotura e fugas de PCM nos sistemas;
- iv) Estabilidade química para permitir elevado número de ciclos de fusão/solidificação;  
A longevidade de um PCM decorre da sua capacidade de realizar ciclos sólido/líquido sem alterar as características físico-químicas do material que determinam a sua função de armazenamento de energia. Contudo, com o uso prolongado, tende a ocorrer uma certa degradação físico-química que diminui a capacidade de armazenamento de energia. Este tipo de problema ocorre por exemplo em PCM do tipo sais hidratados em que se vai perdendo a capacidade de separação dos materiais na mudança de fase. Acontece também em alguns PCM eutéticos, cujos materiais constituintes são suscetíveis a ataques microbiológicos, requerendo a sua proteção com uso de biocidas.
- v) Baixo grau de corrosão, de toxicidade e inflamabilidade, não devendo em caso de rotura emitir substâncias tóxicas ou perigosas para o ambiente.  
Os PCM são frequentemente utilizados em aplicações em que podem entrar em contacto com pessoas, por exemplo no arrefecimento de alimentos ou no controlo de temperatura em edifícios. É por isso importante que sejam os mais seguros possíveis;
- vi) Condutividade térmica (k) elevada, de forma a permitir uma elevada taxa de troca de calor;
- vii) Pequena variação da densidade ( $\rho$ ) entre a fase sólida e líquida. A variação de estado pode conduzir a variação de volume e consequentemente de densidade (ex: A cristalização da água em gelo, aumenta o volume);

viii) Baixo grau de “super-cooling”, um fenómeno observado em vários PCM eutéticos e sais hidratados, em que o PCM se mantém no seu estado líquido, mesmo depois de arrefecido, a baixo do seu ponto de solidificação.

Na tabela 2.1 comparam-se as vantagens e desvantagens dos principais grupos de PCM, para além dos valores das respectivas temperaturas de mudança de estado.

Tabela 2.1 PCM: Classes e comparação funcional de PCM.

PCM's			Vantagens	Desvantagens
Tipo	Subtipo	Exemplo		
Orgânicos	Parafina	Carboidratos	Simples de usar; Quimicamente inerte; Estabilidade para elevado número de ciclos; Baixa pressão de vapor; Baixa temperatura de fusão; Baixa Corrosividade; Pequena variação de volume nas mudanças de fase; Sem super-cooling; Não tóxico; Reciclável;	Normalmente mais caro; Baixa densidade e capacidade de calor latente; Baixa condutividade térmica; Temperatura de mudança de fase mal definidas; Normalmente inflamável; Frequentemente incompatível com encapsulamentos plásticos;
	Não Parafina	Ácidos gordos, álcoois e glicóis.		
Inorgânicos	Sais hidratados	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , $\text{LiClO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , ...	Baixo custo e grande disponibilidade; Boa densidade e capacidade de calor latente; Elevada condutividade térmica; Temperatura de mudança de fase bem definida; Não inflamável; Compatível com contentores plásticos; Normalmente reciclável;	Ocorrência de segregação; Necessita de maiores cuidados de preparação; Baixa longevidade, necessita de aditivos para prologar o período de vida; Propenso a fenómeno de super-cooling; Potencialmente corrosivo para alguns metais; Elevada pressão de vapor;
	Metálicos	Mercurio, Galio, ...		
Eutéticos	Orgânicos-Orgânicos		Temperatura de fusão rigorosa; Elevada capacidade de armazenamento térmico;	Normalmente pouca informação técnica disponível, sobre propriedades termofísicas;
	Orgânicos-Inorgânicos			
	Inorgânicos-Inorgânicos			

### 2.3.1. Nomenclatura de PCM

Tratando-se de uma área de ciência emergente, a nomenclatura utilizada para classificar PCM não está ainda normalizada. Para efeito do presente trabalho, adota-se a designação do fabricante “PCM Products limited”, em que o nome é constituído por uma sequência alfanumérica, onde as letras identificam o tipo de PCM e os números, a temperatura de mudança de fase (por exemplo: S20, onde “S” significa sal hidratado e “20” temperatura de fusão de 20°C). Na tabela 2.2 indicam-se várias características termofísicas de diferentes tipos de PCM.

Tabela 2.2 PCM: Características termofísicas de tipos de PCM. Adaptada de (PCM uk limited, 2020).

PCM		Temperatura de mudança de fase ( $T_{fus}$ )	Densidade ( $\rho$ )	Calor latente de fusão por unidade de massa ( $\Delta H_m$ )	Capacidade térmica volumétrica (VHC)	Calor específico ( $c_{p, PCM}$ )	Condutividade térmica (k)	Temperatura Máxima de Operação
Tipo	Ref#	(°C)	( $kg \cdot m^{-3}$ )	( $kJ \cdot kg^{-1}$ )	( $MJ \cdot m^{-3}$ )	( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	(°C)
Parafina	A32	32	845	120	110	2,2	0,21	300
Parafina	A29	29	810	226	183	2,15	0,18	300
Sal hidratado	S32	32	1460	200	292	1,91	0,51	60
Sal hidratado	S30	30	1304	190	248	1,9	0,48	60
Sólido-sólido	X30	30	1050	115	121	1,65	0,36	nd
Parafina	A60	60	910	145	132	2,22	0,22	300
Parafina	S89	89	1550	151	234	2,48	0,67	120

### 2.3.2. Caracterização de PCM

Por não ser um standard de facto e porque os métodos produtivos variam frequentemente entre fabricantes e por vezes entre lotes de um mesmo fabricante, na prática as características termofísicas apresentadas por um determinado lote produzido, podem ser relativamente diferentes das previstas no modelo teórico fornecido pelo fabricante. A existência destas diferenças faz com que a validação laboratorial previa das propriedades termofísicas dos PCM seja um passo importante para o conhecimento destes desvios ( $T_{fus}$ ,  $T_{sol}$ , curva de histerese, entalpia, entre outras), e subsequentemente, para melhor a exploração prática do PCM.

Não existindo um standard que estabeleça o equipamento ou a metodologia mais adequados para a caracterização térmica de um PCM, existem quatro técnicas predominantes (Muñoz, 2016; Solé, Miró, Barreneche, Martorell, & Cabeza, 2013), que se diferenciam pelo tipo e número de parâmetros retornados, custo, volume das amostras, e disponibilidade (comercial/científica): TGA (thermogravimetric analysis), DTA (differential thermal analysis), DSC (differential scanning calorimetry) e T-history.

A análise DTA é historicamente a técnica mais utilizada para determinar a temperatura de mudança de fase e a entalpia (máxima energia de um sistema termodinâmico), de um material, apresentando o seu comportamento em função da temperatura ou do tempo.

Entretanto, a DSC veio permitir obter o fluxo de calor do material em função da temperatura e do tempo, ampliando as propriedades que poderiam ser determinadas e, consequentemente, levando os investigadores a utilizá-la como principal técnica de caracterização dos pontos de fusão e solidificação do material, de fenómenos de “subcooling” e histerese. A técnica DSC é frequentemente utilizada em conjunto com a análise TGA para estudo da estabilidade térmica do material.

### 2.3.3. Encapsulamento

Em geral, a aplicação de PCM envolve uma fase líquida ou o contacto com outros elementos, o que na maioria das aplicações requer a utilização de materiais encapsulados (Su, Darkwa, & Kokogiannakis, 2015). Os PCM encapsulados (Figura 2.9), podem ser apresentados

na forma de pó, com dimensões que vão desde os micros a alguns milímetros (micro-encapsulamento), ou inseridos em invólucros com dimensões na ordem dos centímetros (macro-encapsulamento). Os materiais de encapsulamento não devem reagir com os PCM de forma a não se deteriorarem ao longo do tempo. A escolha do tipo de encapsulamento e geometria está dependente da aplicação e forma como os PCM são integrados no sistema alvo, sendo também estas características de diferenciação.

Entre os principais riscos e problemas a considerar na estratégia de encapsulamento, destacam-se o fenómeno de segregação, observado no caso do encapsulamento vertical de PCM do tipo sais-hidratados. Nestes materiais, para encapsulamentos verticais superiores a 5 cm, observam-se frequentemente fenómenos de segregação (Bruno, Belusko, Liu, & Tay, 2015), em que a água se torna incapaz de hidratar plenamente o sal. Este fenómeno limita a exploração destes materiais em algumas geometrias de encapsulamento, nomeadamente verticais.

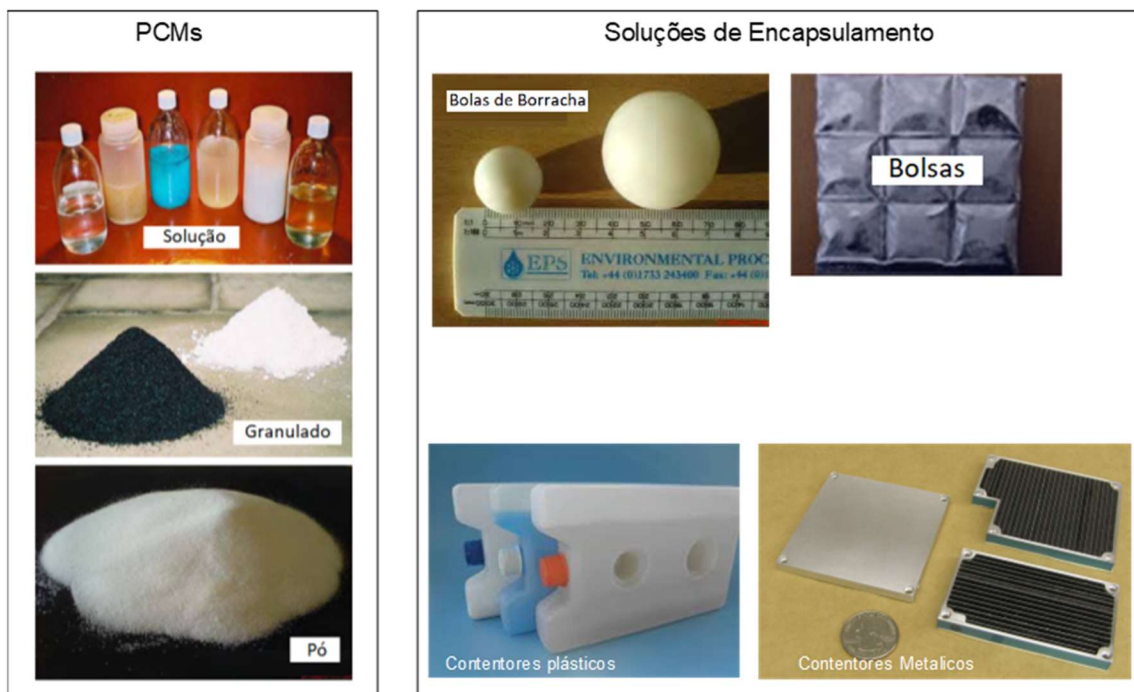


Figura 2.9 PCM: granularidade e encapsulamento. Adaptado de (Coelho, 2016; PCM uk limited, 2020).

## 2.4. Oportunidades para a exploração de PCM na indústria agroalimentar

Na aplicação à indústria agroalimentar, o armazenamento de energia térmica com recurso a PCM, apresenta várias áreas de interesse potencial, entendendo-se destacar:

- i) Recuperação de calor residual industrial;

A agroindústria é uma utilizadora intensiva de processos de calor de baixa temperatura, ou seja, abaixo de 120°C. Existem já várias aplicações que fazem uso do armazenamento e reaproveitamento do IWH, como sejam o aquecimento de água para os diversos processos de transformação alimentar ou para operações de limpeza de fábrica. O IWH pode ser recuperado em diferentes equipamentos e operações das linhas de produção, por exemplo, nos sistemas de refrigeração vulgarmente existentes nas fábricas (Miró, Gasia, & Cabeza, 2016).

ii) Aquecimento e redução de picos de temperatura em estufas;

Os PCM podem ser explorados no revestimento das estruturas dos edifícios, de forma a incrementar a sua inércia térmica (Kuznik, David, Johannes, & Roux, 2011). Na agroindústria, têm sido aplicados em estufas de calor, muitas vezes com coletores solares de ar, mantendo a sua temperatura estável e reduzindo picos de temperatura, como os que ocorrem no verão (Hassanien, Li, & Dong Lin, 2016).

iii) Armazenamento e transporte de alimentos;

Existem já soluções de contentores para armazenamento e transporte de alimentos e bebidas, que integram PCM na sua estrutura, permitindo manter os produtos quentes ou frios, pelo tempo necessário à entrega após a produção (Mehling & Cabeza, 2008).

iv) Apoio à integração de renováveis;

A utilização de PCM pode facilitar a integração de soluções de energias renováveis, nas estruturas produtivas, principalmente de tecnologias baseadas em energia solar, como fotovoltaica (FV) e energia solar térmica. O FV produz energia elétrica que pode ser usada em resistências para gerar calor por efeito de Joule e dessa forma carregar PCM. O controlo do calor gerado por efeito Joule é um processo conhecido e consolidado, sendo possível abordar diferentes faixas de temperatura (Pérez-García, Silva, & Cabrera Corral, 2015). Já no caso da energia solar térmica, a exploração da radiação solar permite aumentar a temperatura de um fluido de trabalho, como a água, e essa energia pode posteriormente ser transferida para um PCM por meio de um permutador de calor, carregando-o (Mendes, Joyce, Giestas, Horta, & Brites, 2009). Os PCM são, portanto, instrumentos potenciais para a maximização do autoconsumo, ou seja, do consumo de energia renovável produzida localmente numa instalação agroindustrial, em vez de ser vendida à rede, a uma tarifa inferior.

v) Incremento de flexibilidade energética

O comportamento térmico de um PCM pode permitir desacoplar o consumo de energia das necessidades de aquecimento de um dispositivo. Esta é uma propriedade instrumental para fornecer flexibilidade energética (Pereira, Lopes, & Martins, 2019), que pode ser utilizada para diversos fins. Como exemplo, a flexibilidade energética permitida pelo TES com PCM pode ser usada para melhorar o autoconsumo da geração fotovoltaica local ou para deslocar o consumo de energia elétrica para períodos com tarifas mais baratas. A flexibilidade energética proporcionada nestes termos é caracterizada pelo Anexo 67 da Agencia Internacional de Energia (EBC, *Energy in Buildings and Communities Programme*), como “a capacidade de gerir o consumo e a produção de acordo com as condições climáticas locais, necessidades do utilizador e requisitos da rede de energia” (Jensen et al., 2017).

Numa segunda abordagem, focando-se neste caso exemplos concretos dos muitos equipamentos e operações da industria agroalimentar, que representam oportunidades de recuperação e gestão de calor na forma latente, é possível destacar entre os principais grupos de equipamentos : i) fornos de panificação, com intervalos de temperatura de operação compreendidos entre os 60 e os 300 °C e ciclos de trabalho até 2 horas; ii) secadores de tambor horizontal para cereais (35 a 60 °C, com ciclos de 12 a 24h); iii) silos de manteiga (35 a 50 °C, operando em contínuo); iv) caldeiras de biomassa (800 a 1100 °C, a operar em contínuo); ou v) silos de têmpera de chocolate (30 a 55 °C, operando em contínuo). Na Figura 2.10 podem-se observar exemplos destes equipamentos.



Figura 2.10 Equipamentos industriais, passíveis de armazenamento de energia térmica por calor latente.

### 2.4.1. Conjugações possíveis de operações e equipamentos, para estudo de caso

Considerando as diferentes oportunidades de valorização energética, por armazenamento de energia térmica com integração de PCM, identificadas na indústria agroalimentar, importa selecionar uma relação “equipamento-operação”, que permita avaliar as diferentes hipóteses de valorização formuladas na génese desta dissertação e, simultaneamente, as incertezas e riscos associados. Com esse objetivo, estabelecem-se como critérios de valorização: i) o intervalo térmico de trabalho, ii) a operação em ciclos de trabalho longos; iii) A oportunidade de integração com circuitos de FER; iv) a possibilidade de prototipagem e ensaio em laboratório; e v) o potencial de disseminação dos resultados obtidos;

Assim, do conjunto de áreas de interesse identificadas, classes de equipamentos e operações, visando o desenvolvimento de um estudo de caso e a posterior demonstração experimental em prova de conceito, propõem-se avaliar um universo de equipamentos que, sendo distintos, realizam operações de aquecimento, fusão e secagem, segundo um modelo de operação que se sustenta numa técnica comum, de aquecimento lento, com manutenção prolongada e estável da temperatura de operação. Esta técnica, vulgarmente denominada de “Banho-Maria”, pressupõe a construção dos equipamentos numa arquitetura de “camisa de aquecimento”, vulgar “camisa de água” (Figura 2.11), em que se procede ao armazenamento e manutenção da temperatura de operação, na forma de calor sensível. São exemplo deste *cluster*, secadores, misturadores, e sistemas de descongelamento, entre muitos outros.

Dentro do universo de operações e equipamentos que integram este *cluster*, propõem-se estudar o interesse na transição do armazenamento térmico por calor sensível para calor latente, substituindo água por PCM. Além da demonstração do ganho energético decorrente da mudança na estratégia de armazenamento de calor, pretende-se com este estudo de caso demonstrar também a possibilidade de construção de arquiteturas de armazenamento distribuídas, incorporadas diretamente nos equipamentos produtivos, fazendo-o com um mínimo impacto na infraestrutura e operações atuais (por exemplo, de exploração, manutenção ou calibração), o que maximiza o seu potencial de adoção e disseminação na indústria.

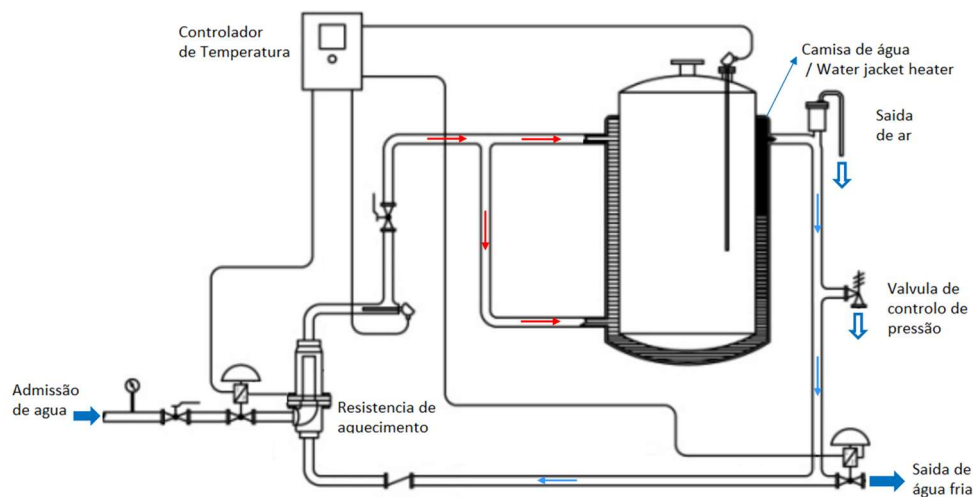


Figura 2.11 Exemplo de sistema de “Camisa de Água”. Adaptado de (Sutter, 2010).

## 2.4.2. O caso do chocolate

A operação de têmpera e trabalho do chocolate, visando a sua utilização em produtos de confeitaria, enquadra-se no perfil das especificações desejadas para um estudo de caso, como preconizado nesta dissertação.

O chocolate é uma matéria-prima alimentar, feita com base no grão de cacau torrado e moído (massa de cacau), à qual são adicionados ingredientes como açúcar, gorduras vegetais (maioritariamente manteiga de cacau, por exemplo 95% manteiga de cacau e 5% gorduras alternativas), leite, adoçantes (como sacarose), emulsificantes (promovem a homogeneidade) e aromatizantes. Como exemplo da composição de um chocolate de leite comercial, pode-se considerar a seguinte formulação: 47% de açúcar, 17% de leite em pó desnatado, 17% de manteiga de cacau, 7% de gordura do leite, 5% de cacau sólidos, 5% de gorduras vegetais e emulsificantes (Baichoo, MacNaughtan, Mitchell, & Farhat, 2006).

Apesar desta composição de referência, o chocolate, enquanto matéria-prima, apresenta-se sob formulações muito variáveis, o que se reflete nas características termofísicas de cada mistura, com ênfase no ponto de fusão, que tende a diminuir com o aumento da percentagem de gordura na manteiga de cacau. O derretimento da manteiga de cacau ocorre num intervalo compreendido entre os 27 e os 33 °C, dependendo da percentagem e natureza da gordura, encontrando-se essencialmente completa a 35 °C (Quast et al., 2011).

### 2.4.2.1. A têmpera de chocolate

A manteiga de cacau é composta, basicamente, por triacilgliceróis (aproximadamente 98%), os quais apresentam características de polimorfismo, cristalizando em diferentes geometrias (designadas por I a VI), influenciadas pela transferência de calor, taxa de arrefecimento, e quantidade de movimento (agitação), durante as condições de cristalização (Baichoo et al., 2006). As principais formas cristalinas de empacotamento dos triacilgliceróis são a  $\alpha$  ( $\alpha$ -hexagonal) e  $\beta$ -prima ( $\beta'$  ortorrômbica) e  $\beta$  ( $\beta$  triclínica), sendo a geometria V, associada à forma  $\beta$ -prima, considerada a ideal para a fabricação de chocolate, devido ao seu intervalo de fusão (~ 28 a 34 °C), dependendo da composição, situando-se acima da temperatura ambiente típica, mas abaixo da temperatura fisiológica, o que permite que derreta na boca (Baichoo et al., 2006)), além de outras propriedades físicas como a consistência, plasticidade ou o brilho do chocolate. De forma a maximizar a presença desta forma cristalina na manteiga de cacau (e em outras manteigas vegetais usadas como alternativas de menor custo), o chocolate necessita de passar por um processo de têmpera, antes de ser moldado nos produtos finais.

A têmpera é assim um processo de pré-tratamento do chocolate, por cristalização controlada, que visa homogeneizar a estrutura de cristalização das gorduras vegetais aí presentes, sendo responsável por diversas características organolépticas do produto, como a cor, a dureza

e a quebra à temperatura ambiente (*snap*), a rápida e completa fusão na boca, o brilho, a contração durante o desmolde e a rápida libertação de aroma e sabor na degustação.

O processo de têmpera do chocolate envolve quatro passos (Figura 2.12):

- i) Inicia-se com o aquecimento do chocolate até que ocorra a fusão completa da fase gordurosa. Isto é alcançado num intervalo de aproximadamente 30 minutos durante o qual se eleva o chocolate da temperatura ambiente, até um valor próximo dos 45 °C (Torbica, Pajin, Omorjan, Lončarević, & Tomić, 2014; Valdecir, Kelly, & Luccas, 2004), que poderá variar, com a composição do chocolate, até aos 55 °C (Baichoo et al., 2006).
- ii) Em seguida, é realizado um arrefecimento lento (1°C/2min (Baichoo et al., 2006), sob movimentação constante da massa, até à temperatura de cristalização adequada à formação de cristais estáveis, do tipo  $\beta$ -prima na geometria V;
- iii) Mantém-se a temperatura no intervalo de cristalização, por um período de tempo de cerca de 10 min (Visotto, Gomes, & Batista, 2005), para promover a cristalização na forma  $\beta$ -prima desejada.
- iv) Finalmente realiza-se um novo aquecimento, mais baixo (no limite do intervalo de fusão da geometria V, 32 a 34°C), para que as formas cristalinas instáveis, que também se formaram no intervalo anterior, transmutem, ficando a gordura cristalizada maioritariamente na geometria V desejada, e o chocolate disponível para a moldagem.

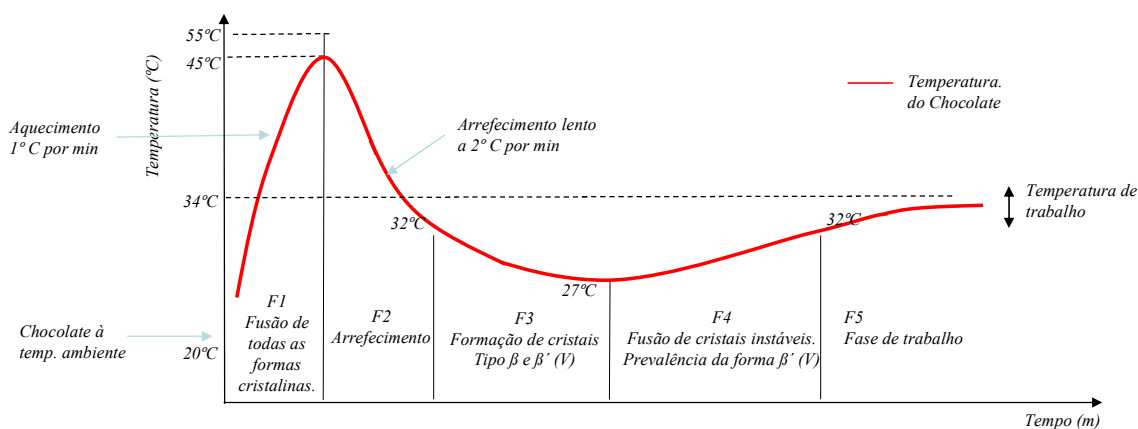


Figura 2.12 Processo de têmpera. Adaptado de (Valdecir et al., 2004).

#### 2.4.2.2. A temperatura de trabalho

A composição do chocolate, assim como a duração, ritmo e limites de temperatura dos intervalos de têmpera, variam de acordo com a aplicação a que se destina (por exemplo, bombons, tabletes ou recheios), e são na sua essência o que diferencia e define o posicionamento do produto no mercado.

Por consequência desta variabilidade do regime transitório e por não interferir no estudo das hipóteses de investigação enunciadas, centra-se a análise no período de trabalho, em

que o chocolate já temperado se encontra a uma temperatura de trabalho (30 a 34 °C dependendo da composição). A opção por este modelo, que exclui o regime transitório, reflete também a generalidade das operações por técnica de “Banho Maria”, utilizadas com outros produtos como manteigas ou ganaches, em que não existe um processo inicial de têmpera e cristalização.



## 3

## 3.

**METODOLOGIA**

Face aos objetivos estabelecidos e hipóteses de investigação avançadas, desenvolveu-se uma metodologia de investigação norteada por três vetores:

- Seleção de equipamento experimental: seleção do par “equipamento e operação”, representativos do interesse no desenvolvimento de uma estratégia de armazenamento de energia térmica para o setor agroalimentar, com vista à realização do estudo de caso e demonstração da prova de conceito;
- Simulação: desenvolvimento do modelo computacional representativo do equipamento e do seu desempenho operacional. Simula-se a resposta térmica de materiais PCM e a sua interação com o meio, considerando diferentes geometrias de encapsulamento. Tal visa a seleção do material PCM com melhor comportamento, bem como a geometria que permita um maior armazenamento térmico com boa taxa de transferência de calor.
- Instalação e ensaio: desenvolvimento de uma instalação experimental em escala laboratorial, representativa do comportamento do equipamento real, com relevância para a produção e armazenamento de energia térmica.

### 3.1. Caracterização da classe de equipamentos de estudo

Dentro do universo dos equipamentos que operam segundo a técnica de “Banho Maria”, ou numa arquitetura de “camisa de aquecimento” por calor sensível, os equipamentos de têmpera de chocolate são um subconjunto representativo, que normalmente incorpora tecnologia para realizar tarefas complementares, como o transporte do chocolate fundido, a injeção e moldagem nos produtos finais (como bombons ou tablets), podendo os modelos mais avançados integrar ainda um túnel de arrefecimento (Figura 3.1).

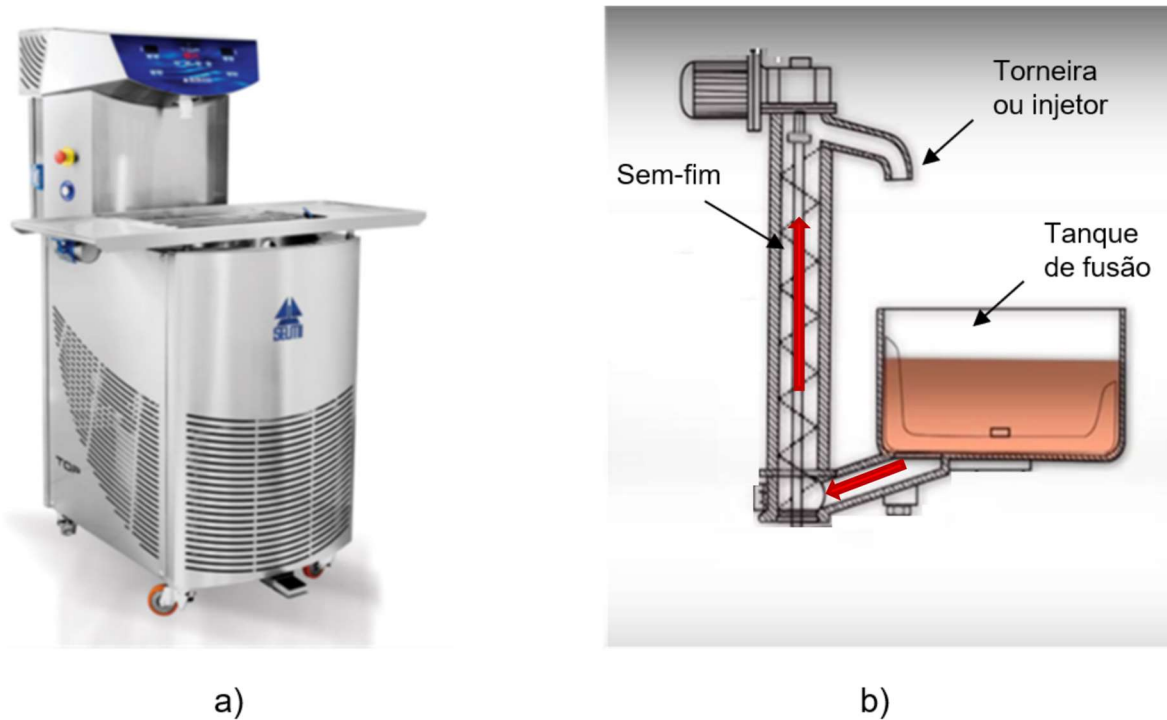


Figura 3.1 a) Exemplo modelo comercial (de: <https://tomric.com/equipment/selmi-chocolate-tempering-unit-plus-ex/>);  
b) Diagrama de blocos (Adaptado de: <https://tomric.com>).

Numa visão macro por blocos funcionais, o equipamento de têmpera pode segmentar-se em: i) tanque de aquecimento, onde   depositado o chocolate sólido e onde se realizam as opera es de aquecimento e fusão; ii) um circuito de transporte, normalmente com um sem-fim mecânico que conduz o chocolate liquefeito para um andar de inje o; iii) o injetor e os moldes; e iv) o túnel de arrefecimento.

Para efeito dos objetivos propostos, o interesse da análise coloca-se no primeiro bloco, a câmara de aquecimento e fusão. Neste tipo de equipamento, a soluço de aquecimento da camisa de água   normalmente baseada numa resistência elétrica colocada na base. Existem também solu es de serpentinas horizontais, elétricas ou aquecidas por circuitos de vapor.

Como principais critérios na base da escolha desta opera o e equipamento destaca-se:

- i) Intervalo térmico de trabalho: situado no intervalo das fontes de calor industrial residual, que se propõem valorizar, sendo passível de alimentar quer por rede elétrica quer por circuito de recupera o de vapor;
- ii) Ciclo de opera o longo: normalmente a têmpera de chocolate   seguida de várias horas de tarefas de formagem, em que o lote de chocolate fundido   distribuído pelas formas dos produtos finais (exemplo, tabletes e bombons). Dependendo da dimensão do lote e número de tarefas/camadas, este período pode ir até 8 horas de trabalho, ou prolongar-se para turnos subsequentes, sendo necessário manter o chocolate   temperatura de trabalho, o que representa um cenário de consumo prolongado de energia.

- iii) Estabilidade da temperatura de trabalho: de forma a manter a homogeneidade das propriedades organolépticas (como cor, brilho ou textura), entre os produtos do mesmo lote, a temperatura do chocolate fundido tem de se manter o mais estável possível, evitando a cristalização em geometrias indesejadas. O PCM assume aqui uma oportunidade de demonstrar a sua mais-valia enquanto regulador passivo de temperatura, promovendo a convergência de qualquer desvio da temperatura de trabalho, nomeadamente à medida que a matéria-prima vai sendo gasta e o tanque ficando vazia;
- iv) Possibilidade de prototipagem laboratorial: a dimensão física, temperatura de operação e infraestrutura tecnológica típica do macro bloco de interesse (tanque de fusão), permitem a sua prototipagem e estudo à escala laboratorial, à partida, sem comprometer a relevância dos resultados na validação das hipóteses ou demonstração da prova de conceito;
- v) Possibilidade de disseminação: a ser viável “substituir” água por PCM, a solução de trabalho que possa ser encontrada permitirá uma potencial disseminação na indústria, sem alterações à estrutura do equipamento e sem mudanças relevantes ao nível dos processos de operação ou de manutenção;
- vi) Possibilidade de combinação com FERs: por se tratar de um macro bloco bem definido e facilmente isolável, pode pensar-se em diferentes soluções de alimentação energética, quer de origem fotovoltaica, solar térmico ou vapor. Também aqui o ciclo de trabalho longo pode ser uma vantagem, permitindo explorar o ciclo solar, ou o baixo custo energético durante a noite.

Face às características do equipamento e ao modelo teórico da operação de têmpera e formagem de chocolate, conforme descrito na secção 2.4, com a introdução de PCM encapsulado, propõe-se preencher o espaço ocupado pela água no equipamento. Desta forma, aumenta-se a capacidade de armazenamento de energia térmica na mesma volumetria, já disponível no equipamento, sem necessidade de alterações estruturais.

## 3.2. Validação numérica

Antes de se avançar para a prototipagem e ensaios laboratoriais, considera-se a modelização e simulação computacional do comportamento do equipamento, da sua interação com possíveis materiais PCM e com o meio envolvente. Entre outros, deste trabalho resultam critérios para a seleção do PCM e para a sua estratégia de encapsulamento, assim como uma perspetiva do comportamento do conjunto, com ênfase para a resposta da capacidade de armazenamento térmico, taxas de transferência de calor, gradientes térmicos ou riscos de operação, entre outros.

Existem diferentes ferramentas comerciais de simulação de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*). Estas dispõem de modelos numéricos que

permitem simular a dinâmica da interação entre diferentes fluidos e superfícies, possibilitando estudar processos de mudança de fase, de transferência de calor, de escoamento e outras interações mecânicas.

Entre as referências nesta área destacam-se as ferramentas Phoenics, da empresa Cham, e Fluent, da ANSYS, sendo este último uma solução mais recente, com diferentes possibilidades na interface de utilização. Em comum, baseiam-se em macroprocessos de três fases, incluindo: i) a definição do estudo de caso, através da construção do modelo geométrico dos objetos envolvidos e da especificação das propriedades termodinâmicas dos materiais; ii) a construção da malha computacional ortogonal, que reflete os pontos de análise; e iii) a resolução das equações matemáticas que suportam os diferentes elementos do modelo.

## 4

## 4.

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Para ensaio e análise computacional concebeu-se o modelo de uma caldeira de fusão, à semelhança do usado em máquinas de têmpera de chocolate, recorrendo-se ao software ANSYS Fluent para simulação da dinâmica de fluidos. Sobre este modelo procurou-se identificar e comparar as variáveis com influência na capacidade de armazenamento de energia térmica e nos processos de carga e de descarga, para uma solução com recurso a PCM (LHS), versus uma solução convencional de armazenamento de calor sensível (SHS), utilizando água.

Na seleção do material PCM e subsequente estratégia de encapsulamento, enunciam-se e hierarquizam-se as variáveis de influência, de natureza termofísica, operacional e legal, procurando-se estabelecer critérios de decisão replicáveis, consolidados numa metodologia passível de transposição para outros cenários de operações e equipamentos agroindustriais.

#### **4.1. Modelização do equipamento experimental, critérios de simulação e parâmetros de controlo**

Para a simulação numérica da operação de um equipamento de têmpera de chocolate, concebeu-se o modelo de uma caldeira aquecida por processo de camisa de água, em que a matéria-prima é adicionada e processada por lotes. Neste tipo de equipamento a água é utilizada como meio de homogeneização de temperatura e de armazenamento de calor sensível, sendo aquecida até ao ponto de operação por meio de uma resistência, localizada no fundo da caldeira e controlado por um sistema simples de “on/off”, de forma a manter a temperatura no intervalo de trabalho pretendido. Sobre este modelo, propôs-se estudar a diferença de desempenho quando se substitui água por um material PCM.

Assim, para efeito dos objetivos de simulação, mas prevendo a posterior a transição para ensaios reais em bancada laboratorial, foi desenvolvido um modelo formado por dois tanques cilíndricos coaxiais, em aço inox 316, com 1,5 mm de espessura. No espaço entre tanques constituiu-se a camisa de aquecimento preenchida com água (Figura 4.1).

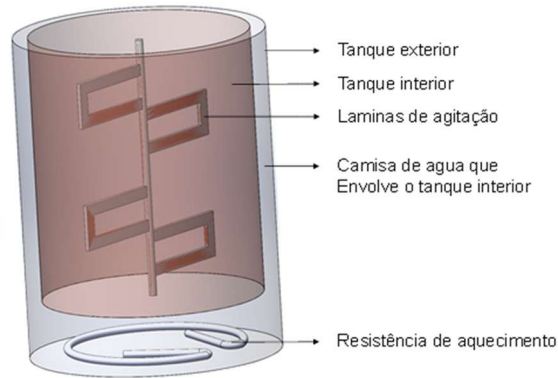


Figura 4.1 Representação Computacional do equipamento de têmpera de chocolate.

O tanque interior, em parede simples, tem uma volumetria de 23 L. O tanque exterior, com uma volumetria de 38 L, possui uma parede dupla preenchida por um isolante térmico, de natureza polimérica, com 1 cm de espessura. Diminuindo-se o volume da resistência na base, o volume das paredes do tanque interior e o volume de prote o de nível (que impede o enchimento total da camisa de aquecimento), obt m-se uma camisa de água com um volume de 11,5 L, para uma espessura da coluna de água de 1,5 cm.

Na opera o convencional deste tipo de equipamento, a água   usada para fornecer o perfil de temperatura necessário   fusão do chocolate, mas também para o armazenamento de calor sensível (SHS), mantendo a temperatura no intervalo de trabalho, durante as várias horas que podem ser necessárias para o processamento do lote em tarefas de moldagem e formagem do chocolate. A temperatura da camisa de aquecimento   controlada e corrigida por um termóstato que aciona a resistência elétrica na base da caldeira (considerado de 3 kW). Para os objetivos da análise, considera-se uma temperatura de trabalho em que a massa de chocolate se encontra no valor de 34  C.

Como condi es fronteira, considerou-se a temperatura do ar ambiente a 20  C e um valor de  $4,12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  de perdas totais por convec o, resultantes dos fluxos de calor existentes em situa o de equilíbrio, após a carga integral da camisa de aquecimento e com a massa de chocolate   temperatura de trabalho (34  C). Neste estado consideram-se três fluxos de calor:

- $q_1$ , da camisa de aquecimento para o chocolate, através da base da caldeira ( rea  $A_1$ );
- $q_2$ , da camisa de aquecimento para o chocolate, através da parede cilíndrica do interior do tanque ( rea interior  $A_{2i}$ ); e
- $q_3$  do chocolate para o ar exterior ( rea  $A_3$ ).

Nas simula es, optou-se por:

- i) Majorar  $q_3$ , considerando-se o cenário mais penalizador, em que o topo da caldeira se encontra aberto (sem tampa);
- ii) Desprezar as perdas para o exterior pelas paredes laterais, por consequência do uso do material isolante;

- iii) Desprezar a resistência térmica introduzida pela parede de aço do tanque interior (entre a camisa de aquecimento e o chocolate), por consequência da elevada condutividade térmica do aço ( $k_{A316}$ ).

Neste contexto, tem-se:

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 \Leftrightarrow \dot{q}_1 \cdot A_1 + \dot{q}_2 \cdot A_{2,i} = \dot{q}_3 \cdot A_3$$

Equação 4.1

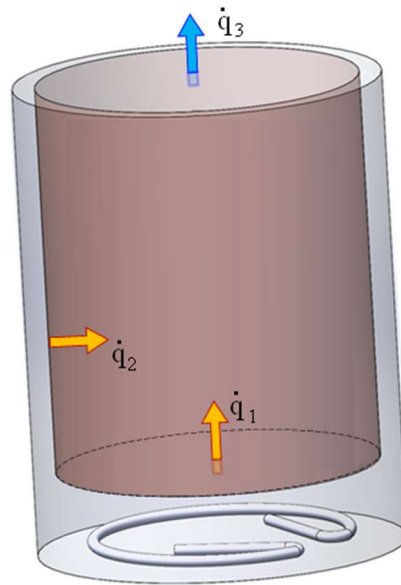


Figura 4.2 Equilíbrio entre fluxos de calor, após carregamento do PCM.

Relativamente a  $\dot{q}_1$ , considerando o fluxo de calor da base da caldeira para a massa de chocolate, tem-se:

$$\dot{q}_1 = \frac{1}{R_{T_1}} \times \Delta T_1$$

Equação 4.2

em que  $\Delta T_1$  representa a variação da temperatura entre a camisa de aquecimento e a massa de chocolate:

$$\Delta T_1 = T_{PCM} - T_{Choc}$$

Equação 4.3

e em que a resistência térmica entre o PCM e o chocolate para o caso da superfície plana da base do tanque é:

$$R_{T_1} = \frac{1}{h_{PCM}} + \frac{e_1}{k_{A316}} + \frac{1}{h_{Choc}}$$

Equação 4.4

No caso de  $q_2$ , tratando-se de uma superfície cilíndrica, há que considerar:

$$\dot{q}_2 = \frac{1}{R_{T_2}} \times \Delta T_2$$

Equação 4.5

em que:

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = T_{PCM} - T_{Choc}$$

Equação 4.6

correspondendo  $R_{T_2}$  à resistência térmica das paredes cilíndricas do tanque interior:

$$R_{T_2} = \frac{1}{\frac{1}{h_{Choc}} + A_i \times \frac{\ln(r_o/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot k_{A316} \cdot L'} + \frac{A_i}{A_o} \times \frac{1}{h_{PCM}}}$$

Equação 4.7

No caso das perdas por convecção, para o ar ambiente  $q_3$ , considera-se:

$$\dot{q}_3 = \frac{1}{R_{Tar}} \times \Delta T_3$$

Equação 4.8

em que  $\Delta T_3$  representa a variação de temperatura para o ar ambiente:

$$\Delta T_3 = T_{Choc} - T_{Ar}$$

Equação 4.9

e onde a resistência térmica para o caso da superfície plana entre o chocolate e o ar é:

$$R_{Tar} = \frac{1}{\frac{1}{h_{Ar}} + \frac{1}{h_{Choc}}}$$

Equação 4.10

Para efeito do cálculo consideram-se:

Tabela 4.1 Valores para calculo de perdas por convecção, para o ar ambiente.

Variável	Descrição	Valor
$r_i$	Raio interno do tanque interior	14,5 cm
$r_o$	Raio externo do tanque interior	14,65 cm
$e$	Espessura ( $r_o - r_i$ )	1,5 mm
$L'$	Altura do tanque interior	34,8 cm
$T_{Choc}$	Temperatura da massa de chocolate	34 °C

$T_{Ar}$	Temperatura do ar ambiente	20 °C
$k_{A316}$	Condutividade térmica do aço	16 (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )

## 4.2. Seleção e caracterização do PCM para simulação e posterior ensaio laboratorial

A seleção do PCM e a estratégia de encapsulamento são determinantes na maximização da capacidade de armazenamento de energia no volume disponível e no correto processamento do produto alimentar, respeitando os requisitos de segurança da operação e a legislação da indústria alimentar.

No intervalo de temperaturas que caracterizam as operações habituais de transformação e processamento do setor, os PCM com temperaturas de fusão compatíveis com o processo visado enquadram-se nos grupos dos inorgânicos (sais hidratados), orgânicos (parafinas) e sólido-sólido (Figura 2.8). Os últimos, pelo custo superior, menor capacidade de armazenamento e elevada rigidez (que limita a liberdade na geometria de encapsulamento e a integração com os equipamentos existentes), tornam-se desinteressantes para os objetivos do estudo de caso.

Assim, tendo por base a temperatura de mudança de fase como primeiro critério de seleção, foram considerados dois PCM: um sal hidratado (S34) e uma parafina (A36), cujas principais propriedades termofísicas se encontram estruturadas na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 Características de PCM, fornecidas pelo fabricante PCM UK limited, 2020.

PCM		Temperatura de mudança de fase ( $T_{fus}$ )	Densidade ( $\rho$ )	Calor latente de fusão por unidade de massa ( $\Delta H_m$ )	Capacidade térmica volumétrica (VHC)	Calor específico ( $c_{p,PCM}$ )	Condutividade térmica (k)	Temperatura Máxima de Operação
Type	Ref <sup>a</sup>	(°C)	(kg·m <sup>-3</sup> )	(kJ·kg <sup>-1</sup> )	(MJ·m <sup>-3</sup> )	(kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	(°C)
Parafina	A32	32	845	120	101	2,2	0,21	250
Parafina	A34	34						
Parafina	A36	36	790	130	103	2,37	0,18	250
Sal hidratado	S34	34	2100	140	294	2,1	0,52	158
Sólido-sólido	X30	30	1050	115	121	1,65	0,36	n.d.

A inexistência de ofertas comerciais conhecidas para uma parafina com a temperatura de fusão de 34 °C, colocou a possibilidade de se utilizar uma parafina com  $T_{fus}$  inferior (A32), o que obrigaria a trabalhar para lá do intervalo de armazenamento de calor latente. Não sendo esta uma situação desejável para os objetivos do estudo, abandonou-se esta hipótese. O recurso à parafina A36 poderia ser uma solução, contudo, haveria o risco de não se carregar totalmente o material, não se explorando assim a totalidade da sua capacidade de armazenamento.

Importa realçar que as propriedades fornecidas pelos fabricantes (no caso, a PCM UK Limited, 2020), são de natureza teórica, o que, adequando-se aos objetivos da simulação computacional, podem revelar desvios ao previsto em fase de ensaios experimentais. Além destes

desvios, fenômenos como a histerese (Figura 4.3), são ocorrências comuns que podem deslocar o valor da temperatura de fusão pretendida.

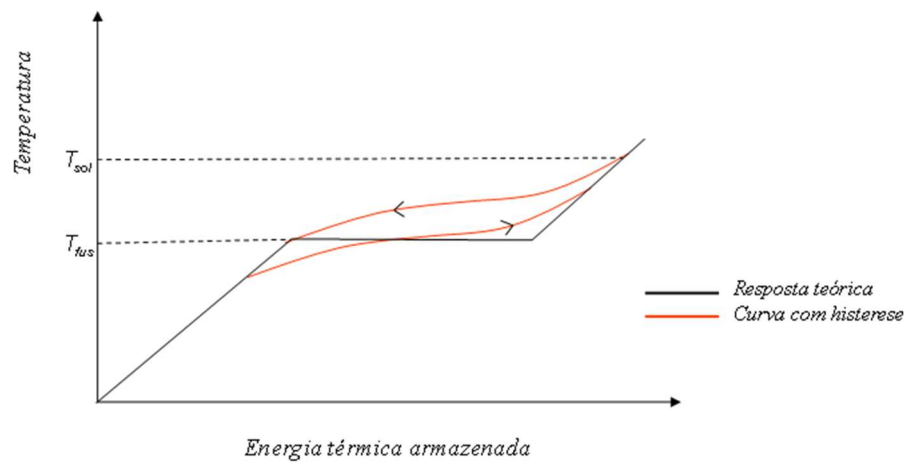


Figura 4.3 Representação da curva de histerese de um PCM.

Por não obedecer a standards de mercado rigorosos, a produção de dois PCM orgânicos do mesmo tipo (parafina, por exemplo) e com a mesma temperatura de fusão, pode conduzir a materiais com parâmetros termofísicos distintos, quando produzidos por diferentes fabricantes. Com menor relevância, esta variabilidade pode também verificar-se entre lotes produzidos por um mesmo fabricante, observando-se desvios face aos parâmetros de caracterização teóricos fornecidos. Existindo várias razões para esta variabilidade na produção (Solé et al., 2013), a sua repercussão manifesta-se ao nível do desempenho obtido, face ao desempenho teórico previsto. No limite, esses desvios podem conduzir a análises enviesadas e a conclusões erradas. Importa por isso validar com rigor as propriedades termofísicas fundamentais de cada lote de PCM, depois de produzido (vide secção 2.3.2). No caso do PCM selecionado para o presente projeto e adquirido ao fabricante inglês PCM UK Limited, as características teóricas do lote adquirido, foram posteriormente validadas pelo fabricante.

#### 4.2.1. Modelo de decisão para suporte à seleção de PCM

Os PCM orgânicos e inorgânicos, nomeadamente parafinas e sais hidratados, apresentam temperaturas de fusão no intervalo das normais operações de transformação dos alimentos, o que os torna especialmente interessantes para o estudo de soluções de LHS no setor agroindustrial. Apesar desta variável de convergência, as parafinas apresentam geralmente menor capacidade de calor latente, condutividade térmica mais baixa e risco de inflamabilidade. Por outro lado, são mais estáveis, com menor risco de corrosão e toxicidade que os sais.

Considerando a importância destas características na seleção do PCM para o estudo de caso, importa também valorizar as características físicas e a geometria do equipamento selecionado para o ensaio experimental e a sua influência na estratégia de encapsulamento. A possibilidade de uma boa solução de encapsulamento, que resolva os riscos de corrosão e

toxicidade, pode justificar a opção por um sal hidratado, que permitirá maior capacidade de armazenamento de energia, o que é especialmente relevante em cenários de baixo volume. Por outro lado, o possível risco de segregação, comum no encapsulamento de sais (Oró et al., 2012), poderia justificar a opção por uma parafina.

Sendo a proximidade entre a temperatura de mudança de fase do PCM e a temperatura de trabalho do equipamento o principal critério de seleção, além de verificar esta condição, o PCM escolhido deve também possuir valores elevados de calor latente de fusão e de densidade, por forma a proporcionar alta capacidade de armazenamento térmico no volume disponível (Xu, Sze, Romagnoli, & Py, 2017; Zsembinszki, Fernández, & Cabeza, 2020), em termos relativos. A condutividade térmica é também determinante, para garantir uma boa capacidade de descarga. O baixo risco de toxicidade e de corrosão são igualmente critérios determinante, principalmente quando se lida com produtos alimentícios. Neste contexto de múltiplas variáveis de influência, parâmetros e riscos, entendeu-se fundamental estabelecer critérios de decisão que permitissem orientar a escolha do PCM. Com esse objetivo, estabeleceu-se um modelo de decisão integrando os parâmetros considerados mais relevantes, selecionados e agrupados de acordo com sua natureza térmica, mecânica e química, de modo a permitir definir critérios de adequação e risco de acordo com a natureza da operação a realizar.

Assim, sobre este agrupamento de parâmetros e riscos, foi desenvolvida uma matriz de critérios de avaliação, estruturada em três níveis de importância. A maior importância, 3, é atribuída aos critérios de exclusão (temperatura de fusão e custo), ou que têm impacto direto no desempenho (entalpia de fusão e segregação). A menor importância, 1, é atribuída aos critérios de risco, o que se justifica pela possibilidade de serem melhorados por meio de uma solução de encapsulamento adequada. Os critérios intermediários têm importância 2. No total, cada PCM pode pontuar entre 1 e 100 pontos.

Tabela 4.3 Tabela 4.4 Metodologia de avaliação. Exemplo para PCM S34.

Critério	Importância (1 a 3)	Adequação (1 a 5)	Pontuação	Critério	Importância (1 a 3)	Adequação (1 a 5)	Pontuação
<i>Temp. fusão (<math>T_{fus}</math>)</i>	3	5	15	<i>Reciclagem</i>	2	4	8
<i>Entalpia (<math>\Delta H_m</math>)</i>	3	4	12	<i>Inflamabilidade</i>	1	4	4
<i>Custo</i>	3	5	15	<i>Toxicidade</i>	1	3	3
<i>Segregação</i>	3	3	9	<i>Corrosão</i>	1	3	3
<i>Longevidade</i>	2	4	8	<i>Variação volumétrica</i>	1	4	4
<i>TOTAL:</i>							81

Embora ainda não exista informação abrangente, ou um modelo holístico que considere o impacto do ciclo de vida do PCM, quer em termos de materiais, quer da energia envolvida desde a produção até a reciclagem no final da vida, agregando a solução de encapsulamento e o processo de exploração (Nienborg et al., 2018), entendeu-se importante incluir um critério

qualitativo, associado ao impacto conhecido na reciclagem de diferentes materiais PCM em fim de vida.

A metodologia desenvolvida com base nestes pressupostos é exemplificada para dois dos PCM considerados, um sal hidratado e uma parafina (Figura 4.4), respetivamente, as referências S34 e A36, da PCM Products Company, cujos parâmetros termofísicos estão descritos na Tabela 4.2. O sal S34 tem, portanto, uma capacidade de armazenamento térmico superior, mas um desempenho pior em termos de segregação, corrosão e toxicidade. No entanto, o encapsulamento do material mitiga esses impactos negativos. Além disso, o seu custo inferior torna-se relevante numa eventual divulgação e massificação dos resultados.

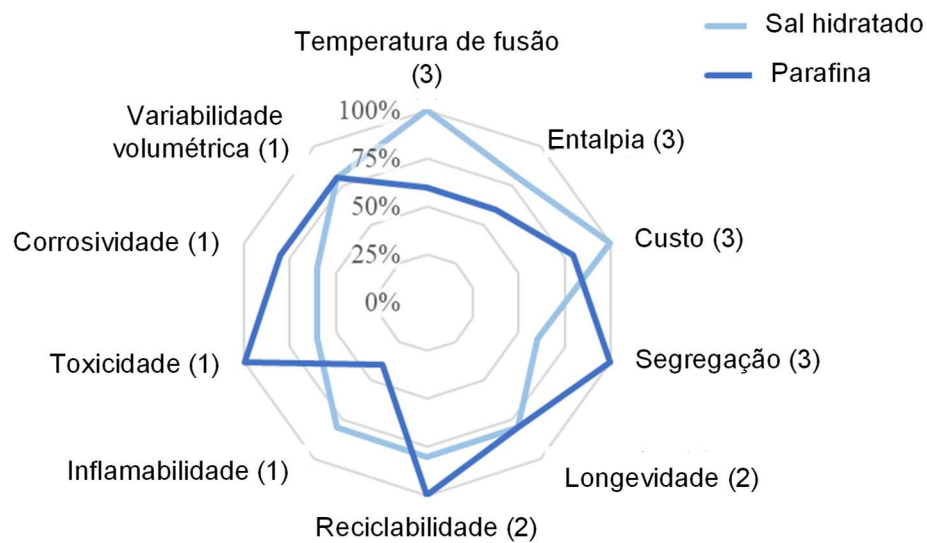


Figura 4.4 Aplicação da metodologia de seleção a dois PCM, um sal hidratado e uma parafina. Os critérios de importância são apresentados entre parêntesis, para cada um dos parâmetros de seleção. O sal hidratado é melhor em três deles, quando comparado à parafina. As pontuações são apresentadas em percentagem, dada pela importância multiplicada pela adequação. Assim, o sal hidratado pontuou 81 e a parafina 78.

### 4.3. Encapsulamento

Para o PCM selecionado consideraram-se três estratégias de encapsulamento: esferas, barras cilíndricas e tablets (Figura 4.5). Cada possível solução tem vantagens e desvantagens, influenciadas por fatores operacionais e pelas características termofísicas do material.

Em comum às hipóteses de encapsulamento consideradas, tem-se a manutenção parcial da água na camisa de aquecimento. Esta água atua como um homogeneizador do processo de transferência de calor, entre o calor da fonte, o PCM e o cilindro interno, mantendo também o seu papel de armazenamento de calor em SHS.

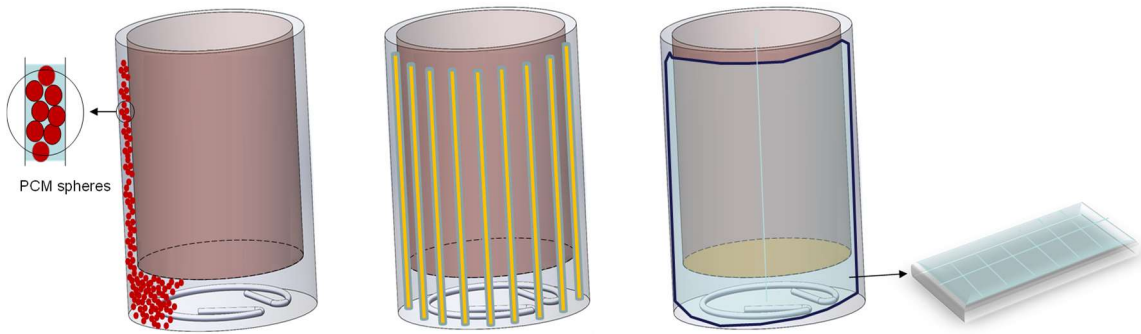


Figura 4.5 Estratégias de encapsulamento do PCM S34.

- i) O encapsulamento em esfera (1 cm de diâmetro), proporciona maior superfície de troca de calor, mas coloca problemas operacionais e de segurança. Torna-se fundamental garantir que as esferas não entrariam em contato com a resistência elétrica na base do cilindro externo (sob risco de se queimarem), e ao mesmo tempo garantir um processo de coleta eficiente durante os procedimentos de desmontagem e limpeza dos tanques.
- ii) Pelas características da geometria do equipamento, o uso de barras cilíndricas seria a maneira mais fácil de introduzir PCM na camisa de aquecimento, com mudanças mínimas nos procedimentos de operação e manutenção. Mas, para comprimentos superiores a 5 cm, colocam-se riscos de segregação, típicos de sais hidratados, que comprometem o desempenho e a longevidade (número de ciclos) da solução.
- iii) O encapsulamento numa solução de tablete oferece assim maior capacidade de inclusão de volume de PCM e, conseqüentemente, maior capacidade de armazenamento de energia, sem problemas de gestão operacional, o que permite também uma disseminação mais fácil dos resultados. Sem prejuízo destas vantagens, exige um material de encapsulamento flexível, capaz de se ajustar à forma do cilindro durante as mudanças de fase (sólido-líquido-sólido), sem risco de danos.

Sendo o material de revestimento uma preocupação transversal às três possíveis geometrias de encapsulamento, considerou-se: o uso de folha de alumínio para a solução tablete, o uso de cobre na solução das barras cilíndricas e diferentes polímeros plásticos para esferas e também estes para a solução em tablete. Cada possível revestimento apresenta vantagens e desvantagens. Os polímeros plásticos permitiam custos de encapsulamento mais baixos, mas presumia-se que estes poderiam ser mais suscetíveis à corrosão e ao desgaste mecânico. Tinham também uma menor condutividade de calor, o que prejudica a carregamento/descarregamento do PCM. O encapsulamento metálico é mais caro, mas oferece maior condutividade e robustez.

Considerando todos os fatores de influência, quer do tipo de geometria, quer das alternativas de materiais de encapsulamento, a solução adotada foi o encapsulamento em formato tablete, utilizado revestimento em polímero plástico.

Sendo esta solução um compromisso necessário entre diversas variáveis, incluindo custo, verificou-se posteriormente nos ensaios experimentais que, após um número de ciclos de carga e descarga, a selagem térmica da embalagem cedeu em algumas bolsas da tablete (Figura 4.6). Não sendo claro se a falha decorre da selagem térmica deficiente das bolsas, da resistência mecânica do material polimérico, ou da corrosividade do PCM S34, esta ocorrência condiciona a aplicabilidade deste material de encapsulamento em soluções não laboratoriais, que terão uma exploração mais intensa e prolongada.

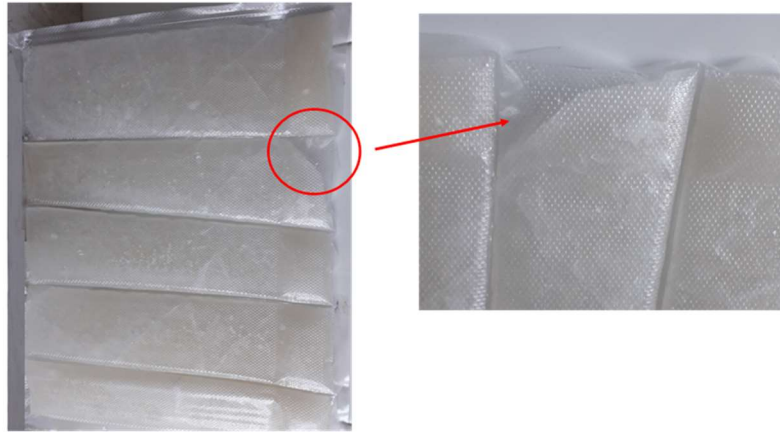


Figura 4.6 Falhas na exploração do PCM S34 encapsulado em tabletes plásticas.

#### **4.4. Simulação por análise numérica CFD (*Computational Fluid Dynamics*)**

Como ferramenta de simulação utilizou-se o software ANSYS Fluent (CFD), para avaliar a capacidade de armazenamento de energia térmica, quando operando com água (SHS) e com PCM (LHS), assim como a evolução das principais variáveis que influenciam os processos de carga e descarga. Para tanto, foi desenvolvido um modelo representativo da geometria do equipamento e das propriedades termodinâmicas dos materiais.

Numa primeira tentativa, utilizou-se um modelo tridimensional apoiado numa malha de análise com mais de 3.000.000 de elementos (Figura 4.7). A simulação deste modelo apresentou problemas de simulação e convergência, com mais de três dias de processamento para cada passo temporal de cinco segundos.

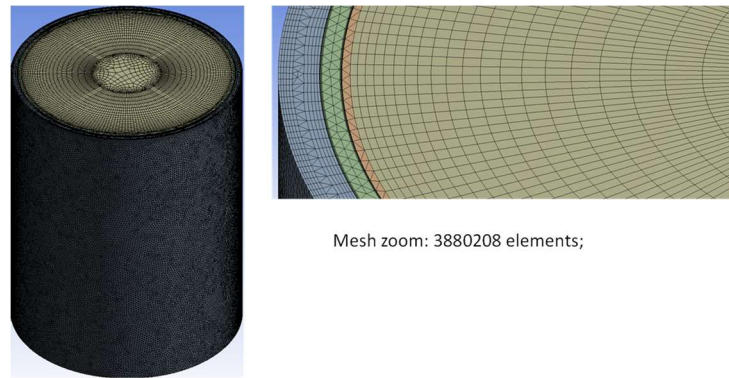


Figura 4.7 Modelo 3D e malha.

Para ultrapassar este constrangimento, considerando a simetria do equipamento, foi desenvolvido um modelo 2D de seção transversal (Figura 4.8). Com esta solução foi possível reduzir significativamente a complexidade do modelo, melhorando a velocidade de simulação para aproximadamente cinco minutos por passo de cinco segundos.

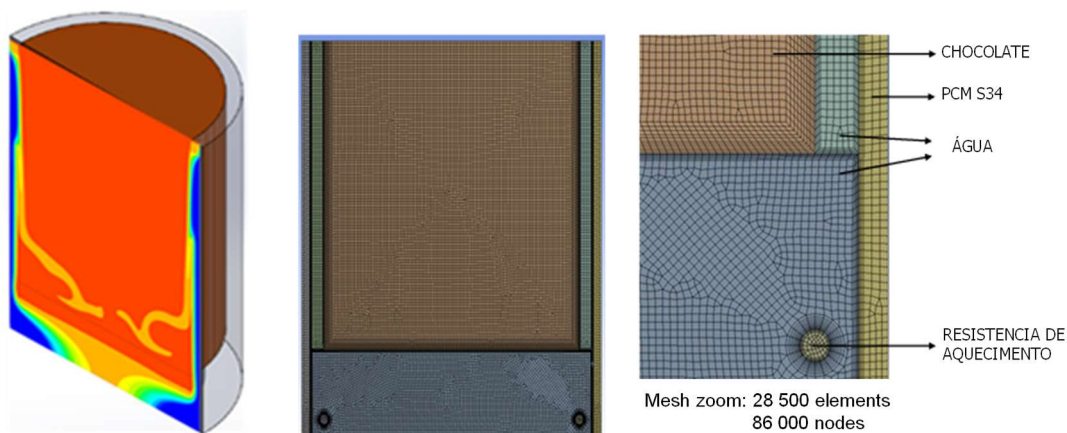


Figura 4.8 Modelo 2D em seção transversal e respectiva malha.

Para este modelo 2D ensaiaram-se diferentes geometrias e densidades de malha, fazendo variar o número de elementos de análise de forma a, primeiro, se obterem padrões de convergência adequados e depois se garantir a independência da malha, e diferenciando a densidade do número de elementos de acordo com a necessidade de detalhe sobre os processos de troca de calor entre os corpos do modelo, sendo superior junto às superfícies de contacto entre os mesmos.

Sobre esta malha, realizou-se um estudo de independência de “time step”, ensaiando-se intervalos entre 0,5 e 10s, com convergência para passos de 0,5, 1 e 5 segundos, a utilização de um intervalo de tempo de 5 segundos, permitiu um bom compromisso entre precisão e tempo de processamento computacional para a malha utilizada, quer nas fases em que há maior variabilidade, como por exemplo o início de carga, quer nas fases em que essa variabilidade diminui, como o fim de carga, com a aproximação a 100% de fração de massa líquida.

#### 4.4.1. Análise térmica transitória

Utilizando o modelo CFD 2D, realizaram-se quatro casos de análise térmica transitória, considerando a carga e a descarga da camisa de aquecimento, utilizando água e água + PCM, como veículos TES:

- i) Caso 1: Carga. A camisa de aquecimento encontra-se cheia de água (11,5 L), sem PCM, e realiza-se o aquecimento da massa de chocolate, partindo da temperatura ambiente de 20 °C, até à temperatura de 38 °C induzida pela resistência da base. O tanque interior encontra-se parcialmente cheio (60%), com a mistura de chocolate 1 (Figura 4.9 e Figura 4.10);
- ii) Caso 2: Descarga. Partindo da conclusão do Caso 1, com a camisa de aquecimento preenchida apenas com água, a 38 °C, e a massa de chocolate a 34 °C para uma fração líquida superior a 99%, com o tanque interior parcialmente cheio (60%), com a mistura de chocolate 1 (Figura 4.11 e Figura 4.12);
- iii) Caso 3: Carga. A camisa de aquecimento encontra-se preenchida com 3,5 L de PCM S34 + 8l de água. Partindo da temperatura ambiente de 20 °C, realiza-se a carga e o aquecimento da massa de chocolate até à temperatura de 38 °C. O tanque interior encontra-se parcialmente cheio (60%) com a mistura de chocolate 1 (Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15);
- iv) Caso 4: Descarga. Iniciando após conclusão do Caso 3, com a camisa de aquecimento a 38°C, preenchida com 3,5l de PCM S34 + 8l de água, e a massa de chocolate a 34°C para uma fração líquida superior a 99%, com o tanque interior parcialmente cheio (60%), com a mistura de chocolate 1 (Figura 4.16 e Figura 4.17);

O volume de PCM utilizado (3,5 L), 30% da capacidade da camisa de aquecimento, entende-se ser suficiente para estudar o impacto e relevância no acréscimo esperado na capacidade de armazenamento, sem comprometer os processos de operação e manutenção do equipamento. Mantém-se a água como meio de homogeneização e transmissão de temperatura e de retenção de calor sensível.

Para efeitos de simulação, consideraram-se as características de um chocolate comercial com 55% de cacau, cujas propriedades mais relevantes são descritas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Propriedades usadas em simulação para modelizar o comportamento do chocolate.

Propriedades	Valores
Densidade, $\rho$	1260 kg m <sup>3</sup>
Calor específico, $C_p$	1.2 kJ kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Condutividade térmica, $k$	0.09 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>

Em cada cenário, a carga e descarga da camisa de aquecimento e a evolução da temperatura do chocolate foram analisadas em dois intervalos: 30 a 34 °C e 34 a 38 °C, procurando-se avaliar:

- i) a formação de gradientes de temperatura horizontais e verticais;
- ii) a evolução da fração líquida da massa de chocolate;
- iii) o acréscimo na capacidade de armazenamento de energia na camisa de aquecimento;
- iv) o aumento do período de operação, abaixo de 34 °C, durante a descarga do PCM.

Como condições fronteira, considerou-se a temperatura do ar ambiente a 20 °C e um valor de  $4,12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  de perdas totais por convecção.

Os resultados das simulações são apresentados e comparados em seguida:

Caso 1:

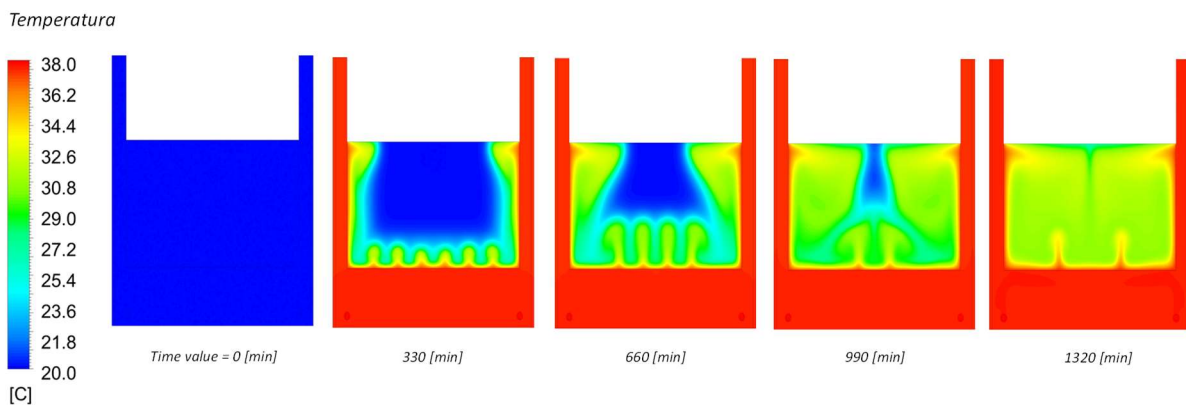


Figura 4.9 Caso 1: Evolução da Temperatura no modelo 2D.

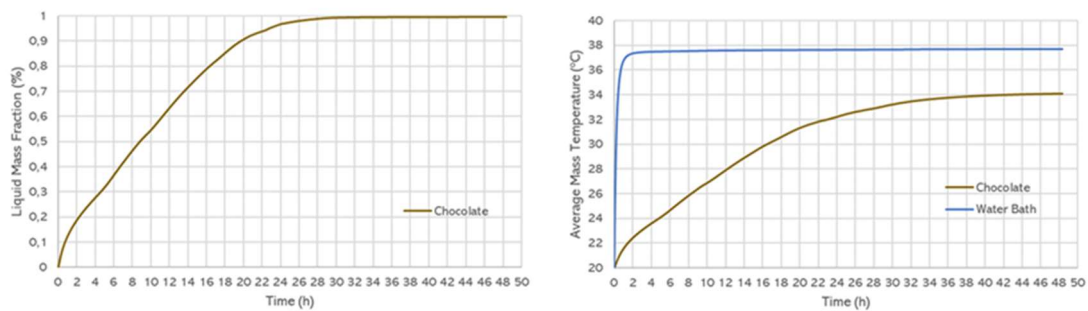


Figura 4.10 Caso 1 (água): Evolução de temperatura e fração líquida durante a carga.

Valores às 26h: Fração líquida de chocolate=0,979; Temperatura média do chocolate= 32,60 °C.

Caso 2:

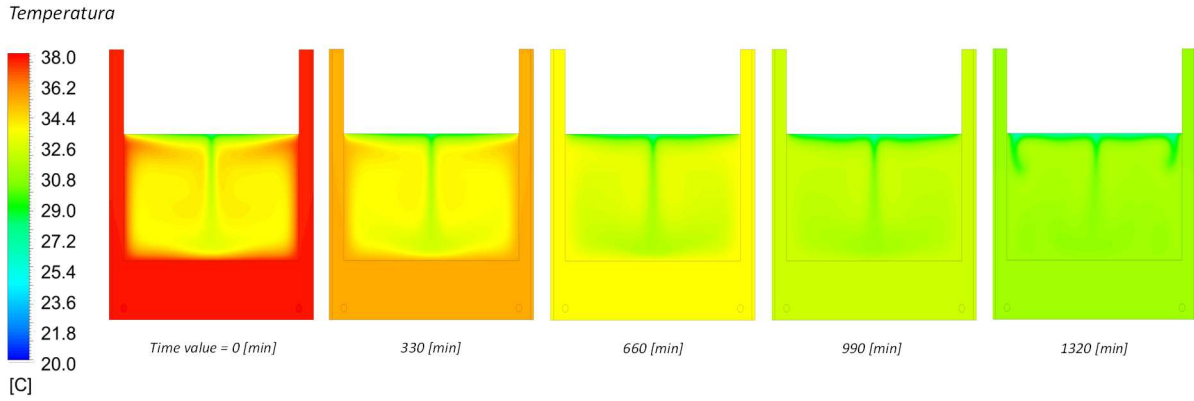


Figura 4.11 Caso 2: Evolução da Temperatura no modelo 2D.

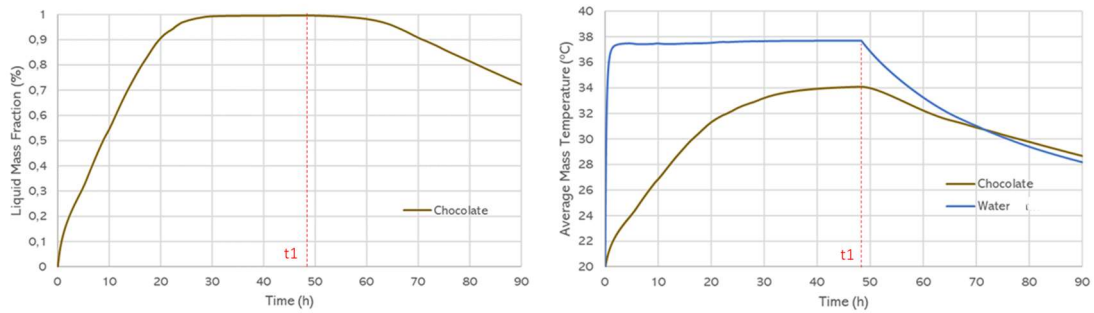


Figura 4.12 Caso 2 (água): Evolução de temperatura e fração líquida durante a descarga, após caso 1. Início da descarga em  $t_1= 48h20$ , Temp. média chocolate a  $34^{\circ}C$ . Temp. média do chocolate  $<30^{\circ}C$  em  $t_2= 77h56$ .

Caso 3:

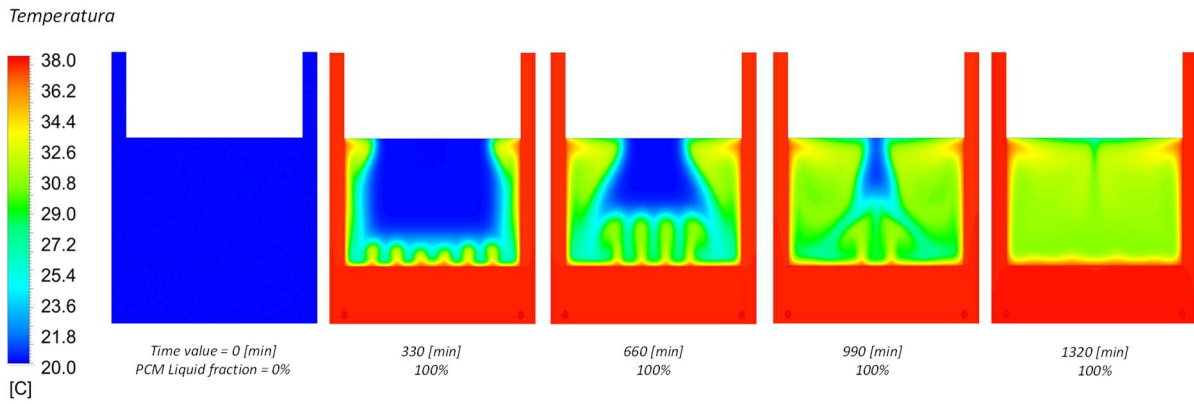


Figura 4.13 Caso 3: Evolução da Temperatura no modelo 2D.

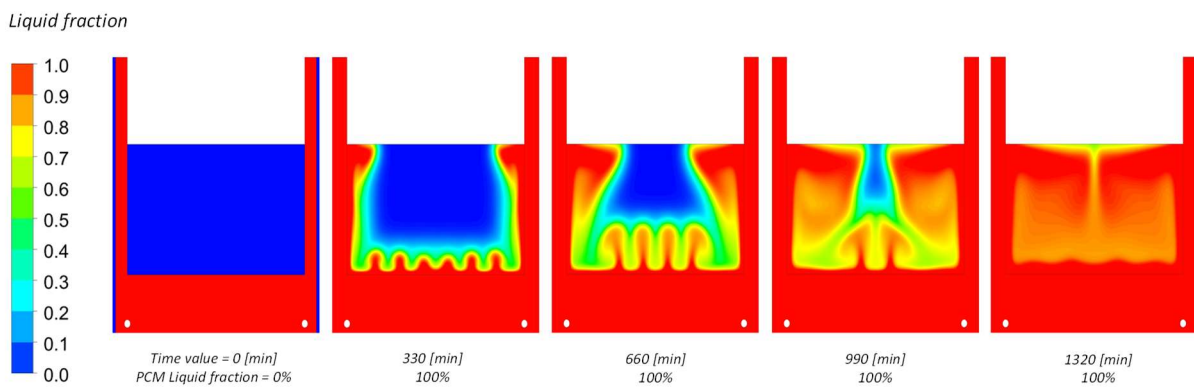


Figura 4.14 Caso 3: Evolução 2D da fração líquida do PCM e do chocolate.

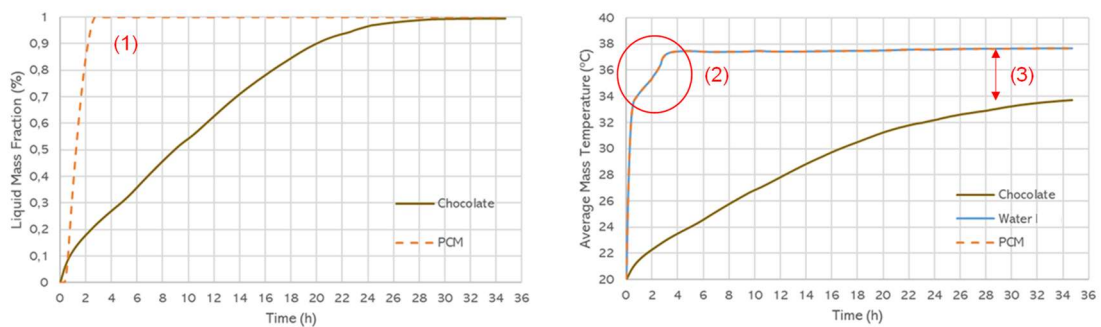


Figura 4.15 Caso 3 (água + PCM): Evolução de temperatura e fração líquida durante a carga.

Valores às 26h: Fração líquida de chocolate=0,979; Temperatura média do chocolate= 32,59 °C.

Caso 4:

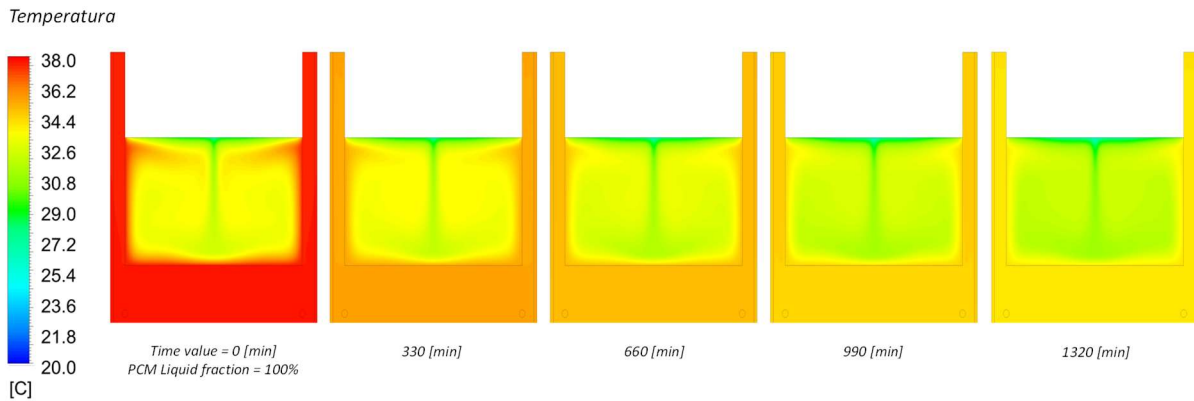


Figura 4.16 Caso 4: Evolução da Temperatura no modelo 2D.

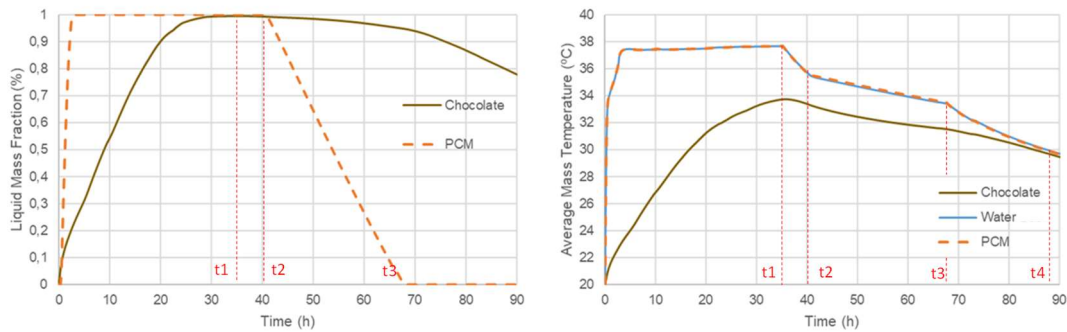


Figura 4.17 Caso 4 (água + PCM): Evolução de temperatura e fração líquida na descarga, após caso 3.

Início da descarga:  $t_1 = (35h10, 38\text{ }^\circ\text{C})$ . Início da descarga LHS  $t_2 = (40h0, 35,69\text{ }^\circ\text{C})$ .

Fim da descarga LHS  $t_3 = (68h21, 33,21\text{ }^\circ\text{C})$ . Fim da descarga  $t_4 = (87h05, 30\text{ }^\circ\text{C})$ .

Da análise de resultados das simulações de carga, caso 1 (água) e caso 3 (água + PCM), é possível observar que:

- i) No caso 3, o período de carga do PCM (referencia 1 na Figura 4.15) decorre entre  $t = 14\text{ min}$  e  $t = 75\text{ min}$ , momento em que se alcança mais de 99% da fração líquida do PCM. Os 99% da fração líquida do chocolate só são alcançados após as 32 horas de trabalho, mas, depois das 26h observa-se nos casos 1 e 3 uma convergência na evolução da temperatura média do chocolate e da fração líquida do chocolate.
- ii) Até ao valor da temperatura de mudança de fase ( $\sim 34\text{ }^\circ\text{C}$ ), verifica-se um crescimento linear da temperatura no conjunto “água + PCM”, em linha com o armazenamento térmico em SHS. No intervalo de carga do PCM em LHS (2), ocorre uma desaceleração no ritmo de crescimento da temperatura, que só é repostado após o PCM estar totalmente carregado, retornando-se ao padrão de crescimento inicial, em consonância com um novo período de armazenamento térmico em SHS, que é mantido até atingir a temperatura da fonte de calor ( $38\text{ }^\circ\text{C}$ );

- iii) Considerando o sistema em equilíbrio após as 32h, verifica-se (referencia 3 na Figura 4.15) uma diferença entre a temperatura na camisa de aquecimento (água + PCM), que se encontra a 38 °C, para a temperatura média na massa de chocolate, a 34 °C. Esta diferença justifica-se pelos gradientes de temperatura, horizontais e verticais, que ocorrem dentro na massa de chocolate, observáveis na Figura 4.13.
- iv) A principal diferença entre os resultados obtidos nos casos 1 e 3, decorre assim da inflexão associada ao intervalo de carga do PCM em LHS (referencia 2 na Figura 4.15). Depois disso, a temperatura na camisa de aquecimento segue um padrão de crescimento linear até aos 38 °C, o que acontece para o caso 1, aproximadamente uma hora antes que no caso 3.

O fenómeno anterior não altera significativamente a evolução da temperatura média do chocolate. Há um crescimento rápido próximo às paredes do tanque, com gradientes de temperatura mais elevados para o eixo. Essas diferenças tendem a diminuir à medida que a curva do chocolate converge entre os dois casos. Como referência, às 26h de carga, a fração líquida do chocolate no caso 1 é de 97,987% e a temperatura média da massa de chocolate é de 32,604°C, respetivamente 0,03% e 0,007°C superior ao caso 3. Esses resultados sugerem que embora o PCM aumenta a capacidade de armazenamento, abrandando inicialmente o aumento da temperatura na camisa de aquecimento, não afeta significativamente a evolução da temperatura e do estado do chocolate. Este é um resultado positivo para as metas estabelecidas, a capacidade de armazenamento é aumentada, absorvendo-se mais energia térmica disponível, sem se alterar de forma relevante o processo de trabalho.

As simulações de descarga, caso 2 (água) e caso 4 (água + PCM), iniciaram-se após completos os respetivos processos de carga, respetivamente casos 1 e 3. Na sua análise é possível observar:

- i) As linhas de descarga, da temperatura na camisa de aquecimento e da temperatura média do chocolate, apresentam no caso 2 uma diminuição sem descontinuidades, quase uniforme, em direção à temperatura ambiente. Já no caso 4, existem três segmentos lineares claros, com ritmos diferentes, antes (0,40 °C/h), durante (0,09 °C/h) e após (0,17 °C/h) o intervalo de libertação de calor latente (Figura 4.18). Com o armazenamento de calor latente prolonga-se o período de operação acima de 30 °C, passa de 29,6h sem PCM para 51,91h (175%) com este material, após o início da descarga.
- ii) Outro aspeto de interesse em ambas as simulações é que a partir de certo momento, o valor da temperatura média do chocolate (~31 °C no caso 1 e 30 °C no caso 2), torna-se superior ao da camisa de aquecimento, sugerindo uma inversão no fluxo de calor.

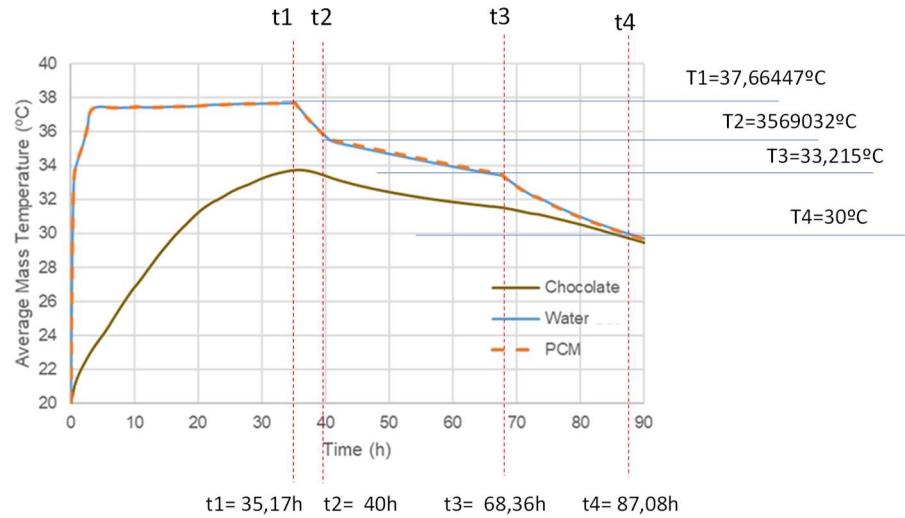


Figura 4.18 Caso 4 (água + PCM): Evolução de temperatura na descarga, após caso 3.

#### 4.4.2. Simulação paramétrica

No âmbito das variações paramétricas, consideraram-se alterações ao tipo e características do PCM, quantidade e geometria de encapsulamento, comportamento da fonte de calor e valores de perda de calor por convecção. Deste trabalho destacam-se os casos 5 e 6, detalhados em seguida:

- iv) Caso 5: Mantendo-se o PCM S34, a solução de encapsulamento e demais características de simulação consideradas nos casos 3 e 4, preencheu-se o volume total do tanque interior a 100%. Os resultados obtidos, evidenciando processos de carga e descarga mais lentos e gradientes de temperatura, horizontais e verticais mais acentuados (Figura 4.19), não acrescentam outras diferenças relevantes face às características analisadas na secção 4.4.2, sugerindo que o incremento da carga do tanque interior (de 60% para 100%), não altera de forma relevante o modelo de operação, no que respeita à capacidade de armazenamento e aos processos de transferência de calor.

#### Caso 5

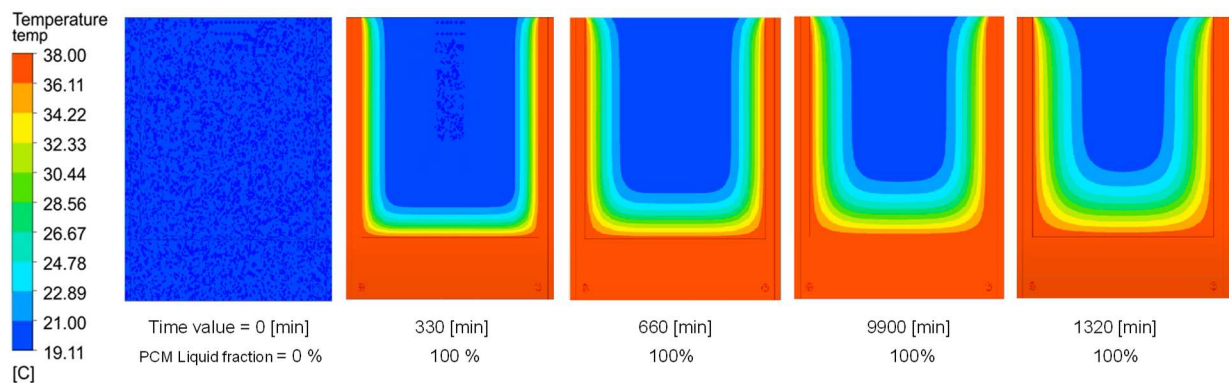


Figura 4.19 Caso 5: Evolução da temperatura e fração líquida durante a carga, com o tanque preenchido a 100%.

- i) Caso 6: Com o tanque interior totalmente preenchido, considerou-se um PCM orgânico com uma temperatura de fusão superior à temperatura de trabalho da massa de chocolate (parafina A36, cujas propriedades são descritas na Tabela 4.2). Considerou-se a camisa de aquecimento (11,5 L) totalmente preenchida com o A36. O processo de descarga (Figura 4.20), iniciou-se com o PCM e chocolate a 36 °C, ambos a 100% de fração líquida e sem gradientes internos, mantendo-se as demais condições de contorno.

Apos 11,5 h de descarga, a massa de chocolate apresentava já gradientes de temperatura, encontrando-se ainda acima dos 34 °C. A temperatura no PCM era já inferior, posicionando-se no intervalo dos 32 °C e a fração líquida muito próxima de 0.

### Caso 6

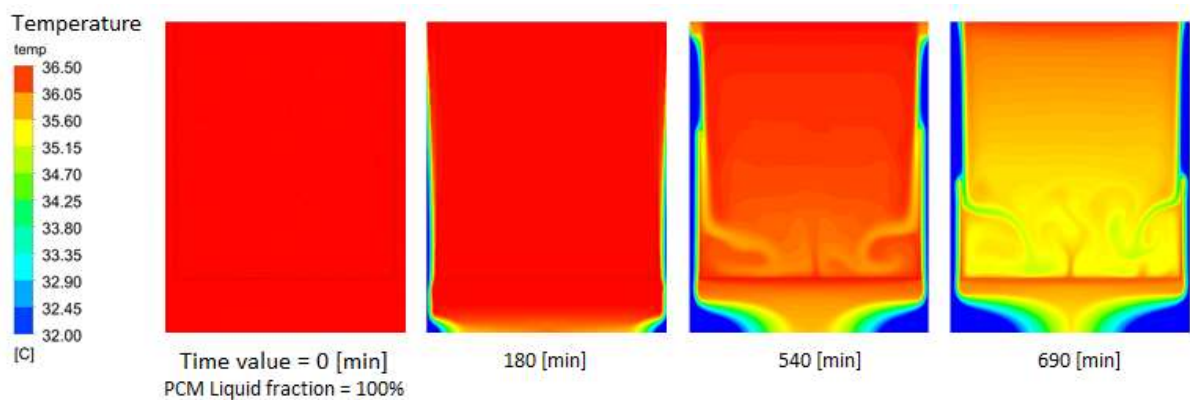


Figura 4.20 Caso 6: Descarga, PCM A36.

Por comparação com a capacidade de armazenamento possível em SHS, usando apenas água na camisa de aquecimento, a quantidade de energia térmica armazenada no PCM A36 passa de 950 kJ para 1.152,4 kJ (121 %).

Para conseguir obter uma quantidade de armazenamento por calor sensível comparável à do calor latente com o PCM A36, a temperatura da água teria que ser elevada acima de 40 °C.

Apesar da maior capacidade de armazenamento obtida neste cenário, que resulta de se utilizar a totalidade do volume disponível na camisa de aquecimento (11,5 l), a relação de ganho para o mesmo volume é inferior à calculada teoricamente para o S34 (que apresenta maior densidade energética e consequentemente maior capacidade de armazenamento). Este cenário de 100% da camisa de aquecimento preenchida com PCM A36, é, contudo, apenas teórico, pois nem a temperatura de fusão do A36 se adequa ao armazenamento de calor à temperatura de trabalho do chocolate, nem será possível o preenchimento total do volume da camisa de aquecimento com PCM. Isso implicaria alterações profundas à solução de encapsulamento, de forma a evitar riscos de segurança alimentar, com repercussões nas operações de manutenção do equipamento real. Além disso, o PCM junto à resistência de aquecimento,

numa situação real, seria sujeito a riscos de degradação mais rápida, que comprometeriam a longevidade da solução. Adicionalmente, a presença de água acrescenta um papel homogeneizador da temperatura durante a carga do PCM, que aqui seria perdido.

## 5

## 5.

**INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL**

Este trabalho tem como objetivo explorar e avaliar a possibilidade de melhorar a eficiência energética nas operações da agroindústria, proporcionando flexibilidade energética, por utilização de material PCM em uma arquitetura TES distribuída, integrando o material PCM diretamente nos equipamentos de produção, proporcionando-lhes capacidade de armazenamento de energia com mínimo impacto operacional.

Para demonstrar e validar esse conceito, foi selecionada uma classe de equipamentos que opera no modelo de camisa de aquecimento, utilizando a técnica do banho-maria. Dentro desta classe, utiliza-se um equipamento de fusão e mistura de materiais granulados (ex.: leite, chocolate, manteiga) como estudo de caso para o paradigma TES distribuído.

### 5.1. Equipamento laboratorial

O equipamento utilizado para os ensaios experimentais e demonstração da prova de conceito consiste de uma máquina de têmpera e mistura para derreter alimentos granulados (Figura 5.1), que pode ser segmentado em dois macro blocos funcionais:

- i) Um tanque cilíndrico interno de 23 L, onde são depositados e aquecidos os alimentos granulados e realizadas as operações de fusão e mistura;
- ii) Um tanque cilíndrico externo de 38 L, aquecido na base por uma fonte de calor de 3.000 W (resistência elétrica).

Os dois tanques são construídos em aço inox 316.



Figura 5.1 Equipamento para temperar e misturar de materiais granulados. Da esquerda para a direita: tanque externo e tanque interno; vista superior do equipamento; resistência de aquecimento; representação computacional do equipamento.

Tabela 5.1 Características e dimensões do equipamento experimental. (1) O volume total do tanque interior inclui o volume das paredes de aço; (2) O volume da camisa de aquecimento obtém-se diminuindo ao volume do tanque exterior, o volume total do tanque interior, o volume da resistência na base e o volume de proteção de nível, que impede o enchimento total da camisa de aquecimento.

Dimensões	Valor
Cilindro exterior, altura:	46,4 cm
Cilindro exterior, diâmetro interior:	32,3 cm
Cilindro exterior, volume:	38 L
Cilindro exterior, espessura da parede de aço:	1,5 mm
Cilindro exterior, espessura da parede de isolante térmico:	1 cm
Cilindro interior, altura (cm)	34,8 cm
Cilindro interior, diâmetro exterior (cm)	29,3 cm
Cilindro interior, volume total <sup>(1)</sup>	23 L
Cilindro interior: espessura da parede de aço	1,5 mm
Volume da camisa de aquecimento <sup>(2)</sup>	11,5 L
Espessura da coluna da camisa	1,5 cm
Resistência elétrica, comprimento:	90,0 cm
Resistência elétrica, diâmetro:	1,0 cm
Resistência elétrica, potência	3.000 W
Resistência elétrica, tensão de operação	230 V

O volume entre os tanques externo e interno (volume da camisa de aquecimento) é tradicionalmente preenchido com água, que funciona como meio de armazenamento térmico e de transmissão e homogeneização do calor produzido na resistência elétrica da base. Este volume de água (11,5 L) será parcialmente substituído por material PCM, visando aumentar a capacidade de armazenamento de energia do equipamento. O produto alimentar, depois de fundido, deverá manter-se no estado liquefeito, a uma temperatura de trabalho constante, durante o ciclo de processamento (8 a 12 horas), de forma a preservar as suas propriedades organoléticas. Garantir estas condições na solução de operação convencional requer ligar e desligar repetidamente o resistor, com consumo de energia intermitente.

Para efeito do estudo de caso em laboratório, a resistência é alimentada por energia de rede. No entanto, existem diversos processos agroindustriais que operam em baixas temperaturas (abaixo de 120 °C) (Garcia et al., 2012), e o seu calor residual poderá ser recuperado e explorado como fonte para alimentar este equipamento. Do mesmo modo será de considerar a possibilidade de integração com fontes renováveis, nomeadamente de origem solar.

## 5.2. Instrumentação e construção de base de dados

Para monitorização, recolha e consolidação dos dados experimentais, foi implementada uma solução de Internet-of-Things (IoT) sobre a plataforma Azure da Microsoft, utilizando-

se um microcontrolador (MCU) PSoC\_5Lp (32bits ARM, 80MHz) da Cypress, onde se integraram sensores de temperatura e energia elétrica. Os dados recolhidos são enviados por WiFi para a plataforma Azure, onde são consolidados e consultados utilizando a ferramenta “Power BI”, também da Microsoft.

Os sensores de temperatura foram fixados em pontos-chave do equipamento, a saber, no tanque interno, no tanque externo e entre ambos (Figura 5.2). Estes sensores foram numerados de 1 a 5, sendo:

- T1: temperatura da camisa de aquecimento;
- T2: temperatura na parede interna do tanque interno;
- T3: temperatura inferior no tanque interno no meio;
- T4: temperatura superior do tanque interno no meio;
- T5: temperatura da parede externa do tanque externo.



Figura 5.2 Da esquerda para a direita: localização dos sensores de temperatura no equipamento; vista da cablagem que interliga os sensores de temperatura ao MCU; e pellets de chocolate dentro do tanque interno.

Na escolha do MCU, valorizou-se a sua capacidade de processamento e armazenamento de dados, bem como a possibilidade de integração com uma plataforma de desenvolvimento de código aberto e a sua interoperabilidade com diferentes tecnologias de sensores de aquisição de dados. A plataforma foi desenhada para responder à especificidade do estudo de caso, mas preparada para permitir um crescimento incremental, nomeadamente a integração de mais ou outros tipos de sensores. Os sensores de temperatura (DS18B20 12 bits (one-wire), da Maxim Integrated) foram selecionados com base nos seus intervalos de operação, de acordo com suas faixas de temperatura, alta estabilidade, precisão e dimensões reduzidas. Para monitorização da temperatura e humidade ambiente, foi utilizada a estação MPM da Schneider Electric. A energia elétrica consumida pelo equipamento foi monitorizada por um circuito integrado ACS71020 da Allegro Microsystems, que monitoriza tensão e corrente. Para poder coletar dados de temperatura no eixo interno do tanque, foi necessário remover o braço agitador. Esta opção, também refletida nos casos de simulação, potencia o desenvolvimento de

gradientes térmicos na massa de chocolate, mas não tem influência perceptível na temperatura da camisa de aquecimento ou na evolução da fração líquida do PCM.



Figura 5.3 Da esquerda para a direita: sensor de temperatura; estação ambiental da Schneider Electric e micro-controlador.

### 5.3. Propriedades do chocolate usado

O chocolate utilizado, foi um produto comercial da Makro (55% Cacau), em granulado, com uma densidade de 1,261 kg/L (Figura 5.4), sólido a 25°C e liquefeito à temperatura de trabalho de 34 °C.



Figura 5.4 Granulado de chocolate.

## 6

## 6.

**ENSAIOS EXPERIMENTAIS E AVALIAÇÃO  
DOS MODELOS NUMÉRICOS**

Os ensaios laboratoriais decorreram à temperatura ambiente de  $16,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), com humidade relativa do ar de 56%. O PCM selecionado foi um sal hidratado, referência S34 da PCM Products Inc., com temperatura de fusão de  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ , encapsulado em tablete ( $30\times 5\times 1,2\text{ cm}$ ) construído em polietileno flexível de baixa densidade (LDPE) (Figura 6.1). A recolha de dados sensoriais, nomeadamente da temperatura nos pontos 1 a 5 (Figura 5.2) e corrente de alimentação, realizou-se com uma periodicidade de 22 segundos.



Figura 6.1 Inclusão do PCM no espaço da camisa de aquecimento.

### 6.1. Condições de ensaio

Foram realizados oito cenários de ensaio, envolvendo a carga e descarga da camisa de aquecimento, com e sem PCM e com o tanque interno parcialmente preenchido (60%), usando-se duas misturas distintas de chocolate granulado:

- i) Mistura 1: 15 kg de chocolate granulado (11,89 L) + 2 Litros de leite. Volume total: 13,89 L, correspondentes a 60% do volume do tanque interior;
- ii) Mistura 2: 12,5 kg de chocolate granulado (9,91 L) + 6 Litros de leite. Volume total: 15,91 L, correspondentes a 69% do volume do tanque interior;

O ensaio com diferentes misturas visou avaliar o impacto desta variável no processo de carga e descarga do conjunto, que se veio a revelar residual.

As características de cada ensaio, numerados de 1 a 8, são descritas na Tabela 6.1. Para comparar o desempenho entre o armazenamento em SHS e LHS, definem-se dois intervalos de análise para a temperatura de operação, respetivamente entre 30 e 34 °C e entre 34 e 38 °C, com armazenamento em SHS e LHS, respetivamente no limite superior e inferior de cada intervalo.

Tabela 6.1 Sumário dos cenários de ensaio.

Ref.	Descrição
# 1	Carga em SHS, 11,5 L de água, tanque a 60%, mistura de chocolate 1
# 2	Descarga e, SHS, 11,5 L de água, tanque a 60%, mistura de chocolate 1
# 3	Carga em SHS e LHS, 8 L de água + 3,5 L de PCM, tanque a 60%, mistura de chocolate 1
# 4	Descarga em SHS e LHS, 8 L de água + 3,5 L de PCM, tanque a 60%, mistura de chocolate 1
# 5	Carga em SHS, 11,5 L de água, tanque a 60%, mistura de chocolate 2
# 6	Descarga e, SHS, 11,5 L de água, tanque a 60%, mistura de chocolate 2
# 7	Carga em SHS e LHS, 8 L de água + 3,5 L de PCM, tanque a 60%, mistura de chocolate 2
# 8	Descarga em SHS e LHS, 8 L de água + 3,5 L de PCM, tanque a 60%, mistura de chocolate 2

Previamente à apresentação dos resultados experimentais, importa estabelecer critérios de comparação entre estes e entre estes e os resultantes de simulações de CFD. Concretamente:

- i) É possível comparar os resultados experimentais entre si, mas não é correto comparar diretamente os períodos de carga entre os ensaios experimentais e as simulações CFD, pois a fonte de calor opera de forma diferente nos dois cenários. Na simulação em Fluent foi considerada uma temperatura de aquecimento constante de 38 °C, enquanto nos ensaios foi utilizada uma fonte de calor controlada por termóstato, operada por pulsos on/off de 3.000 W, com duração variável.
- ii) Embora a fonte de calor tenha sido desligada durante o período de descarga, a comparação dos resultados durante esta fase depende das condições iniciais (temperatura e fração líquida). No início da descarga, a temperatura na camisa de aquecimento é semelhante em todos os casos (38 °C), mas a temperatura média na massa de chocolate e a respetiva fração líquida não são iguais, devido aos gradientes térmicos internos. Apesar desta diferença, admite-se esta aproximação na análise da fase de descarga.

Além destes critérios, importa também mencionar alguns cálculos teóricos:

- i) A energia armazenada na forma de calor sensível em 11,5 L de água (massa  $m_{agua} = 11,5$  kg), quando a sua temperatura é elevada dos 16,4 °C de temperatura ambiente, para 38 °C (variação de temperatura  $\Delta T = 21,6$  °C), considerando um valor médio de calor específico para a água de  $\bar{C}_p = 4,13$  kJ  $\cdot$  kg<sup>-1</sup>  $\cdot$  K<sup>-1</sup>, será:

$$Q_{agua} = m_{agua} \cdot \bar{C}_p \cdot \Delta T = 1026 \text{ kJ.}$$

Este será o valor de SHS, correspondente aos cenários de ensaio #1, #2, #5 e #6.

- ii) Utilizando o cálculo prévio, a energia armazenada em 8 L de água, cenários #3, #4, #7 e #8, será de 714 kJ.
- iii) A energia armazenada no PCM dependerá da sua massa ( $m_{PCM} = 7,35$  kg, para uma densidade  $\rho = 2100$  kg m<sup>-3</sup>), da sua temperatura de mudança de fase (fusão) ( $T_{pc} = 34$  °C), do calor específico nas suas fases sólida e líquida (que se assume igual, com um valor médio  $\bar{C}_{sp} = \bar{C}_{lp} = 2,1$  kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), da percentagem de fração líquida da sua massa (que se assume 100%, i.e.,  $\alpha_m = 1$ ) e do valor da sua entalpia de mudança de fase ( $\Delta H_m = 140$  kJ kg<sup>-1</sup>). Obtendo-se os valores prévios através do fabricante (Tabela 4.2), o valor total de energia armazenada no PCM (SHS e LHS), é dado por (Sharma et al., 2009):

$$Q_{PCM} = m_{PCM} \cdot [\bar{C}_{sp} \cdot (T_{pc} - T_i) + \alpha_m \cdot \Delta H_m + \bar{C}_{lp} \cdot (T_f - T_{pc})] = 1362 \text{ kJ.}$$

## 6.2. Análise de resultados experimentais

Tendo por base as limitações assinaladas e os cálculos teóricos prévios, apresentam-se e analisam-se em seguida os principais resultados experimentais.

- i) Com a introdução de 3,5 L de PCM, correspondendo a aproximadamente 30% da capacidade da camisa de aquecimento de 11,5 L, alcançou-se um incremento de 1050 kJ (102%) na energia armazenada, que era de 1026 kJ (apenas com SHS), aumentando para 2076 kJ no total (714 kJ como SHS, em 8 L de água, e 1362 kJ como LHS e SHS, no PCM).
- ii) Por consequência da incorporação do PCM, observou-se um aumento nos períodos de carga e descarga, que se deve ao aumento da energia térmica armazenada. Comparando as descargas em # 2 (Figura 6.2) e # 4 (Figura 6.3), a introdução do PCM permitiu o aumento do período de descarga (34 a 30 °C) em 227% (em linha com o aumento da simulação CDF), estendendo o período de operação acima de 30 °C em 5,53 h, passando de 4,33 h para um total de 9,86 h.
- iii) Nos ensaios de descarga utilizando apenas água (SHS), #2 (Figura 6.2) e #6 (Figura 6.4), com as misturas 1 e 2, respetivamente, é possível observar uma redução quase linear na temperatura da camisa de aquecimento. Por comparação, nos cenários #4 (Figura 6.3) e #8 (Figura 6.5), para LHS e SHS, é possível reconhecer após os 34 °C um ponto de mudança, com diminuição na taxa de queda de temperatura após 34 °C. As reduções, de 42% no # 4 (mistura 1) e 43% no # 8 (mistura 2), sugere uma influência residual da mistura de chocolate usada no desempenho da solução de armazenamento.

- iv) Além do aumento da capacidade de armazenamento, que é essencial para o desenvolvimento de uma arquitetura de armazenamento distribuída, a introdução do PCM levou a um aumento da estabilidade térmica e a um período de operação mais longo, diminuindo a taxa de perda abaixo da temperatura de fusão (34 °C), de 1,30 °C/h a 0,74 °C/h, como referência para a descarga no cenário #8.
- v) Com a descarga e subsequente arrefecimento da massa de chocolate, observa-se um ponto de inversão em que a temperatura na camisa de aquecimento passa a ser inferior à temperatura da massa de chocolate. Isso é mais pronunciado nos casos SHS do que nos casos LHS e demonstra que a massa de chocolate tem uma capacidade maior de reter calor do que a água.
- vi) No cenário #8, (SHS + LHS), o chocolate descarrega aproximadamente à mesma taxa que o PCM (respetivamente 0,73 °C/h e 0,74 °C/h). Já no cenário de descarga #6 (SHS), em que a água arrefece mais rápido que o chocolate, observa-se um ponto de transição em que o chocolate passa a fornecer calor à camisa de aquecimento (Figura 6.4,  $T_2 > T_1$ ). Usando o PCM, este calor não é retirado do chocolate e o intervalo de trabalho é estendido em cerca de 1h20 de operação acima de 30 °C, face ao obtido usando apenas água representa mais 32%. Isso sugere que, em caso de substituição total da água por PCM, o período de operação acima de 30 °C seria duplicado.
- vii) Sendo esperado a observação de gradientes térmicos na massa de chocolate, estes foram aumentados pela remoção do braço agitador. Nas duas misturas ensaiadas, foram observados gradientes verticais e horizontais durante o carregamento (mais quente próximo às paredes do tanque do que no centro), cuja direção foi invertida durante a descarga (mais quente no centro do tanque do que próximo às paredes). Durante a carga, os pontos de temperatura mais elevados foram observados junto à parede interna do tanque e à base do tanque.
- viii) O principal fator de diferença entre a mistura 1 e 2, foi a introdução de uma maior quantidade de leite. Ao aumentar o volume de leite procurou-se diminuir a presença de ar no tanque interior, durante a fase de fusão do chocolate granulado (Figura 6.6), e aumentar a condutividade térmica da mistura. Com isto esperava-se uma mais rápida homogeneização da temperatura interior, com a diminuição dos gradientes térmicos. Paralelamente, admitia-se diminuir a capacidade de reter calor da mistura (condutividade do chocolate menor que a do leite), o que significaria um ritmo de arrefecimento mais rápido quando desliga a fonte de calor. Da análise comparativa dos casos de ensaio, observaram-se diferenças residuais no ritmo de arrefecimento e nos gradientes da massa de chocolate nas duas misturas.

- ix) Embora a solução com PCM necessite de um maior consumo de energia para completar a carga, este consumo é compensado pelo prolongamento do ciclo de funcionamento sem a necessidade de fornecer mais calor. Isto é relevante nos casos em que a energia é fornecida por, por exemplo, fontes renováveis, como painéis solares térmicos, validando-se a oportunidade do PCM para agregar flexibilidade à rede, por meio do armazenamento distribuído.

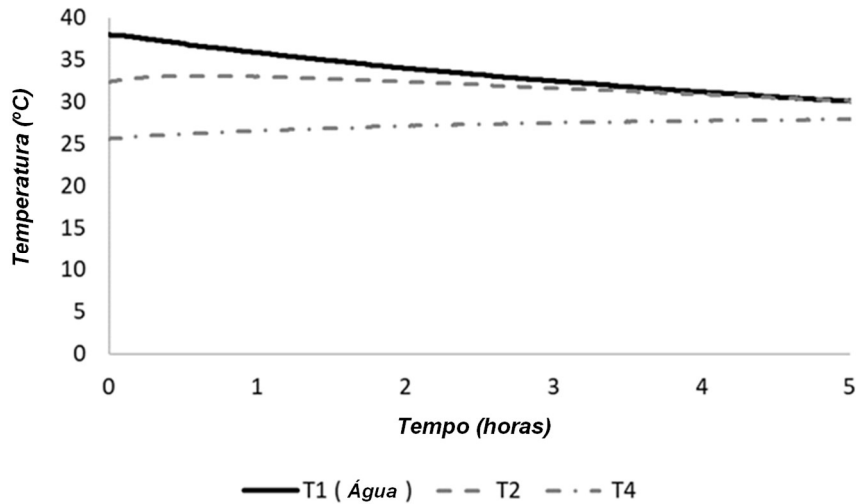


Figura 6.2 Descarga em SHS, cenário #2, onde apenas é usada água com a mistura de chocolate 1.

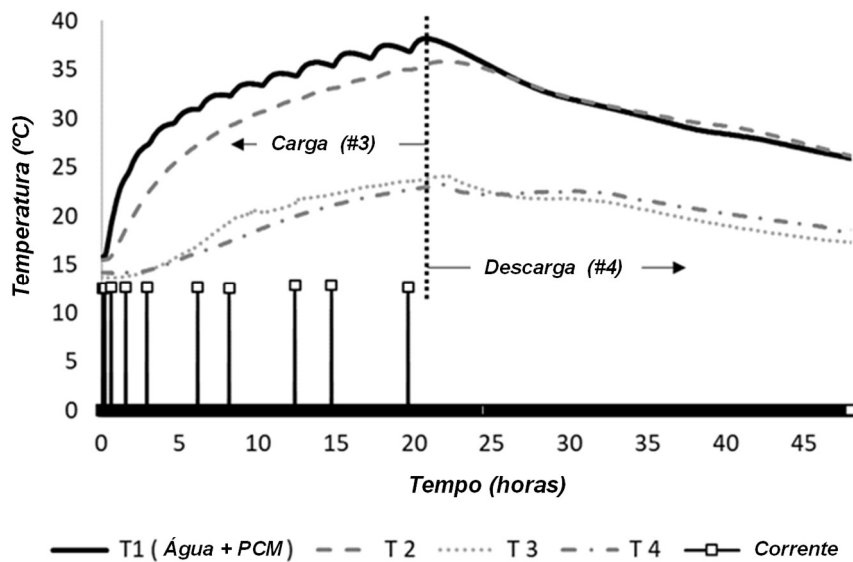


Figura 6.3 Carga de calor (# 3) e descarga (# 4), utilizando o PCM, com LHS e SHS, para mistura de chocolate 1.

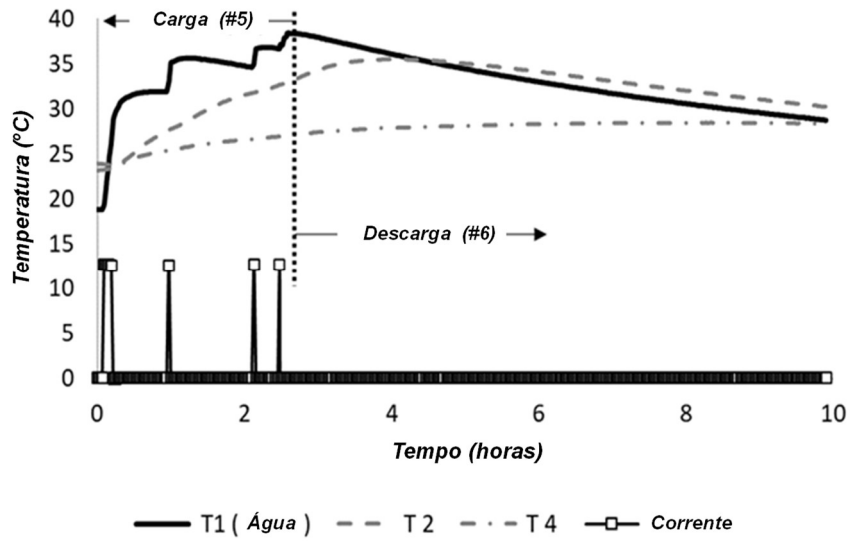


Figura 6.4 Carga de calor (# 5) e descarga (# 6), utilizando apenas água para SHS, com a mistura de chocolate 2.

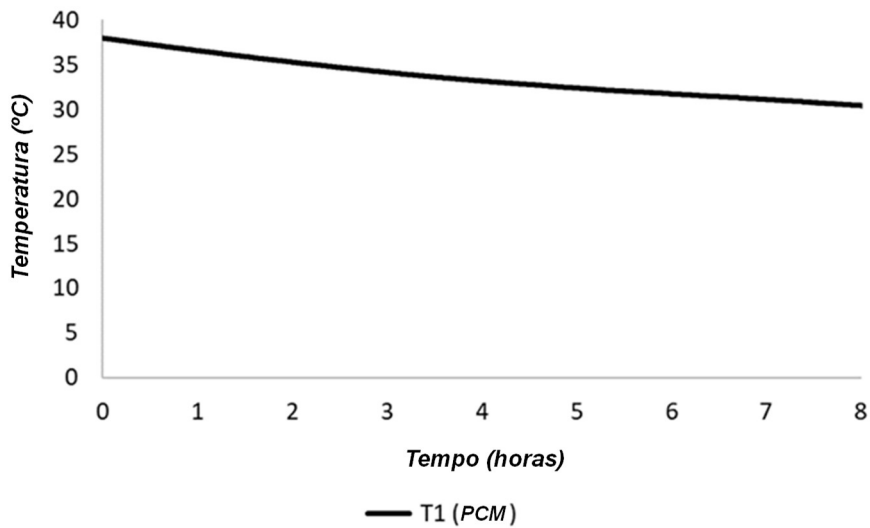


Figura 6.5 Detalhe da fase de descarga no cenário #8, utilizando o PCM para LHS e SHS, com a mistura 2.



Figura 6.6 Da esquerda para a direita: granulado de chocolate; mistura 1 fundida; e mistura 2 fundida.

### 6.3. Falhas no decurso dos ensaios experimentais

No decurso dos ensaios a principal falha observada prende-se com a degradação do encapsulamento usado nas tabletes de PCM. Conforme mencionado, o PCM foi encapsulado em tabletes seccionadas, construídas em LDPE flexível. Esta opção mostrou-se adequada, face ao objetivo de não introduzir alterações relevantes nos processos de operação do equipamento, facilitando a adoção e posicionando-se como um importante vetor para a disseminação dos resultados. Porém, o uso do invólucro plástico, sendo um material barato e flexível, apresentou limitações técnicas de robustez. Além da degradação dos selos de compartimentação (ver Figura 6.7, à esquerda), com a mudança de fase houve uma deformação dos sacos de PCM, que se moldaram às paredes do tanque interno. Este processo dificultou a remoção do PCM, por exemplo, para fins de manutenção, provocando pequenos rasgos na maioria dos invólucros, e assim limitando sua reutilização ( Figura 6.7, à direita). Verificando-se o interesse na preservação da geometria, será importante em trabalhos futuros considerar diferentes materiais de encapsulamento, nomeadamente a utilização de folha de alumínio.



Figura 6.7 Da esquerda para a direita: degradação da selagem térmica do invólucro; PCM após retirada a frio, no estado sólido, consolidada na base do encapsulamento, com pontos de rutura no encapsulamento.

### 6.4. Comparação entre as condições do modelo numérico e do ensaio experimental

Considerando as restrições enunciadas na secção 6.1, relativas as diferenças entre a operação da fonte de calor e à quantidade de energia armazenada na massa de chocolate quando se inicia a descarga, que limitam as comparações entre os resultados experimentais e os decorrentes da simulação do modelo numérico, é possível identificar entre ambos as seguintes concordâncias de resultados:

- i) É possível verificar nos cenários de carga e de descarga experimentais, padrões de evolução de temperatura convergentes com os preconizados no modelo numérico.
- ii) Nos cenários experimentais com PCM, identificam-se durante a carga e a descarga três ritmos distintos de variação da temperatura, convergentes com os períodos de armazenamento em SHS, (SHS+LHS) e novamente SHS, conforme previsto no modelo numérico.
- iii) Embora não sejam comparáveis os tempos totais de descarga, experimentais e simulados, verificaram-se incrementos percentuais no tempo de operação decorrentes da inclusão do PCM, que são também convergentes, quando se considera como referência o tempo de descarga usando apenas água (respetivamente 175% e 227 %).
- iv) O modelo numérico e os ensaios experimentais, convergem ainda na formação de gradientes de temperatura na massa de chocolate durante a carga e na sua inversão do seu sentido durante o processo de descarga, existindo um ponto a partir do qual o chocolate passa ele próprio a fornecer energia à camisa de aquecimento.



| 7.

## CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO

Com o presente trabalho procurou-se contribuir para a melhoria do desempenho energético no setor agroalimentar por meio do armazenamento de energia térmica (TES) na forma de calor latente (LHS), recorrendo a materiais PCM.

Da revisão da literatura realizada sobressai que apesar de um número crescente de cenários de aplicação de PCM em outros setores, verifica-se a falta de estudos de caso que sustentem a oportunidade da utilização de materiais de mudança de fase, numa estratégia de eficiência energética, para o setor agroindustrial.

Decorrente deste objetivo colocavam-se diferentes riscos e incertezas, como: i) qual o ganho possível em capacidade de armazenamento de energia e o impacto do mesmo na autonomia das operações e no custo dos produtos finais, ii) se seria possível desenvolver uma arquitetura de armazenamento distribuída, que facilitasse a integração e o aproveitamento do potencial de produção proveniente de FER e, simultaneamente, aproximasse e flexibilizasse a recuperação e valorização de energia proveniente de fontes de calor de baixa intensidade; e iii) o impacto que isto poderia ter na cadeia de produção, nos processos de trabalho e na longevidade do próprio parque tecnológico existente.

Observando-se no setor diferentes gerações tecnológicas e múltiplas combinações do tipo “equipamento-operação” que dependem diretamente do consumo de energia térmica, considerou-se para estudo de caso um cluster de equipamentos que operam num modelo de camisa de aquecimento, sobre o qual se admitiu, por hipótese de investigação, a possibilidade de substituir o veículo de armazenamento de calor sensível, a água, por um material PCM capaz de aumentar essa capacidade de armazenamento, contribuir para a estabilização da temperatura de trabalho e prolongar o período de operação em autonomia, maximizando não apenas o desempenho energético do equipamento mas contribuindo para a flexibilização de toda a rede energética que suporta a cadeia de produção em que esta inserido.

Concluída esta dissertação, entende-se ter conseguido demonstrar estes pontos, nomeadamente, o valor agregado para a indústria, decorrente do aumento da capacidade de armazenamento de energia térmica.

No processo, foram sendo colocadas novas questões e oportunidades de investigação. Algumas abordadas no âmbito dos trabalhos, caso da metodologia de comparação de PCM. Outras, que, enquanto derivadas das hipóteses originais, se admitem relevantes e se endereçam para trabalhos futuros.

## 7.1. Conclusões

Considerando a pergunta de investigação enunciada no Capítulo 1: “É possível melhorar o desempenho energético do setor agroindustrial por meio do armazenamento de energia térmica em materiais PCM, com impacto reduzido nos equipamentos da cadeia produtiva?”, este trabalho avaliou as suas implicações e ramificações, por meio de modelos, protótipos e ensaios experimentais, procurando demonstrar a exequibilidade das hipóteses e a sua contribuição para o desempenho energético na indústria.

Estudaram-se as propriedades de diferentes materiais PCM e a sua adequação a diferentes *clusters* de equipamentos e tipologias de operações, selecionando-se para estudo de caso um par “equipamento-operação”, ilustrativo da importância da energia térmica nas operações de transformação e processamento no setor. Este estudo de caso, materializado num equipamento de processamento de chocolate, foi modelizado numa ferramenta de simulação numérica e o modelo teórico validado pelos resultados dos ensaios experimentais posteriores, abrindo caminho para uma ferramenta de planeamento para este cluster de equipamentos, mas, cujas metodologias usadas se admitem extrapoláveis para outras matérias-primas (por exemplo, a manteiga), e para outros *clusters* e operações no setor. Neste processo demonstrou-se:

- i) a possibilidade de incorporação de PCM diretamente na estrutura dos equipamentos produtivos, substituindo parcialmente o uso da água como fonte de armazenamento térmico, sem alteração significativa nos modelos de operação dos equipamentos existentes;
- ii) que a substituição de 3,5 L de água pelo mesmo volume do PCM S34, representou um acréscimo de 1050 kJ, ou seja, 330% da capacidade de armazenamento no mesmo volume, e 102% no conjunto combinado (3,5 L PCM + 8 L de água) do estudo de caso;
- iii) que uma vez carregado o PCM, o ganho potenciado pelo aumento da capacidade de armazenamento, se reflete diretamente no aumento do tempo de funcionamento do equipamento em autonomia (sem energia de rede), mantendo a massa de chocolate à temperatura de trabalho por mais 1,2 horas de operação (32%);

Foi ainda apresentada uma metodologia de seleção de PCM, com critérios de avaliação baseados na adequação das propriedades termofísicas do material às especificidades da operação, ao impacto nos processos de exploração e manutenção, ao custo e disponibilidade de materiais, principais fatores de risco, e impacto do ciclo de vida.

Ficou também demonstrada a importância da estratégia de encapsulamento, nomeadamente ao nível da escolha dos materiais e geometria, para a mitigação dos riscos, maximização da condutividade térmica e das trocas de calor e longevidade da solução.

## 7.2. Trabalhos futuros

Variando de acordo com o PCM selecionado e estratégia de encapsulamento, a possibilidade demonstrada de aumentar a capacidade de armazenamento por massa, quando comparada com a mesma proporção permitida nos modelos convencionais com recurso a água, sustenta o interesse na transição de soluções centralizadas baseadas em SHS para soluções distribuídas de LHS. Contudo, a necessidade de uma transição tecnológica suave, que não comprometa o investimento realizado no parque de equipamentos industriais existente, nem acrescente complexidade aos processos de operação e manutenção atuais, sugere a importância de uma estratégia incremental, caso a caso, à semelhança do que se fez para o *cluster* estudado, de forma a responder adequadamente às especificidades das faixas de temperatura de operação e geometrias das estruturas de cada tipologia de equipamento/operação.

Neste percurso, embora os ganhos possam ser valorizados unitariamente e explorados ao nível dos equipamentos isolados, como demonstrado no estudo de caso, é importante reter que bons desempenhos isolados não substituem a necessidade de escala para obter uma solução comercialmente eficiente à dimensão industrial. É assim importante alargar o espectro de equipamentos de uma linha de produção que possam incorporar materiais PCM, de forma a atingir uma capacidade de armazenamento distribuída que concorra com os valores de armazenamento de energia das atuais soluções TES-SHS centralizado.

Demonstradas as condições para o aumento e eficiência da capacidade de armazenamento de energia térmica na indústria, em linha com o desenvolvimento da estratégia de encapsulamento e incorporação do PCM, preconiza-se o desenvolvimento de circuitos de integração e recuperação de energia local, capazes de se posicionarem como alternativa à energia da rede elétrica pública. A valorização energética da flexibilidade potencializada pelas soluções de armazenamento TES-LHS, passa a exigir a integração com fontes de energia cujo potencial não seja totalmente explorado na agroindústria. Nomeadamente, a integração de circuitos de vapor e a recuperação de IWH, bem como a integração de fontes renováveis. A opção pela energia solar é particularmente interessante, pois permite que o PCM seja carregado diretamente por troca térmica, o que também permite aumentar a flexibilidade energética e o autoconsumo total.

A diversificação de equipamentos passíveis de incorporação de PCM, o desenvolvimento de sistemas de recuperação de energia e o desenvolvimento de novas matérias compostas, deverão assim ser objeto de trabalhos de investigação subsequentes.





## REFERÊNCIAS

- Baichoo, N., MacNaughtan, W., Mitchell, J. R., & Farhat, I. A. (2006). A STEPSCAN differential scanning calorimetry study of the thermal behavior of chocolate. *Food Biophysics*, 1(4), 169–177. <https://doi.org/10.1007/s11483-006-9018-z>
- Bruno, F., Belusko, M., Liu, M., & Tay, N. H. S. (2015). Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems. In *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. <https://doi.org/10.1533/9781782420965.2.201>
- Cabeza, L. F. (2015). *Advances in Thermal Energy Storage Systems* (L. F. Cabeza, Ed.). <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16453-7>
- Cengel, Y. A. (2009). *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer, 2nd Edition*. (McGraw-Hill).
- Coelho, L. (2016). *Thermal Energy Storage Systems for energy efficient building an integrated solution for residential building energy storage by solar and geothermal resources. Projeto Europeu H2020 TESSe2b*.
- Da Silva, C. A., Baker, D., Shepherd, A. W., Jenane, C., & Miranda-da-Cruz, S. (2009). Agro-Industries for development. In *The Food and Agriculture Organization of the United Nations, CAB International*. <https://doi.org/10.1079/9781845935764.0000>
- European Commission. (2016). *EU Energy in Figures, Statistical Pocketbook*. <https://doi.org/10.2833/03468>
- FAO-UNIDO. (2015). *FAO-UNIDO Expert Group Meeting on Agro-Industry Measurement (AIM ) Report*. (November), 1–9.
- FAO. (2012). Policy Brief: The Case for Energy-Smart Food Systems. *Food and Agriculture Organization of The United Nations*, 1–16. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/014/i2456e/i2456e00.pdf>
- Hassanien, R. H. E., Li, M., & Dong Lin, W. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 989–1001. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.095>
- Jarimi, H., Aydin, D., Yanan, Z., Ozankaya, G., Chen, X., & Riffat, S. (2019). Review on the recent progress of thermochemical materials and processes for solar thermal energy storage and industrial waste heat recovery. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 14(1), 44–69. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cty052>
- Jensen, S. Ø., Henrik, M., Lopes, R., Junker, R. G., Aelenei, D., Li, R., ... Pasut, W. (2017). *Annex 67: Energy Flexible Buildings - Energy Flexibility as a key asset in a smart building future - Contribution of Annex 67 to the European Smart Building Initiatives*. (November), 1–16. Retrieved from <http://www.annex67.org/media/1470/position-paper-energy-flexibility-as-a-key-asset-i-a-smart-building-future.pdf>
- Kamiński, J., & Leduc, G. (2010). Energy efficiency improvement options for the EU food industry. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 13(1), 81–96.
- Kane, L., & Ault, G. (2014). A review and analysis of renewable energy curtailment schemes and Principles of Access: Transitioning towards business as usual. *Energy Policy*, 72(2014), 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.010>
- Konig, G., Da Silva, C. A., & Mhlanda, N. (2013). Enabling environments for agribusiness and agro-industries development: Regional and country perspectives. In *FAO, Agribusiness and Food Industries*.

- Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J.-J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 379–391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.019>
- Latini, A., & Laid, S. (2017). *Handbook on Efficient Fruit and Vegetables Processing Plants*. (April).
- Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). *Heat and cold storage with PCM*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9>
- Mendes, J., Joyce, A., Giestas, M., Horta, P., & Brites, M. (2009). Armazenamento de Energia Solar Termica. In *LNEG*. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/70657933.pdf>
- Miah, J. H., Griffiths, A., McNeill, R., Poonaji, I., Martin, R., Leiser, A., ... Sadhukhan, J. (2015). Maximising the recovery of low grade heat: An integrated heat integration framework incorporating heat pump intervention for simple and complex factories. *Applied Energy*, 160(September), 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.032>
- Miah, J. H., Griffiths, A., McNeill, R., Poonaji, I., Martin, R., Morse, S., ... Sadhukhan, J. (2015). Creating an Environmentally Sustainable Food Factory: A Case Study of the Lighthouse Project at Nestlé. *Procedia CIRP*, 26, 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.030>
- Miró, L., Gasia, J., & Cabeza, L. F. (2016). Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review. *Applied Energy*, 179, 284–301. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.147>
- Monforti-Ferrario, F., Dallemand, J.-F., Pascua, I. P., Motola, V., Banja, M., Scarlat, N., ... Renzulli, P. (2015). Energy use in the EU food sector: State of play and opportunities for improvement. In *European Commission Joint Research Centre*. <https://doi.org/10.2790/158316>
- Muller, D., Marechal, F., Roux, P., & Wolewinski, T. (2005). *An energy management method for the food industry*.
- Muñoz, G. F. (2016). *Characterization , equation formulation and enhancement of phase change materials (PCM) for thermal energy storage (TES)*. (c), 1–65.
- Nienborg, B., Gschwander, S., Munz, G., Fröhlich, D., Helling, T., Horn, R., ... Schossig, P. (2018). Life cycle assessment of thermal energy storage materials and components. *Energy Procedia*, 155, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.063>
- Oró, E., de Gracia, A., Castell, A., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, 99, 513–533. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058>
- PCM uk limited, P. (2020). Types of Phase Change Materials. Retrieved from [www.pcmproducts.net](http://www.pcmproducts.net)
- Pereira, T. C., Lopes, R. A., & Martins, J. (2019). Exploring the energy flexibility of electric water heaters. *Energies*, 13(1), 1–11. <https://doi.org/10.3390/en13010046>
- Pérez-García, M., Silva, R., & Cabrera Corral, F. J. (2015). *Solar Heat for Agro-Industrial Processes: an Analysis of its Potential Use in Southern Spain*. (September 2014), 1–9. <https://doi.org/10.18086/eurosun.2014.01.06>
- Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, Vol. 65, pp. 67–123. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>
- Quast, L. B., Luccas, V., Demiate, I. M., Santos, R. D., Quast, E., & Kieckbusch, T. G. (2011). Avaliação De Propriedades Térmicas De Manteiga De Cacau E Gorduras Alternativas Evaluation of Thermal Properties of Cocoa Butter and. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, 05, 387–397.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. In *Sustainability* (Vol. 10). <https://doi.org/10.3390/su10010191>
- Shapiro, H. N., & Moran, M. J. (2014). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 8th Edition*.

- (Wiley).
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Sims, R., Flammini, A., Puri, M., & Bracco, S. (2015). *Opportunities For Agri-Food Chains To Become Energy-Smart*. Retrieved from [www.fao.org/](http://www.fao.org/)
- Solé, A., Miró, L., Barreneche, C., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2013). Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.066>
- Su, W., Darkwa, J., & Kokogiannakis, G. (2015). Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 373–391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.044>
- Sutter, B. P. (2010). *Direct Steam Injection Hot Water Systems*.
- Thollander, P., & Palm, J. (2013). *Improving Energy Efficiency in Industrial Energy Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4162-4>
- Torbica, A. M., Pajin, B. S., Omorjan, R. P., Lončarević, I. S., & Tomić, J. M. (2014). Physical properties of chocolate with addition of cocoa butter equivalent of moderate hardness. *JAACS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91(1), 39–48. <https://doi.org/10.1007/s11746-013-2357-2>
- UNIDO. (2009). Industrial Development Report 2009. In *Development* (Vol. 12). <https://doi.org/10.1039/b917653e>
- Ure, Z., & Mashare, M. (2013). PHASE CHANGE MATERIAL BASED PASSIVE COOLING SYSTEMS DESIGN PRINCIPAL AND GLOBAL APPLICATION EXAMPLES. In 12 th international conference on sustainable Ener (Ed.), *Paper ID: SET2013-023*. Hong Kong.
- Valdecir, Kelly, C., & Luccas. (2004). Review: Tempering or Precrystallization of Chocolate. *Brazilian Journal of Food Technology*, 7(1), 23–30.
- Vissotto, F. Z., Gomes, C. R., & Batista, B. J. L. (2005). Caracterização do comportamento reológico e da textura de chocolates sem sacarose. *Brazilian Journal of Food Technology*, 8(2), 107–111.
- Xu, H., Sze, J. Y., Romagnoli, A., & Py, X. (2017). Selection of Phase Change Material for Thermal Energy Storage in Solar Air Conditioning Systems. *Energy Procedia*, 105, 4281–4288. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.898>
- Zsembinszki, G., Fernández, A. G., & Cabeza, L. F. (2020). Selection of the appropriate phase change material for two innovative compact energy storage systems in residential buildings. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/app10062116>





## A. Apêndice: Publicações e disseminação de conhecimento

A divulgação de resultados visa, por um lado, a sua disponibilização ao universo de investigadores da indústria agroalimentar, fabricantes de equipamentos e potenciais utilizadores, e por outro, a sua disseminação entre os investigadores relacionados com as áreas de armazenamento de energia térmica e dos materiais de mudança de fase. No conjunto, procurando disseminar conhecimento e aferir a perspetiva da relevância e aceitação dos mesmos.

Neste contexto, foram produzidos três artigos científicos, em publicações indexadas ao referencial SCOPUS e Web of Science:

- i) “Prospects for the Improvement of Energy Performance in Agroindustry Using Phase Change Materials”, apresentado na DoCEIS20 (Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems), publicado em “Technological Innovation for Life Improvement”, Springer, IFIP AICT 577, pp. 277-289, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-45124-0\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-45124-0_26);
- ii) “Case Studies of Latent Heat Storage with Phase-Change Materials in the Agroindustry Value Chain”, apresentado no ICoWEFS 2021 (International Conference on Water Energy Food and Sustainability), publicado em “Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability”, Springer, pp. 456-465, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3\\_50](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3_50);
- iii) “A Case Study for Decentralized Heat Storage Solutions in the Agroindustry Sector Using Phase Change Materials”, publicado em MDPI AgriEngineering Journal 4(1), pp. 255-278, 2022. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4010018>.

O primeiro artigo foi apresentado na “Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems”, DoCEIS20, Conferência do Programa Doutoral em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa;

O segundo artigo foi apresentado na “International Conference on Water Energy Food and Sustainability”, ICoWEFS 2021, organizada pela Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Portalegre;





## B. Apêndice: Informação complementar sobre PCM

Empresas fabricantes de PCM

Empresa	Pais	Link
PCM UK inc.	Reino Unido	<a href="http://www.pcmproducts.net">www.pcmproducts.net</a>
MikroCaps d.o.o.	Eslovénia	<a href="http://www.mikrocaps.com">www.mikrocaps.com</a>
Rubitherm Technologies GmbH	Alemanha	<a href="http://www.rubitherm.eu">www.rubitherm.eu</a>







2022

CARLOS MANUEL VALENTE  
QUITERIO SIMÃO

MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA  
AGROALIMENTAR POR INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE  
MUDANÇA DE FASE (PCM) EM EQUIPAMENTOS PRODUTIVOS

