



Análise do impacto de técnicas de armazenamento de energia num sistema de distribuição de frio

Tiago Alexandre Garcia Dias

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Química

Orientadores: Professor Doutor Francisco Manuel da Silva Lemos

Professor Doutor João Manuel Nunes Alvarinhas Fareleira

Orientador Externo: Engenheiro Miguel Marques da Silva

Júri

Presidente: Professor Doutor Sebastião Manuel Tavares Silva Alves

Vogais: Professor Doutor João Manuel Nunes Alvarinhas Fareleira

Professora Doutora Helena Maria Teixeira da Nóbrega Avelino

Dezembro 2015

I. Agradecimentos

Agradeço aos orientadores Professor Doutor Francisco Lemos e Professor Doutor João Fareleira e à Professora Doutora Amélia Lemos a oportunidade que me deram para realizar esta tese, assim como todo o apoio, sugestões e disponibilidade.

Ao Engenheiro Miguel Silva, por ter aceite esta parceria, pela confiança e disponibilidade durante este trabalho.

Agradeço aos meus pais e restante família pelo apoio constante ao longo destes meses.

Um agradecimento especial à Paula Rosa por toda a paciência, apoio e incentivo durante este trabalho.

A todos os meus amigos, em particular à Ana Braz, Bernardo Matias, Filipa Moniz, Inês Ferreira, Joana Temido, Pedro Silva, Ricardo Matias e Rita Vilas Boas, que me acompanharam diariamente durante o trabalho, com palavras de ajuda e incentivo.

II. Resumo

Este trabalho tem como objetivo introduzir o tema da necessidade de armazenamento de energia térmica, explorar os tipos de materiais de mudança de fase existentes (orgânicos, inorgânicos e eutéticos), bem como estruturar as vantagens e desvantagens de cada um dos grupos, possíveis soluções que minimizem ou eliminem as suas desvantagens e analisar a possibilidade de implementar um sistema de armazenamento de frio numa unidade de fornecimento de frio urbano com o objetivo de reduzir custos e poupar energia.

Numa primeira fase foi necessário escolher o tipo de material de mudança de fase para as condições operatórias do tanque de água onde é armazenada a água refrigerada que é utilizada na rede de frio urbana e elaborar um modelo para analisar a dinâmica do tanque com o PCM inserido.

O material escolhido foi uma parafina, o tetradecano, $C_{14}H_{30}$, por ser a que apresentava um ponto de solidificação/fusão na gama de temperaturas em que é operado o tanque de água da empresa.

Para analisar a dinâmica, foram realizadas várias simulações para diversas opções, em particular relativas a quantidades de energia que se pretendia armazenar.

A variável a que se deu ênfase foi o diâmetro das esferas do material de mudança de fase, em que, para cada quantidade de energia armazenada, se otimizou esse parâmetro do PCM, variando-se entre 10 cm e 1 m.

Tendo em conta os parâmetros termodinâmicos e as propriedades de transporte estimadas, verificou-se que para diâmetros acima de 20 cm, de acordo com os resultados obtidos pelos modelos, o PCM não solidifica totalmente nas condições operatórias utilizadas e para os ciclos temporais requeridos, pelo que não contribuía a 100% para o armazenamento de energia térmica.

Os melhores resultados obtidos foram para diâmetros de esferas de 10 cm, com exceção de uma situação, em que se pretendia armazenar 50% de energia.

Palavras-chave: armazenamento de energia térmica, material de mudança de fase, rede de frio, transferência de calor

III. Abstract

This work aims to introduce the topic of thermal energy storage, explore the types of phase change materials (organic, inorganic and eutectic), how to structure the advantages and disadvantages of each group and possible solutions that minimize or eliminate their disadvantages and analyze the possibility of implementing a cold storage system in a district cooling supply unit in order to reduce costs and save energy.

Initially it was necessary to choose the type of phase change material to the operating conditions of the water tank where the cooled water is stored which is used in urban chilled water network and design a model for analyzing the dynamics of the tank with the PCM.

The material selected was paraffin, in particular $C_{14}H_{30}$, the only one that had the melting/solidification temperature in the range operated in the chilled water tank.

To analyze the tank dynamics, it was made several simulations for different options, in particular concerning the amounts of energy that was intended to store.

The variable that was emphasized was the diameter of the spheres of the phase change material. For each amount of stored energy, this parameter was optimized. This parameter was varied between 10 cm and 1 m.

Given the thermodynamic parameters and estimated transport properties, it was found that above 20 cm diameter, according to the results obtained by the model, PCM doesn't totally solidifies the operative conditions and for the required time cycle, didn't have 100 % contribution for the thermal energy storage.

The best results obtained were for 10 cm diameters, except for a situation where it was intended to store 50 % of energy.

Keywords: thermal energy storage, phase change material, chilled water network, heat transfer

IV. Índice

| | |
|--|-------|
| I. Agradecimentos..... | i |
| II. Resumo | iii |
| III. Abstract | v |
| IV. Índice | vii |
| V. Índice de Figuras | xi |
| VI. Índice de Tabelas | xiv |
| VII. Lista de Abreviaturas | xvi |
| VIII. Lista de Símbolos e Unidades | xviii |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Motivações | 1 |
| 1.2. Objetivos | 1 |
| 2. Estado da Arte..... | 3 |
| 2.1. Necessidade de armazenamento de energia | 3 |
| 2.2. Picos de energia..... | 6 |
| 2.3. Técnicas de armazenamento de energia | 6 |
| 2.4.1. Armazenamento eletromagnético | 7 |
| 2.4.2. Armazenamento de energia mecânica..... | 7 |
| 2.4.3. Armazenamento de energia química | 8 |
| 2.4.4. Armazenamento de energia térmica | 8 |
| 3. Armazenamento de calor sensível..... | 11 |
| 3.1. Sistemas de armazenamento de calor sensível de curta duração | 12 |
| 3.1.1. Tanque para armazenamento de energia com estratificação térmica | 12 |
| 3.1.2. Armazenamento de energia térmica em aquíferos | 12 |
| 4. Armazenamento de calor latente | 15 |
| 4.1. Introdução | 15 |
| 4.2. Materiais de mudança de fase sólido-líquido..... | 17 |
| 4.3. Materiais de mudança de fase orgânicos | 19 |
| 4.3.1. Parafinas..... | 19 |
| 4.3.2. Não-Parafinas..... | 21 |
| 4.3.3. Ácidos gordos | 21 |
| 4.4. Materiais de mudança de fase inorgânicos | 23 |
| 4.4.1. Sais hidratados..... | 23 |

| | |
|--|----|
| 4.4.2. Metálicos..... | 24 |
| 4.5. Eutéticos..... | 24 |
| 5. CLIMA ESPAÇO..... | 26 |
| 5.1. Funcionamento..... | 26 |
| 5.2. Vantagens | 26 |
| 5.3. Gerador de calor/frio | 27 |
| 5.4. Rede de distribuição de fluidos térmicos | 28 |
| 5.5. Subestações..... | 28 |
| 6. Caso estudo | 29 |
| 6.1. Tanque de água | 30 |
| 6.2. Escolha do tipo de material do PCM..... | 32 |
| 6.3. Propriedades do PCM | 33 |
| 6.4. Área superficial..... | 33 |
| 7. Tanque de água com PCM | 35 |
| 7.1. Volume de PCM | 35 |
| 7.2. Coeficiente de transferência de calor..... | 37 |
| 7.3. Balanço aos volumes de água | 38 |
| 7.4. Armazenamento de 10%..... | 39 |
| 7.4.1. Número de esferas | 40 |
| 7.4.2. Resultados $D_{\text{esfera}} = 1 \text{ m}$ | 40 |
| 7.4.3. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,75 \text{ m}$ | 42 |
| 7.4.4. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,5 \text{ m}$ | 44 |
| 7.4.5. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,25 \text{ m}$ | 46 |
| 7.4.6. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$ | 48 |
| 7.4.7. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 50 |
| 7.4.8. Compilação de resultados | 51 |
| 7.5. Armazenamento de 20%..... | 52 |
| 7.5.1. Número de esferas | 52 |
| 7.5.2. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$ | 52 |
| 7.5.3. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 54 |
| 7.5.4. Compilação de resultados | 56 |
| 7.6. Armazenamento de 30%..... | 57 |
| 7.6.1. Número de esferas | 57 |
| 7.6.2. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$ | 57 |
| 7.6.3. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 59 |

| | |
|---|----|
| 7.6.4. Compilação de resultados | 61 |
| 7.7. Armazenamento de 50%..... | 62 |
| 7.7.1. Número de esferas | 62 |
| 7.7.2. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$ | 63 |
| 7.7.3. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 65 |
| 7.7.4. Compilação de resultados | 65 |
| 7.7.5. Simulação $D/H_{\text{recipiente}} = 5$ | 66 |
| 8. Conclusões..... | 69 |
| Propostas de trabalho futuro | 70 |
| A. Bibliografia..... | 72 |
| B. Anexos..... | 75 |
| B.1. Empacotamento em rede simples | 75 |
| B.2. Números adimensionais..... | 76 |
| B.2.1. <i>Grashof</i> | 76 |
| B.2.2. Número de <i>Reynolds</i> | 76 |
| B.2.3. Número de <i>Prandtl</i> | 76 |
| B.5. Coeficiente de transferência de calor | 77 |

V. Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2-1 – Percentagem de utilização das fontes de energia em Portugal no ano de 2013 [1]. | 3 |
| Figura 2-2 – Evolução da utilização das fontes desde 2000 até 2013, e respetiva percentagem no ano mais recente [1]. | 4 |
| Figura 2-3 – Cadeia de energia com integração de sistemas de armazenamento de energia [3]. | 5 |
| Figura 2-4 – Classificação dos métodos de armazenamento de energia [6]. | 7 |
| Figura 2-5 – Tipos de armazenamento de energia térmica. | 8 |
| Figura 2-6 – Curva teórica de calor latente para transição sólido-líquido [8]. | 9 |
| Figura 4-1 – Classificação dos materiais de armazenamento de calor latente [14]. | 16 |
| Figura 4-2 – Princípio dos materiais de mudança de fase [13]. | 17 |
| Figura 5-1 – Rede de distribuição de frio da CLIMAESPAÇO. | 26 |
| Figura 5-2 – Valores de emissão de CO ₂ associadas a diversas tecnologias de produção de eletricidade [28]. | 27 |
| Figura 6-1 - Esquema da instalação de frio. | 29 |
| Figura 6-2 – Esquema do tanque de água fria da CLIMAESPAÇO. | 30 |
| Figura 6-3 – Variação do volume de água fria (V_1) e quente (V_2). | 31 |
| Figura 7-1 – Esquema do tanque com o PCM inserido. | 36 |
| Figura 7-2 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10% de energia e $D_{esfera} = 1$ m. | 40 |
| Figura 7-3 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10% de energia e $D_{esfera} = 1$ m. | 41 |
| Figura 7-4 – Evolução da cota de líquido de água, para 10% de energia e $D_{esfera} = 1$ m. | 42 |
| Figura 7-5 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10% de energia e $D_{esfera} = 0,75$ m. | 43 |
| Figura 7-6 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10% de energia e $D_{esfera} = 0,75$ m. | 43 |
| Figura 7-7 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,75$ m. | 44 |
| Figura 7-8 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,50$ m. | 44 |
| Figura 7-9 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,50$ m. | 45 |
| Figura 7-10 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,50$ m. | 45 |
| Figura 7-11 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,25$ m. | 46 |
| Figura 7-12 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,25$ m. | 47 |
| Figura 7-13 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,25$ m. | 47 |
| Figura 7-14 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,20$ m. | 48 |
| Figura 7-15 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,20$ m. | 49 |
| Figura 7-16 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,20$ m. | 49 |
| Figura 7-17 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,1$ m. | 50 |
| Figura 7-18 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,10$ m. | 50 |
| Figura 7-19 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,10$ m. | 51 |
| Figura 7-20 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 20% de energia e $D_{esfera} = 0,2$ m. | 53 |
| Figura 7-21 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 20% de energia e $D_{esfera} = 0,2$ m. | 53 |
| Figura 7-22 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 20% de energia e $D_{esfera} = 0,2$ m. | 54 |
| Figura 7-23 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 20% de energia e $D_{esfera} = 0,1$ m. | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 7-24 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 20% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 55 |
| Figura 7-25 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 20% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 56 |
| Figura 7-26 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 30% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$ | 58 |
| Figura 7-27 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 30% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$ | 58 |
| Figura 7-28 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 30% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$ | 59 |
| Figura 7-29 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 30% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 59 |
| Figura 7-30 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 30% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 60 |
| Figura 7-31 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 30% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 61 |
| Figura 7-32 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 50% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$ | 63 |
| Figura 7-33 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 50% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$ | 64 |
| Figura 7-34 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 50% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$ | 64 |
| Figura 7-35 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 50% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 65 |
| Figura 7-36 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 50% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 66 |
| Figura 7-37 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 50% energia e $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$ | 67 |
| Figura B-1 – Célula unitária..... | 75 |

VI. Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2-1 – Meios de armazenamento para sistemas de calor sensível e latente [6]. | 10 |
| Tabela 3-1 – Calor específico a 20°C de alguns tipos de materiais [6]. | 11 |
| Tabela 4-1 – Parâmetros de PCM's para aplicações [6] [13] [14] [15] [16]. | 15 |
| Tabela 4-2 – Comparação entre materiais orgânicos, inorgânicos e eutéticos. | 19 |
| Tabela 4-3 – Temperatura de mudança de fase e calor latente de fusão de parafinas [14]. | 19 |
| Tabela 4-4 – Propriedades termofísicas de parafinas comerciais com potencial de utilização [14] [18]. | 20 |
| Tabela 4-5 – Propriedades de alguns materiais não-parafínicos [14] [19]. | 21 |
| Tabela 4-6 – Propriedades de alguns ácidos gordos [14]. | 21 |
| Tabela 4-7 – Percentagem de calor latente perdido ao fim de ciclos térmicos [23]. | 22 |
| Tabela 4-8 – Efeitos de corrosão observados na superfície dos metais [23]. | 22 |
| Tabela 6-1 – Dados dos parâmetros para a evolução dos volumes no tanque de água. | 31 |
| Tabela 6-2 – Energia armazenada no tanque de água. | 32 |
| Tabela 6-3 – Propriedades do PCM C-14 [14] [17]. | 33 |
| Tabela 7-1 – Massa e volume de PCM para cada caso de estudo. | 35 |
| Tabela 7-2 – Rácio de viabilidade do material mudança de fase. | 35 |
| Tabela 7-3 – Volume do recipiente do PCM. | 36 |
| Tabela 7-4 – Propriedades da água e valores do coeficiente de transferência de calor [30]. | 37 |
| Tabela 7-5 – Número de esferas e área transferência do material mudança de fase. | 40 |
| Tabela 7-6 – Compilação dos resultados obtidos para armazenar 10% de energia. | 51 |
| Tabela 7-7 – Número de esferas e área transferência do material mudança de fase. | 52 |
| Tabela 7-8 – Compilação dos resultados obtidos para armazenar 20% de energia. | 56 |
| Tabela 7-9 – Número de esferas e área transferência do material mudança de fase. | 57 |
| Tabela 7-10 – Compilação dos resultados obtidos para armazenar 30% de energia. | 61 |
| Tabela 7-11 – Número de esferas e área transferência do material mudança de fase. | 62 |
| Tabela 7-12 – Compilação dos resultados obtidos para armazenar 50% de energia. | 65 |
| Tabela B-1 – Parâmetros para o cálculo de Gr e Re. | 77 |
| Tabela B-2 – Propriedades da água no intervalo de temperatura da água no interior do tanque [30]. | 77 |

VII. Lista de Abreviaturas

| | |
|-----|--|
| ESS | Sistema de armazenamento de energia (<i>Energy Storage System</i>) |
| PCM | Material de Mudança de Fase (<i>Phase Change Material</i>) |
| tep | tonelada equivalente de petróleo |
| TES | Armazenamento de Energia Térmica (<i>Thermal Energy Storage</i>) |

VIII. Lista de Símbolos e Unidades

| | | |
|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| A | Área de transferência | m^2 |
| C_p | Calor específico | $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| D | Diâmetro | m |
| E | Energia | J |
| g | Aceleração da gravidade | m/s^2 |
| h | Coeficiente de transferência de calor | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ |
| H | Altura | m |
| k | Condutividade térmica | $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| L | Calor latente | kJ/kg |
| M | Massa | kg |
| Q_e | Caudal volumétrico de entrada | m^3/h |
| Q_s | Caudal volumétrico de saída | m^3/h |
| V | Volume | m^3 |
| Ws | Massa de PCM | kg |
| β | Coeficiente de dilatação térmica | K^{-1} |
| $\Delta H_{\text{fusão}}$ | Entalpia de fusão | kJ/kg |
| ΔT | Variação de temperatura | K |
| μ | Viscosidade | $N \cdot s \cdot m^{-2}$ |
| ρ | Massa volúmica | kg/m^3 |

1. Introdução

1.1. Motivações

O armazenamento de energia, que já é utilizado há muito tempo, por exemplo através das baterias. Tem vindo a assumir uma relevância cada vez maior no contexto da eficiência energética e da utilização de recursos energéticos renováveis.

De todos os métodos de armazenamento de energia, este trabalho vai-se centrar no armazenamento de energia térmica, incidindo com maior ênfase no armazenamento através da utilização de calor latente. Neste âmbito, um dos métodos com maior potencial para o armazenamento de energia térmica é a aplicação de materiais de mudança de fase (PCM's).

Os PCM's apresentam uma alta entalpia de fusão, permitindo que, mesmo com volumes relativamente reduzidos, seja armazenada ou libertada uma grande quantidade de energia na forma de calor latente, durante a fusão e a solidificação, respetivamente. Com este trabalho espera-se analisar o estado atual dos materiais de mudança de fase para aplicações de armazenamento de energia térmica.

Os PCM's possuem inúmeras aplicações nas áreas de medicina, eletrónica, têxtil e edifícios, e apresentam resultados mais interessantes do que os sistemas convencionais sem a integração dos materiais de mudança de fase.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo introduzir o tema da necessidade de armazenamento de energia, conhecer os tipos de materiais de mudança de fase existentes (orgânicos, inorgânicos e eutéticos), bem como apresentar de forma estruturada as vantagens e desvantagens de cada um dos grupos e possíveis soluções que minimizem ou eliminem as suas desvantagens.

Numa segunda etapa é preciso saber que impacto tem a inserção de um material de mudança de fase e verificar quais as dimensões mais convenientes para maximizar os ganhos energéticos.

2. Estado da Arte

2.1. Necessidade de armazenamento de energia

A energia tem um papel fundamental na sociedade pelas mais diversas razões, como a confeção de alimentos e o fornecimento de calor para o dia-a-dia do ser humano. A indústria tem um papel fundamental no desenvolvimento do país e, sendo um dos sectores predominantes, é um dos que necessita de maior quantidade de energia.

A forma mais acessível de obter energia é pela combustão de madeira ou combustíveis fósseis, como o carvão ou o petróleo, sendo que estes são as que possuem maior utilização. Através da Figura 2-1 pode-se observar que o gás natural e as fontes renováveis de energia apresentam taxas de utilização consideráveis, embora menores quando comparadas com as anteriores.

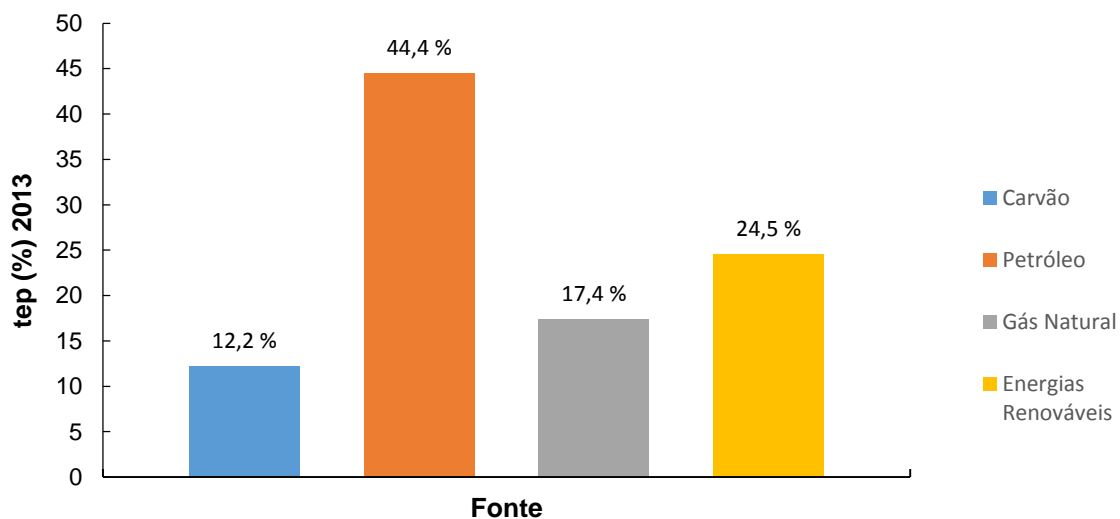


Figura 2-1 – Percentagem de utilização das fontes de energia em Portugal no ano de 2013 [1].

É de notar que a soma das quatro parcelas apresentadas no gráfico perfaz um valor total de 98,5%, sobrando 1,5%, respetivos ao saldo importador de eletricidade e resíduos industriais.

No entanto, os combustíveis fósseis não são fontes inesgotáveis na natureza, o que se tem revelado num conseqüente aumento de preço que tem vindo a decorrer ao longo do tempo. A escassez de reservas existentes levou à utilização de outros tipos de fontes até então menos exploradas a nível global [2]. A afirmação prévia pode ser comprovada através da Figura 2-2.

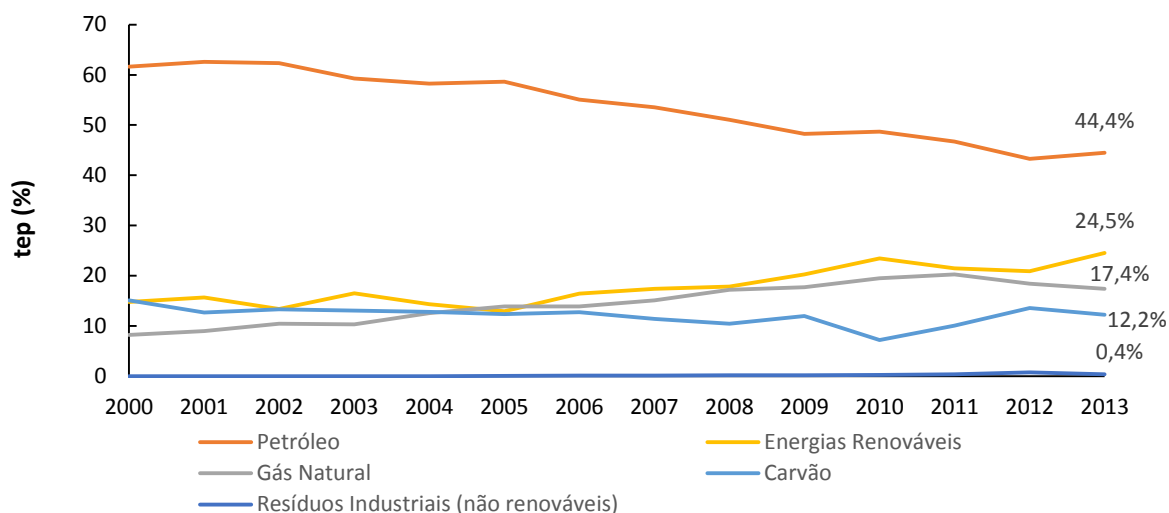


Figura 2-2 – Evolução da utilização das fontes desde 2000 até 2013, e respetiva percentagem no ano mais recente [1].

Uma das questões mais prementes na atualidade é a necessidade de limitar o consumo de energia, nomeadamente através de um aumento da eficiência de utilização da mesma. Neste contexto, ao longo destes últimos anos, as técnicas de armazenamento de energia têm vindo a ser desenvolvidas, tanto ao nível da inovação como do aperfeiçoamento, para poderem contribuir para este aumento de eficiência.

Um dos principais problemas que desperta para a necessidade do armazenamento energético é a intermitência das fontes de energia, ou seja, o facto da oferta destas não estar sincronizada com a procura.

Os sistemas de armazenamento de energia (ESS) podem contribuir para minimizar este problema, satisfazer as necessidades da sociedade de uma forma mais eficiente e reduzir os problemas de pico de consumo de energia [2].

A Figura 2-3 mostra a alteração da cadeia de energia, com a integração de sistemas de armazenamento de energia.

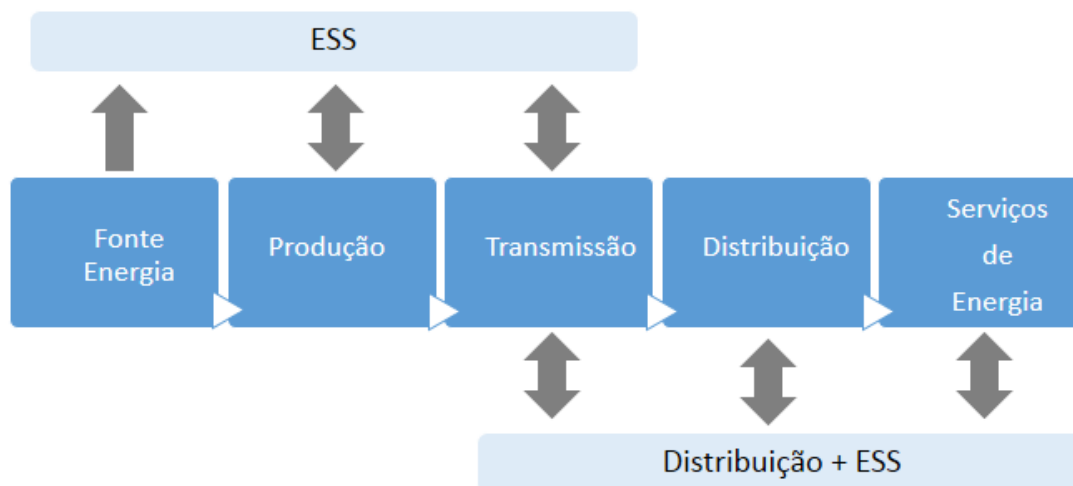


Figura 2-3 – Cadeia de energia com integração de sistemas de armazenamento de energia [3].

A cadeia tradicional de energia teria apenas 5 ligações: fonte de energia/combustíveis, produção, transmissão, distribuição e dispositivo de energia do cliente. Contudo, os ESS, possuindo a capacidade de estabilizar o fornecimento de energia aos utilizadores com independência espacial e temporal, estão na rampa de lançamento de se tornarem a sexta ligação.

O recurso a sistemas de armazenamento de energia proporciona benefícios como [2]:

- Nivelamento da carga: as grandes variações que ocorrem na procura de eletricidade podem ser reduzidas pelo armazenamento do excesso de eletricidade durante períodos de menor procura para utilização em períodos de pico de procura;
- Fiabilidade de qualidade da energia: o armazenamento permite que a carga elétrica opere de uma forma contínua e regular, fornecendo energia que satisfaça a oferta nas horas de pico de procura;
- Deslocamento temporal de energia: a diferença entre a procura de energia no horário de pico e no horário fora de pico é grande, o armazenamento de energia torna-se vital. Utilizando a energia armazenada para diminuir a diferença entre a oferta e a procura, permite-se que a distribuição de energia seja mais equilibrada, o que leva a um maior rendimento de funcionamento e a uma posterior redução de custos em combustível;
- Minimização da utilização de combustíveis;
- Benefícios ambientais: a redução do recurso a combustíveis resulta numa diminuição das emissões de CO, CO₂, NO_x e compostos orgânicos voláteis e maior conservação dos combustíveis.

Espera-se que no futuro o uso de fontes renováveis de energia assegure uma menor dependência dos combustíveis fósseis, a estabilização dos preços e a redução dos níveis de poluição.

Existem muitas fontes de energia renovável, mas toda essa energia é direta ou indiretamente proveniente da radiação solar, incluindo a biomassa. Entre as fontes renováveis de energia intermitentes encontram-se a energia das ondas, eólica, das marés, hidroelétrica, térmica e fotovoltaica [4].

Algumas das fontes de energia enfrentam alguns problemas, como a sazonalidade e o desfasamento entre a oferta e a procura.

A forma de ultrapassar os dois problemas acima referidos e capacitar estas energias para respostas a picos de consumo, é o recurso ao armazenamento, e é sobre esta matéria que se debruça este trabalho.

2.2. Picos de energia

O consumo energético varia consideravelmente com o tempo.

A procura de energia é originada por consumidores de três categorias: industrial, doméstico e comercial. Como seria de esperar, a procura de energia elétrica varia significativamente ao longo do ano, sendo que existem também variações significativas durante um mesmo dia.

No verão verifica-se um maior consumo devido ao uso de aparelhos de refrigeração e no inverno devido ao uso de aparelhos de aquecimento. Ao longo do dia as grandes variações devem-se ao diferente nível de atividade ao longo das várias horas do dia, bem como às necessidades diferentes de aquecimento, refrigeração e mesmo de iluminação.

O uso de sistemas de armazenamento de energia é bastante útil para que haja energia disponível para colocar na rede quando a procura excede a oferta. Quando é necessário energia acima da produzida, esta é retirada do sistema de armazenamento; no caso de a procura ser inferior à oferta, o excedente de energia é armazenada.

Hoje em dia, a elevada amplitude da procura energética é uma questão preocupante para as centrais que fornecem e controlam a rede de transmissão e distribuição, até porque a geração de energia é mais eficiente se puder ser feita num regime de produção constante [4] [5].

2.3. Técnicas de armazenamento de energia

Existe uma larga variedade de formas de armazenamento de energia, sendo que algumas delas serão discutidas neste capítulo, embora de um modo superficial. Pela Figura 2-4, é possível verificar que as tecnologias estão divididas por categorias e agrupadas de acordo com a forma como a energia (biológica, magnética, mecânica, química e térmica) é armazenada.

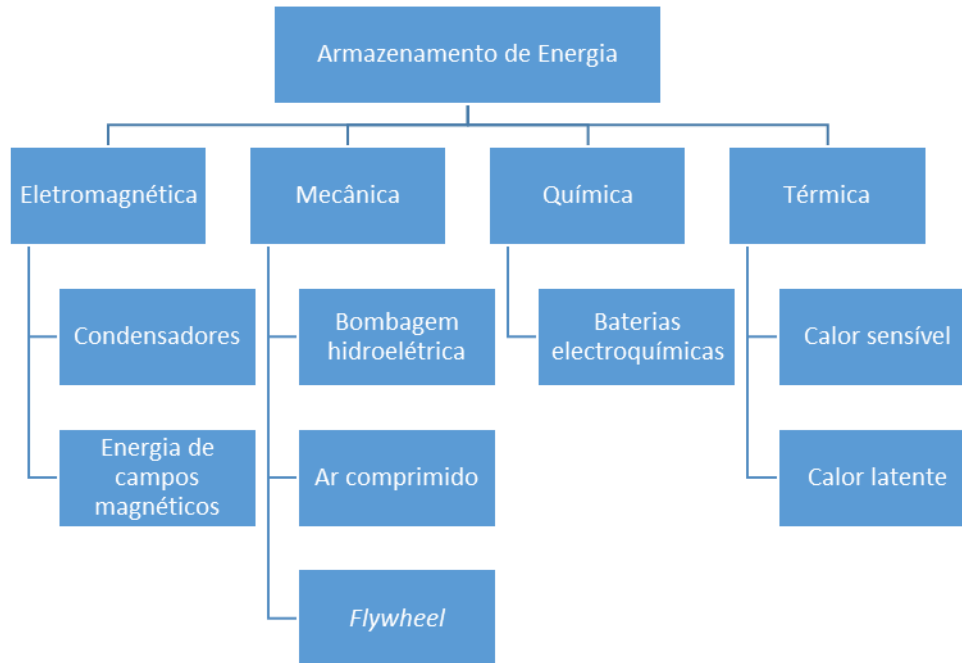


Figura 2-4 – Classificação dos métodos de armazenamento de energia [6].

Vai ser feito um breve resumo sobre os tipos de armazenamento, sendo que o armazenamento de energia térmica será o abordado com maior objetividade.

2.4.1. Armazenamento eletromagnético

Este capítulo está relacionado com dois tipos de mecanismos: os condensadores, nos quais a energia pode ser armazenada pela separação das cargas elétricas positivas das negativas, e o armazenamento de energia em campos magnéticos.

São normalmente utilizados em situações em que existe a necessidade de armazenar pequenas ou médias quantidades de energia sob condições temporárias durante curtos espaços de tempo e para taxas elevadas de energia. Nestas aplicações é de referir a rápida cinética e a alta potência, em detrimento da grande quantidade que pode ser armazenada, pois esta é geralmente muito menor quando comparada a outras tecnologias [7].

2.4.2. Armazenamento de energia mecânica

A energia mecânica pode ser armazenada como energia cinética de um movimento linear ou rotativo, como energia potencial ou como energia de compressão de um gás.

2.4.3. Armazenamento de energia química

A energia pode ser armazenada em sistemas constituídos por um ou mais compostos que libertam ou absorvem energia quando reagem para dar origem a outros compostos. As baterias são o dispositivo mais utilizado para o armazenamento de energia química [6].

2.4.4. Armazenamento de energia térmica

Com sistemas de armazenamento de energia térmica (TES), é possível responder às necessidades dos vários sectores – comercial, industrial e utilidades – em aplicações como aquecimento de espaços e águas domésticas, refrigeração e ar condicionado [6].

A acumulação de energia térmica é um princípio de conservação temporária de energia para posterior utilização. Alguns exemplos de sistemas de armazenamento de energia térmica são:

- Acumulação de energia solar para utilização noturna;
- Armazenamento de “frio” no inverno para o arrefecimento na época do verão;
- Armazenamento de “calor” no verão para o aquecimento de espaços no inverno;
- Armazenamento nas horas de baixas tarifas de eletricidade (refrigeradores a funcionar durante a noite para depois ao longo de todo o dia o ar frio ser utilizado em unidades de ar condicionado).

É do conhecimento geral que a energia solar não se encontra disponível a todo o instante, mas os sistemas TES podem ser cruciais para compensar essa incompatibilidade temporal, trazendo ainda como vantagens a conservação dos combustíveis fósseis, a diminuição de custos derivados da importação dos mesmos e benefícios ambientais.

Na Figura 2-5 encontram-se esquematizados os dois tipos de armazenamento de energia térmica. Existem duas vertentes de calor armazenado: calor sensível e calor latente.



Figura 2-5 – Tipos de armazenamento de energia térmica.

O processo de armazenamento de energia térmica pode ser obtido por arrefecimento ou aquecimento de uma substância, ou por mudança de fase desta, quer por fusão ou vaporização, ficando a energia disponível aquando da ocorrência do processo inverso. Se o armazenamento for feito através do aumento ou diminuição da temperatura do material é denominado armazenamento de calor sensível. Armazenar energia por mudança de fase, isto é, utilizar uma transição de sólido para líquido ou de líquido para vapor sem conseqüente mudança de temperatura, é designado por armazenamento de calor latente [6].

Na Figura 2-6 está representada a curva teórica de calor latente para um sistema de transição sólido-líquido.

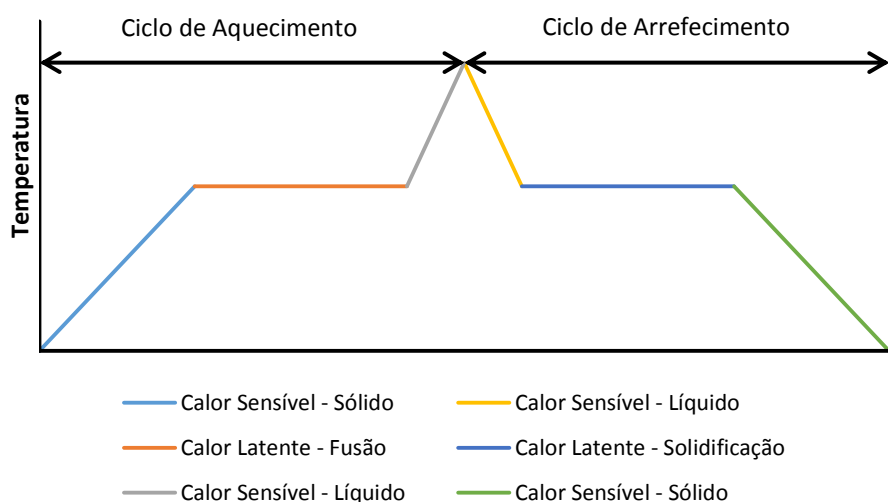


Figura 2-6 – Curva teórica de calor latente para transição sólido-líquido [8].

Outra característica que distingue os diferentes sistemas de armazenamento de energia térmica é a duração de armazenamento: curta, média ou longa.

O armazenamento por um curto período de tempo é utilizado para resolver cargas de potência de pico, desde durações de umas horas até ao máximo de um dia, com vista à redução de dimensão dos sistemas e ao proveito da estrutura diária das tarifas de energia. Este tipo de armazenamento é denominado armazenamento diurno.

O armazenamento de médio ou longo período de tempo é recomendado quando há a possibilidade do calor residual e das cargas sazonais de energia serem transferidos com um atraso desde algumas semanas até meses.

A principal característica de um sistema sazonal de armazenamento é a grande capacidade que esta solicita. As perdas térmicas revelam-se significativas nos sistemas de longo prazo, por esta razão são necessários mais cuidados para preveni-las num sistema sazonal por comparação com um sistema diurno.

Os custos associados ao tamanho e ao isolamento dos sistemas de armazenamento sazonal impedem a maior parte destes de serem económicos.

Os sistemas de armazenamento diurnos apresentam vantagens, tais como, o capital de investimento, baixas perdas energéticas e unidades mais pequenas. No que diz respeito aos sistemas anuais, estes apresentam maiores dimensões, embora sejam ideais para parques industriais [6].

A Tabela 2-1 resume os diferentes meios de armazenamento disponíveis para sistemas de armazenamento de energia térmica, de calor sensível e de calor latente, e a sua respetiva duração, de longo ou curto prazo. Serão abordados meios de armazenamento de curto prazo como: leito de rochas e tanques de água estratificados e de longo prazo: leito de rochas, aquíferos, leito de terra, tanques de água extensos e lagoas solares. Quanto ao armazenamento de calor latente serão tema os materiais orgânicos, materiais inorgânicos e materiais eutéticos, todos relativos a meios de armazenamento de curta duração [4] [6] [7] [9] [10].

Tabela 2-1 – Meios de armazenamento para sistemas de calor sensível e latente [6].

| Armazenamento de Calor Sensível | | Armazenamento de Calor Latente |
|--|--------------------------|---------------------------------------|
| Curto Prazo | Longo Prazo | Curto Prazo |
| Leito de rochas | Leito de rochas | Materiais Eutéticos |
| Tanques de água | Leito de terra | Materiais Inorgânicos |
| - | Tanques de água extensos | Materiais Orgânicos |
| - | Aquíferos | - |
| - | Lagoas Solares | - |

3. Armazenamento de calor sensível

No sistema de armazenamento de calor sensível, a energia é acumulada devido à mudança de temperatura do suporte de armazenamento. A quantidade de energia introduzida num TES (*Thermal Energy Storage*) por um mecanismo de acumulação de calor sensível é diretamente proporcional à diferença entre a temperatura de armazenamento final e inicial, a massa volúmica do suporte e a respetiva capacidade calorífica. Na Equação 3-1 assume-se que as propriedades são constantes, como o c_p e que a temperatura é uniforme tanto no estado inicial como no final.

$$Q = mc_p\Delta T = \rho c_p V\Delta T \quad \text{Equação 3-1}$$

Onde c_p ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) é o calor específico do material do suporte de armazenamento, ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) é a massa volúmica do material, V (m^3) é o volume do armazenamento e ΔT (K) é a variação de temperatura provocada no armazenamento.

A capacidade de armazenar calor sensível depende em grande medida do valor ρc_p , calor específico volumétrico. O calor específico volumétrico de um material descreve a capacidade de um determinado volume de uma substância armazenar energia enquanto sofre alteração de temperatura, sem mudança de fase.

Na Tabela 3-1 encontram-se apresentados alguns materiais tipicamente utilizados bem como as suas propriedades.

Tabela 3-1 – Calor específico a 20°C de alguns tipos de materiais [6].

| Material | Massa volúmica ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | Calor específico ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) | Calor específico volumétrico ($\times 10^6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$) |
|-----------|--|--|--|
| Argila | 1 458 | 879 | 1,28 |
| Tijolo | 1 800 | 837 | 1,51 |
| Arenito | 2 200 | 712 | 1,57 |
| Madeira | 700 | 2 390 | 1,67 |
| Betão | 2 000 | 880 | 1,76 |
| Vidro | 2 710 | 837 | 2,27 |
| Alumínio | 2 710 | 896 | 2,43 |
| Ferro | 7 900 | 452 | 3,57 |
| Aço | 7 840 | 465 | 3,68 |
| Magnetite | 5 177 | 752 | 3,89 |
| Água | 988 | 4 182 | 4,17 |

A água é o tipo de material com o parâmetro ρc_p mais elevado e não é dispendiosa, pelo que é a partida o melhor material para armazenar energia.

Para ser útil para o armazenamento de energia térmica, o material normalmente não deve ser dispendioso e ter uma boa capacidade térmica. Outro parâmetro importante no armazenamento de energia térmica sensível é a taxa à qual o calor pode ser libertado e transferido, o que está relacionado com a condutividade térmica [6]. Por esta razão é que o ferro é um excelente meio para armazenamento térmico, pois tanto tem uma elevada capacidade calorífica como uma alta condutividade térmica.

3.1. Sistemas de armazenamento de calor sensível de curta duração

3.1.1. Tanque para armazenamento de energia com estratificação térmica

Os tanques estratificados termicamente têm a capacidade de armazenar frio e calor, usam suporte de armazenamento líquido, maioritariamente água, e seguem os seguintes requisitos: sustentar volumes de água separados por estratificação a diferentes temperaturas e minimizar as perdas de calor.

A estratificação natural, sem divisórias internas, segue a seguinte operação cíclica: a água quente com menor densidade flutua à superfície do reservatório enquanto a água fria, de menor densidade, desce até à base do mesmo [6].

Este tipo de armazenamento é usado em vastas aplicações residenciais com integração de painéis solares. A água fria é direcionada ao painel solar, onde é aquecida, voltando para o reservatório. A água quente é aproveitada para utilização doméstica. Entretanto a água dentro do reservatório que arrefeceu no processo anterior de utilização, desce, e reinicia-se outro ciclo [11].

Outra configuração são os sistemas de armazenamento térmico estratificado de água fria, pertinentes em aplicações de refrigeração. A água produzida nos períodos de vazio ou supervazio é armazenada no reservatório e depois distribuída para as instalações nas horas de grande procura. Tal como no caso anterior, a estratificação é feita naturalmente devido às diferentes densidades da água, a quente no topo, e a fria na base do tanque.

Sistemas de armazenamento de calor sensível de longa duração

3.1.2. Armazenamento de energia térmica em aquíferos

Um aquífero é um reservatório de água subterrâneo, sendo o material que o constitui permeável à água, e a sua camada limite por um material impermeável como rocha ou barro. Este tipo de acumulação tem potencial para ser aplicado em grande escala e ter longa duração. A quantidade de energia que pode ser armazenada num aquífero depende das condições locais, como a variação da temperatura, condutividade térmica do material circundante e escoamento de águas subterrâneas naturais [6].

Esta técnica de armazenamento de energia assegura movimento de energia de baixo custo eficiente e confiável que pode complementar os sistemas convencionais quer de aquecimento, quer de

arrefecimento. É uma tecnologia ecológica, capaz de reduzir consideravelmente as emissões de poluente, o uso de CFC's e o uso de eletricidade nos períodos de pico de procura de energia.

No inverno, o calor armazenado pode ser usado para aquecer o ambiente dos edifícios, no verão, o arrefecimento é conseguido transferindo o calor do interior dos edifícios para a água subterrânea, usando o mesmo princípio no sentido inverso, água que posteriormente pode servir para aquecimento no inverno [12].

4. Armazenamento de calor latente

4.1. Introdução

Calor latente é a quantidade de calor que corresponde à mudança de fase de uma substância. A troca de calor latente é usualmente muito maior do que a troca de calor sensível de um determinado material, o que está diretamente relacionado com o seu calor específico.

De entre as mudanças de fase existentes com liberação ou absorção de calor, as mais apropriadas para os sistemas de armazenamento de energia térmica são as sólido-líquido, líquido-gás e sólido-sólido. Os PCM's líquido-gás não são os mais comuns para sistemas de armazenamento de energia térmica devido à elevada variação de volume e pressão para armazenar os materiais na fase gasosa. Deste modo, os PCM's sólido-líquido são os mais requeridos para aplicações dia-a-dia.

Para serem utilizados em aplicações, os materiais de um sistema de armazenamento de calor latente têm que satisfazer certos parâmetros termodinâmicos, cinéticos, químicos, económicos e técnicos.

Tabela 4-1 – Parâmetros de PCM's para aplicações [6] [13] [14] [15] [16].

| Parâmetros dos PCM's | |
|-----------------------------|--|
| Térmico | Temperatura de fusão à temperatura de operação desejada |
| | Elevada capacidade para armazenamento de calor latente durante o processo de mudança de fase |
| | Características favoráveis para a transferência de calor |
| Físico | Baixa variação de volume durante o processo de transição |
| | Baixa pressão de vapor |
| | Alta densidade |
| | Fase de equilíbrio favorável |
| Cinético | Refrigeração limitada ou inexistente |
| | Taxa de cristalização suficiente |
| Químico | Estabilidade química |
| | Não corrosivo com o material de encapsulamento |
| | Não tóxico, não inflamável e não explosivo |
| | Disponível para aplicação |
| | Rentável para grande produção |
| Técnico | Simple |
| | Aplicável |
| | Eficiente |
| | Compacto |
| | Confiança |

A alta densidade de armazenamento de energia está diretamente relacionada com o calor latente por unidade de volume, possibilitando que mais calor seja armazenado com menos material. A elevada condutividade térmica melhora a transferência de calor, auxiliando na carga e descarga. Além disso, as temperaturas de fusão dos materiais de mudança de fase são diferentes, deve ser tido em conta isso a escolha do material, para que a sua temperatura de fusão seja relativa à temperatura de utilização e da fonte de calor de cada sistema [6] [16].

A estabilidade de fase durante a fusão ou a solidificação contribui para a acumulação de calor e a alta densidade permite um menor volume do recipiente de armazenamento. Já a baixa variação de volume na fase de transformação e a baixa pressão de vapor à temperatura de operação reduzem os problemas de armazenamento [14] [15].

A refrigeração sempre foi um aspeto problemático no desenvolvimento dos materiais de mudança de fase, em particular os sais hidratados. O sobrearrefecimento, de mais do que 5 a 10 °C, interfere com a transferência de calor do armazenamento.

Os materiais de mudança de fase podem sofrer degradação pela perda de água por hidratação, decomposição química e incompatibilidade com os materiais de construção. A alta estabilidade química permite que os materiais de mudança de fase consigam lidar com grandes oscilações de temperatura e mais variadas condições de armazenamento. Devem ser não tóxicos, não inflamáveis e não explosivos para não representarem um perigo para os habitantes ou para as propriedades, e não corrosivos para serem mais facilmente armazenados e não necessitem de recipientes e armazenamento especiais ou permutadores de calor [14].

Custo reduzido e grande disponibilidade são duas características que tornam estes sistemas atrativos. Outra particularidade relevante requerida aos PCM's é uma vida útil longa, pois apresentam pouca ou nenhuma degradação após um grande número de ciclos de fusão [15] [16].

A nível ambiental é essencial que sejam recicláveis, pois não sendo o seu tempo de vida infinito, é importante verificar se os materiais podem ser reciclados aquando do fim do ciclo de vida.

Existem três tipos de materiais de mudança de fase na categoria dos sólido-líquido (eutéticos, inorgânicos e orgânicos) caracterizados na Figura 4-1, com maior detalhe em subgrupos.

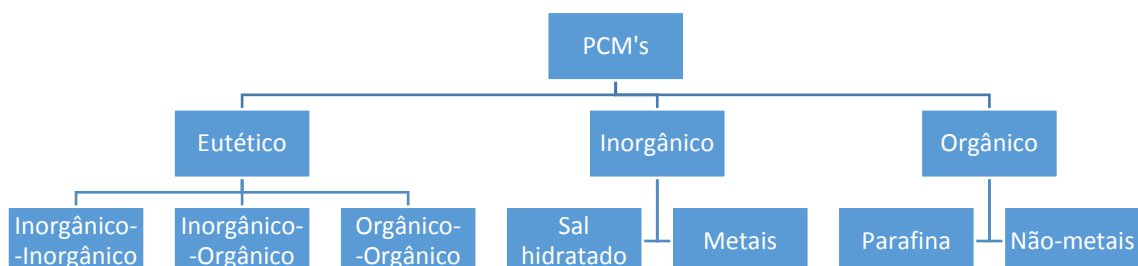


Figura 4-1 – Classificação dos materiais de armazenamento de calor latente [14].

4.2. Materiais de mudança de fase sólido-líquido

Os materiais de mudança de fase são agentes que intervêm como meios de armazenamento de calor latente. O seu princípio de funcionamento está representado na Figura 4-2.

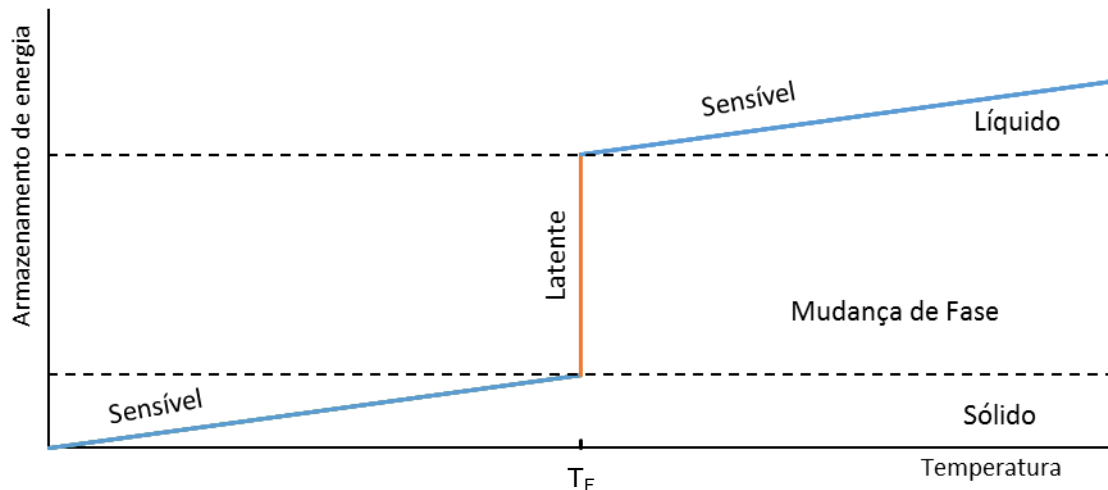


Figura 4-2 – Princípio dos materiais de mudança de fase [13].

Quando um material se funde ou vaporiza, absorve calor, e por outro lado, quando solidifica ou condensa, liberta calor, estas mudanças de fase são aproveitadas para a acumulação de calor em PCM's.

Em teoria, cada PCM tem o seu ponto de mudança de fase correspondente ao momento em que se dá a transição de fase. No entanto, para os materiais de mudança de fase não-eutéticos, essa transição ocorre numa gama de temperaturas e não num ponto específico.

Normalmente as temperaturas a que ocorrem a solidificação e a fusão diferem uma da outra, este fenómeno é conhecido como histerese do material e causa uma oscilação de temperatura na carga e descarga de energia térmica.

Nas transições sólido-sólido, o calor é acumulado enquanto o material é transformado de uma forma cristalina noutra. Em geral, são transições de baixo calor latente e com variações de volume mais pequenas quando comparadas com as transições sólido-líquido. Os materiais de mudança de fase sólido-sólido têm a vantagem de serem menos rigorosos nos requerimentos do recipiente envolvido [17].

No que diz respeito à transição líquido-gás tem maior quantidade de calor latente na fase de transição, mas os grandes incrementos em termos de volume nesta fase estão associados a problemas de controlo o que excluiu o seu potencial para a utilização em sistemas de armazenamento térmico [17].

As transformações sólido-líquido têm, normalmente, um calor latente inferior quando comparada com as líquido-gás, no entanto a mudança de volume que sofrem é muito mais reduzida, de apenas 10% ou menos, pelo que são economicamente mais atrativas para a sua utilização em sistemas de

armazenamento térmico [17]. Nos próximos subcapítulos serão abordados os três tipos de materiais de transformação de fase sólido-líquido referidos anteriormente, eutéticos, inorgânicos e orgânicos.

Para qualquer mudança de fase, o calor Q é absorvido ou libertado a temperatura constante, é dado pela Equação 4-1.

$$Q = mL$$

Equação 4-1

Sendo m a massa e L o calor latente. O calor latente de uma substância é a quantidade de calor envolvida na mudança de uma fase para outra.

Para aplicações de aquecimento, a temperatura de funcionamento proveitosa para o sistema deve ser um pouco abaixo da temperatura a que ocorre a mudança de fase do PCM, só assim será perceptível o benefício do sistema de armazenamento provocado pelo grau da energia latente que pode ser armazenado e posteriormente libertado. Adicionalmente, a fonte de calor deve ser capaz de elevar a temperatura do meio de armazenamento acima da temperatura de mudança de fase a fim de gerar o gradiente térmico necessário para a transferência de calor e, assim, utilizar o calor latente do material de mudança de fase. Em suma, é importante a escolha de um material de mudança de fase que tenha a sua temperatura de mudança de fase acima da temperatura de funcionamento e abaixo da temperatura da fonte de calor [6] [13] [18].

O reverso será verdade em sistemas para armazenamento de frio. Quando utilizados em sistemas de acumulação de energia térmica, os materiais de mudança de fase são armazenados em recipientes, que podem ser de grandes dimensões, ou num conjunto de muitos recipientes pequenos, como tubos ou bolsas de plástico o que permite aumentar significativamente a área de transferência de calor entre o PCM e o meio, sendo que a transferência de calor é frequentemente o parâmetro mais limitativo no desenho e dimensionamento deste tipo de sistemas de armazenamento de energia [6] [13] [17] [18].

Como foi dito anteriormente, vão ser abordados materiais orgânicos, inorgânicos e eutéticos nos próximos subcapítulos. Na Tabela 4-2 está exposta uma breve comparação entre estes.

Tabela 4-2 – Comparação entre materiais orgânicos, inorgânicos e eutéticos.

| PCM's | | | |
|--------------|---|-------------------------------------|----------------------------------|
| | Orgânicos [6] [13] [19] | Inorgânicos [19] [20] [21] | Eutéticos [13] [20] [21] |
| Vantagens | Não corrosivos | Entalpia de mudança de fase elevada | Gama de pontos de fusão estreita |
| | Não sofrem sobreaquecimento | | |
| | Estabilidade térmica e química | | |
| | Grande taxa de cristalização | Pequena variação de volume | Alta densidade de armazenamento |
| | Recicláveis | Custos moderados | |
| | Disponíveis numa ampla gama de temperaturas | Alta condutividade térmica | |
| Desvantagens | Baixa condutividade térmica | Sobreaquecimento | Disponibilidade limitada |
| | | Corrosão | |
| | Inflamáveis | Separação de fases | Custo elevado |
| | | Falta de estabilidade térmica | |

4.3. Materiais de mudança de fase orgânicos

Os materiais de mudança de fase orgânicos podem ser classificados em duas categorias, parafinas e não-parafinas. Os materiais orgânicos permitem fusão e solidificação contínua sem sofrerem separação de fase, não apresentando degradação nas propriedades após diversas transições de fase, e são normalmente não corrosivos [14].

A baixa condutividade térmica da maior parte dos materiais de mudança de fase orgânicos resulta numa taxa de transferência de calor reduzida. O micro encapsulamento é a solução implementada muitas vezes para melhorar a transferência de calor entre o material de mudança de fase e o ambiente, através do aumento da razão superfície/volume do PCM. No entanto, é essencial que a matriz de encapsulamento tenha uma condutividade térmica elevada para que o sistema de micro encapsulamento apresente essa melhoria na velocidade de transferência de calor. O encapsulamento vai originar um custo adicional do material de mudança de fase [14] [19].

4.3.1. Parafinas

As parafinas usadas em aplicações de armazenamento térmico são normalmente mencionadas como ceras de parafina. As ceras de parafina consistem normalmente numa mistura de alcanos de cadeia linear $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$, verificando-se um aumento no ponto de fusão e do calor latente de fusão com o aumento do comprimento da cadeia de carbonos. Na Tabela 4-3 estão expressas a temperatura de mudança de fase e o calor latente de fusão de parafinas puras em função do número de átomos de carbono.

Tabela 4-3 – Temperatura de mudança de fase e calor latente de fusão de parafinas [14].

| Nº de átomos | Temperatura de | Calor latente de fusão | Grupo ^(a) |
|--------------|----------------|------------------------|----------------------|
|--------------|----------------|------------------------|----------------------|

| de carbono | mudança de fase (°C) | (kJ·kg ⁻¹) | |
|------------|----------------------|------------------------|----|
| 14 | 4,0 | 228,0 | I |
| 15 | 10,0 | 205,0 | II |
| 16 | 16,7 | 237,1 | I |

(a) Grupo I, bastante promissor; Grupo II, promissor.

As parafinas são seguras, fiáveis, de baixo custo e não-corrosivas. São quimicamente inertes e estáveis abaixo dos 500 °C e têm baixa pressão de vapor na forma líquida. As parafinas utilizadas nos sistemas têm geralmente longos ciclos sólido-líquido. Devido ao elevado custo de parafinas com elevado grau de pureza, apenas as parafinas de grau técnico são utilizadas como PCM's em sistemas de armazenamento de calor latente [14] [19] [22].

No entanto, apresentam algumas características não desejáveis, como:

- Baixa condutividade térmica;
- Não compatibilidade com alguns recipientes de armazenamento [13] [14];
- Moderadamente inflamáveis.

No que diz respeito à variação de volume na mudança de fase, as respostas não são convergentes, pois é uma propriedade dependente do tipo de parafina. Não é correto afirmar que as parafinas têm pequenas ou grandes variações de volume, é mais apropriado comentar esse parâmetro individualmente. Na Tabela 4-4, encontra-se uma lista de parafinas comerciais, podemos ver que a maior variação de volume ocorre para a *Parafina 6106* com 19 %, e a menor na *Parafina P116* com 3,9 %.

Tabela 4-4 – Propriedades termofísicas de parafinas comerciais com potencial de utilização [14] [18].

| Parafina | Distribuição de átomos | Temperatura de mudança de fase (°C) | Calor latente de fusão (kJ·kg ⁻¹) | Condutividade térmica (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | Densidade (kg·m ⁻³) | | ΔV (%) |
|------------|----------------------------------|-------------------------------------|---|---|---------------------------------|---------------|--------|
| | | | | | Líquido (70°C) | Sólido (20°C) | |
| 5913 | C ₁₃ -C ₂₄ | 22-24 | 189 | 0,21 | 760 | 900 | 18,4 |
| Octadecano | C ₁₈ | 28 | 244 | 0,15 | 774 | 814 | 5,2 |
| 6106 | C ₁₆ -C ₂₈ | 42-44 | 189 | 0,21 | 765 | 910 | 19,0 |
| P116 | - | 45-48 | 210 | - | 786 | 817 | 3,9 |
| 5838 | C ₂₀ -C ₃₃ | 48-50 | 189 | 0,21 | 769 | 912 | 18,6 |
| 6035 | C ₂₂ -C ₄₅ | 58-60 | 189 | 0,21 | 795 | 920 | 15,7 |
| 6403 | C ₂₃ -C ₄₅ | 62-64 | 189 | 0,21 | 790 | 915 | 15,8 |
| 6499 | C ₂₁ -C ₅₀ | 66-68 | 189 | 0,21 | 830 | 930 | 12,0 |

4.3.2. Não-Parafinas

Para além das parafinas existe um grande número de materiais de mudança de fase orgânicos com propriedades muito variadas. Ao contrário das parafinas que têm todas propriedades similares, cada material não-parafínico revela conter propriedades únicas. Esta versatilidade torna estes materiais bastante importantes para diversas aplicações.

Neste grupo de materiais, incluem-se os ácidos gordos, os álcoois, os ésteres e os glicóis. Na Tabela 4-5, estão apresentadas as propriedades de alguns materiais não-parafínicos.

Tabela 4-5 – Propriedades de alguns materiais não-parafínicos [14] [19].

| Material | Ponto de fusão (°C) | Calor latente de fusão (kJ·kg ⁻¹) |
|---------------|---------------------|---|
| Ácido fórmico | 7,8 | 247,0 |
| Glicerina | 17,9 | 198,7 |
| Fenol | 29,0 | 205,0 |

Este tipo de materiais orgânicos oferece muita variedade, o que possibilita ir ao encontro de temperaturas de mudança de fase apropriadas para aplicações mais específicas. Outro aspeto positivo, é a elevada capacidade de armazenamento de calor latente no processo de mudança de fase. No entanto, tem algumas desvantagens como o facto de terem uma baixa condutividade térmica, de serem inflamáveis e instáveis a elevadas temperaturas [14].

4.3.3. Ácidos gordos

Os ácidos gordos são descritos como sendo bons materiais de mudança de fase. Este grupo de compostos têm valores de calor de fusão elevados quando comparados com as parafinas, apresentam congruência na fusão e solidificação e arrefecem sem sofrerem sobrearrefecimento. Fusão congruente, ocorre durante a fusão de um composto quando a composição do líquido que se forma é a mesma que a composição do sólido. A maior desvantagem é o seu custo, duas a três vezes superior em relação às parafinas de grau técnico.

Na Tabela 4-6 encontram-se alguns ácidos gordos de cariz importante para aplicações de armazenamento de calor latente de baixa temperatura.

Tabela 4-6 – Propriedades de alguns ácidos gordos [14].

| Material | Ponto de fusão (°C) | Calor latente (kJ·kg ⁻¹) | Grupo ^(a) |
|-----------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------|
| Ácido acético | 16,7 | 184 | I |
| Polietilenoglicol 600 | 20 - 25 | 146 | I |
| Ácido cáprico | 36 | 152 | - |
| Ácido láurico | 49 | 178 | II |

| | | | |
|--------------------|-----|-----|---|
| Ácido mirístico | 58 | 199 | I |
| Ácido palmítico | 55 | 163 | I |
| Ácido esteárico | 69 | 199 | I |
| Acetamida | 81 | 241 | I |
| Fumarato de metilo | 102 | 242 | I |

(a) Grupo I, bastante promissor; Grupo II, promissor.

Foram testados diferentes ácidos gordos numa gama de temperaturas de fusão entre 40-63 °C e de padrão industrial com 90-95 % de pureza para a utilização em sistemas de aquecimento solar térmico durante longos períodos de armazenamento de energia, tendo em conta a estabilidade térmica do PCM e a compatibilidade de alguns metais com ácidos gordos [14] [23].

Os materiais de contenção estudados nos testes de resistência à corrosão foram: aço inoxidável (SS 304L) com óxido de crómio (Cr_2O_3) como camada superficial, alumínio (Al) com camada superficial de óxido de alumínio (Al_2O_3), aço carbónico (Aço C20) e cobre (Cu).

Os ácidos gordos investigados revelaram boa estabilidade térmica na gama de temperatura de mudança de fase para utilizações em sistemas de armazenamento de energia térmica de média duração. No entanto, para aplicações de longa duração, o ácido palmítico e mirístico são os mais adequados, como se pode ver pela Tabela 4-7.

Tabela 4-7 – Percentagem de calor latente perdido ao fim de ciclos térmicos [23].

| Número de ciclos | Ácido esteárico | Ácido palmítico | Ácido mirístico | Ácido láurico |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 40 | 8,8 | 11,4 | 5,7 | 16,5 |
| 410 | 9,7 | 12,2 | 7,0 | 26,0 |
| 700 | 24,6 | 14,4 | 10,7 | 33,2 |
| 910 | 31,9 | 17,8 | 17,1 | 37,2 |

No que diz respeito aos materiais de contenção conclui-se que o aço e o alumínio são os mais compatíveis com os ácidos estudados, por serem os mais resistentes à corrosão. Na Tabela 4-8, encontram-se as conclusões sobre os efeitos de corrosão observados na superfície dos metais.

Tabela 4-8 – Efeitos de corrosão observados na superfície dos metais [23].

| Material | Ácido esteárico | Ácido palmítico | Ácido mirístico | Ácido láurico |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SS 304L | Resistente | Resistente | Resistente | Resistente |
| Aço C20 | Resistente | Ligeiramente corroído | Ligeiramente corroído | Resistente |
| Al | Resistente | Resistente | Resistente | Resistente |
| Cu | Ligeiramente corroído | Ligeiramente corroído | Ligeiramente corroído | Ligeiramente corroído |

4.4. Materiais de mudança de fase inorgânicos

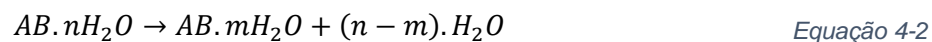
Os materiais de mudança de fase inorgânicos são classificados como sais hidratados e metálicos.

4.4.1. Sais hidratados

Os sais hidratados podem ser considerados como ligas de sais inorgânicos e água, formando um sólido cristalino de fórmula geral $AB \cdot nH_2O$, onde AB representa um sal inorgânico.

A transformação sólido-líquido dos sais hidratados é na prática uma desidratação da hidratação do sal, sendo um processo termodinâmico similar à fusão e solidificação.

O sal hidratado, normalmente, funde dando origem a um sal com menos moléculas de água, de acordo com a Equação 4-2 ou à sua forma anidra, Equação 4-3 [17] [19] [23].



Os sais hidratados são um dos grupos mais importantes de materiais de mudanças de fase, que têm sido amplamente estudados para a utilização em sistemas de armazenamento de calor latente. As propriedades mais atrativas dos sais hidratados são terem um elevado calor latente de fusão, condutividade térmica relativamente elevada (quase o dobro da parafina) e pequenas variações de volume na fusão. São não-corrosivos, compatíveis com plásticos e ligeiramente tóxicos. A maior parte dos sais hidratados têm um baixo custo para serem utilizados em armazenamento de energia.

Os sais hidratados podem adotar três tipos de comportamento durante o processo de fusão: congruente, semicongruente ou incongruente [14].

- Fusão congruente – ocorre quando o sal anidro é completamente solúvel na água de hidratação à temperatura de fusão;
- Fusão incongruente – ocorre quando o sal não é completamente solúvel na água de hidratação à temperatura de fusão;
- Fusão semicongruente - a fase sólida e a líquida em equilíbrio durante a fase de transição apresentam uma composição de fusão diferente mediante conversão do hidrato num material menos hidratado através da perda de água.

O maior problema de utilizar os sais hidratados como materiais de mudança de fase é o facto de eles fundirem de forma incongruente. Se n moles de água hidratada não forem suficientes para dissolver uma mol de sal, a solução resultante permanece supersaturada à temperatura de fusão. O sal sólido, de maior densidade, deposita-se no fundo do recipiente e fica indisponível para o processo inverso de

solidificação, o que leva a uma perda de reversibilidade no processo de fusão-solidificação. Para reverter esta situação podem ser tomadas algumas medidas:

- Agitação mecânica [24];
- Encapsulamento do material de mudança de fase, de modo a diminuir a separação e a sedimentação de fases [25]:
 - Adição de agentes espessantes, que impedem a deposição dos sais sólidos, mantendo-os em suspensão [26];
 - Excesso de água, para que os cristais fundidos não produzam uma solução saturada [27];

4.4.2. Metálicos

Esta categoria inclui metais de baixo ponto de fusão e misturas eutéticas. No entanto este tipo de materiais ainda não foi considerado para tecnologias de materiais de mudança de fase devido ao seu excessivo peso. Apesar disso, têm uma característica que os distingue dos outros materiais de mudança de fase e que constitui uma clara vantagem, a elevada condutividade térmica. Apresentam ainda baixo calor latente de fusão por unidade de massa, elevado calor latente por unidade de volume, baixo calor específico e pressão de vapor baixa [17] [19].

4.5. Eutéticos

Os eutéticos, podendo ser orgânicos ou inorgânicos, correspondem a composições de pelo menos dois ou mais componentes, em que cada um funde e solidifica de forma congruente, formando uma mistura de cristais do componente durante a cristalização. Todos os eutéticos fundem e solidificam quase sempre sem separação de fase por solidificarem em misturas íntimas de cristais, impossibilitando que os componentes se desagreguem. Quando da fusão ambos componentes liquidificam simultaneamente sem separação [14] [18].

Os PCM's eutéticos podem ser orgânico-orgânico, orgânico-inorgânico e inorgânico-inorgânico.

Embora com custos mais elevados que outros PCM's, este tipo de material não necessita de encapsulamento, portanto o baixo custo é atingido para a totalidade do sistema de armazenamento [17]. As temperaturas de operação entre 110 e 140 °C são muito elevadas para algumas aplicações, tal como aquecimento de água.

5. CLIMAESPAÇO

A CLIMAESPAÇO é uma central térmica situada no Parque das Nações. Tem como função cobrir todas as necessidades térmicas do Parque das Nações, sendo estas o aquecimento central dos edifícios, a sua refrigeração e o aquecimento das águas sanitárias destes.

5.1. Funcionamento

A central funciona segundo um processo de trieração, isto é, a partir da mesma fonte energética (gás natural), produz em simultâneo energia elétrica, calor e frio.

As principais vantagens da rede urbana de frio e calor é a redução do consumo de energia primária e das emissões de dióxido de carbono.

A partir de uma central de trieração de alta eficiência, situada no extremo norte do Parque das Nações, como se vê na Figura 5-1, a energia térmica é distribuída sob a forma de água arrefecida e água aquecida.



Figura 5-1 – Rede de distribuição de frio da CLIMAESPAÇO.

A distribuição processa-se através de uma rede de tubagens. A transferência de energia entre a rede de distribuição e os edifícios é efetuada em subestações existentes nos edifícios, através de permutadores de calor [28].

5.2. Vantagens

De uma forma geral o sistema da CLIMAESPAÇO proporciona qualidade e conforto, segurança, preservação do meio ambiente, fiabilidade e tem vantagens em termos económicos.

A preservação do meio ambiente assume um papel cada vez mais importante. A ClimaEspaço produz e distribui energia de forma racional, reduzindo o consumo de energia primária em 40% e portanto as emissões de dióxido de carbono [28].

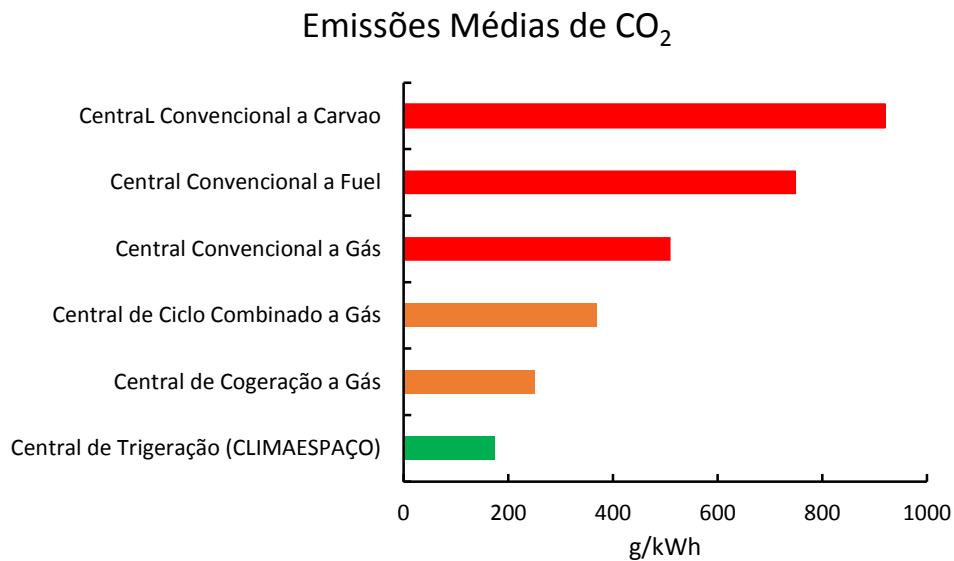


Figura 5-2 – Valores de emissão de CO₂ associadas a diversas tecnologias de produção de eletricidade [28].

Para além disso, a central de trieração não utiliza substâncias destruidoras da camada de ozono.

5.3. Gerador de calor/frio

Esta unidade para a produção de frio e calor possui [29].

- Uma turbina a gás com uma potência elétrica de 5 MW;
- Uma caldeira de recuperação com sistema de pós-combustão, com uma potência total de 12 MW de calor;
- Uma caldeira auxiliar com uma potência calorífica de 15 MW de calor;
- Dois grupos de refrigeração de absorção de duplo efeito, instalados em paralelo e com uma potência unitária de 5 MW de frio;
- Dois grupos de refrigeração de compressão, instalados em paralelo e com uma potência unitária de 5,8 MW de frio.
- Um tanque de água gelada com 15 000 m³.

5.4. Rede de distribuição de fluidos térmicos

É constituída por aproximadamente 40 km de rede em toda a zona de intervenção do Parque das Nações. A rede de água fria na ida fornece água a uma temperatura de 4 °C enquanto a temperatura do circuito de retorno é aproximadamente 12 °C [29]. A rede de água quente abastece os utilizadores com água a 100 °C, sendo a água do circuito de retorno aproximadamente 65 °C.

5.5. Subestações

As subestações de transferência de energia estão localizadas nos edifícios utilizadores do serviço. Estão equipadas com permutadores de calor, sendo nestes equipamento que se realiza a interface entre a rede primária da Climaespaço e a rede secundária dos clientes.

6. Caso estudo

De modo a estudar um sistema de armazenamento de energia térmica recorrendo a um material de mudança de fase, este trabalho conta com a colaboração da *Cofely*. Esta tese retrata um problema real de uma unidade de distribuição de calor e frio urbano. A instalação CLIMAESPAÇO possui armazenamento de energia produzida nos períodos de pouca procura, para ser usado nos períodos em que a procura excede a oferta, mas quer expandir a sua capacidade.

Em primeira instância pretende-se com o trabalho, a escolha do melhor tipo de material para ser incorporado no material de mudança de fase. Em seguida foi necessário a criação de um modelo para analisar as alterações de resposta da dinâmica que o PCM introduziu no sistema de distribuição de água fria e verificar se existiram ganhos do ponto de vista energético.

As simulações foram feitas com vista ao material mudança de fase armazenar 10, 20, 30 e 50 % do valor de energia que o tanque atualmente armazena sem PCM. Foi escolhido um material para PCM e foi estudado o impacto da forma de introdução desde PCM em esferas com diâmetro que varia entre 10 cm e 1m.

Na Figura 6-1 encontra-se esquematizado a rede de distribuição de frio da CLIMAESPAÇO.

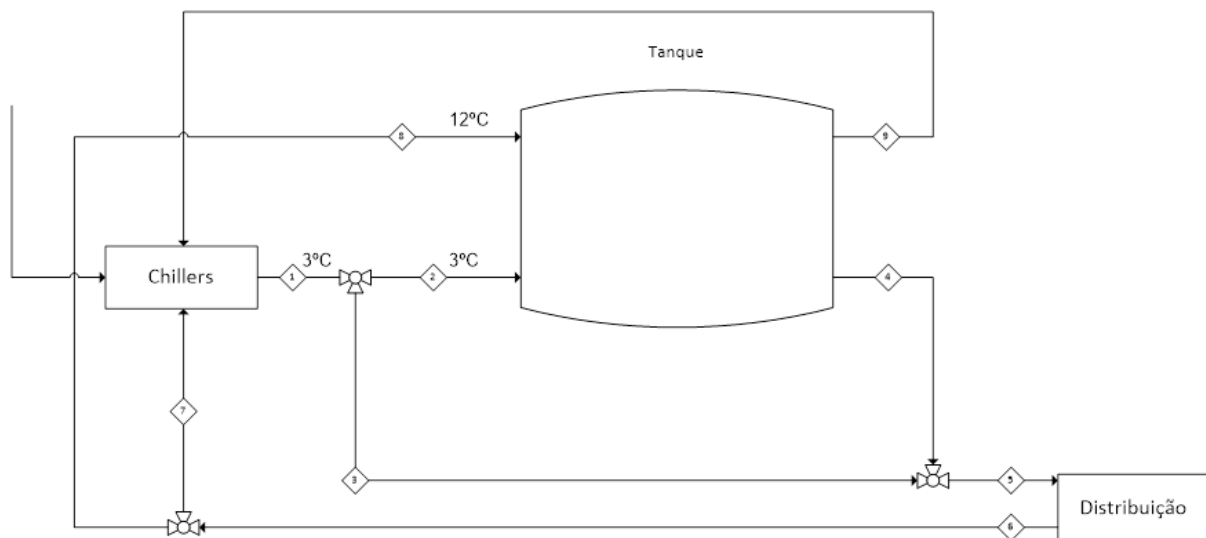


Figura 6-1 - Esquema da instalação de frio.

A água fria vinda dos *chillers*, dependendo da necessidade, tem dois destinos possíveis: alimentar o tanque ou ser fornecida diretamente à rede de distribuição. A água proveniente da distribuição, dependendo da temperatura de retorno, tem como destino os *chillers* ou o topo do tanque. A água que sai do topo do tanque é destinada aos *chillers*.

6.1. Tanque de água

O tanque de água é um tanque estratificado, que armazena água com temperaturas entre os 3 e 12 °C. Na Figura 6-2, está esquematizado o tanque de água fria da CLIMAESPAÇO, sobre o qual se vai realizar o estudo de otimização de armazenamento de energia.

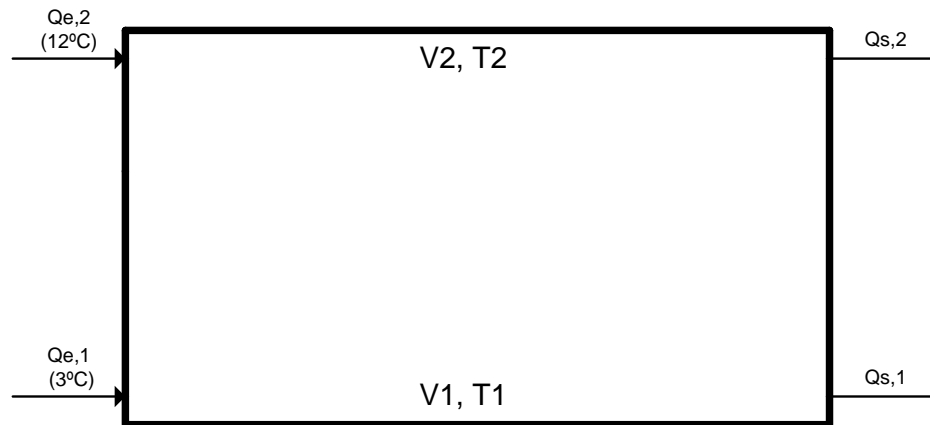


Figura 6-2 – Esquema do tanque de água fria da CLIMAESPAÇO.

O tanque é alimentado por duas entradas e descarregado por duas saídas de água. A água que é produzida nos *chillers*, a 3 °C, entra na base do tanque. Para efeitos de modelação foi considerado que havia dois volumes completamente estratificados, um a uma temperatura de 3 °C e outro a 12 °C. Durante o período da noite, é feita a carga de frio no tanque, e este fica cheio de água fria, que se encontra esquematizada como V_1 . A saída da base do tanque é a que corresponde à água que é distribuída a toda a rede à qual a ClimaEspaço fornece frio. A água que retorna da rede, dependendo da temperatura a que se encontra, pode entrar no topo do tanque ou nos *chillers*. O processo denominado por descarga de frio corresponde quando é feita a distribuição da água V_1 , pelo que este volume decresce, e o volume de água quente, V_2 , começa a subir.

O cálculo da variação de cada volume é feito na base da entrada e saída de caudal de cada zona, como é descrito pela Equação 6-1 e Equação 6-2.

$$\frac{d(V_1)}{dt} = Q_{e,1} - Q_{s,1} \quad \text{Equação 6-1}$$

Em que $Q_{e,1}$ é o caudal de entrada de água fria e $Q_{s,1}$ é o caudal de saída de água fria.

$$\frac{d(V_2)}{dt} = Q_{e,2} - Q_{s,2} \quad \text{Equação 6-2}$$

De forma análoga, $Q_{e,2}$ é o caudal de entrada de água quente e $Q_{s,2}$ é o caudal de saída de água quente.

Na Figura 6-3, encontra-se representado a variação de volume de água fria e quente no tanque.

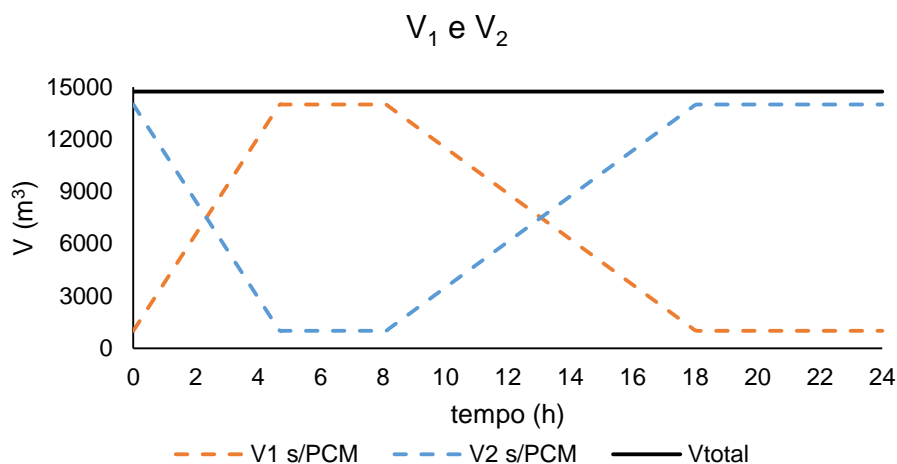


Figura 6-3 – Variação do volume de água fria (V_1) e quente (V_2).

Pela Figura 6-3, verifica-se que o tanque fica com o máximo de volume de água fria em 4 horas e 42 minutos. O processo de descarga útil de água fria tem a duração de 10 horas, ao fim dos quais foi esgotada toda a água fria guardado no tanque. Após este tempo, o fornecimento de água fria, é feita diretamente pelos *chillers* não tendo esta água que passar pelo tanque de armazenamento intermédio.

Considerou-se ainda que o sistema de controlo de caudais garante que o volume total é constante sendo a soma dos caudais e de entrada igual à dos caudais de saída.

Na Tabela 6-1, encontram-se apresentados os parâmetros necessários para a variação dos volumes de água no tanque.

Tabela 6-1 – Dados dos parâmetros para a evolução dos volumes no tanque de água.

| Parâmetro | Processo de carga | Processo de descarga |
|--------------------------|-------------------|----------------------|
| $Q_{e,1}$ (m^3/h) | 4 000 | 2 500 |
| $Q_{s,1}$ (m^3/h) | 1 225 | 3 810 |
| $Q_{e,2}$ (m^3/h) | 3 000 | 2 500 |
| $Q_{s,2}$ (m^3/h) | 5 775 | 1 190 |
| $V_{1,min}$ (m^3) | 1 000 | |
| $V_{1,máx}$ (m^3) | 14 000 | |
| $V_{2,min}$ (m^3) | 1 000 | |
| $V_{2,máx}$ (m^3) | 14 000 | |
| T_{V1} ($^{\circ}C$) | 3 | |
| T_{V2} ($^{\circ}C$) | 12 | |
| $t_{duração}$ (h) | 8 | 16 |

O objetivo da introdução do material com mudança de fase é tentar prolongar o intervalo de tempo que o volume V_1 levará a reduzir-se completamente, em vez de se esgotar o volume de água fria armazenado ao fim de 18 horas, esgotá-lo o mais tarde possível.

De forma preliminar a quantidade de energia que é atualmente armazenada no tanque com base na Equação 6-3.

$$E = V \times \rho \times C_p \times (T_{topo} - T_{base}) \quad \text{Equação 6-3}$$

Em que E é a energia armazenada (J), V (m^3) é o volume de água no tanque, ρ ($kg \cdot m^{-3}$) é a massa volúmica da água, C_p ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) é o calor específico da água, T_{topo} e T_{base} são, respetivamente as temperaturas da água nos estratos no topo e na base do tanque ($^{\circ}C$).

Considerou-se um volume de água de $13\,000\,m^3$, sobrando $1\,000\,m^3$ como volumes mortos tanto na zona V_1 como na zona V_2 .

Tabela 6-2 – Energia armazenada no tanque de água.

| Parâmetro | Valor |
|--|---------|
| V (m^3) | 13 000 |
| ρ (kg/m^3) | 1 000 |
| C_p ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) | 4 180 |
| T_{base} ($^{\circ}C$) | 3 |
| T_{topo} ($^{\circ}C$) | 12 |
| E (MJ) | 489 060 |
| E (MJ/m^3) | 37,62 |

Com base no valor de energia que o tanque armazena, os estudos para armazenamento de frio foram feitos com base numa percentagem do valor de 434 720 MJ. Pretende-se que o material mudança de fase armazene 10, 20, 30 e 50 % do valor que actualmente o tanque consegue armazenar.

Dado que o calor latente que o PCM poderá armazenar por unidade de volume é substancialmente superior ao calor específico da água para um ΔT de 9, a substituição de água por um volume equivalente de PCM corresponderá a um aumento substancial da quantidade de energia que poderá ser acumulada no tanque.

O tanque de água, tem um diâmetro de 34,9 m e uma altura de 15,7 m.

6.2. Escolha do tipo de material do PCM

A escolha do tipo de material está diretamente relacionada com a sua temperatura de fusão e com o calor latente de fusão.

Com base no que foi descrito anteriormente no subcapítulo 4.3.1. e tendo em conta as temperaturas dos volumes de água presentes no tanque, a temperatura de fusão do material de mudança de fase tem que estar contida no intervalo entre $3\,^{\circ}C$, temperatura da água gerada pelos *chillers*, e os $12\,^{\circ}C$, a água que é proveniente do retorno da rede e que deve ser refrigerada: este valor deve ser ainda, tanto quanto possível, próximo da temperatura da água que é fornecida à rede de água fria. Um

material adequado, que respeita esta premissa, é a parafina com 14 átomos de carbono, $C_{14}H_{30}$ com uma temperatura de fusão de 4 °C e um calor latente de 228 kJ/kg.

6.3. Propriedades do PCM

Para efeitos do modelo considera-se que o PCM se comporta como um material ideal: fenômenos como degradação ou a necessidade de sobrearrefecimento não são considerados. Do ponto de vista da adequação à realidade, esta parafina deve apresentar uma estabilidade considerável às temperaturas a que será utilizada sendo, no entanto, expectável que algum sobrearrefecimento possa ser necessário. Considera-se ainda que a mudança de fase ocorre numa temperatura bem definida sem histerese significativa entre o processo de solidificação e fusão. Sendo que não se verifica na realidade, pois tratando-se de uma parafina comercial, existirá alguma variação na temperatura de fusão.

O material mudança de fase foi ainda considerado como homogêneo e isotrópico com o valor de densidade diferente para a fase líquida e sólida. Dado que os cálculos preliminares indicaram que o volume de material era demasiado grande para poder ser incorporado num único volume, portanto foi considerado que seria composto por vários módulos esféricos todos com o mesmo volume, inseridos num recipiente cilíndrico que permitisse o acesso fácil a todo o volume e área de transferência.

Os cálculos foram efetuados considerando que o PCM se encontra inicialmente (início do ciclo de carga) no estado líquido. Durante o processo de carga de frio, o material de mudança de fase congela, e durante o processo de descarga de frio ocorrerá a fusão do PCM.

De modo a garantir que a transferência de calor no interior dos módulos seja o mais eficiente possível, as esferas de PCM têm no seu interior alhetas metálicas de modo a aumentar a condutividade efetiva da parafina, admitindo uma temperatura uniforme no interior da cápsula.

Tabela 6-3 – Propriedades do PCM C-14 [14] [17].

| Parâmetro | Valor |
|---|-------|
| ρ_S (kg/m ³) | 825 |
| ρ_L (kg/m ³) | 771 |
| $T_{\text{fusão}}$ (°C) | 4,0 |
| $\Delta H_{\text{fusão}}$ (kJ/kg) | 226 |
| k_L (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | 0,15 |

No exterior do das esferas de PCM, o mecanismo usado para descrever a transferência de calor é o de convecção natural, pois a água fria sobe muito lentamente pelo tanque.

6.4. Área superficial

De modo a saber qual o impacto que as alhetas têm na área superficial das esferas do PCM, verificou-se qual seria a sua variação. O encapsulamento das esferas é feito com um material metálico de forma a aumentar a condutividade térmica efetiva, visto o PCM se tratar de um material com um baixo valor de condutividade térmica. Assumiu-se que nas cápsulas, as alhetas ocupam 1 % do volume da esfera com PCM.

$$\frac{V_{cápsula,com\ alheta}}{V_{cápsula,sem\ alheta}} = 1,01 \leftrightarrow \frac{\frac{4}{3}\pi r_{cápsula,com\ alheta}^3}{\frac{4}{3}\pi r_{cápsula,sem\ alheta}^3} = 1,01 \leftrightarrow r_{cápsula,com\ alheta} = r_{esfera,sem\ alheta} \times \sqrt[3]{1,01}$$

Sabendo a relação dos raios entre a cápsula com e sem alheta, calculou-se que impacto tem a alheta na área de transferência.

$$\frac{A_{cápsula,com\ alheta}}{A_{cápsula,sem\ alheta}} = \frac{4\pi r_{cápsula,com\ alheta}^2}{4\pi r_{cápsula,sem\ alheta}^2} = \frac{(r_{esfera,sem\ alheta} \times \sqrt[3]{1,01})^2}{r_{cápsula,sem\ alheta}^2} = 1,00665$$

Como as alhetas não influenciam o valor da área superficial da cápsula, foi usado nos cálculos o valor da área da cápsula sem alheta, denominada área da esfera do PCM.

7. Tanque de água com PCM

De modo a se poder saber o volume de material de mudança de fase necessário, é preciso saber a quantidade de energia de que se pretende armazenar.

7.1. Volume de PCM

A quantidade de energia total que o tanque armazena é de 434 720 MJ. Sabendo a quantidade de energia que o material mudança de fase armazena, pode-se calcular o valor de volume de PCM necessário, o que é descrito pela Equação 7-1 e Equação 7-2.

$$m_{PCM} = \frac{E_{armazenada}}{\Delta H_{fusão}} \quad \text{Equação 7-1}$$

Em que m_{PCM} (kg) é a massa do material mudança de fase, $E_{armazenada}$ (J) é a energia que o PCM consegue armazenar e $\Delta H_{fusão}$ (kJ/kg) é o calor latente de fusão do material.

$$V_{PCM} = \frac{m_{PCM}}{\rho_{L,PCM}} \quad \text{Equação 7-2}$$

Em que V_{PCM} (m³) é o volume de PCM e ρ_{PCM} (kg/m³) é a massa volúmica do PCM na fase líquida.

Tabela 7-1 – Massa e volume de PCM para cada caso de estudo.

| Parâmetro | +10% | +20% | +30% | +50% |
|-----------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| $E_{armazenada}$ (MJ) | 48 906 | 97 812 | 146 718 | 244 530 |
| m_{PCM} (kg) | 216 398 | 432 796 | 649 195 | 1 081 991 |
| V_{PCM} (m ³) | 281 | 561 | 842 | 1 403 |

Com o valor de volume de material mudança de fase, pode-se concluir sobre a sua viabilidade. Deste modo recorre-se à Equação 7-3, para se aferir a conclusão da utilidade do PCM.

$$rácio = \frac{E_{armazenada,PCM}}{E_{água}} \quad \text{Equação 7-3}$$

Com a inserção do material mudança de fase, uma parte do volume de água vai ser substituído por PCM. Se o rácio da Equação 7-3 for superior a um, a energia correspondente ao volume de PCM compensa a perda de energia desse volume em água.

Tabela 7-2 – Rácio de viabilidade do material mudança de fase.

| Parâmetro | +10% | +20% | +30% | +50% |
|---|--------|--------|---------|---------|
| $E_{armazenada,PCM}$ (MJ) | 48 906 | 97 812 | 146 718 | 244 530 |
| $E_{água}$ ($V_{H_2O}=V_{PCM}$) (MJ) | 17 925 | 35 851 | 53 776 | 89 627 |
| Rácio | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 |

Como se pode verificar, o rácio é superior a um, nos quatro casos de estudo, portanto a implementação do PCM é sempre viável, para qualquer que seja a quantidade de energia que se pretenda armazenar no material mudança de fase. Como seria de esperar, o valor do rácio não varia com a quantidade de energia que se pretende armazenar.

Sabendo o volume do material mudança de fase necessário, pode-se obter uma estimativa do volume do recipiente cilíndrico que vai conter os módulos esféricos, como é apresentado pela Equação 7-4.

$$V_{recipiente} = \frac{V_{PCM}}{f} \quad \text{Equação 7-4}$$

Em que $V_{recipiente}$ é o volume do cilíndrico que contém as esferas de PCM (m^3), V_{PCM} é o volume necessário de PCM (m^3) e f é o fator de empacotamento das esferas numa rede cúbica simples, a que permite um acesso mais fácil ao volume entre as esferas.

O cálculo do fator de empacotamento em rede cúbica simples encontra-se descrito no Anexo B.1. Empacotamento em rede simples.

Tabela 7-3 – Volume do recipiente do PCM.

| Parâmetro | +10% | +20% | +30% | +50% |
|----------------------------|------|-------|-------|-------|
| V_{PCM} (m^3) | 281 | 561 | 842 | 1 403 |
| F | 0,52 | | | |
| $V_{recipiente}$ (m^3) | 536 | 1 072 | 1 608 | 2 608 |
| H/D | 10 | | | |
| $H_{recipiente}$ (m) | 1,8 | 2,3 | 2,6 | 3,1 |

Na Figura 7-1, está esquematizado o tanque com o material mudança de fase no seu interior.

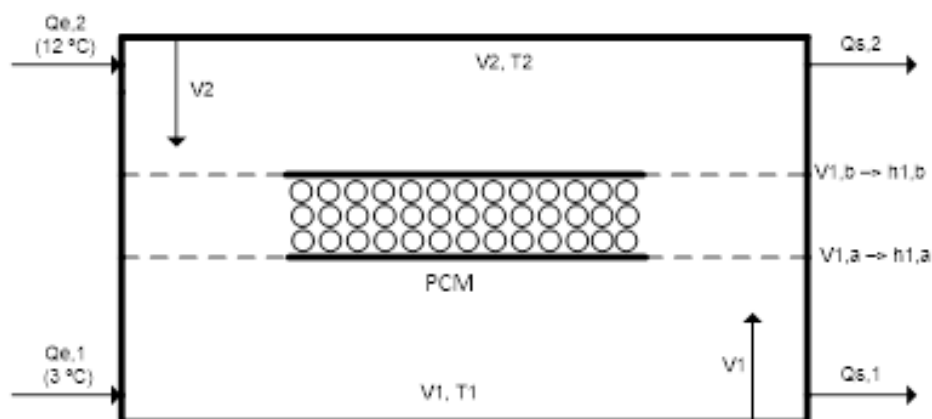


Figura 7-1 – Esquema do tanque com o PCM inserido.

O parâmetro $h_{1,a}$ é a cota de líquido de água fria que corresponde à cota da base do material mudança de fase, $h_{1,b}$ corresponde à altura em que o estrato de água fria no recipiente conteria todos os módulos esféricos de PCM. Para todas as simulações efetuadas foi assumido que a base do PCM estaria a uma cota de 2 m.

7.2. Coeficiente de transferência de calor

A Tabela 7-4 apresenta os valores relevantes para a estimativa do coeficiente de transferência de calor, que foram obtidos como está descrito no Anexo B.5. Coeficiente de transferência de calor.

Tabela 7-4 – Propriedades da água e valores do coeficiente de transferência de calor [30].

| D (m) | ρ (kg/m ³) | g (m/s ²) | β (K ⁻¹) | ΔT (K) | $\mu \times 10^6$ (N·s·m ⁻²) | C_p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | k (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | Gr | Pr | Nu | h (W·m ⁻² ·K ⁻¹) |
|-------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------|--|--|---|-------------------|------|-----|---|
| 1,00 | 1 000 | 9,81 | $5,3 \times 10^{-5}$ | 8 | 1 200 | 4 188 | 0,591 | $2,8 \times 10^9$ | 8,57 | 217 | 128 |
| 0,75 | | | | | | | | $1,2 \times 10^9$ | | 175 | 138 |
| 0,50 | | | | | | | | $3,5 \times 10^8$ | | 130 | 153 |
| 0,25 | | | | | | | | $7,6 \times 10^7$ | | 89 | 175 |
| 0,20 | | | | | | | | $2,3 \times 10^7$ | | 66 | 195 |
| 0,10 | | | | | | | | $2,8 \times 10^6$ | | 40 | 237 |

Pode verificar-se que, como seria de esperar, o coeficiente de transferência de calor será mais elevado se se utilizarem esferas mais pequenas.

7.3. Balanço aos volumes de água

O balanço de volume feito no capítulo 6.1 – *Tanque de água* é agora modificado devido à introdução do material. Dado que se considerou o tanque como contendo duas camadas de água completamente estratificadas, uma a 3 °C e outra a 12 °C, considerou-se que a água fria em contacto com o PCM fundido irá aquecer, gerando um caudal equivalente de água à temperatura mais elevada, enquanto a água a 12 °C ao contactar com o PCM congelado irá arrefecer, gerando um caudal equivalente de água fria. A Equação 6-1 e Equação 6-2, passam a ser descritas pela Equação 7-5 e Equação 7-8.

$$\frac{d(V_1)}{dt} = Q_{e,1} - Q_{s,1} - \frac{Q_{trocado,1}}{C_p \rho (T_{V2} - T_{V1})} - \frac{Q_{trocado,2}}{C_p \rho (T_{V2} - T_{V1})} \quad \text{Equação 7-5}$$

Em que $Q_{e,1}$ é o caudal de água que entra na base do tanque (m^3/h), $Q_{s,1}$ é o caudal de água que sai na base do tanque (m^3/h), $\frac{Q_{trocado,1}}{C_p \rho (T_{V2} - T_{V1})}$ é a quantidade de água que estava no volume V_1 e passou para o volume V_2 ao trocar energia com o PCM.

A parcela $\frac{Q_{trocado,1}}{C_p \rho (T_{V2} - T_{V1})}$ depende da fase de operação em que se encontra o tanque, como descreve a Equação 7-6.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Q_{trocado,1}}{C_p \rho (T_{V2} - T_{V1})} = \frac{Q_{trocado,1}}{C_p \rho (T_{V2} - T_{V1})} \text{ se carga de frio} \\ \frac{Q_{trocado,1}}{C_p \rho (T_{V2} - T_{V1})} = 0 \text{ se descarga de frio} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Equação 7-6.1} \\ \text{Equação 7-6.2} \end{array}$$

De forma análoga, o comportamento da parcela $\frac{Q_{trocado,2}}{C_p \rho (T_{V2} - T_{V1})}$ vem descrita na Equação 7-7.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Q_{trocado,2}}{C_p \rho (T_{V2} - T_{V1})} = 0 \text{ se carga de frio} \\ \frac{Q_{trocado,2}}{C_p \rho (T_{V2} - T_{V1})} = \frac{Q_{trocado,2}}{C_p \rho (T_{V2} - T_{V1})} \text{ se descarga de frio} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Equação 7-7.1} \\ \text{Equação 7-7.2} \end{array}$$

Embora seja possível considerar que possa haver simultaneamente troca de calor entre o PCM e tanto o estrato quente como o estrato frio. Tanto o congelamento como o descongelamento do PCM, a velocidade de transferência de calor será limitante, considera-se que apenas uma das trocas ocorrerá de forma significativa em cada um dos processos (carga ou descarga).

O balanço ao volume V_2 vem apresentado na Equação 7-8.

$$\frac{d(V_2)}{dt} = - \frac{d(V_1)}{dt} \quad \text{Equação 7-8}$$

O calor trocado na zona 1 (água fria) e na zona 2 (água quente) depende da evolução da solidificação do PCM, como descrito na Equação 7-9 e Equação 7-10.

$$\begin{cases} Q_{\text{trocado},1} = UA \times (T_{\text{PCM}} - T_{V1}) \text{ se } W_s < W_{s,\text{max}} & \text{Equação 7-9.1} \\ Q_{\text{trocado},1} = 0 \text{ se } W_s \geq W_{s,\text{max}} & \text{Equação 11-9.2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_{\text{trocado},2} = UA \times (T_{V2} - T_{\text{PCM}}) \text{ se } W_s < W_{s,\text{max}} & \text{Equação 7-10.1} \\ Q_{\text{trocado},2} = 0 \text{ se } W_s \leq 0 & \text{Equação 11-10.2} \end{cases}$$

Em que U ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) é o coeficiente de transferência de calor, A a área de contacto entre o estrato de água relevante (m^2) e o PCM e variável ao longo do tempo, T_{PCM} é a temperatura de fusão do PCM (K), T_{V1} é a temperatura de volume de água fria (K), W_s é a massa de PCM solidificado e $W_{s,\text{max}}$ é a quantidade de PCM máxima que pode congelar.

Por fim, o balanço à quantidade de PCM que solidifica é feito através da Equação 7-11.

$$\frac{d(W_s)}{dt} = \frac{Q_{\text{trocado},1}}{\Delta H_{\text{fusão}}} \quad \text{Equação 7-11}$$

Onde $Q_{\text{trocado},1}$ é a quantidade de energia que o PCM armazena e $\Delta H_{\text{fusão}}$ é o calor latente de fusão do material.

De referir que com base na Figura 7-1, o parâmetro UA da Equação 7-9 e Equação 7-10 varia com a cota em que o líquido se encontra.

$$\begin{cases} UA = 0 \text{ se } h_1 < h_{1,a} & \text{Equação 7-12.1} \\ UA = UA_{\text{superficial}} \left(\frac{h_1 - h_{1,a}}{h_{1,b} - h_{1,a}} \right) \text{ se } h_{1,a} \leq h_1 \leq h_{1,b} & \text{Equação 11-12.2} \\ UA = UA_{\text{superficial}} \text{ se } h_1 > h_{1,b} & \text{Equação 11-12.3} \end{cases}$$

Só existe troca de calor entre a água e o material de mudança de fase, quando a água começa a entrar em contacto com o PCM, pelo que o parâmetro UA atinge o valor de zero quando a cota de líquido é inferior à cota base do PCM. Enquanto o volume de líquido está entre a base do PCM e a altura do recipiente, o valor de UA vai aumentando consoante a fração de PCM que está em contacto com o líquido. Quando a água passa a cota máxima de PCM, o valor do parâmetro UA é máximo.

7.4. Armazenamento de 10%

Para a apresentação dos resultados é necessário calcular o coeficiente de transferência de calor.

No subcapítulo 7.1. obteve-se o valor para o volume de PCM, para armazenar 10% do que o tanque já armazena. Em seguida é necessário calcular o número de esferas que são necessárias ter para armazenar o que se pretende e a respetiva área de transferência de calor.

7.4.1. Número de esferas

Fizeram-se simulações com vários de diâmetros de esferas.

Tabela 7-5 – Número de esferas e área transferência do material mudança de fase.

| V_{PCM} (m^3) | D_{PCM} (m) | V_{esfera} (m^3) | Número de esferas | Área superficial do PCM (m^2) | Área superficial total (m^2) |
|------------------------|------------------|---------------------------|----------------------|---|--|
| 250 | 1,00 | 0,524 | 537 | 3,14 | 1 687 |
| | 0,75 | 0,221 | 1 271 | 1,77 | 2 246 |
| | 0,50 | 0,065 | 4 289 | 0,79 | 3 369 |
| | 0,25 | 0,014 | 19 854 | 0,28 | 5 614 |
| | 0,20 | 0,004 | 67 006 | 0,13 | 8 420 |
| | 0,10 | 0,001 | 536 045 | 0,03 | 16 840 |

Para esta quantidade de armazenamento de energia, é necessário saber as cotas da base e do topo dos módulos esféricos (ver Figura 7-1, página 36). A base do PCM é definida a 2 m e a cota do topo é a 3,82 m. A diferença entre estes dois valores representa o recipiente onde estão inseridos os módulos esféricos.

Apresentam-se em seguida os resultados das simulações para os vários diâmetros de PCM.

7.4.2. Resultados $D_{esfera} = 1$ m

Na Figura 7-2, está representado a variação do volume de água fria ($3^\circ C$) ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior o tanque.

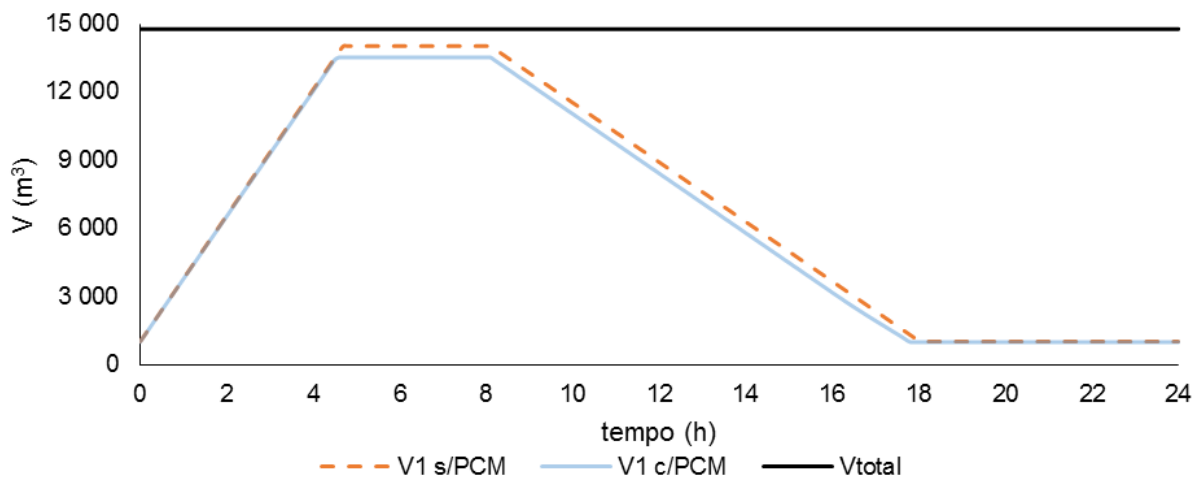


Figura 7-2 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10% de energia e $D_{esfera} = 1$ m.

Verifica-se que o tanque sem PCM, no processo de descarga, atinge o volume de água fria (3 °C) de 1 000 m³ às 18 horas. Ao se introduzir o PCM no interior do tanque, seria de esperar que o tanque atingisse o volume de 1 000 m³ depois das 18 horas, que é o objetivo da introdução do PCM.

Pela Figura 7-2 verifica-se que tal não acontece, aliás existe até uma contração do volume de água fria de 3 °C (V_1). Esta contração é explicada pelo facto de que a quantidade de PCM que solidifica/funde é inferior a 1/3 da quantidade teórica de PCM que seria necessário para armazenar a quantidade de energia necessária, como se verifica pela Figura 7-3.

De notar que o volume máximo de água fria é inferior quando o tanque tem PCM, sendo que esta diferença se justifica pelo volume que o próprio PCM ocupa. O mesmo não se verifica para o volume mínimo de água fria, que independentemente do PCM é sempre o mesmo valor.

Pelo balanço ao PCM podemos saber a quantidade de massa de material mudança de fase que solidifica que se encontra representado na Figura 7-3.

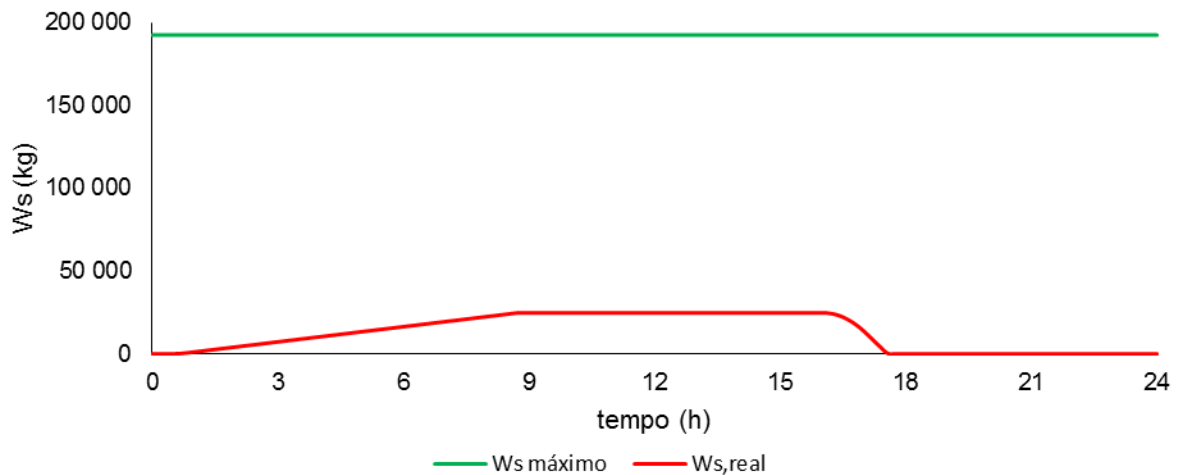


Figura 7-3 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10% de energia e $D_{esfera} = 1 m$.

A velocidade de solidificação do PCM é mais pequena no processo de carga de frio em relação ao processo de descarga de frio. Isto justifica-se pelo facto do processo de carga estar associado a um ΔT de 1 K enquanto que o processo de descarga de frio tem um ΔT de 8 K.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 24 708 kg uma vez que não houve tempo suficiente para que todo o PCM solidificasse antes de começar a descarga, embora fosse necessário uma massa de PCM de 216 398 kg, conferindo uma eficiência de 11,4 %.

Na Figura 7-4, pode-se analisar a evolução da cota de líquido de água fria ao longo do tempo no tanque.

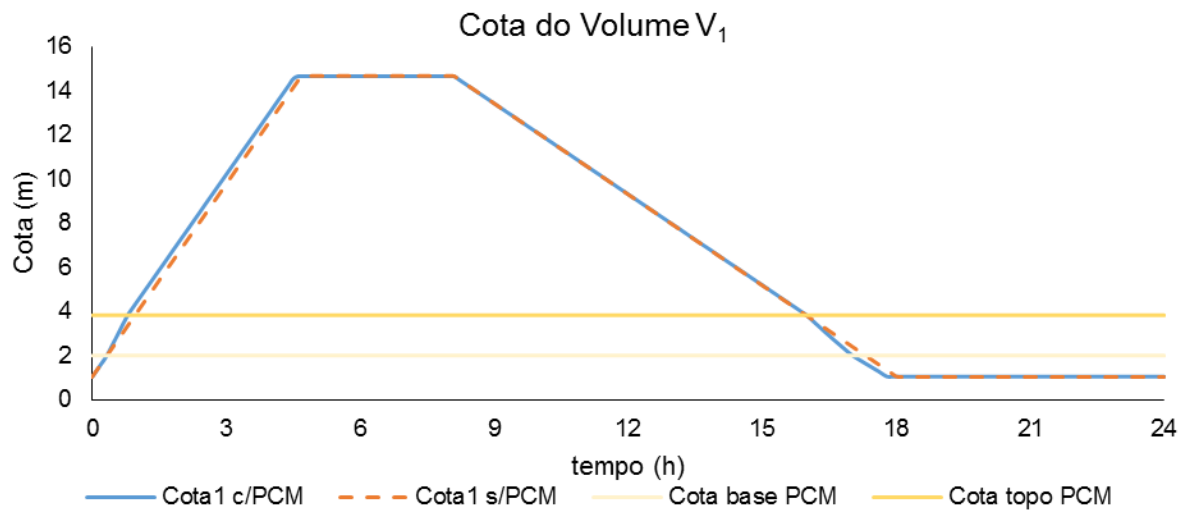


Figura 7-4 – Evolução da cota de líquido de água, para 10% de energia e $D_{esfera} = 1\text{ m}$.

Contrariamente ao volume, a cota máxima de líquido com ou sem PCM é o mesmo, simplesmente o tempo que demora a atingir é diferente.

Verifica-se distintamente três ritmos de crescimento durante o processo de carga de frio. Até aos dois metros de altura a variação de altura de líquido com ou sem PCM é idêntica. Entre a base e o topo do PCM, a velocidade do crescimento da cota de líquido aumenta. Depois de ser atingido o topo do PCM, o ritmo a que ascende o líquido volta a ser diferente.

7.4.3. Resultados $D_{esfera} = 0,75\text{ m}$

A redução do diâmetro das esferas permite aumentar a área de transferência de calor entre a água e o PCM. Na Figura 7-5, está representado a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior o tanque.

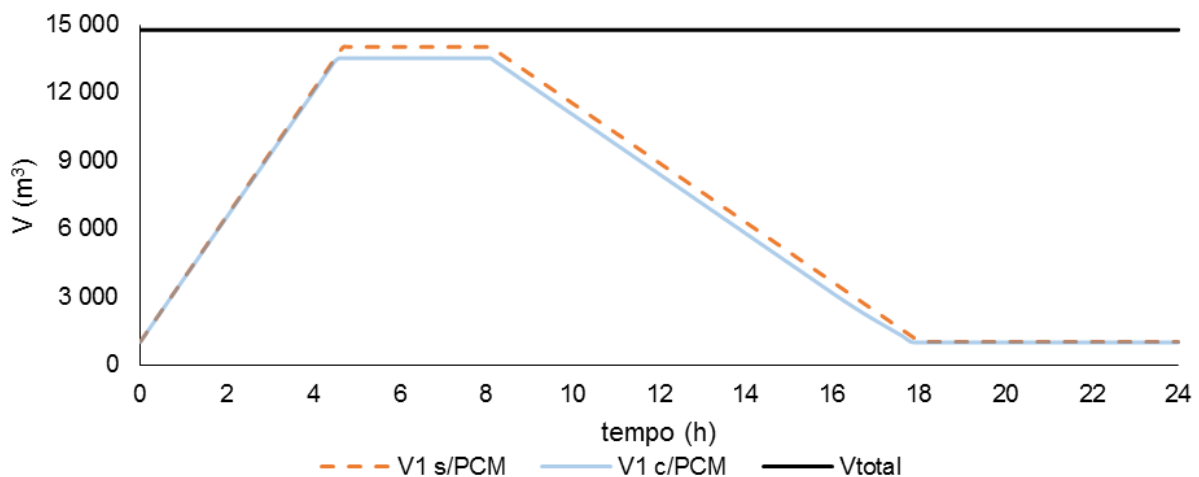


Figura 7-5 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10% de energia e $D_{esfera} = 0,75$ m.

A introdução do PCM, não permite que exista um ganho energético, pois existe uma contração do volume de água fria de 3 °C (V_1), pois o volume V_1 atinge o valor de 1 000 m³ antes das 18 horas que é o que o tanque consegue sem PCM. A inclusão do PCM com um diâmetro de 75 cm não apresenta uma contribuição positiva.

Na Figura 7-6, apresenta-se a quantificação da massa de material mudança de fase que solidifica.

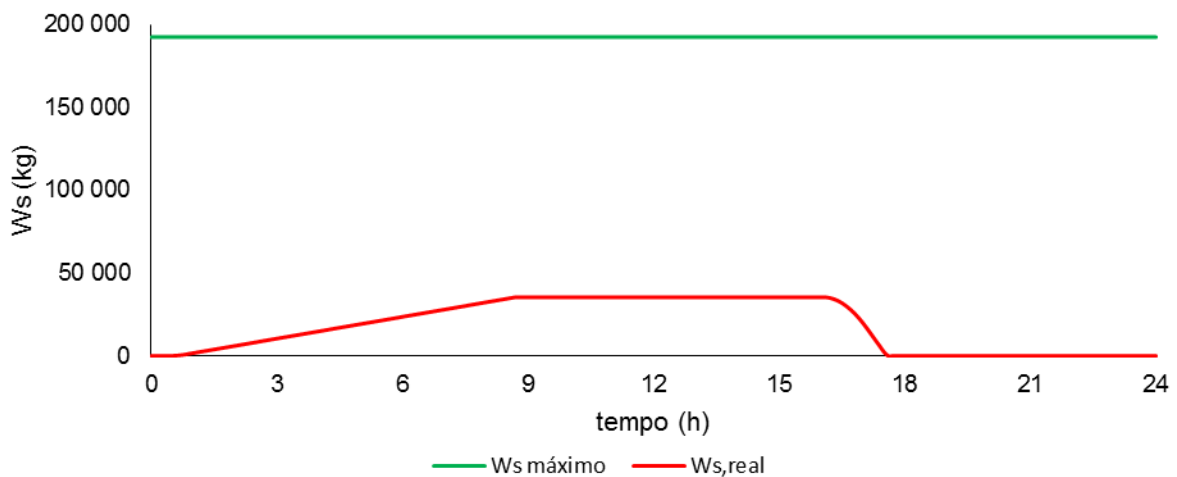


Figura 7-6 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10% de energia e $D_{esfera} = 0,75$ m.

O ritmo de fusão do material mudança de fase é, novamente, muito superior ao de solidificação.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 35 458 kg, embora fosse necessário uma massa de PCM de 216 398 kg, conferindo uma eficiência de 16,4%, indicando que a transferência de calor entre a água do tanque e o PCM é claramente insuficiente.

Na Figura 7-7, pode-se analisar a evolução da cota de líquido de água fria ao longo do tempo no tanque.

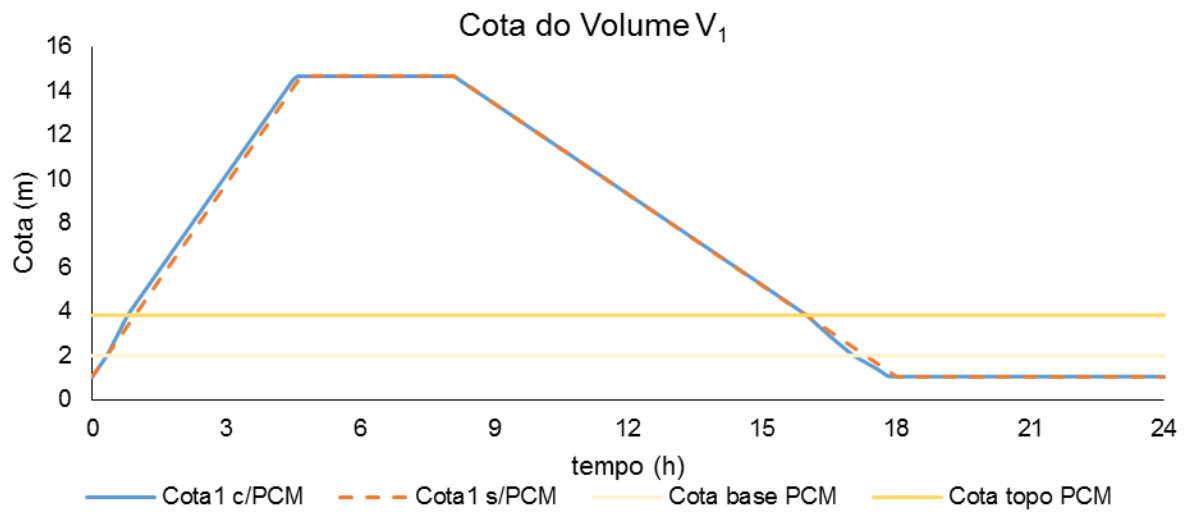


Figura 7-7 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,75$ m.

Como anteriormente, pode-se verificar 3 fases de evolução da cota de líquido de água fria em cada um dos processos.

7.4.4. Resultados $D_{esfera} = 0,5$ m

Na Figura 7-8, está representado a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior do tanque.

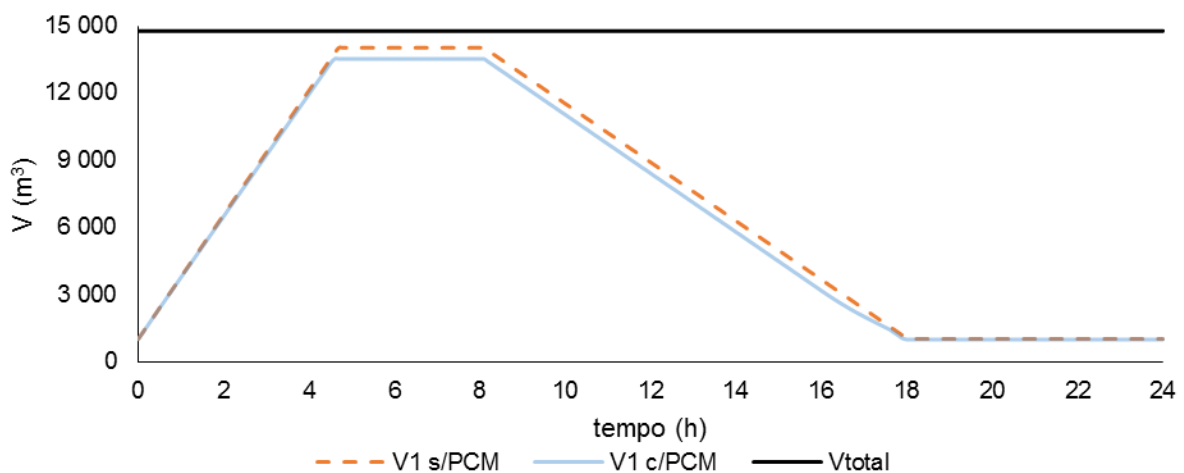


Figura 7-8 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,50$ m.

Com esferas de 50 cm de diâmetro não se consegue obter volume de água fria (V_1) de 1 000 m³ após as 18 horas, pelo que o uso de PCM com este diâmetro não satisfaz o objetivo pretendido.

Na Figura 7-9, apresenta-se a quantificação da massa de material de mudança de fase.

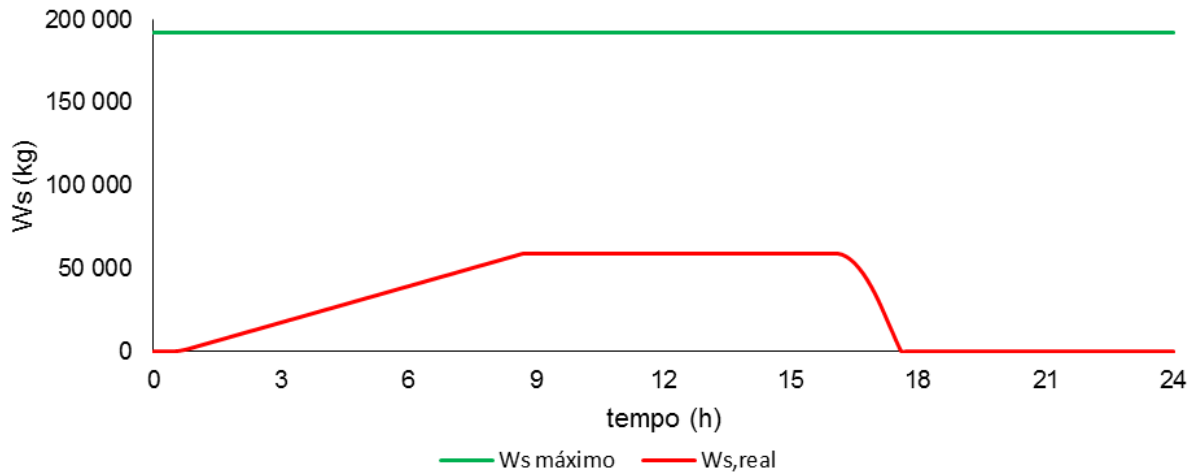


Figura 7-9 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,50$ m.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 59 071 kg, embora fosse necessário uma massa de PCM de 216 398 kg, conferindo uma eficiência de 27,3%. Como a massa de PCM, que na realidade é utilizada para o armazenamento desta quantidade de energia, é inferior a 1/3 o uso do PCM com 50 cm de diâmetro seria de evitar.

Na Figura 7-10, pode-se analisar a evolução da cota de líquido de água fria ao longo do tempo no tanque.

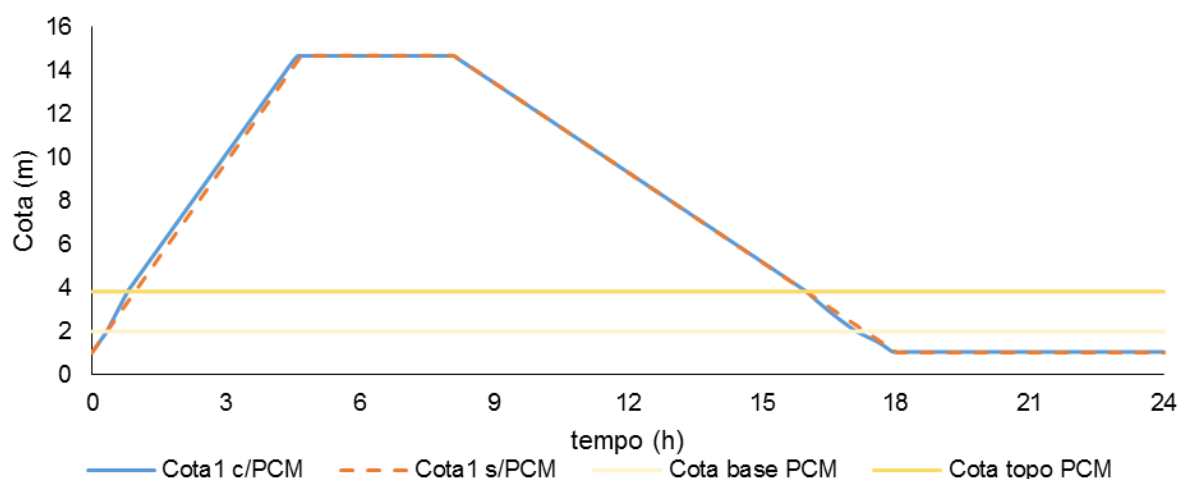


Figura 7-10 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,50$ m.

7.4.5. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,25 \text{ m}$

Na Figura 7-11, está representado a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior o tanque.

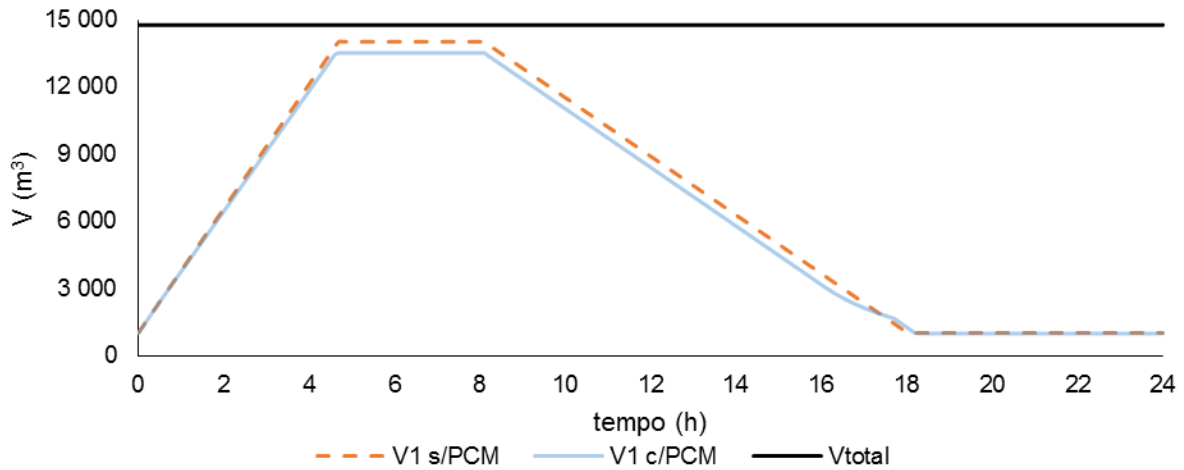


Figura 7-11 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10 % de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,25 \text{ m}$.

Ao se introduzir as esferas de PCM com 25 cm de diâmetro no interior do tanque, atingiu-se o volume de água fria (V_1) de $1\,000 \text{ m}^3$ depois das 18 horas, que é o objetivo da introdução do PCM. Obteve-se uma variação de tempo de 12 minutos, isto quer dizer que o volume V_1 atinge o valor de $1\,000 \text{ m}^3$, 12 minutos depois em comparação com o tanque sem PCM.

Tal acontece pelo facto de que a quantidade de PCM que solidifica/funde ser superior a $1/3$ da quantidade teórica de PCM que seria necessário para armazenar a quantidade de energia necessária, como se verifica pela Figura 7-12 Figura 7-3.

Na Figura 7-12, apresenta-se a quantificação da massa de material de mudança de fase.

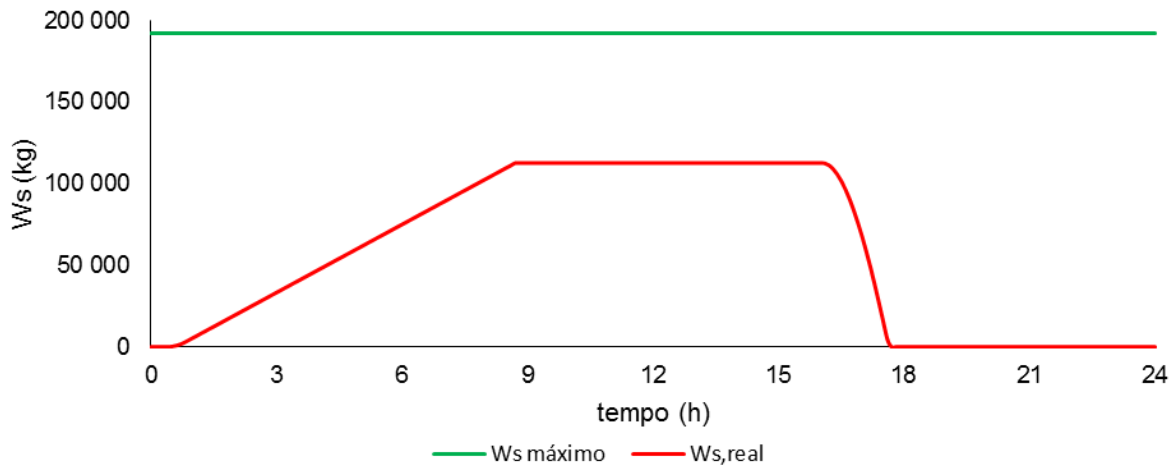


Figura 7-12 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,25$ m.

A velocidade do processo de solidificação e fusão são as mesmas que nos casos anteriores.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 112 661 kg, embora fosse necessário uma massa de PCM de 216 398 kg, conferindo uma eficiência de 52,1%.

Na Figura 7-13, pode-se analisar a evolução da cota de líquido de água fria ao longo do tempo no tanque.

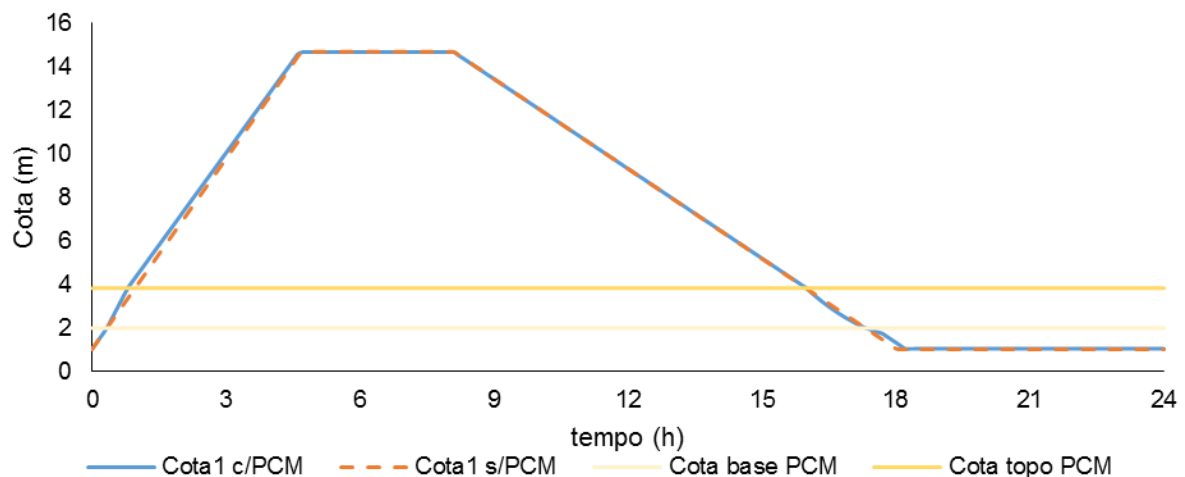


Figura 7-13 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,25$ m.

No processo de descarga, a partir da cota igual a 4 m, a taxa de decréscimo muda a partir dos 2 m de altura pois é coincide com o facto de não existir mais PCM.

7.4.6. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$

Na Figura 7-14, está representado a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior o tanque.

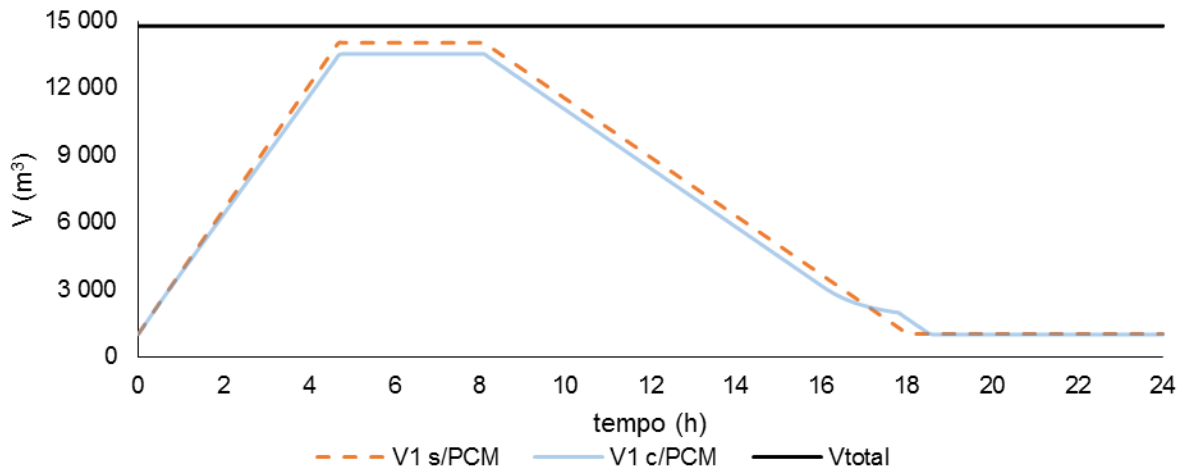


Figura 7-14 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10 % de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,20 \text{ m}$.

Verifica-se que com esferas de 20 cm de diâmetro, o volume de água fria (V_1) atinge o valor de $1\ 000 \text{ m}^3$ num instante posterior quando comparado com o tanque sem PCM, porque a quantidade de PCM que é usada realmente é superior a 1/3 da teórica (ver Figura 7-15). Portanto a utilização de PCM acrescenta utilidade ao que se pretende, obtendo-se um ganho temporal de 30 minutos.

Verifica-se que no processo de descarga tem uma determinada taxa de decréscimo, entre 15,9 e 17,8 h, devido ao facto de o PCM estar a fundir. A partir das 17,8 h, o decréscimo de volume apresenta outro ritmo, porque o PCM encontra-se completamente fundido.

Na Figura 7-15, apresenta-se a quantificação da massa de material de mudança de fase.

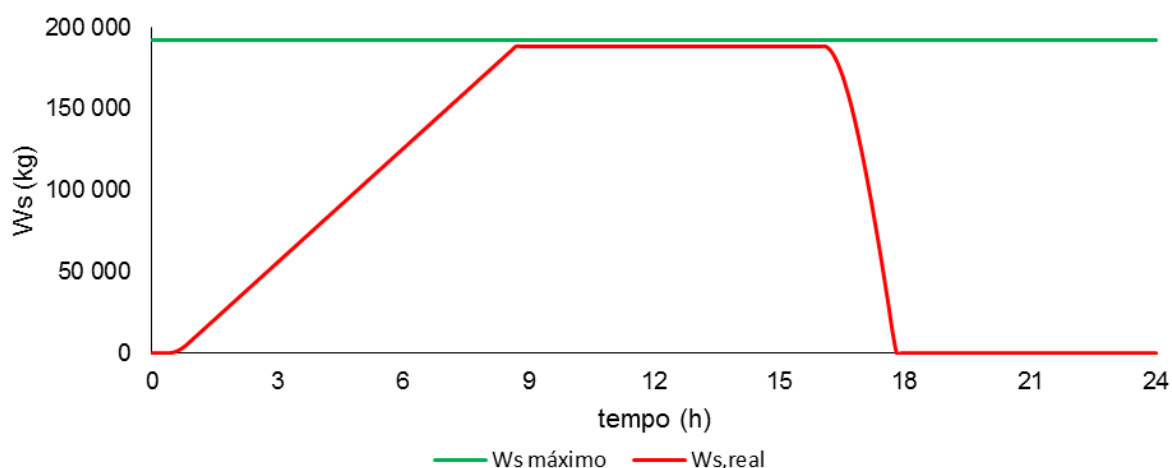


Figura 7-15 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,20$ m.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 188 492 kg, embora fosse necessário uma massa de PCM de 216 398 kg, conferindo uma eficiência de 87,1%.

Na Figura 7-16, pode-se analisar a evolução da cota de líquido de água fria ao longo do tempo no tanque.

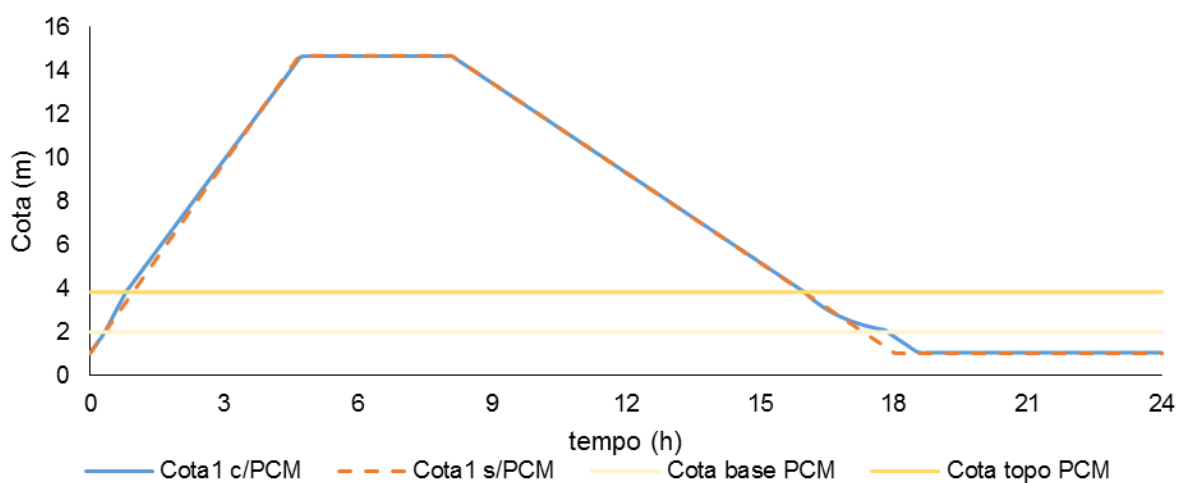


Figura 7-16 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,20$ m.

Contrariamente ao volume, a cota máxima de líquido com ou sem PCM é o mesmo, simplesmente o tempo que demora a atingir é diferente.

Entre a cota 4 e 2, o decréscimo é feito devido ao facto de o PCM se encontrar em fusão, após os 2 m, a taxa de decréscimo é mais acentuada pelo facto de o PCM estar fundido completamente.

7.4.7. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$

Na Figura 7-17, está representado a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior do tanque.

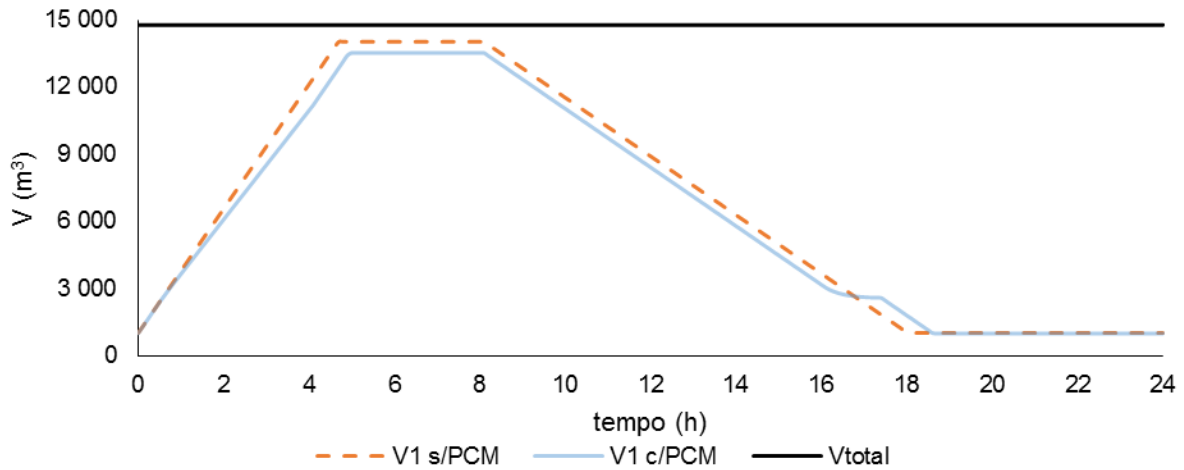


Figura 7-17 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 10 % de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$.

Com esferas de 10 cm de diâmetro, o tanque com o PCM inserido atinge o volume de água fria (V_1) de $1\,000 \text{ m}^3$ num tempo posterior em comparação com o tanque sem PCM. Portanto a utilização de PCM acrescenta utilidade ao que se pretende, obtendo-se um ganho de 36 minutos.

Analisando a Figura 7-18, podemos saber a quantidade de massa de material mudança de fase que solidifica.

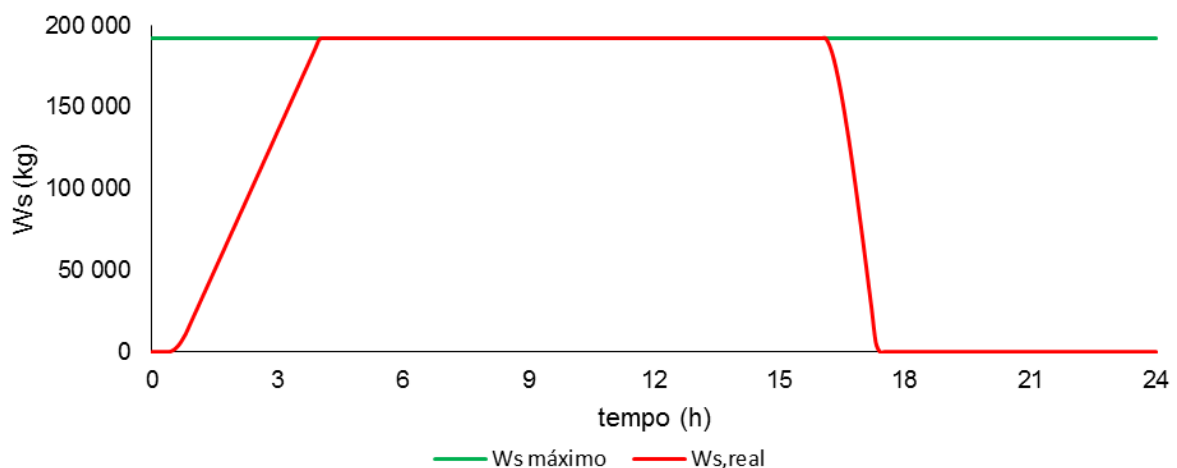


Figura 7-18 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 10 % de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,10 \text{ m}$.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 216 398 kg, conferindo uma eficiência de 100%.

Na Figura 7-19, pode-se analisar a evolução da cota de líquido de água fria ao longo do tempo no tanque.

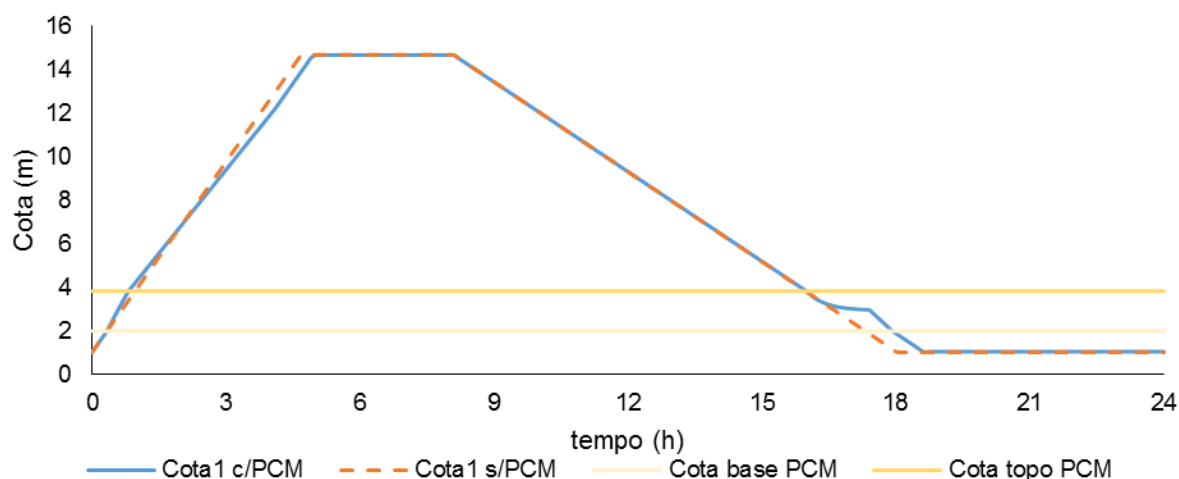


Figura 7-19 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 10 % de energia e $D_{esfera} = 0,10$ m.

Tal como para o diâmetro de 0,2 m, a taxa de decréscimo entre as 15,9 h e 17,6 h, durante o processo de fusão do PCM, e depois das 17,6 h, o decréscimo é constante até aos 1 000 m³.

7.4.8. Compilação de resultados

Na Tabela 7-6, está apresentada um quadro resumo com os resultados obtidos para as diversas simulações para armazenar 10% de energia no tanque.

Tabela 7-6 – Compilação dos resultados obtidos para armazenar 10% de energia.

| D_{PCM} (m) | Número de esferas | Área superficial total (m ²) | h (W·m ⁻² ·K ⁻¹) | $W_{S,máx}$ (kg) | $W_{S,real}$ (kg) | Δt (min) | Ganho energético (MJ) |
|---------------|-------------------|--|---|------------------|-------------------|------------------|-----------------------|
| 1,00 | 537 | 1 687 | 128 | 216 398 | 24 708 | -18 | - |
| 0,75 | 1 271 | 2 246 | 138 | | 35 458 | -12 | - |
| 0,50 | 4 289 | 3 369 | 153 | | 59 071 | -6 | - |
| 0,25 | 19 854 | 5 614 | 175 | | 112 661 | 12 | 25 461 |
| 0,20 | 67 006 | 8 420 | 195 | | 188 492 | 30 | 42 599 |
| 0,10 | 536 045 | 16 840 | 237 | | 216 398 | 36 | 43 472 |

Para as esferas de 1, 0,75 e 0,5 m ocorre alguma redução da água fria disponível no tanque. Na realidade pode considerar-se que, dado que o rácio de eficiência é de cerca de 3, se não houver congelamento de, pelo menos, 1/3 do PCM a introdução desde corresponde a uma redução líquida de capacidade calorífica do tanque na sua globalidade. Em nenhum destes casos se conseguiu uma

solidificação total do material mudança de fase, pois a área de transferência de calor é baixa para armazenar a quantidade de energia que se pretende.

As esferas com 10 cm de diâmetro são as melhores para utilização, pois para além de ser o único caso que apresenta solidificação total do material mudança de fase, é também o que apresenta maior ganho energético em termos da manutenção da descarga de água fria a partir do tanque de armazenamento.

7.5. Armazenamento de 20%

No subcapítulo 7.1. obteve-se o valor para o volume de PCM, para armazenar 20% do que o tanque já armazena. Em seguida é necessário calcular o número de esferas que são necessárias ter para armazenar o que se pretende.

7.5.1. Número de esferas

Fez-se simulações com vários de diâmetros de esferas.

Tabela 7-7 – Número de esferas e área transferência do material mudança de fase.

| V_{PCM} (m^3) | D_{PCM} (m) | V_{esfera} (m^3) | Número de esferas | Área superficial do PCM (m^2) | Área superficial total (m^2) |
|------------------------|------------------|---------------------------|----------------------|---|---|
| 561 | 1,00 | 0,524 | 1 073 | 3,14 | 3 371 |
| | 0,75 | 0,221 | 2 542 | 1,77 | 4 492 |
| | 0,50 | 0,065 | 8 577 | 0,79 | 6 736 |
| | 0,25 | 0,014 | 39 707 | 0,28 | 11 227 |
| | 0,20 | 0,004 | 134 012 | 0,13 | 16 840 |
| | 0,10 | 0,001 | 1 072 089 | 0,03 | 33 681 |

Para esta quantidade de armazenamento de energia, é necessário saber as cotas da base e do topo dos módulos esféricos, (ver Figura 7-1, página 36). A base do PCM é definida a 2 m e a cota do topo é a 4,3 m. A diferença entre estes dois valores representa o recipiente onde estão inseridos os módulos esféricos.

De seguida são apresentados os resultados das simulações para cada um dos valores do diâmetro usado nas esferas. De todas as simulações realizadas, apresentam-se, graficamente, somente dois exemplos, para 20 e 10 cm.

7.5.2. Resultados $D_{esfera} = 0,2$ m

Na Figura 7-20, está representado a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior o tanque.

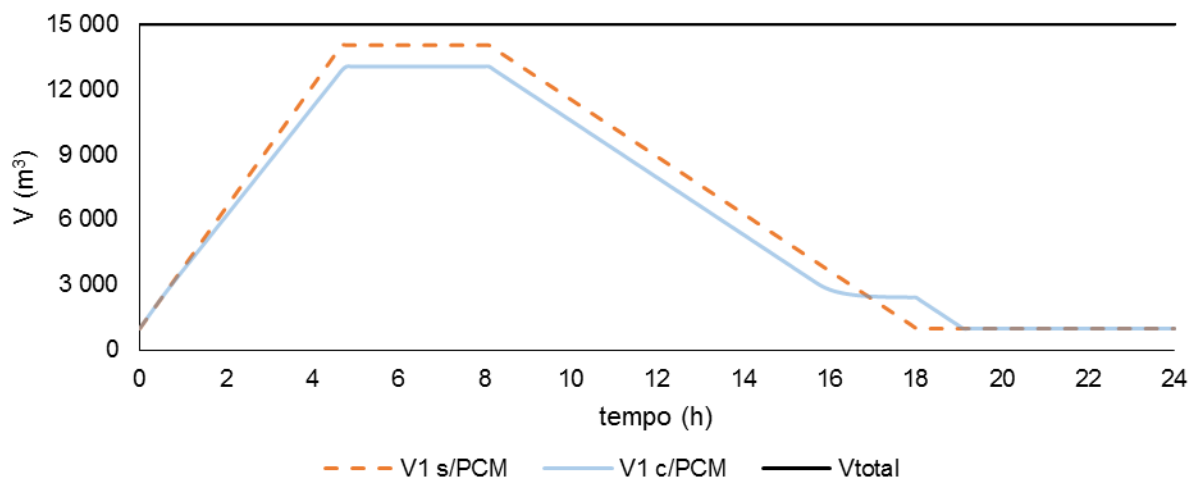


Figura 7-20 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 20% de energia e $D_{esfera} = 0,2 m$.

Verifica-se que com esferas de 20 cm de diâmetro, a inserção do material de mudança de fase faz com que o tanque atinja um volume de água fria V_1 de $1\ 000\ m^3$ num tempo posterior em comparação com o tanque sem PCM. Portanto a utilização de PCM acrescenta utilidade ao que se pretende, obtendo-se um ganho temporal de água fria V_1 de 60 minutos. Verifica-se que no processo de descarga tem uma determinada taxa de decréscimo, entre 15,6 e 18,0 h, devido ao facto de o PCM estar a fundir. A partir das 18,0 h, o decréscimo de volume apresenta outro ritmo, porque o PCM encontra-se completamente fundido.

Analisando a Figura 7-21, podemos saber a quantidade de massa de material mudança de fase que solidifica.

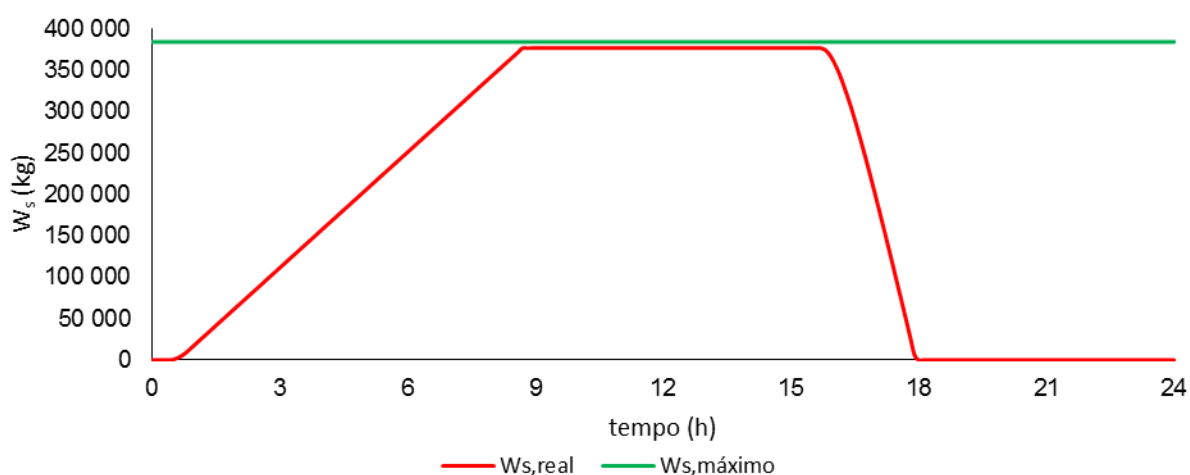


Figura 7-21 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 20% de energia e $D_{esfera} = 0,2 m$.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 377 053 kg, embora fosse necessário uma massa de PCM de 432 796 kg, conferindo uma eficiência de 87,1%.

Na Figura 7-22, pode-se analisar a evolução da cota de líquido de água fria ao longo do tempo no tanque.

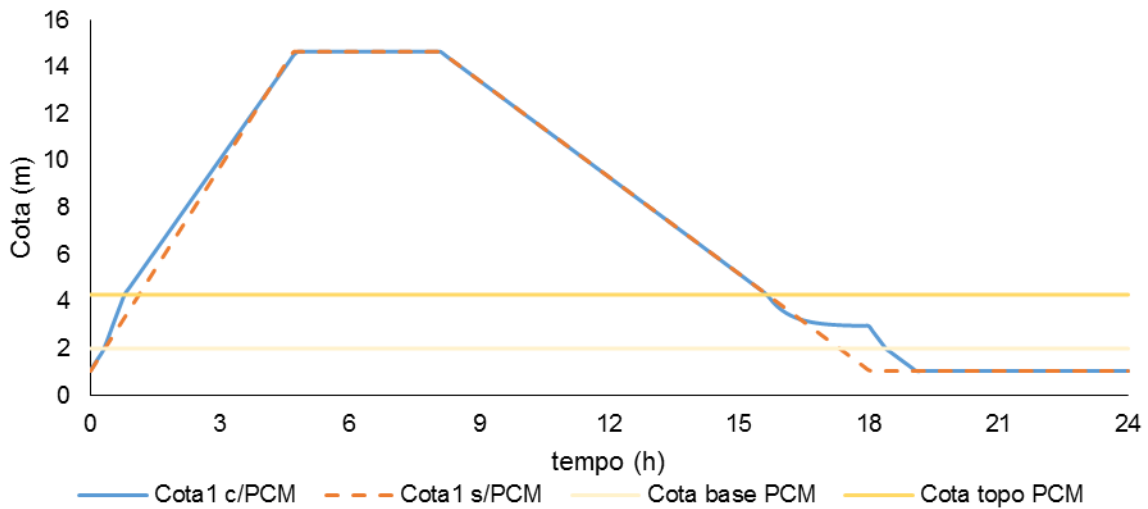


Figura 7-22 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 20% de energia e $D_{esfera} = 0,2$ m.

Entre a cota 4,3 e 2, o decréscimo é feito devido ao facto de o PCM se encontrar em fusão, após os 2 m, a taxa de decréscimo é mais acentuada pelo facto de o PCM estar fundido completamente.

7.5.3. Resultados $D_{esfera} = 0,1$ m

Na Figura 7-23, está representado a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior o tanque.

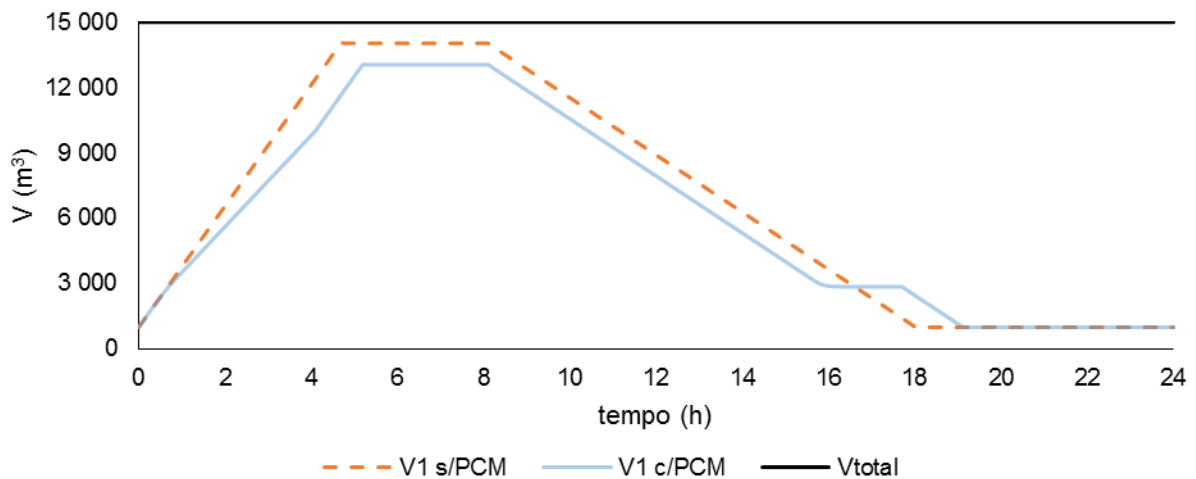


Figura 7-23 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 20% de energia e $D_{esfera} = 0,1$ m.

Verifica-se que com esferas de 10 cm de diâmetro, o tanque com o PCM inserido atinge o volume de água fria V_1 de 1 000 m³ num tempo mais avançado em comparação com o tanque sem PCM que atinge o mesmo valor ao final de 18 horas. Portanto a utilização de PCM acrescenta utilidade ao que se pretende, obtendo-se um ganho de 66 minutos.

O período de solidificação do PCM é entre as 0,5 e as 4,1 horas, o que se verifica pela taxa de crescimento menos acentuada na Figura 7-23.

Analisando a Figura 7-24, podemos saber a quantidade de massa de material mudança de fase que solidifica.

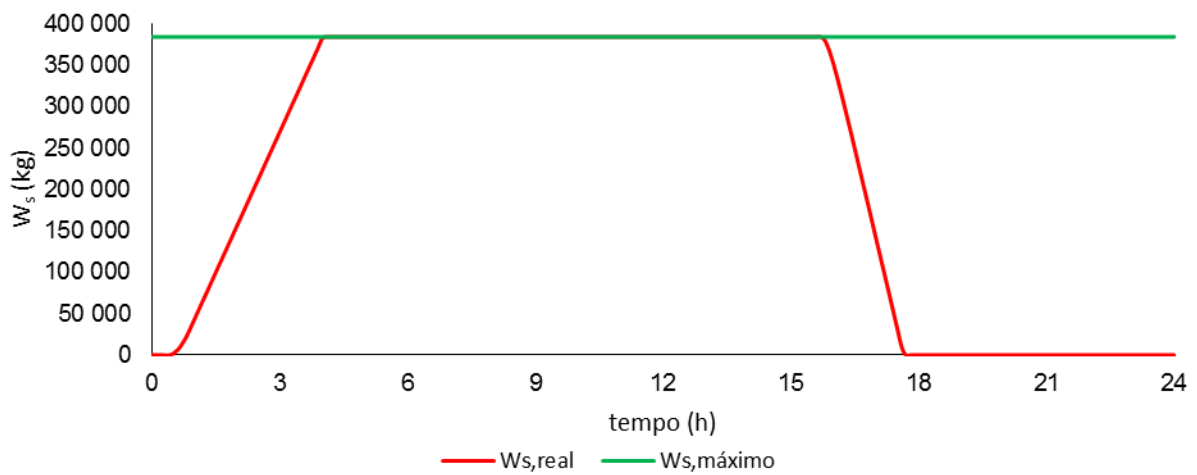


Figura 7-24 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 20% de energia e $D_{esfera} = 0,1$ m.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 432 796 kg, conferindo uma eficiência de 100%.

Na Figura 7-25, pode-se analisar a evolução da cota de líquido de água fria ao longo do tempo no tanque.

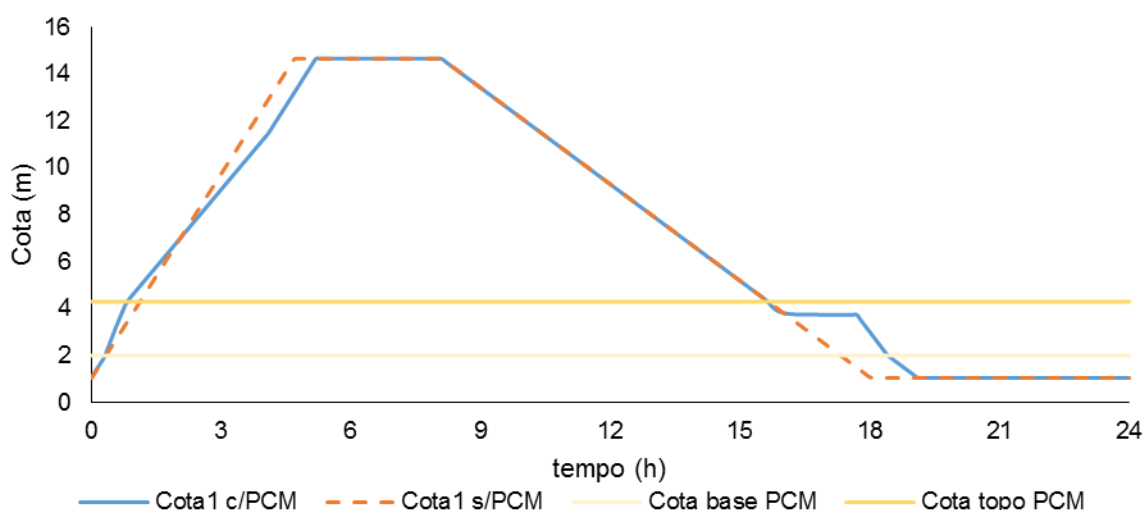


Figura 7-25 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 20% de energia e $D_{esfera} = 0,1$ m.

Entre o PCM, verifica-se que a taxa de decréscimo apresenta 2 variações diferentes. Entre as 15,6 h e as 17,7 h, o decréscimo resulta da fusão do PCM, no entanto entre as 17,7 h e as 18,4 h o decréscimo deve-se ao facto de o líquido estar ainda a atravessar o PCM embora este já esteja fundido.

7.5.4. Compilação de resultados

Na Tabela 7-8, está apresentada um quadro resumo com os resultados obtidos para as diversas simulações para armazenar 20% de energia no tanque.

Tabela 7-8 – Compilação dos resultados obtidos para armazenar 20% de energia.

| D_{PCM} (m) | Número de esferas | Área superficial total (m^2) | h ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) | $W_{S,máx}$ (kg) | $W_{S,real}$ (kg) | Δt (min) | Ganho energético (MJ) |
|---------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------------|
| 1,00 | 1 073 | 2 294 | 128 | 432 796 | 49 385 | -30 | - |
| 0,75 | 2 542 | 3 992 | 138 | | 79 914 | -24 | - |
| 0,50 | 8 577 | 5 988 | 153 | | 118 187 | -12 | - |
| 0,25 | 39 707 | 9 980 | 175 | | 225 389 | 24 | 50 938 |
| 0,20 | 134 012 | 14 969 | 195 | | 377 053 | 60 | 85 214 |
| 0,10 | 1 072 089 | 29 938 | 237 | | 432 796 | 66 | 86 994 |

As esferas com 10 cm de diâmetro são as melhores (das que foram estudadas) para utilização, pois para além de serem as únicas que apresentam solidificação total do material mudança de fase, são também as que apresentam maior ganho energético de água fria.

7.6. Armazenamento de 30%

No subcapítulo 7.1. obteve-se o valor para o volume de PCM, para armazenar 30% do que o tanque já armazena. Em seguida é necessário calcular o número de esferas que são necessárias ter para armazenar o que se pretende.

7.6.1. Número de esferas

Fizeram-se simulações com vários de diâmetros de esferas.

Tabela 7-9 – Número de esferas e área transferência do material mudança de fase.

| V_{PCM} (m^3) | D_{PCM} (m) | V_{esfera} (m^3) | Número de esferas | Área superficial do PCM (m^2) | Área superficial total (m^2) |
|------------------------|------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 842 | 1,00 | 0,524 | 1 609 | 3,14 | 5 055 |
| | 0,75 | 0,221 | 3 812 | 1,77 | 6 736 |
| | 0,50 | 0,065 | 12 866 | 0,79 | 10 105 |
| | 0,25 | 0,014 | 59 561 | 0,28 | 16 840 |
| | 0,20 | 0,004 | 201 017 | 0,13 | 25 261 |
| | 0,10 | 0,001 | 1 608 133 | 0,03 | 50 521 |

Para esta quantidade de armazenamento de energia, é necessário saber as cotas da base e do topo dos módulos esféricos. A base do PCM é definida a 2 m e a cota do topo é a 4,63 m. A diferença entre estes dois valores representa o recipiente onde estão inseridos os módulos esféricos.

7.6.2. Resultados $D_{esfera} = 0,2$ m

Na Figura 7-26, está representada a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o material de mudança de fase está inserido no interior do tanque.

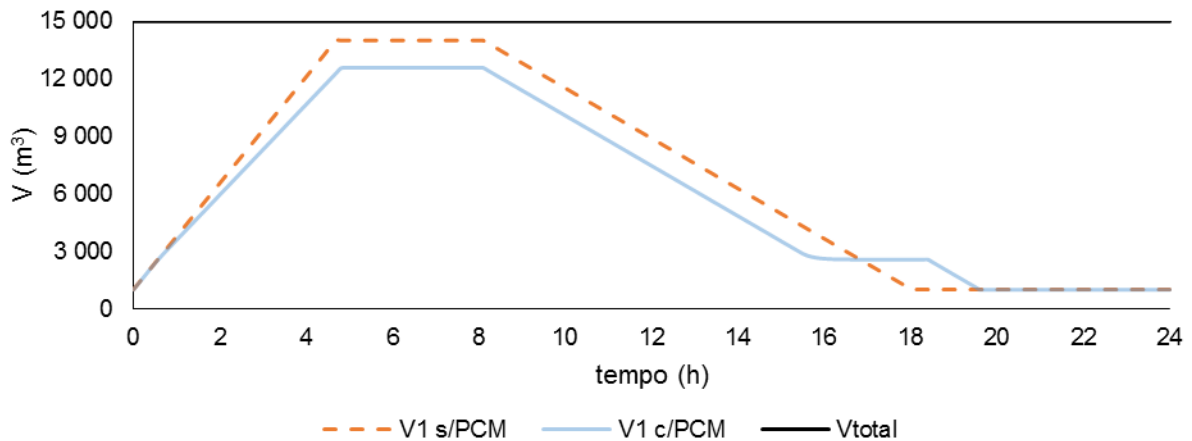


Figura 7-26 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 30% de energia e $D_{esfera} = 0,2 m$.

Verifica-se que com esferas de 20 cm de diâmetro, o material de mudança de fase faz com que o tanque atinja o volume mínimo de água fria V_1 1 000 m^3 num tempo posterior em comparação com o tanque sem PCM. Portanto a utilização de PCM acrescenta utilidade ao que se pretende, obtendo-se um ganho de 90 minutos. Verifica-se que no processo de descarga tem uma determinada taxa de decréscimo, entre 15,4 e 18,4 h, devido ao facto de o PCM estar a fundir. A partir das 18,4 h, o decréscimo de volume apresenta outro ritmo, porque o PCM encontra-se completamente fundido.

Analisando a Figura 7-27, podemos saber a quantidade de massa de material mudança de fase que solidifica.

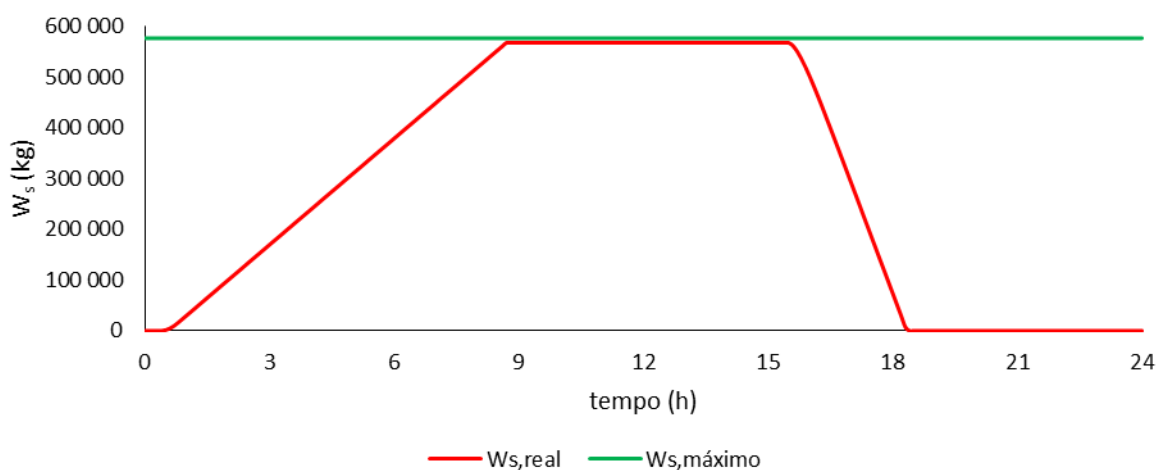


Figura 7-27 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 30% de energia e $D_{esfera} = 0,2 m$.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 569 971 kg, conferindo uma eficiência de 87,8%.

Na Figura 7-28, pode-se analisar a evolução da cota de líquido de água fria ao longo do tempo no tanque.

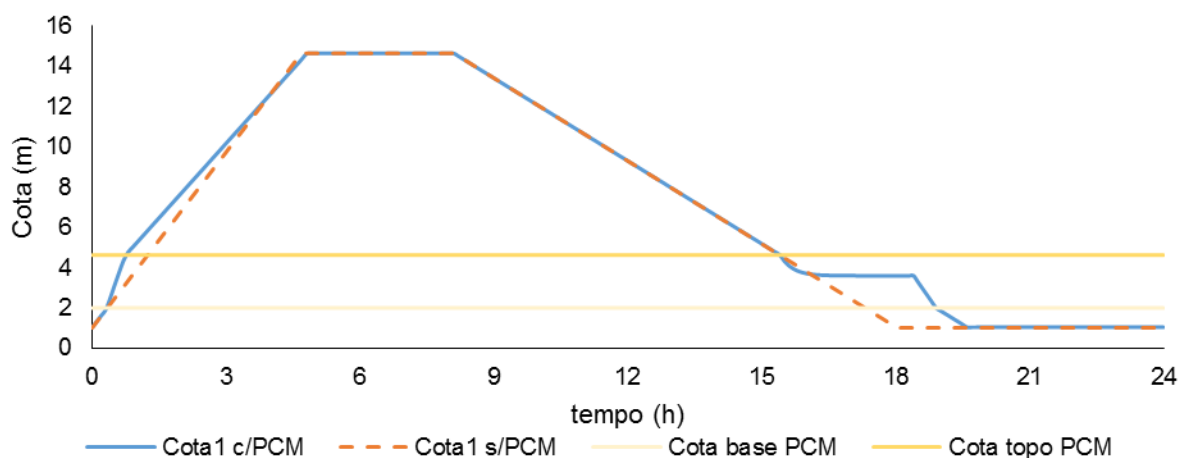


Figura 7-28 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 30% de energia e $D_{esfera} = 0,2$ m.

Contrariamente ao volume, a cota máxima de líquido com ou sem PCM é o mesmo, simplesmente o tempo que demora a atingir é diferente.

Entre a cota 4,63 e 2, o decréscimo é feito devido ao facto de o PCM se encontrar em fusão, após os 2 m, a taxa de decréscimo é mais acentuada pelo facto de o PCM estar fundido completamente.

7.6.3. Resultados $D_{esfera} = 0,1$ m

Na Figura 7-29, está representado a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior o tanque.

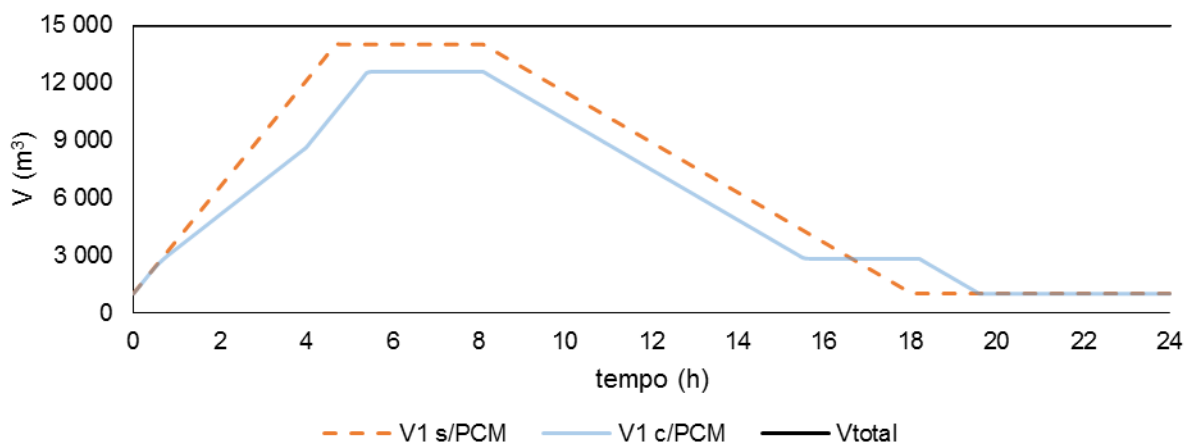


Figura 7-29 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 30% de energia e $D_{esfera} = 0,1$ m.

Verifica-se que com esferas de 10 cm de diâmetro, o tanque com o PCM inserido atinge o volume mínimo de 1 000 m³ num tempo posterior em comparação com o tanque sem PCM. Portanto a utilização de PCM acrescenta utilidade ao que se pretende, obtendo-se um ganho de 90 minutos.

O período de solidificação do PCM é entre as 0,5 e as 4,0 horas, o que se verifica pela taxa de crescimento menos acentuada na Figura 7-29.

Analisando a Figura 7-30, podemos saber a quantidade de massa de material mudança de fase que solidifica.

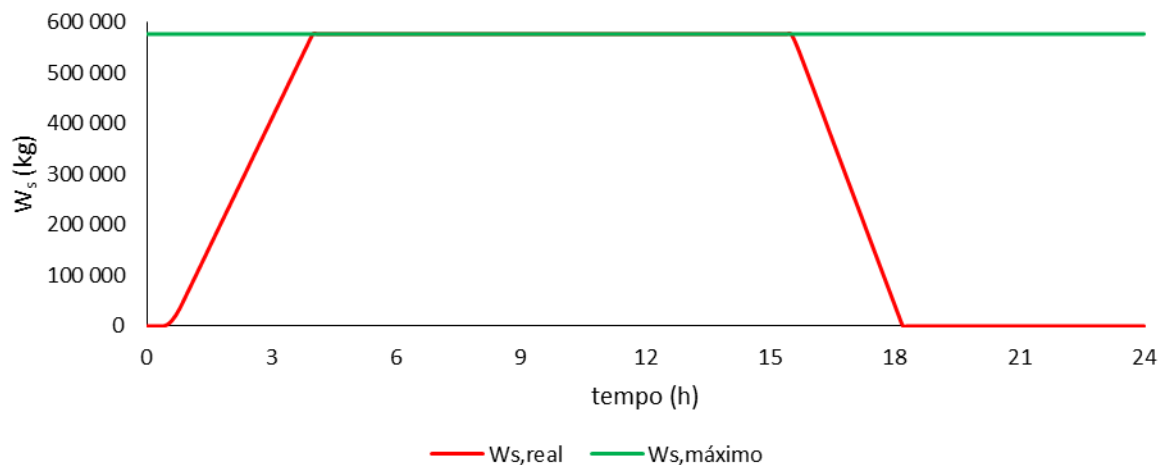


Figura 7-30 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 30% de energia e $D_{esfera} = 0,1$ m.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 577 062 kg, conferindo uma eficiência de 100%.

Na Figura 7-31, pode-se analisar a evolução da cota de líquido de água fria ao longo do tempo no tanque.

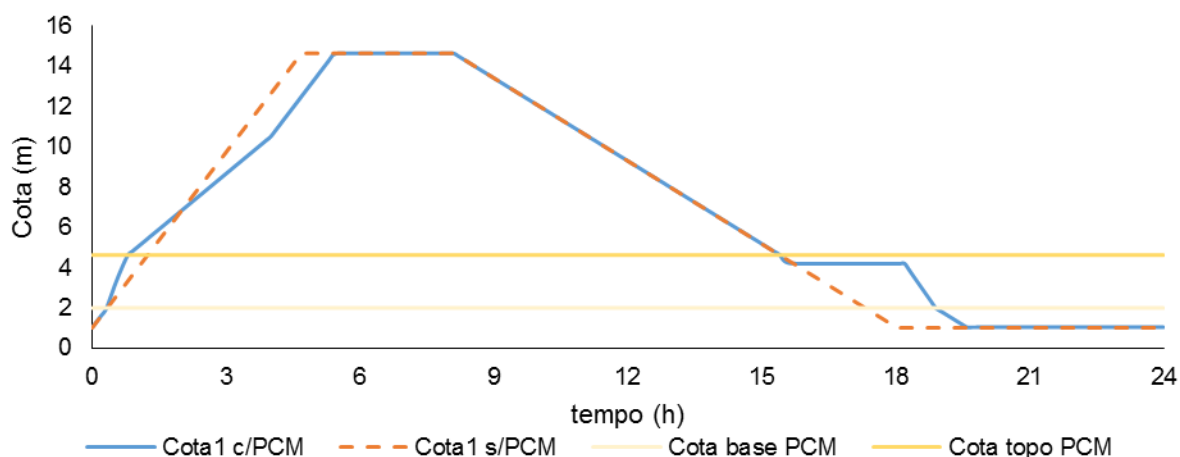


Figura 7-31 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 30% de energia e $D_{esfera} = 0,1$ m.

Entre o PCM, verifica-se que a taxa de decréscimo apresenta 2 variações diferentes. Entre as 15,4 h e as 18,1 h, o decréscimo resulta da fusão do PCM, no entanto entre as 18,1 h e as 18,9 h o decréscimo deve-se ao facto de o líquido estar ainda a atravessar o PCM embora este já esteja fundido.

7.6.4. Compilação de resultados

Na Tabela 7-10, está apresentada um quadro resumo com os resultados obtidos para as diversas simulações para armazenar 30% de energia no tanque.

Tabela 7-10 – Compilação dos resultados obtidos para armazenar 30% de energia.

| D_{PCM} (m) | Número de esferas | Área superficial total (m^2) | h ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) | $W_{S,máx}$ (kg) | $W_{S,real}$ (kg) | Δt (min) | Ganho energético (MJ) |
|---------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------------|
| 1,00 | 1 609 | 5 055 | 128 | 649 195 | 74 805 | -48 | - |
| 0,75 | 3 812 | 6 736 | 138 | | 107 230 | -36 | - |
| 0,50 | 12 866 | 10 105 | 153 | | 178 409 | -18 | - |
| 0,25 | 59 561 | 16 840 | 175 | | 339 775 | 30 | 76 789 |
| 0,20 | 201 017 | 25 261 | 195 | | 569 971 | 90 | 128 813 |
| 0,10 | 1 608 133 | 50 521 | 237 | | 649 195 | 90 | 130 416 |

As esferas com 10 cm de diâmetro são as melhores para utilização, pois para além de ser o único que apresenta solidificação total do material mudança de fase, é também o que apresenta maior ganho energético de água fria.

7.7. Armazenamento de 50%

No subcapítulo 7.1. obteve-se o valor para o volume de PCM, para armazenar 50% do que o tanque já armazena. Em seguida é necessário calcular o número de esferas que são necessárias ter para armazenar o que se pretende.

7.7.1. Número de esferas

Para esta quantidade de energia, realizou-se o estudo apenas para esferas com diâmetro de 0,20 e 0,10 m.

Tabela 7-11 – Número de esferas e área transferência do material mudança de fase.

| V_{PCM} (m^3) | D_{PCM} (m) | V_{esfera} (m^3) | Número de esferas | Área superficial do PCM (m^2) | Área superficial total (m^2) |
|------------------------|------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 403 | 0,20 | 0,004 | 42 101 | 0,13 | 335 028 |
| | 0,10 | 0,001 | 84 202 | 0,03 | 2 680 222 |

Para esta quantidade de armazenamento de energia, é necessário saber as cotas da base e do topo dos módulos esféricos, ver Figura 7-1. A base do PCM é definida a 2 m e a cota do topo é a 5,12 m. A diferença entre estes dois valores representa o recipiente onde estão inseridos os módulos esféricos.

7.7.2. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$

Na Figura 7-32, está representada a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior o tanque.

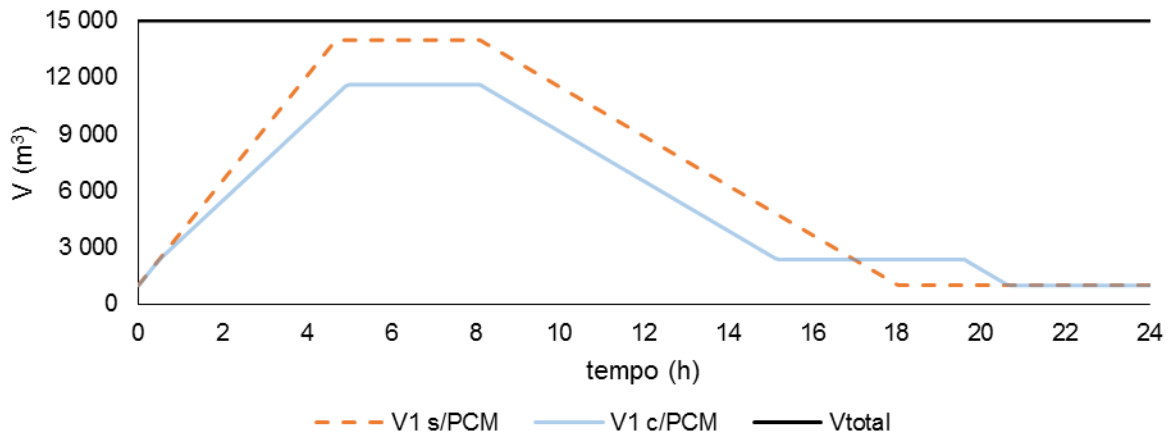


Figura 7-32 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 50% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,2 \text{ m}$.

Verifica-se que com esferas de 20 cm de diâmetro, o tanque com o PCM inserido atinge o volume de água fria V_1 de $1\ 000 \text{ m}^3$ num tempo posterior em comparação com o tanque sem PCM. Portanto a utilização de PCM acrescenta utilidade ao que se pretende, obtendo-se um ganho de 156 minutos. Verifica-se que no processo de descarga tem uma determinada taxa de decréscimo, entre 15,0 e 19,6 h, devido ao facto de o PCM estar a fundir. A partir das 19,6 h, o decréscimo de volume apresenta outro ritmo, porque o PCM encontra-se completamente fundido.

Analisando a Figura 7-33, podemos saber a quantidade de massa de material mudança de fase que solidifica.

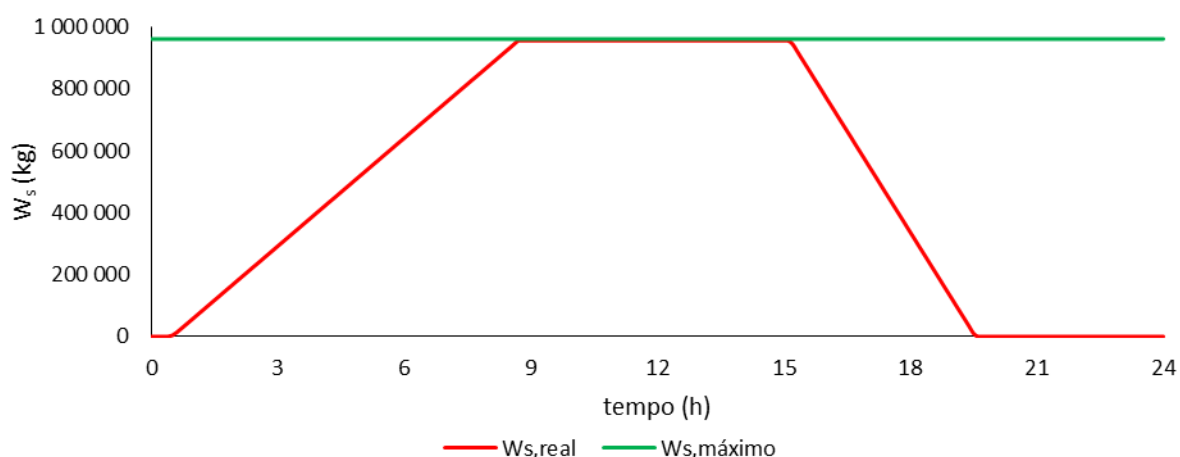


Figura 7-33 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 50% de energia e $D_{esfera} = 0,2$ m.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 956 058 kg, conferindo uma eficiência de 88,3%.

Na Figura 7-34, pode-se analisar a evolução da cota de líquido de água fria ao longo do tempo no tanque.

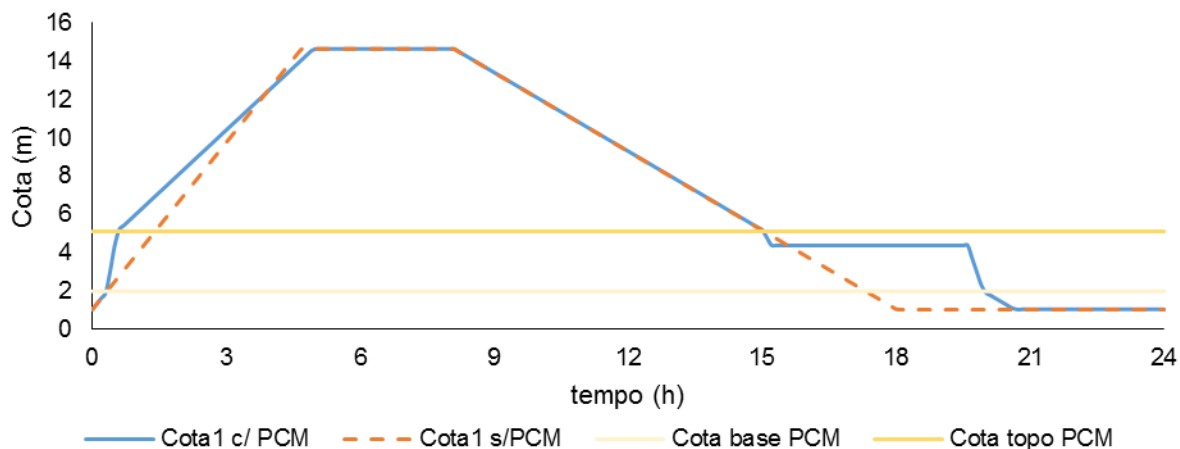


Figura 7-34 – Evolução da cota de líquido de água fria, para 50% de energia e $D_{esfera} = 0,2$ m.

Contrariamente ao volume, a cota máxima de líquido com ou sem PCM é o mesmo, simplesmente o tempo que demora a atingir é diferente.

Entre a cota 5,12 e 2, o decréscimo da cota de líquido é devido à fusão de PCM até às 19,6 h. Entre as 19,6 e as 20,0 h a taxa de decréscimo deve-se ao facto de o líquido ainda estar a atravessar o PCM.

7.7.3. Resultados $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$

Na Figura 7-35, está representado a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior o tanque.

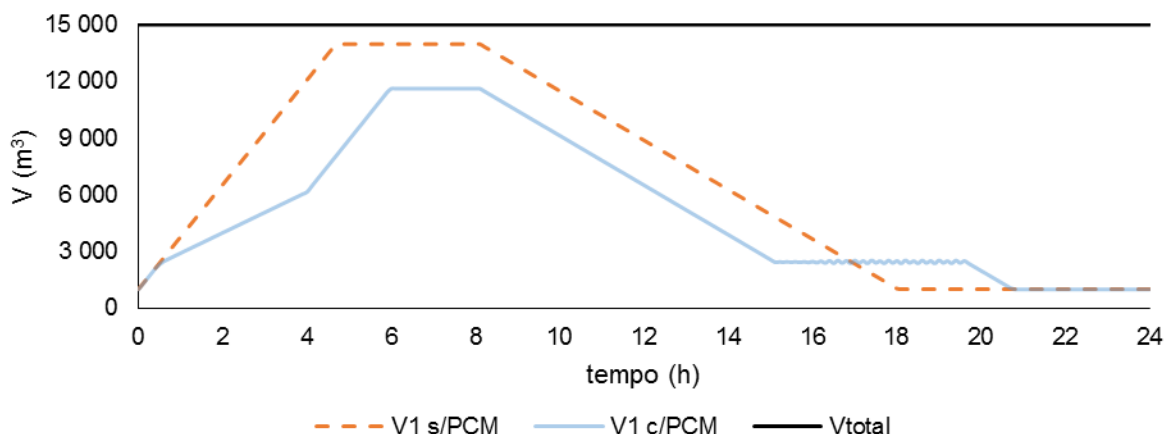


Figura 7-35 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 50% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$.

Verifica-se que com esferas de 0,1 m de diâmetro, o processo de descarga de frio apresenta oscilações na variação do volume, o que representa um problema numérico. Decidiu-se alterar o rácio D/H de 10 para 5, para ver as alterações que este coeficiente implica.

7.7.4. Compilação de resultados

Na Tabela 7-12, está apresentada um quadro resumo com os resultados obtidos para as diversas simulações para armazenar 50% de energia no tanque.

Tabela 7-12 – Compilação dos resultados obtidos para armazenar 50% de energia.

| D_{PCM} (m) | Número de esferas | Área superficial total (m^2) | h ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) | $W_{\text{S,máx}}$ (kg) | $W_{\text{S,real}}$ (kg) | Δt (min) | Ganho energético (MJ) |
|----------------------|-------------------|---|--|-------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|
| 0,20 | 335 028 | 22 454 | 195 | 1 081 991 | 956 058 | 156 | 216 069 |
| 0,10 | 2 680 222 | 44 908 | 237 | | 1 081 991 | 162 | 217 360 |

As esferas com 10 cm de diâmetro são as melhores para utilização, pois para além de ser o único que apresenta solidificação total do material mudança de fase, é também o que apresenta maior ganho energético de água fria. As esferas de 20 cm são uma boa escolha, solidificando 99% da quantidade de material de mudança de fase.

7.7.5. Simulação $D/H_{\text{recipiente}} = 5$

Fez-se a simulação para esferas com diâmetro de 10 cm, mas agora para um recipiente com uma razão diâmetro/altura de 5.

Na Figura 7-36, está representado a variação do volume de água fria ao longo do tempo quando o tanque tem o material de mudança de fase no interior o tanque.

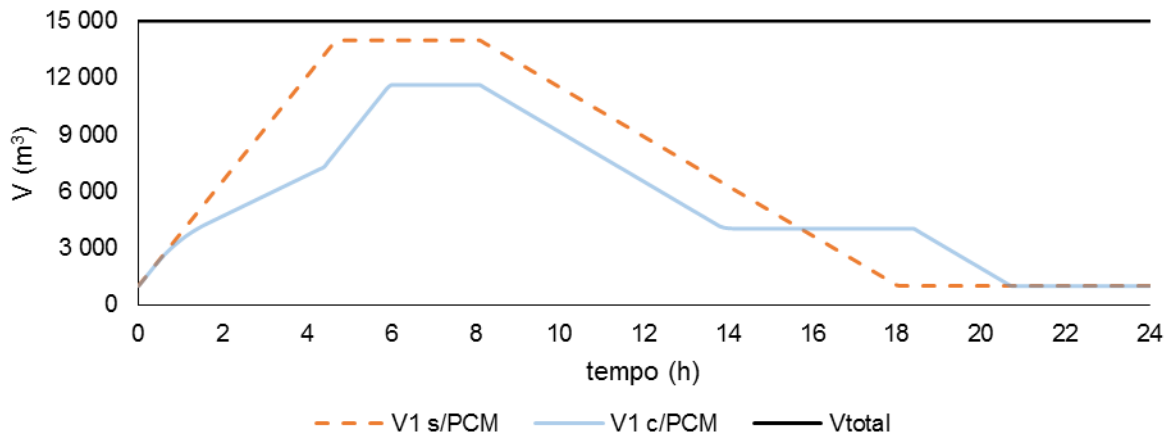


Figura 7-36 – Variação do volume de água fria V_1 com PCM e sem PCM ao longo do tempo, para 50% de energia e $D_{\text{esfera}} = 0,1 \text{ m}$.

Verifica-se que com esferas de 10 cm de diâmetro, o material de mudança de fase atinge o volume mínimo de $1\,000 \text{ m}^3$ num tempo posterior em comparação com o tanque sem PCM. Portanto a utilização de PCM acrescenta utilidade ao que se pretende, obtendo-se um ganho de 162 minutos. Verifica-se que no processo de descarga tem uma determinada taxa de decréscimo, entre 13,8 e 18,4 h, devido ao facto de o PCM estar a fundir. A partir das 18,4 h, o decréscimo de volume apresenta outro ritmo, porque o PCM encontra-se completamente fundido.

Analisando a Figura 7-37, podemos saber a quantidade de massa de material mudança de fase que solidifica.

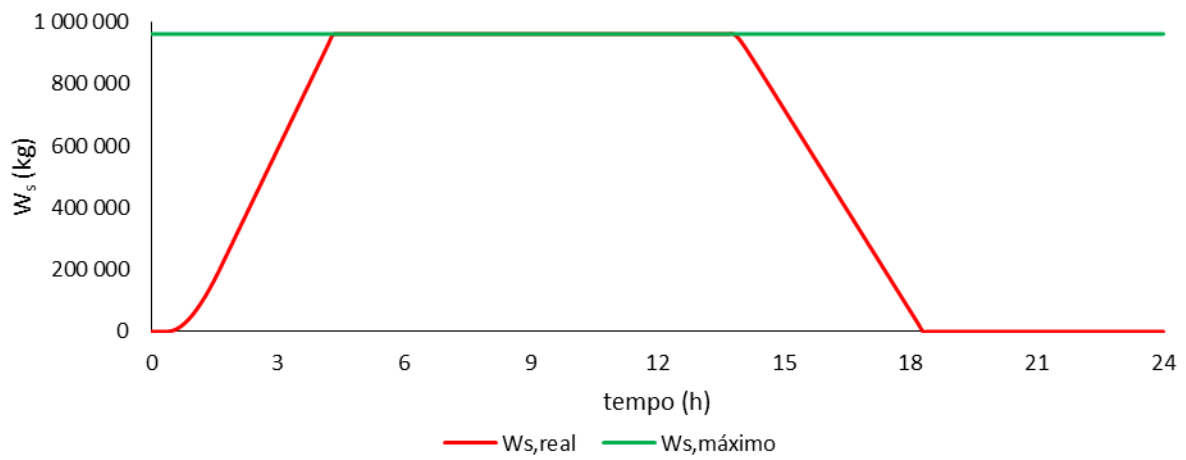


Figura 7-37 – Massa de PCM no processo de carga e descarga de frio, para 50% energia e $D_{esfera} = 0,1$ m.

A quantidade de massa de material de mudança de fase que solidifica é de 577 062 kg, conferindo uma eficiência de 100%. O processo de solidificação demora 234 minutos e o de fusão 276 minutos.

8. Conclusões

Existem dois tipos de sistemas para armazenamento de energia térmica: armazenamento de calor sensível e de calor latente. Esta tese foi desenvolvida para expor os sistemas de calor latente, sendo que este sistema é utilizado através de materiais de mudança de fase.

Embora ainda existam problemas com esta tecnologia, como a separação de fases, sobreaquecimento e risco de chama, que necessitam de ser abordados antes de estes sistemas se tornarem favoráveis como sistemas de armazenamento de calor latente.

Para as gamas de temperaturas associadas ao tanque de água fria, o melhor PCM é o tetradecano, sendo as parafinas orgânicas um material com elevados ciclos de mudança de fase, sem degradação do próprio.

O armazenamento de energia no material mudança de fase escolhido (C-14) apresenta um ratio de eficiência de 2,76, pelo que se consegue armazenar 2,76 vezes mais energia em 1 m³ de PCM do que em 1 m³ de água.

As esferas de parafina de PCM têm um inconveniente pois possuem um baixo valor de condutividade térmica. Pelo que no seu interior têm agulhas metálicas de modo a aumentar a condutividade térmica efetiva. A cápsula é constituída 99 % por PCM e 1 % por agulhas metálicas.

Para esferas com diâmetros de 1, 0,75 e 0,50 m não se verificou um ganho útil de volume de água para que esta pudesse ser usada num maior período tempo do que já se verifica no tanque sem o material mudança de fase, antes pelo contrário, parecia sempre ocorrer alguma redução da água fria disponível no tanque uma vez que a introdução do PCM ocupa algum volume que estaria disponível para a água. Na realidade pode considerar-se que, dado que o rácio de eficiência é de cerca de 3, se não houver congelamento de, pelo menos, 1/3 do PCM a introdução desde corresponde a uma redução líquida de capacidade calorífica do tanque na sua globalidade. Em nenhum destes casos se conseguiu uma solidificação total do material mudança de fase, pois a área de transferência de calor é baixa para armazenar a quantidade de energia que se pretende.

As esferas com 25, 20 e 10 cm, independentemente da quantidade de energia que se pretenda armazenar, apresentam ganhos úteis de volume para além das 18 horas que é atualmente o estado do tanque. Quanto menor o diâmetro das esferas, maior é a utilidade do PCM, isto é consegue-se obter volume de água fria para além das 18 horas.

O diâmetro de 10 cm é o ótimo de utilização, porque para além de ser o que apresenta maior utilidade, é o que apresenta a solidificação e fusão do PCM na sua totalidade, independentemente da quantidade de energia que se queira armazenar.

A única simulação com esferas de 10 cm para armazenar 50% de energia, apresentou problemas numéricos. Os resultados negativos incidiram no processo de descarga, que a área de transferência lateral usada não é a necessária, embora uma mudança nas dimensões do recipiente que contém o

PCM, o processo de descarga não apresenta problema na transferência de calor e consegue-se obter o maior ganho de volume de todas as simulações feitas.

Propostas de trabalho futuro

As conclusões feitas neste trabalho são muito dependentes de resultados obtidos através de simulações. Mesmo que a simulação seja ótima, é recomendado o estudo deste sistema através de uma instalação experimental, para se verificar as temperaturas de saída da água bem como o ganho energético em termos de volume que se consegue obter.

Pode-se também realizar as mesmas simulações, mas usando um *software* comercial, como por exemplo o *TRNSYS*[®], para ter em conta os parâmetros de simplificação que se consideraram no processo de transferência de calor. Como por exemplo, considerar o tanque com vários níveis de estratificação.

Estudar que impacto a oscilação dos caudais de entrada tem na dinâmica do tanque e outros tipos de empacotamento dos módulos do PCM.

Analisar o impacto da altura a qual a base do PCM é colocada no ganho energético.

Recomenda-se a realização de uma análise de custo de um sistema com material de mudança de fase, para verificar se havendo ganho energético existe a possibilidade de desligar os chillers e se isso se traduz em lucro.

A. Bibliografia

- [1] B. d. D. P. Contemporâneo, "Consumo de Energia Primária 2014," [Online]. Available: <http://www.pordata.pt/>. [Acedido em Abril 2015].
- [2] T. Cotterman, "Energy Storage Technologies: Transforming America's Intelligent Electrical Infrastructures," Clemson University, 2013.
- [3] H. Ibrahim e A. Ilinca, "Techno-Economic Analysis of Different Energy Storage Technologies," em *Energy Storage: Technologies and Applications*, Rijeka, Croatia, 2013, pp. 1-40.
- [4] A. G. Ter-Gazarian, *Energy Storage for Power Systems*, 2 ed., Londres, Reino Unido: The Institution of Engineering and Technology, 2011.
- [5] R. Huggins, "Introduction," em *Energy Storage*, Springer, 2010, pp. 2-7.
- [6] I. Dinçer e M. Rosen, *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, WILEY, Ed., Reino Unido: Wiley, 2011, pp. 83-187.
- [7] R. A. Huggins, "Electromagnetic Energy Storage," em *Energy Storage*, Springer, 2010, p. 69.
- [8] C. M. Magill, *PCMs for solar thermal energy storage - Enhanced Energy Storage and Increasing Market Potential*.
- [9] "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers," 2000. [Online]. Available: <https://www.ashrae.org/>. [Acedido em Maio 2015].
- [10] O. E. Atear, *Energy Storage Systems - Storage of Thermal Energy*, Y. A. Gogus, Ed., Oxford, UK: EOLSS Publishers.
- [11] "Solar Energy Systems - using the natural power of the sun," Abril 2015. [Online]. Available: <http://www.solarenergysystems.co.uk/how.html>. [Acedido em Maio 2015].
- [12] L. G. Socaciu, "Seasonal Sensible Thermal Energy Storage Solutions," *Leonardo Electronic Journal of Practices & Technologies*, n.º 19, pp. 49-68, 2011.
- [13] D. Gao e T. Deng, *Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments - Solar Energy and Related Topics*, 1 ed., FORMATEX, Ed., 2013, pp. 32-44.
- [14] S. D. Sharma e K. Sagara, "Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review," *International Journal of Green Energy*, vol. 2, pp. 1-56, 2005.
- [15] V. Stevens, C. Craven e B. Grunau, *Thermal Storage Technology Assessment*, Cold Climate Housing Research Center, 2013.
- [16] M. B. J. Rathod, "Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 246-258, 2013.
- [17] A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen e D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable & sustainable energy reviews*, vol. 13, pp. 318-345, 2009.
- [18] C. Sunliang, *Master Thesis: State of the art thermal energy storage solutions for high*

performance buildings, U. o. Jyväskylä, Ed., 2010.

- [19] J. Mendes e e. al., *Armazenamento de energia solar térmica*, LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- [20] J. Chiu, "Heat Transfer Aspects of Using Phase Change Material in Thermal Energy Storage Applications," 2011.
- [21] A. S. Y. Lingayat, "Review on Phase Change Material as Thermal Energy Storage Medium: Materials, Application," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 3, pp. 916-921, 2013.
- [22] J. Kosny, N. Shukla e A. Fallahi, "Cost analysis of simple phase change material - enhanced building envelopes in Southern U.S. climates," *Energy Efficiency & Renewable Energy*, 2013.
- [23] A. K. K. Sari, "Some fatty acids used for latent heat storage: thermal stability and corrosion of metals with respect to thermal cycling," *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 939-948, 2001.
- [24] A. Lane, "Macro-encapsulation of PCM," Midland, Michigan, 1978.
- [25] A. Lane e H. Rossow, "Encapsulation of heat of fusion storage materials," *Proceedings of the second south eastern conference on application of solar energy*, 1978.
- [26] M. Telkes, "Thermal storage for solar heating and cooling," *Proceedings of the workshop on solar energy sub-systems for heating and cooling of buildings*, 1975.
- [27] R. Biswas, "Thermal storage using sodium sulfate decahydrate and water," *Solar Energy*, vol. 99, pp. 99-100, 1977.
- [28] ClimaEspaço, "ClimaEspaço," [Online]. Available: http://www.climaespaco.pt/duplo_rede.htm. [Acedido em Setembro 2015].
- [29] ClimaEspaço, [Online]. Available: http://www.climaespaco.pt/duplo_clima.htm. [Acedido em Setembro 2015].
- [30] F. Incropera, D. Dewitt, A. Lavine e T. Bergman, *Introduction to Heat Transfer*, 6 ed., John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [31] Engineering.com, "Engineering.com Library," [Online]. Available: <http://www.engineering.com/SustainableEngineering/RenewableEnergyEngineering/SolarEnergyEngineering/PassiveSolarSystemsSolarHotWater/tabid/3892/Default.aspx>. [Acedido em Maio 2015].
- [32] Cypress, "Cypress LTD," [Online]. Available: <http://www.cyp-res.com/stratified-chilled-water-storage-schws/>. [Acedido em Maio 2015].
- [33] Ticsay, "Incorporating Phase Change Materials into Textiles," 2014. [Online]. Available: <http://illumin.usc.edu/printer/2/get-that-34just-right34-feel-incorporating-phase-change-materials-into-textiles/>. [Acedido em Agosto 2015].

B. Anexos

B.1. Empacotamento em rede simples

Na Figura B-1, encontra-se representada uma célula unitária de aresta a .

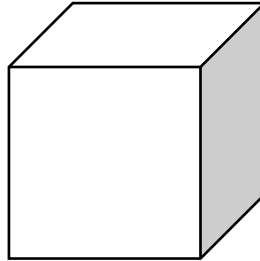


Figura B-1 – Célula unitária.

- $V_{\text{célula unitária}} = a^3$;
- Na célula unitária existem 8 vértices, em cada vértice reside um oitavo de uma esfera. Pelo que uma célula é ocupada por uma esfera;
- $V_{\text{esfera}} = \frac{4\pi}{3} r^3$;
- A aresta a é igual a $2r$;

Pela Equação B-1, calcula-se o valor do fator de empacotamento.

$$f = \frac{\frac{4\pi}{3} r^3}{a^3} = \frac{\frac{4\pi}{3} \left(\frac{a}{2}\right)^3}{a^3} = 0,52$$

Equação B-1

B.2. Números adimensionais

B.2.1. *Grashof*

O cálculo do número de *Grashof* é feito com base na Equação B-2 [30].

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad \text{Equação B-2}$$

Em que g é a aceleração da gravidade (m/s^2), β é o coeficiente de dilatação térmica (K^{-1}), T_s é a temperatura no exterior do PCM (K), T_∞ é a temperatura mais elevada no interior do tanque (K), L é o diâmetro do recipiente que contém o PCM (m) e ν é a viscosidade cinemática (m^2/s).

B.2.2. Número de *Reynolds*

O cálculo do número de *Reynolds* é feito com base na Equação B-3.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{Equação B-3}$$

Em que ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), v é a velocidade (m/s), D o diâmetro do recipiente que contém o PCM (m) e μ a viscosidade da água ($N \cdot s \cdot m^{-2}$).

B.2.3. Número de *Prandtl*

O número de Prandtl é calculado com base na Equação B-4.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad \text{Equação B-4}$$

Em que c_p é o calor específico, μ é a viscosidade do fluido e k a condutividade térmica.

B.5. Coeficiente de transferência de calor

O mecanismo de transferência de calor no exterior dos módulos de PCM é o de convecção natural.

Pela Equação B-5, pode-se comprovar a existência de convecção natural [30].

$$\frac{Gr}{Re^2} \gg 1 \quad \text{Equação B-5}$$

Em que Gr, é o número adimensional *Grashof* e Re é o número adimensional *Reynolds*.

Tabela B-1 – Parâmetros para o cálculo de Gr e Re.

| Parâmetro | Valor |
|-------------------------------------|----------------------|
| $Q_{e,base}$ (m ³ /h) | 3 500 |
| D_{tanque} (m) | 34,9 |
| $D_{seção}$ (m) | 14,5 |
| $A_{seção,livre}$ (m ²) | 791 |
| v (m/s) | 0,0012 |
| Gr | $8,6 \times 10^{12}$ |
| Re | $1,5 \times 10^4$ |
| Gr/Re^2 | 39 462 |

Tabela B-2 – Propriedades da água no intervalo de temperatura da água no interior do tanque [30].

| T (K) | T (°C) | C_p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | $\mu \times 10^6$ (N·s·m ⁻²) | k (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) |
|----------|-----------|---|---|--|
| 273,15 | 0 | 4 217 | 1 750 | 0,569 |
| 275,15 | 2 | 4 211 | 1 652 | 0,574 |
| 280,15 | 7 | 4 198 | 1 422 | 0,582 |
| 285,15 | 12 | 4 189 | 1 225 | 0,590 |

Em seguida é necessário calcular o número de *Nusselt*, para tal utilizou-se a correlação de *Churchill* para convecção natural no exterior de esferas [30].

$$Nu_D = 2 + \frac{0,589(Gr \times Pr)_D^{1/4}}{[1 + (0,469/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad \text{Equação B-6}$$

Em que Nu é o número de *Nusselt*, Gr é o número de *Grashof* e Pr é o número de *Prandtl*.

Para esferas existem duas condições que os valores de Gr e Pr podem tomar, como indica na Equação B-7 e Equação B-8 [30].

$$Gr < 10^{11}$$

Equação B-7

$$Pr > 0,7$$

Equação B-8

A partir de Nu, consegue-se calcular o valor do coeficiente de transferência de calor, com base na Equação B-9.

$$Nu_D = \frac{h \times D}{k}$$

Equação B-9

Em que h é o coeficiente de transferência de calor ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), D é o diâmetro da esfera (m) e k a condutividade térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).