



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO DE
PCM EM CÁPSULAS ESFÉRICAS PARA USO EM SISTEMAS DE
ARMAZENAMENTO TÉRMICO: ESTUDO NUMÉRICO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

NADILSON ALVES DA SILVA

Recife, janeiro de 2008

S586a

Silva, Nadilson Alves da

Análise paramétrica do processo de solidificação de PCM em cápsulas esféricas para uso em sistemas de armazenamento térmico: estudo numérico / Nadilson Alves da Silva. - Recife: O Autor, 2008. xvi, 72 f.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2008.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica. 2. Armazenamento Térmico. 3. Análise Numérica. 4. Material de Mudança de Fase. I. Título.

UFPE

621 CDD (22.ed.)

BCTG/2010-049

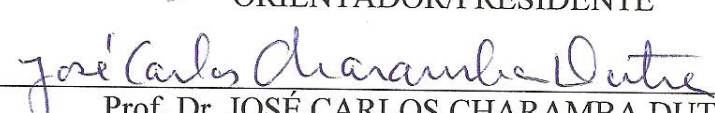
“ANÁLISE PARAMÉTRICA DO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO DE PCM EM
CÁPSULAS ESFÉRICAS PARA USO EM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO
TÉRMICO: ESTUDO NUMÉRICO”.

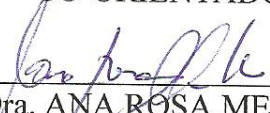
NADILSON ALVES DA SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

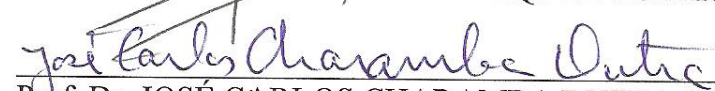

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

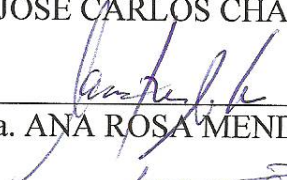

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA
CO-ORIENTADOR

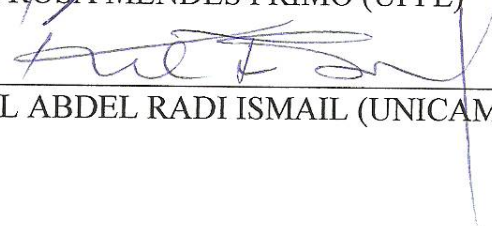

Prof. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO
COORDENADORA DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO (UFPE)


Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA (UFPE)


Prof. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO (UFPE)


Prof. Dr. KAMAL ABDEL RADI ISMAIL (UNICAMP)

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO DE
PCM EM CÁPSULAS ESFÉRICAS PARA USO EM SISTEMAS DE
ARMAZENAMENTO TÉRMICO: ESTUDO NUMÉRICO**

DEDICATÓRIA

**A Deus, autor de todas as leis que regem o comportamento do universo.
A todos aqueles que me ajudaram a empreender este importante passo na minha vida.**

“O temor do SENHOR é o princípio da sabedoria...”
Provérbios 9.10

“ Melhor é a sabedoria do que a força...”
Eclesiastes 9.16

AGRADECIMENTOS

A Deus, Senhor absoluto de toda a existência, por ter me dado condições de realizar este trabalho.

À minha esposa Diana que sempre me incentivou e apoiou emocionalmente, agradeço pela compreensão que demonstrou, abrindo mão de minha presença em alguns momentos, mas apesar das dificuldades, nunca me deixou desanimar.

Aos meus pais, Natanael e Vicência que sempre me incentivaram e ajudaram quando eu mais precisei, além de terem lançado as bases de minha educação e de meu caráter.

Aos meus sogros Aduino e Maria do Carmo pelo incentivo e ajuda constantes, principalmente quando eu precisava ficar em um lugar mais próximo à universidade.

Ao professor Jorge Henríquez, meu orientador, pela paciência que demonstrou diante de minhas limitações, e também pelos conselhos e pela ajuda imprescindíveis ao longo deste trabalho.

Ao professor Charamba, meu co-orientador, pela ajuda prestada e pelos conselhos valiosos sempre que precisei.

À professora Ana Rosa que desde o início do curso me incluiu em diversos trabalhos de pesquisa, permitindo que eu me integrasse em grupos de pesquisa.

Aos professores do GET, Fábio Magnani e Rita, pela amizade e a atenção.

A todos os meus amigos do mestrado, que são muitos, um muito obrigado pelo coleguismo durante estes anos de convívio e ajuda sempre que necessário.

À secretária Eliane pela ajuda e orientações dadas ao longo deste curso.

À CAPES e ao CNPq pelo incentivo financeiro durante o período de realização deste trabalho.

RESUMO

As tecnologias de armazenamento de energia térmica são utilizadas como um meio de aproveitamento da energia que está disponível em um determinado período de tempo, para utilizá-la posteriormente. Isto só é possível devido à capacidade de manter esta energia armazenada de maneira a evitar perdas e que possa ser recuperada em um período de tempo posterior. Este deslocamento da energia no tempo é importante, pois possibilita o aumento de eficiência energética da planta ou sistema e promove uma utilização mais adequada da energia disponível em algum ponto do processo e que poderia estar sendo desperdiçada se não fosse armazenada. No processo de armazenamento térmico são amplamente utilizados dois métodos: o de armazenamento de energia na forma de calor sensível e o armazenamento de energia na forma de calor latente. A seleção de qual método deve ser utilizado deve ser feita de acordo com alguns critérios, tais como capacidade de armazenamento, dimensões do equipamento de armazenamento, temperaturas de carregamento e descarregamento, variação permissível de temperatura, entre outros. Sabe-se que o conceito de calor latente é mais atraente devido à grande capacidade de armazenamento e as temperaturas constantes durante o carregamento e descarregamento do sistema. Existem diversos tipos de sistemas de armazenamento de energia que utilizam o conceito de calor latente, com características apropriadas para cada aplicação e destinadas à obtenção de máxima eficiência. Entre estes, sistemas com material de mudança de fase encapsulado apresentam algumas vantagens construtivas e operacionais. Uma das principais características de um armazenador de calor latente é o processo de mudança de fase que sofre o material usado para armazenar a energia térmica, de modo que a compreensão do processo de transferência de calor no fenômeno de solidificação/fusão é essencial para avaliar exatamente o desempenho térmico destes equipamentos. Neste trabalho foi estudado o processo de solidificação no interior de cápsulas esféricas com o objetivo de otimizar o processo. O estudo é baseado numa análise paramétrica numérica de forma a investigar quais são as melhores condições de solidificação do material no interior da cápsula. O processo de solidificação dentro das cápsulas é tratado usando um modelo condutivo unidimensional com mudança de fase com condições de contorno convectivas na superfície externa da cápsula. As equações diferenciais resultantes são resolvidas numericamente pelo método de diferenças finitas. O modelo apresentado é validado comparando os seus resultados com dados obtidos experimentalmente, disponíveis na literatura. São avaliados o efeito do tamanho da cápsula, temperatura do fluido de carregamento, velocidade do fluido de carregamento e tipo de material de mudança de fase sobre o tempo de solidificação completa e energia térmica armazenada na cápsula.

Palavras-chave: Armazenamento Térmico, Análise numérica, Material de Mudança de Fase.

ABSTRACT

Thermal energy storage is a way to use the energy available in a certain period of time to use it later. This is only possible due to the capacity to maintain this stored energy into medium minimizing losses for posterior recovering. This displacement of the energy in time is important, because it makes possible the increase in energy efficiency of the plant or system, it promotes a more appropriate use of the available energy in some point of the process, that could be being wasted if it was not stored. In the process of thermal storage two methods are widely used: the first one stores energy in the form of sensible heat. The second stores energy in the form of latent heat. The choose of which method should be used is made in agreement with some criteria, such as storage capacity, dimensions of the storage equipment, charge and discharge temperatures, permissible variation of temperature, among others. It is known that the concept of latent heat is more attractive due to the great storage capacity and the constant temperatures during the charge and discharge process of the system. There are several types of systems to energy storage that use the concept of latent heat, with appropriate characteristics for each application and destined to the obtaining of maximum efficiency. Among these, systems with phase change material encapsulated present some constructive and operational advantages. One of the principal characteristics of a medium of storage in latent heat is the process of phase change that suffers the material used to store the thermal energy, so that the understanding of the process of heat transfer in the solidification/melting phenomenon is essential to evaluate the thermal acting of these equipments exactly. In this work it was studied the solidification process inside spherical capsules with the objective of optimizing the process. The study is based on a numeric parametric analysis in a way to investigate which are the best conditions of solidification of the material inside the capsule. The solidification process inside the capsules is treated using a model conductive one-dimensional with phase change with convectives boundary conditions on the external surfaces of the capsule. The comparison with available experimental data showed that the model is in a good agreement with those available results. The resultants differential equations were resolved numerically for the use of finite differences method. Some effects were evaluated: The effect of the size of the spherical capsule, temperature of the charge fluid, speed of the charge fluid and type of phase change material on the time of solidification complete, temperature profile and thermal energy stored in the capsule.

Keywords: *Thermal Energy Storage, Numerical Analysis, Phase Change Material.*

SIMBOLOS

Letras

A	Área de contato entre o fluido e a superfície, [m ²].
Bi	Número de Biot
c_p	Calor específico [kJ/kgK]
CTV	Capacidade térmica volumétrica [kJ/m ³]
FM	Fração de massa solidificada
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção, [W/m ² °C].
k_{ef}	Condutividade térmica efetiva do PCM na fase líquida no interior da cápsula esférica [W/m K].
k_f	Condutividade térmica do fluido [W/m K].
k_{liq}	Condutividade térmica do PCM na fase líquida [W/m K].
k_{sol}	Condutividade térmica do PCM na fase sólida [W/m K].
k_{esf}	Condutividade térmica da cápsula esférica [W/m K].
L	Calor Latente [kJ]
M_{sol}	Massa total que pode ser solidificada [kg]
$MPCM,t$	Massa total da esfera num instante t [kg]
Nu	Número de Nusselt
m	Massa total de meio de armazenamento de energia térmica [kg]
Pr	Número de Prandtl
Q	Calor total transferido [kJ]
Q_s	Calor sensível [kJ]
Re	Número de Reynolds
R_{esf}	Resistência térmica da casca esférica
R_h	Resistência térmica correspondente ao fluxo convectivo
R_s	Resistência térmica da região sólida
R_t'	Resistência térmica da cápsula esférica
R_t	Resistência térmica da cápsula esférica multiplicada pela área da casca esférica
r	Raio [m]
r_{ext}	Raio externo da cápsula esférica [m]
r_f	Raio na frente de solidificação [m]
r_{int}	Raio interno da cápsula esférica [m]
$S(t)$	Posição da frente de solidificação [m]
Ste	Numero de Stephan
T_{ext}	Temperatura da superfície externa da cápsula esférica [°C].
T_∞	Temperatura do fluido longe da superfície, [°C].
T_m	Temperatura de mudança de fase [°C]
T_{int}	Temperatura da superfície interna da cápsula esférica [°C].
T_{ini}	Temperatura inicial da cápsula esférica [°C].
t	Tempo [segundos].
V_f	Velocidade do fluido de trabalho, [m/s].
x	Posição da frente de solidificação adimensionalizada

Letras Gregas

α_{liq}	Coefficiente de difusividade térmica na fase líquida, [m ² /s].
α_{sol}	Coefficiente de difusividade térmica na fase sólida, [m ² /s].
ρ_{liq}	Densidade do PCM na fase líquida, [kg/m ³].
ρ_{sol}	Densidade do PCM na fase sólida, [kg/m ³].
ΔT	Variação de temperatura [°C]
τ	Tempo adimensionalizado
θ	Temperatura adimensionalizada

Símbolo

$\forall$	Volume [m ³]
-----------	--------------------------

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. 1 – Esquema do Armazenador Pedras/Água (adaptado de Dinçer et al, 2002)</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1. 2 - Configurações de paredes Trombe em função das estações do ano (Portal de Energias Renováveis, 2007)</i>	<i>5</i>
<i>Figura 1. 3 - Esquema de termoacumulação utilizando múltiplos tanques</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1. 4 - Tanque estratificado com barreiras (a) e tanque estratificado termicamente (b) (adaptado de Dinçer et al, 2002).....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1. 5 - Tanque de água gelada estratificado termicamente para uso em refrigeração (University of Akron, 2007).....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1. 6 - Tanque estratificado com membrana (adaptado de Dinçer et al, 2002)</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1. 7 - Gradiente de temperatura no tanque estratificado e fronteira entre os fluidos “quente” e “frio” (thermocline)</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1. 8 - Resfriamento com mudança de fase.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 1. 1 - Algumas Substâncias Inorgânicas com potencial para uso como PCM (adaptado de Zalba et al, 2003)</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 1. 2 - Algumas Substâncias Orgânicas com potencial para uso como PCM (adaptado de Zalba et al, 2003)</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 1. 3 - Alguns ácidos graxos com potencial para uso como PCM (adaptado de Zalba et al, 2003).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1. 9 - Solidificação sobre superfície externa.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1. 10 - Fusão do sólido quando o fluido de trabalho passa no interior do tubo.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1. 11 - Fusão do sólido quando o fluido de trabalho passa exterior ao tubo.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1. 12 - Encontro de camadas de solidificação.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1. 13 - Tubos com aletas aumentam a área de transferência de calor para solidificação/fusão externa.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1. 14 – Solidificação externa em tubos aletados (adaptado de Dincer et al, 2002)</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1.15 - Tipos de cápsulas utilizadas em fusão/solidificação interna (Cryogel, 2004, Guzmán, 2004)</i>	<i>15</i>
<i>Figura 1.16 - Solidificação em cápsula esférica.....</i>	<i>15</i>

<i>Figura 1.17 - Esquema do armazenamento de calor latente em cápsulas esféricas</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1.18 - Diagrama de mudança de fase para a água, mostrando o grau de super-resfriamento (Guzmán, 2004).....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2. 1 - Efeito da temperatura do fluido de trabalho e do raio interno da cápsula esférica sobre o tempo de solidificação completa do PCM (Ismail e Henríquez, 2000).....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2. 2 - Cápsula esférica preenchida com PCM e Tanque preenchido de forma aleatória com as cápsulas esféricas (Bédécarrats et al 1996).</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. 1 - Coexistência de duas fases (sólido e líquido) no interior da cápsula esférica durante a solidificação</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3. 2 - Parâmetros geométricos e balanço de energia entre o fluido de trabalho e a cápsula esférica, mostrando as resistências térmicas condutivas e convectivas</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3. 3 - Domínios da fase sólida e da fase líquida durante o processo de solidificação</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3. 4 - Divisão do domínio em N camadas quando existe apenas uma fase.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3. 5 - Evolução da temperatura no centro da cápsula esférica. Comparação entre os resultados obtidos no presente trabalho e medições experimentais apresentadas na bibliografia.</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 4. 1 - Propriedades da água utilizada como material de mudança de fase</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 4. 2 - As propriedades termofísicas do fluido de trabalho para as diferentes proporções da mistura álcool-água.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4. 1 - Temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica ao longo do tempo para uma proporção de 18%, em massa de álcool, na mistura álcool-água.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4. 2 - Temperatura no centro da cápsula esférica em função do tempo - Influência da composição do fluido de trabalho (porcentagem de álcool na mistura álcool-água em massa)..</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.3 - Temperatura na superfície interna da cápsula esférica em função do tempo - Influência da composição do fluido de trabalho (porcentagem de álcool na mistura álcool-água em massa).</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4. 4 - Fração de massa solidificada - Influência da Composição do fluido de trabalho (porcentagem de álcool na mistura álcool-água em massa).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4. 5 - Energia Térmica Armazenada para uma mistura de 29,7% de álcool como fluido de trabalho.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4. 6 - Energia Total Armazenada no PCM em função do tempo - Influência da composição do fluido de trabalho (porcentagem de álcool na mistura álcool-água em massa)..</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4. 7 - Histórico da Temperatura - Diâmetro 20mm</i>	<i>46</i>

<i>Figura 4. 8 - Histórico da Temperatura no Centro da cápsula esférica – Influência do diâmetro</i>	46
<i>Figura 4. 9 - Histórico da Temperatura na superfície interna da cápsula esférica</i>	47
<i>Figura 4. 10 - Fração de massa solidificada em função do tempo - Influência do Diâmetro da cápsula esférica</i>	48
<i>Figura 4. 11 - Tempo para o Carregamento Completo em função do diâmetro</i>	48
<i>Figura 4. 12 - Energia Térmica Armazenada - Diâmetro 40 mm</i>	49
<i>Figura 4. 13 - Energia Total Armazenada na Esfera - Influência do diâmetro</i>	49
<i>Figura 4. 14 - Energia Total Armazenada em função do diâmetro</i>	50
<i>Figura 4. 15 - Evolução da temperatura no centro da esfera - Influência da velocidade média de escoamento do fluido de trabalho</i>	51
<i>Figura 4. 16 - Evolução da temperatura na superfície interna da cápsula esférica - Influência da velocidade média de escoamento do fluido de trabalho</i>	51
<i>Figura 4. 17 - Fração de massa solidificada - Influência da velocidade média do fluido de trabalho</i>	52
<i>Figura 4. 18 - Energia Total Armazenada na Esfera - Influência da velocidade média do fluido de trabalho</i>	52
<i>Figura 4. 19 - da Temperatura no Centro da Esfera - Influência da temperatura do fluido de trabalho.</i>	53
<i>Figura 4. 20 - Histórico da Temperatura na superfície interna da cápsula esférica - Influência da temperatura do fluido de trabalho.</i>	54
<i>Figura 4. 21 - Fração de massa Solidificada Influência da Temperatura do Fluido de Trabalho.</i>	54
<i>Figura 4. 22 - Energia Total Armazenada na Esfera - Influência da Temperatura do Fluido de trabalho</i>	55
<i>Figura 4. 23 - Tempo para o Carregamento Completo</i>	55
<i>Tabela 4. 3 - Propriedades termofísicas das substâncias adotadas como material de mudança de fase</i>	56
<i>Tabela 4. 4 - Parâmetros utilizados na simulação de vários PCMs diferentes</i>	56
<i>Figura 4. 24 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para a água como PCM</i>	57

<i>Figura 4. 25 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para a Glicerina como PCM.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4. 26 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para o Polietilenoglicol E400 como PCM</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4. 27 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para o RT2 como PCM.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4. 28 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para o RT5 como PCM.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4. 29 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para o RT6 como PCM.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4. 30 - Histórico da Temperatura na superfície interna da cápsula esférica</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4. 31 - Evolução da temperatura do centro da cápsula esférica no tempo para todos os materiais</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4. 32 - Fração de massa solidificada - Influência do PCM</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4. 33 - Energia Térmica Armazenada - PCM água</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4. 34 - Energia Térmica Armazenada - PCM Glicerina</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4. 35 - Energia Térmica Armazenada - PCM Polietilenoglicol E400</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4. 36 -Energia Térmica Armazenada - PCM RT2.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4. 37 - Energia Térmica Armazenada - PCM RT5.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4. 38 - Energia Térmica Armazenada - PCM RT6.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4. 39 - Energia Total Armazenada na Esfera - Influência do PCM.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4. 40 - Energia Total Armazenada por PCM.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4. 41 - Tempo para o Carregamento Completo</i>	<i>67</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1. 1 - Algumas Substâncias Inorgânicas com potencial para uso como PCM</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 1. 2 - Algumas Substâncias Orgânicas com potencial para uso como PCM.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 1. 3 - Alguns ácidos graxos com potencial para uso como PCM</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 4. 1 - Propriedades da água utilizada como material de mudança de fase</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 4. 2 - As propriedades termofísicas do fluido de trabalho para as diferentes proporções da mistura álcool-água.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 4. 3 - Propriedades termofísicas das substâncias adotadas como material de mudança de fase.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 4. 4 - Parâmetros utilizados na simulação de vários PCMs diferentes</i>	<i>56</i>

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação do Problema	1
1.2. Métodos e Técnicas de Armazenamento Térmico	1
1.2.1. Calor Sensível	2
1.2.1.1. Armazenamento Térmico de Calor Sensível em Sólidos	2
1.2.1.2 Armazenamento Térmico de Calor Sensível em Líquidos.....	5
1.2.2. Calor Latente	9
1.2.2.1. Materiais de Mudança de Fase (PCM)	10
1.2.2.2 Tipos de Sistemas de Armazenamento de Energia por Calor Latente	12
1.2.2.3. Super-resfriamento	16
1.2.2.4 Aplicação de PCM em Energia Solar	17
1.3 Objetivos.....	18
1.4 Estrutura do Trabalho	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO EM CÁPSULA ESFÉRICA	25
3.1 Resfriamento Puro do Material de Mudança de Fase.....	25
3.2 Solidificação do Material de Mudança de Fase	25
3.3. Discretização das Equações	28
3.3.1. Material de mudança de fase completamente líquido ou completamente sólido.....	29
3.4 Validação do Modelo	38

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1. Influência da Composição do Fluido de Trabalho.....	41
4.2. Influência do Diâmetro Externo da Cápsula Esférica.....	45
4.3. Influência da velocidade média de escoamento do fluido de trabalho.....	50
4.4. Influência da Temperatura do Fluido de Trabalho.....	53
4.5. Influência do Material de Mudança de Fase.....	56
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
5.1 – Conclusões	68
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Problema

As tecnologias de armazenamento de energia térmica são utilizadas como um meio de aproveitamento da energia, que está disponível em um determinado período de tempo, e utilizá-la posteriormente. Isto só é possível devido à capacidade de manter esta energia armazenada de maneira a evitar perdas e que possa ser recuperada em um período de tempo posterior. Este deslocamento da energia no tempo é importante, pois possibilita o aumento de eficiência energética da planta ou sistema e promove uma utilização mais adequada da energia disponível em algum ponto do processo e que poderia estar sendo desperdiçada se não fosse armazenada (Dinçer et al 2002, Kelman, 2002). Outra utilização que confirma a importância do armazenamento térmico está em sistemas de refrigeração. Para sair do pico de demanda de energia elétrica, algumas instalações utilizam armazenamento de energia térmica, a baixa temperatura, no período de tempo onde o custo com energia elétrica é menor, pois os equipamentos de refrigeração diminuem a temperatura do meio de armazenamento e carregam o armazenador. No momento de pico de demanda por energia elétrica, e consequentemente um custo mais elevado de energia elétrica, os equipamentos de refrigeração são desligados ou trabalham em uma capacidade menor e o armazenador provê a energia térmica necessária. Com isto os custos com energia elétrica, em tarifas que variam em função do tempo, são minimizados (Carvalho, 2002).

Dinçer e Rosen (2001) afirmam que existem duas formas de armazenar energia térmica empregadas em equipamentos armazenadores: por calor sensível, utilizando fluidos ou sólidos, como meio de armazenamento, e por calor latente, utilizando materiais de mudança de fase.

A seleção adequada do material a ser utilizado depende, principalmente, do período necessário de armazenamento de energia, período este que pode ser diário, semanal, mensal ou sazonal. Depende também da sua viabilidade econômica, condições nas quais o equipamento de armazenamento irá operar, entre outras. A escolha adequada de qual classe de estocagem de energia térmica será empregada é de extrema relevância para a minimização de perdas de energia térmica, melhorando o aproveitamento da energia térmica armazenada e minimizando a degradação na sua temperatura. Deste ponto de vista é oportuno ressaltar a importância do conceito de exergia referente à Segunda Lei da Termodinâmica como parâmetro de avaliação do sistema analisado. Atualmente o uso de armazenamento de energia térmica preenche os requisitos necessários a uma solução capaz de otimizar os tempos para os picos de demanda de fornecimento de energia térmica contribuindo de forma significativa no que se refere ao aproveitamento racional de fontes de energia, preservação ambiental e aumento de eficiência energética.

1.2. Métodos e Técnicas de Armazenamento Térmico

No processo de armazenamento térmico são amplamente utilizados dois métodos: o de armazenamento de energia na forma de calor sensível e o armazenamento de energia na forma de calor latente. A seleção de qual método deve ser utilizado deve ser feita de acordo com alguns critérios, tais como: capacidade de armazenamento, dimensões do equipamento de armazenamento, temperaturas de carregamento e descarregamento, variação permissível de temperatura, entre outros que serão abordadas mais adiante. O conceito de calor latente é mais atraente devido à grande capacidade de armazenamento e as temperaturas constantes no

carregamento e descarregamento. O PCM pode ser encapsulado em uma variedade de formas: cilíndricas com ou sem aletas, placas planas, blocos retangulares ou cápsulas esféricas (Ismail et al, 2003). Esta última parece oferecer uma série de vantagens, que os autores classificam entre os métodos mais atraentes de encapsulamento. Entre as vantagens citadas para as cápsulas esféricas, está a relação favorável do volume de energia armazenada para a área de transferência de calor e também por causa da facilidade de acondicionamento para o tanque de armazenamento, com uma boa porosidade do leito.

Quanto ao aspecto de custos de instalação e operação e do ponto de vista energético, Pavan (2004) apresentou um comparativo entre duas formas usuais utilizadas para armazenamento de energia térmica, calor sensível e latente, utilizando a água como material de mudança de fase. Fazendo esta comparação entre as duas técnicas, tanto do ponto de vista energético como do funcional e econômico, o trabalho demonstra que o custo inicial de implantação do sistema que realiza o armazenamento de energia térmica utilizando água gelada é maior que o custo de armazenamento na forma de calor latente. Porém este custo pode ser amortizado de forma mais rápida quanto maior for a carga térmica máxima prevista no projeto. Isto devido ao fato de o sistema de armazenamento de calor latente requerer temperaturas menores que na técnica por calor sensível, porém com a vantagem de ser mais relativamente mais compacto.

Apesar do fato de a maioria das aplicações de engenharia optar pela escolha entre o armazenamento de calor sensível ou latente como predominante e único em cada processo de estocagem, a combinação dos dois tipos parece ser promissora. Um exemplo disto é o caso da unidade de armazenamento de energia térmica combinada (Nallusamy et al, 2007) que faz a estocagem de energia térmica solar utilizando calor sensível e latente.

1.2.1. Calor Sensível

O armazenamento de energia na forma de calor sensível é feito com mudanças de temperatura em um determinado material, sólido ou líquido, sem haver mudanças de fase. A substância mais amplamente utilizada é a água, mas também são empregados óleos, leito de rochas, concreto, areia ou o solo, entre outros.

A quantidade (Q) de energia armazenada no material (Eq. 1.1) é proporcional à diferença entre a temperatura final e inicial de estocagem (ΔT), à quantidade de massa do material (m) e ao seu calor específico (c_p).

$$Q = mc_p \Delta T \quad (1.1)$$

A energia é armazenada a uma determinada temperatura, atingida numa troca de calor (processo de carga) e posteriormente transmitida a outro sistema (processo de descarga). Neste método, um isolamento térmico adequado é de extrema importância para evitar perdas de energia no armazenamento.

1.2.1.1. Armazenamento Térmico de Calor Sensível em Sólidos

O armazenamento térmico na forma de calor sensível em materiais sólidos é utilizado, geralmente, quando é necessário armazenar energia a altas temperaturas e a um custo relativamente baixo (Dinçer et al, 2002). As técnicas de leitos rochosos e armazenamento térmico em concreto são exemplos de materiais sólidos de baixo custo. Porém sabe-se que o calor específico dos materiais sólidos em geral é menor que o calor específico da maioria dos líquidos.

A água, por exemplo, possui o calor específico de aproximadamente o dobro do calor específico de rochas. A necessidade da utilização destes materiais sólidos reside na temperatura na qual a energia será armazenada, pois na pressão atmosférica, a água líquida não pode ser armazenada a uma temperatura superior a 100°C, enquanto as rochas, por exemplo, podem armazenar energia em temperaturas em torno de 1000°C. Esta técnica de armazenamento é geralmente utilizada em conjunto com sistemas de carga e descarga que utilizam meios fluidos como material para transferência de energia, por exemplo, óleo ou ar.

Como exemplo de armazenamento de energia térmica em sólidos, pode ser citada a técnica de armazenamento pedras/água (Dinçer *et al*, 2002). Esta técnica consiste em aproveitar calor proveniente de alguma fonte de energia térmica, por exemplo, um coletor solar, e armazenar esta energia em um leito de pedras com um diâmetro aproximado de 2,5 cm cada. Esta energia é recuperada por um fluxo de ar que passa através deste leito de pedras, sendo aquecido pela transferência de calor das pedras para o fluxo de ar por convecção. Neste processo a perda de carga é inversamente proporcional à área de seção e diretamente proporcional à velocidade do ar.

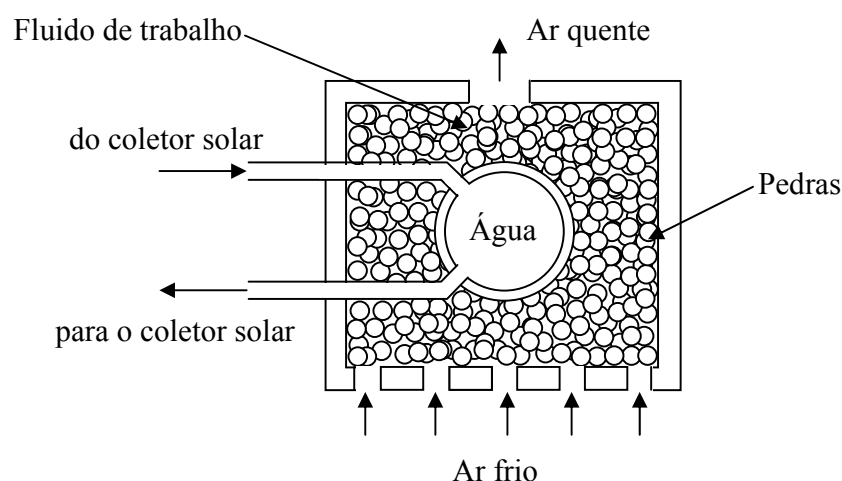


Figura 1. 1 – Esquema do Armazenador Pedras/Água (adaptado de Dinçer *et al*, 2002)

Outra forma de armazenar energia térmica em meio sólido é a parede Trombe. Paredes Trombe são paredes com uma inércia térmica grande (Mendonça *et al*, 2002), que são usadas para "armazenar" o calor quando a radiação solar incide sobre a parede. Esta é uma técnica na qual é feito o aproveitamento da radiação solar por ganhos indiretos - o sol não incide diretamente no espaço a ser aquecido, mas sim numa massa acumuladora. Esta energia acumulada é depois irradiada diretamente para o interior da construção a partir da outra face da parede, sendo possível que o ar possa escoar através de duas aberturas. Já existem estudos recentes referentes a esta técnica (Jie *et al*, 2006, González, 2006, Chen *et al*, 2006). O uso de paredes Trombe, na verdade, é a aplicação de medidas solares passivas especiais. Estas paredes são constituídas por um vidro, localizado no exterior do edifício, e por uma parede, que usualmente é feita de pedras, separadas por uma camada de ar. Existem dois tipos diferentes destas paredes: as ventiladas e as não-ventiladas. As não-ventiladas aquecem a edificação durante o inverno e à noite. Este aquecimento se processa da seguinte forma: a radiação solar atravessa o vidro e incide na parede que se encontra revestida por uma superfície escura, promovendo uma maior absorção de radiação e conseqüente conversão em energia térmica, sendo desta forma absorvida quase toda a radiação visível. Assim a radiação é convertida em calor na superfície da parede. Como a

transferência de calor para o interior da casa se processa muito lentamente, isto permite que a edificação permaneça numa temperatura agradável durante todo o dia, enquanto se vai processando o aquecimento da parede, sendo o calor absorvido transmitido de forma contínua durante a noite.

As paredes Trombe ventiladas, (Figuras 1.2 a,b,c e d) podem ser utilizadas tanto para aquecimento como para arrefecimento da edificação, seja verão ou inverno. Estas paredes têm um conceito construtivo semelhante ao das não ventiladas, com a diferença de possuírem pequenas aberturas na parte superior e inferior do vidro e da parede. No verão permanece aberta a parte superior que possibilita a saída de ar quente no interior da casa. No inverno, ambas as aberturas do vidro permanecem fechadas, provocando uma circulação de ar no interior da casa. O ar aquecido na caixa de ar entra através da abertura superior da parede, promovendo o aquecimento do interior, enquanto o ar frio entra pela abertura inferior, sendo aquecido na caixa de ar entre a parede e o vidro, (Fig. 1.2a). Este funcionamento é equivalente ao da parede Trombe não-ventilada. O ar é aquecido pelo Sol e introduzido no interior da casa por um efeito denominado de termossifão. O calor que é absorvido pelo ar está disponível para uso imediato. Uma parte do calor penetra na parede onde será armazenado, se bem que a superfície interior da parede reemite, por transferência de calor por radiação, um pouco de calor. O tempo necessário para o calor atravessar a parede depende da condutividade térmica da pedra, da diferença de temperatura entre as superfícies exterior e interior da parede e da espessura da parede. A condutividade térmica da pedra é vizinha de 2W/mK . Isto implica o seguinte fato: no caso de uma parede possuir um metro de espessura, é preciso de uma hora para que 100 Wh atravessem uma parede de 1 m^2 de superfície, mantendo a diferença de temperatura entre as duas faces da parede a $50\text{ }^\circ\text{C}$. A espessura da parede deve ser determinada de modo que a maior parte do calor chegue à face interior da parede após o pôr do Sol.

Como a maioria das tecnologias, esta técnica possui suas vantagens e desvantagens. As vantagens são o aquecimento confortável, pois a radiação no comprimento de onda infravermelho possui maior capacidade de penetrar no interior do material é mais confortável que os sistemas de aquecimento de ar convectivos forçados tradicionais; ocorre um aquecimento passivo, isto é, não há partes móveis, portanto essencialmente não necessita de manutenção; a construção é simples, ou seja, é relativamente fácil incorporar a estrutura à construção e os materiais são relativamente baratos. Além das vantagens anteriormente citadas, esta técnica pode proporcionar uma economia considerável no consumo de energia elétrica. Como desvantagem pode-se dizer que há uma dependência de céu aberto, por isso quando o dia está nublado por um longo período de tempo, não há um funcionamento adequado deste equipamento.

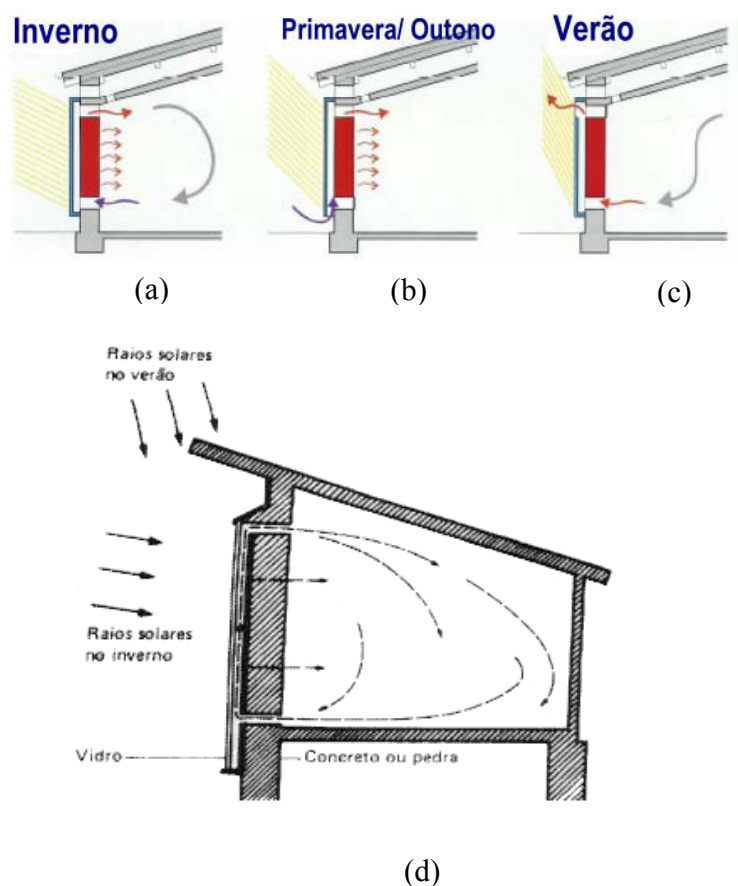


Figura 1. 2 - Configurações de paredes Trombe em função das estações do ano (Portal de Energias Renováveis, 2007)

1.2.1.2 Armazenamento Térmico de Calor Sensível em Líquidos

No armazenamento térmico utilizando líquidos, a água é o melhor representante. Seu elevado calor específico possibilita uma maior capacidade de estocagem de energia em temperaturas inferiores a 100°C . Para temperaturas superiores a esta, podem ser utilizados os chamados “termo-fluidos” que podem ser óleos minerais ou óxido difenil, entre outros. Estes são usados para estocagem e transferência de calor em diferentes processos na indústria (Dinçer *et al*, 2002). Alguns materiais, tijolos e concreto, por exemplo, podem armazenar energia térmica a até 1000°C (Kelman, 2002). Há também a utilização de soluções salinas para manter um gradiente de temperatura possibilitando o armazenamento de calor sensível proveniente da energia solar, são as piscinas solares. Estas são utilizadas para geração de energia elétrica, pois são a fonte de calor para ciclos termodinâmicos acoplados a geradores elétricos. (Fraidenraich (1995), Spyridonos (2003)).

Quando materiais líquidos são utilizados para o armazenamento térmico na forma de calor sensível, faz-se necessário o uso de tanques e sistemas de carga e descarga do fluido a ser estocado. Estes equipamentos devem ter um isolamento que impeça as perdas de energia tanto durante o armazenamento como durante as fases de carga e descarga.

Um parâmetro utilizado em sistemas de armazenamento é a Capacidade Térmica Volumétrica (CTV). Este parâmetro relaciona a quantidade de energia que pode ser armazenada com o volume

ocupado pelo sistema, quantificando assim, uma medida da qualidade do meio de armazenamento. Este é definido como:

$$CTV = \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1.2)$$

onde ρ é a densidade do fluido de armazenamento; c_p é o seu calor específico e ΔT é a diferença de temperatura à qual o meio de armazenamento é submetido.

Anteriormente foi destacado que a água é o meio de armazenamento mais amplamente empregado. Esta afirmativa é feita devido ao fato de que as características desejadas para o fluido de armazenamento são: alto calor específico (capacidade térmica volumétrica elevada); baixo custo; condutividade térmica elevada, isto é, alta difusividade térmica. Estas características fazem da água o meio de armazenamento selecionado, na maioria dos casos. Aqui serão descritas tecnologias de armazenamento térmico por calor sensível em líquidos.

a) Múltiplos Tanques ou Método do Tanque em Vazio

Neste método são utilizados vários tanques separados, no mínimo dois (Carvalho, 2002). Comumente utilizados para armazenamento a temperaturas entre 8°C e 14°C (Carvalho, 2002) e o fluido de armazenamento empregado geralmente é a água. Esta técnica requer o cuidado com o isolamento entre os tanques, pois deve-se evitar a troca de calor entre a água gelada estocada e a água de retorno que está numa temperatura mais elevada.

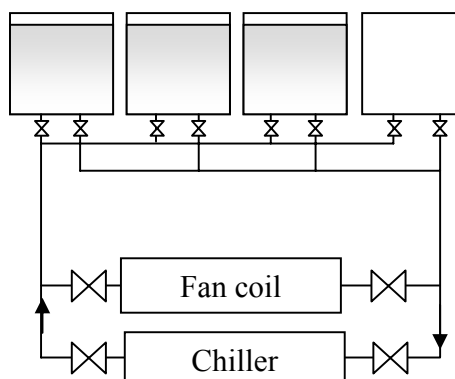


Figura 1. 3 - Esquema de termoacumulação utilizando múltiplos tanques

Nesta técnica os tanques são utilizados alternadamente. E há sempre um tanque vazio para receber água de retorno que saiu gelada de outro tanque, passou pela carga (Fan coil) e foi para o tanque vazio. Ou também o tanque vazio recebe água gelada proveniente do chiller. Todo o processo é controlado pela abertura e fechamento das válvulas. Este método requer um maior número de válvulas, conexões e tubulações, além um sistema de controle que direcione a água ao tanque de retorno ou às diferentes partes do sistema no momento adequado, porém não há necessidade de se ter cuidado com misturas entre os fluidos. Neste método ocorre o inconveniente de perdas térmicas quando a água fria é introduzida num tanque, que até recentemente, estava vazio. Também é necessário um volume de armazenamento relativamente grande.

b) Tanques Estratificados

Nesta técnica o fluido empregado é comumente a água e utiliza um único tanque para estocagem de energia térmica. A estratificação pode ter várias configurações, podendo ter barreiras físicas ou ser estratificado termicamente valendo-se dos gradientes de densidade. Alguns exemplos são mostrados a seguir.



Figura 1. 4 - Tanque estratificado com barreiras (a) e tanque estratificado termicamente (b) (adaptado de Dinçer *et al*, 2002)



Figura 1. 5 - Tanque de água gelada estratificado termicamente para uso em refrigeração (University of Akron, 2007)

Há também a estratificação com membrana ou diafragma:

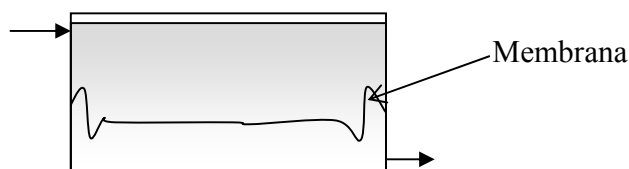


Figura 1. 6 - Tanque estratificado com membrana (adaptado de Dinçer *et al*, 2002)

Na técnica de armazenamento térmico com tanques estratificados termicamente o fluido de armazenamento a alta temperatura é separado do que está a baixa temperatura não por um isolamento completo mas por uma separação devido ao gradiente de densidade do fluido, assim, é desejável um tanque que possua uma altura igual ou inferior ao dobro do diâmetro afim de evitar a mistura entre os dois, principalmente no carregamento e descarregamento. Neste tipo de tanque as temperaturas mais baixas ficam na faixa de 4°C a 6°C, enquanto que as maiores estão entre 10°C e 18°C, na prática, quanto maior for a diferença entre as temperaturas máxima e mínima, melhor será para aplicação do método devido à maior diferença entre as densidades o que dificulta a mistura (ASHRAE, 1993).

As entradas e saídas de fluido no tanque devem ser o mais alto e o mais profundo possível, respectivamente, visando evitar perdas, isto é, reduzindo o volume “morto” dentro do tanque de armazenamento.

Durante o carregamento deve surgir uma fronteira de separação entre os volumes de fluido “quente” e “frio”. Esta fronteira de transição é denominada de *thermocline*.

Visando manter o thermocline no tanque é necessário o uso de difusores tanto na entrada como na saída do tanque. Esta camada se desloca da base para o topo do tanque no carregamento e do topo para a base no descarregamento.

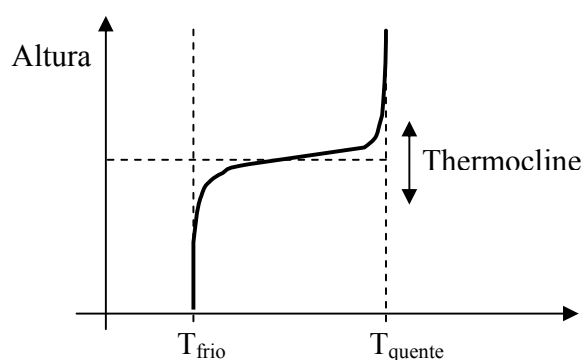


Figura 1. 7 - Gradiente de temperatura no tanque estratificado e fronteira entre os fluidos “quente” e “frio” (thermocline)

O projeto dos difusores é crítico, pois é o responsável pela qualidade da estratificação, ou seja, pela qualidade da camada de transição (thermocline). Os difusores devem ser projetados de forma a minimizarem a mistura do fluido de armazenamento e devem evitar ao máximo a turbulência, para tanto, os mesmos devem ser dispostos simetricamente em relação ao eixo vertical e em relação ao plano horizontal. Assim pode-se ter um aproveitamento de até 90% da energia armazenada (Thumann, 2001).

Na estratificação com labirintos, os volumes da água estão separados por barreiras (chicanas), formando compartimentos parcialmente separados (Fig. 1.4a). Neste processo o volume de carga e descarga é feito de maneira seqüencial. Durante o carregamento o fluido frio empurra o fluido quente para fora, isto provoca uma mistura significativa dos dois fluidos devido à turbulência presente neste processo, velocidade do fluido, variações de densidade, condutividade térmica e interações entre as paredes do armazenador e o fluido (ASHRAE, 1993, Dinçer et al, 2002).

No processo de estratificação com diafragma ou membrana, esta barreira física pode ser rígida ou móvel, e é montado dentro do tanque de armazenamento. Esta membrana tem por finalidade fazer uma separação entre as regiões “quente” e “fria”, eliminando a mistura e a condução de calor entre ambas, dispensando assim o uso de difusores (Dinçer et al, 2002).

1.2.2. Calor Latente

O calor transferido quando uma substância muda de uma fase para outra é chamado de calor latente. O calor trocado neste processo é muito maior que o calor sensível trocado para um determinado meio. O material utilizado neste processo é chamado PCM (*phase change material*) ou material de mudança de fase (MMF) que geralmente são soluções de sal em água. A energia na forma de calor latente é armazenada neste método, que pode ser realizado à temperatura constante, que é a temperatura de mudança de fase, que é uma característica do MMF. Quando o material passa da fase líquida para a fase sólida libera calor, mas quando passa da fase sólida para a fase líquida absorve calor, há materiais que mudam de fase a até 800°C, que é o caso do cloreto de sódio (Kelman, 2002). Neste processo deve haver um fluido de trabalho para o carregamento e descarregamento do sistema (Kelman, 2002; Dinçer et al, 2002).

Durante o processo de mudança de fase, que ocorre, na superfície de transferência de calor, a fusão ou solidificação do material, à temperatura constante e esta superfície pode sofrer alterações de geometria, pois ela se desloca ao longo do tempo. A difusividade do MMF pode sofrer variações devido às diferenças de fases o que pode limitar a capacidade de armazenamento de energia. A quantidade de energia armazenada no material é proporcional à quantidade de massa (m) e ao calor latente do material (L).

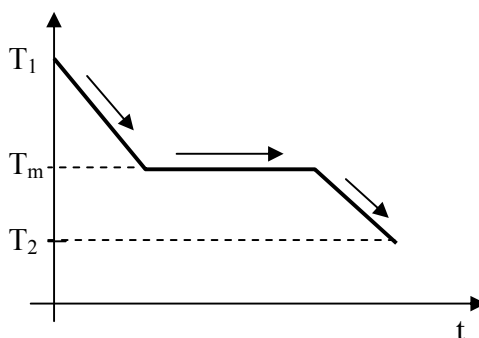


Figura 1. 8 - Resfriamento com mudança de fase.

No processo de resfriamento visto na figura (1.8) há duas parcelas de calor sensível e uma parcela de calor latente (mais significativa que as parcelas do calor sensível), que ocorre à temperatura de mudança de fase (T_m). O calor total absorvido, assumindo c_p constante, neste processo é:

$$Q = mc_p(T_m - T_1) + mL + mc_p(T_2 - T_m) \quad (1.3)$$

Os materiais utilizados como MMF são: substâncias eutéticas, e misturas que são substâncias inorgânicas, como por exemplo, misturas salinas ou substâncias orgânicas e ácidos graxos. (Zalba et al, 2003).

As principais vantagens deste método são maior capacidade a armazenamento de energia carregamento e descarregamento a temperaturas constantes e redução do espaço ocupado pelo armazenador devido ao tamanho relativamente menor. Entretanto pode ocorrer super-resfriamento do MMF, no caso de armazenamento a baixas temperaturas, dificuldade de controle da taxa de calor trocado e aumento de custos relativos à aquisição e operação de uma instalação que utilize este método.

Na utilização e seleção de materiais de mudança de fase é necessário avaliar as características requeridas para cada tipo e aplicação, estas características são avaliadas segundo critérios termodinâmicos, que incluem as propriedades termofísicas do material, critérios cinéticos, critérios químicos, como, por exemplo, estabilidade química a longo prazo e possibilidade de corrosão, critérios técnicos e econômicos (Zalba et al, 2003).

1.2.2.1. Materiais de Mudança de Fase (PCM)

Classificação

De acordo com Zalba et al (2003) e Dinçer e Rosen (2002) os materiais empregados em sistemas de armazenamento de energia térmica na forma de calor latente podem ser agrupados de acordo com algumas de suas características. Serão aqui citadas as classificações de acordo com a disponibilidade comercial e composição química, se o PCM é orgânico ou inorgânico.

a) Materiais comerciais e não comerciais

Esta característica agrupa os materiais de mudança de fase acordo com seguinte critério: se são ou não fabricados para serem comercializados como PCM. Suas propriedades termofísicas (ponto de fusão, calor específico, condutividade térmica e densidade) são conhecidas e fornecidas pelos seus fabricantes. Estas substâncias podem ser eutéticas, misturas orgânicas, inorgânicas ou ácidos graxos.

b) Materiais Orgânicos e Inorgânicos

Os materiais orgânicos compreendem substâncias como parafinas, ceras ou alcanos. Dentro de materiais orgânicos, existe uma classe chamada MCPAM (Phase change materials made up of molecular alloys), formado por ligas base-alcano, que têm a vantagem de ser termoajustável, ou seja, eles permitem alterações na temperatura de mudança de fase através da sua composição. Quanto aos inorgânicos, uma parte considerável destes materiais são os sais hidratados em suas várias aplicações, principalmente em armazenamento de energia solar. Com estes materiais pode-se armazenar energia térmica a temperaturas bem elevadas, em torno de 1000 °C (Kelman, 2002). No que diz respeito à temperatura de armazenagem ou mudança fase, a transferência de calor em acumuladores pode ser melhorada pela escolha correta do PCM, de tal forma que a sua temperatura de mudança de fase otimize o gradiente térmico com relação à substância, com o calor que está sendo trocado (Zalba et al, 2003). Por exemplo, com parafinas e alcanos é possível variar o número de átomos de carbono ou de formas diferentes de ligas moleculares, o que permite uma variação praticamente contínua da temperatura de mudança de fase dentro de certos intervalos.

A seguir estão listados, nas tabelas, algumas substâncias inorgânicas e orgânicas como exemplos de PCM (Zalba et al, 2003).

Tabela 1. 1 - Algumas Substâncias Inorgânicas com potencial para uso como PCM (adaptado de Zalba et al, 2003)

Substância	Temperatura de fusão (°C)	Calor Latente (kJ/kg)	Condutividade térmica (W/m K)	Densidade (kg/m³)
H ₂ O	0	333	0.612 (líquido, 20°C)	998 (líquido, 20 °C)
LiClO ₃ . 3H ₂ O	8.1	253	n.a.	1720
ZnCl ₂ . 3H ₂ O	10	n.a.	n.a.	n.a.
K ₂ HPO ₄ .6H ₂ O	13	n.a.	n.a.	n.a.
NaOH . 3.1/2H ₂ O	15	n.a.	n.a.	n.a.
Na ₂ CrO ₄ . 10H ₂ O	18	n.a.	n.a.	1447 (líquido, 20°C)
KF . 4H ₂ O	18.5	231	n.a.	1455 (sólido, 18°C)
Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25.8	125.9	n.a.	1728 (líquido, 40 °C) 1795 (sólido, 5 °C)
CaCl ₂ .6H ₂ O	29	190.8	0.540 (líquido, 38.7°C)	1562 (líquido, 32 °C)

Tabela 1. 2 - Algumas Substâncias Orgânicas com potencial para uso como PCM (adaptado de Zalba et al, 2003)

Substância	Temperatura de fusão (°C)	Calor Latente (kJ/kg)	Condutividade térmica (W/m K)	Densidade (kg/m³)
Parafina C14	4.5	165	n.a.	n.a.
Paraffina C15–C16	8	153	n.a.	n.a.
Polyglycol E400	8	99.6	0.187 (líquido, 38.6 °C) 0.185 (líquido, 69.9 °C)	1125 (líquido, 25 °C) 1228 (sólido, 3 °C)
Dimethyl-sulfoxido (DMS)	16.5	85.7	n.a.	1009 (sólido e líquido)
Paraffina C16–C18	20–22	152	n.a.	n.a.
Polyglycol E600	22	127.2	0.189 (líquido, 38.6 °C) 0.187 (líquido, 67.0 °C)	1126 (líquido, 25 °C) 1232 (sólido, 4 °C)
Paraffina C13–C24	22–24	189	0.21 (sólido)	0.760 (líquido, 70 °C)

Tabela 1. 3 - Alguns ácidos graxos com potencial para uso como PCM (adaptado de Zalba et al, 2003)

Alguns ácidos graxos com potencial para uso como PCM				
Substância	Temperatura de fusão (°C)	Calor Latente (kJ/kg)	Condutividade térmica (W/m K)	Densidade (kg/m³)
Propyl palmitate	10	186	n.a.	n.a.
Isopropyl palmitate	11	95–100	n.a.	n.a.
Capric–lauric acid p-pentadecane (90:10)	13.3	142.2	n.a.	n.a.
Isopropyl stearate	14–18	140–142	n.a.	n.a.
Caprylic acid	16.3	149	0.149 (líquido, 38.6 °C) 0.145 (líquido, 67.7 °C) 0.148 (líquido, 20 °C)	901 (líquido, 30 °C) 862 (líquido, 80 °C) 981 (sólido, 13 °C) 1033 (sólido, 10 °C)
Capric–lauric acid (65 mol%–35 mol%)	18.0	148	n.a.	n.a.
Butyl stearate	19	140	n.a.	n.a.
Capric–lauric acid (45–55%)	21	143	n.a.	n.a.
Dimethyl sabacate	21	120–135	n.a.	n.a.

1.2.2.2 Tipos de Sistemas de Armazenamento de Energia por Calor Latente

Na aplicação da técnica de armazenamento de energia por calor latente, há uma série de tipos de sistemas desenvolvidos para melhorar no processo de transferência de calor. Estes sistemas são de dois tipos: Solidificação/fusão sobre superfície externa e solidificação/fusão sobre superfície interna.

Na solidificação sobre superfície externa a camada de sólido cresce ao redor do tubo (Ismail et al, 2000). Neste processo o fluido refrigerante (fluido de trabalho) passa no interior do tubo a uma temperatura inferior a do ponto de solidificação do fluido externo, promovendo assim a solidificação.

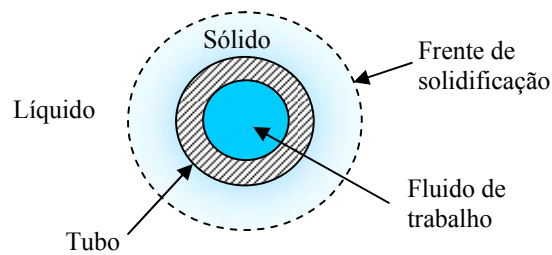


Figura 1. 9 - Solidificação sobre superfície externa.

Já no processo de descarregamento um fluido a uma temperatura maior que a temperatura de fusão passa no interior do tubo. Este fluido de trabalho terá sua temperatura diminuída e a camada de sólido sobre o tubo tenderá a diminuir radialmente no sentido do centro para a extremidade.

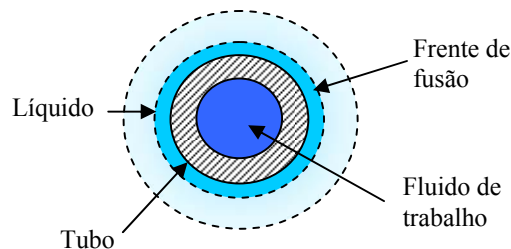


Figura 1. 10 - Fusão do sólido quando o fluido de trabalho passa no interior do tubo.

Porém, se o fluido a temperatura maior que a temperatura de fusão passar na região externa ao tubo a fusão ocorrerá na parte externa da camada de sólido.

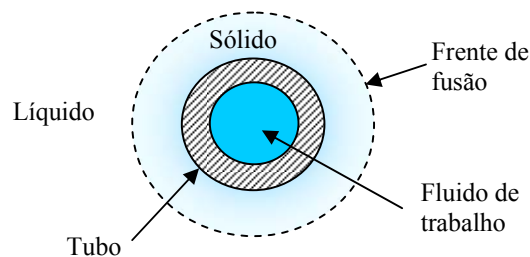


Figura 1. 11 - Fusão do sólido quando o fluido de trabalho passa exterior ao tubo.

Uma observação é que o encontro de duas camadas de sólido adjacentes deve ser evitado. Dependendo do sistema de descarregamento pode haver um comprometimento da performance do sistema.

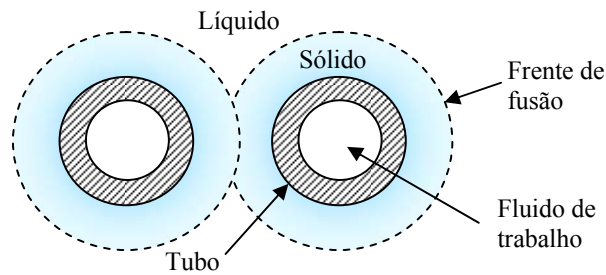


Figura 1. 12 - Encontro de camadas de solidificação.

São exemplos de outras configurações:



Figura 1. 13 - Tubos com aletas aumentam a área de transferência de calor para solidificação/fusão externa

Na configuração vista acima a camada de sólido, em geral de gelo, se forma de acordo com a geometria das aletas da tubulação. Esta configuração foi estudada por Ismail et al, 2000.

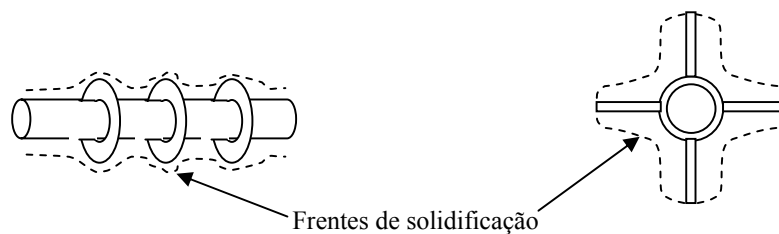


Figura 1. 14 – Solidificação externa em tubos aletados (adaptado de Dincer et al, 2002)

Nos sistemas de onde ocorre fusão interna do gelo, o fluido de trabalho percorre a geometria externamente, provocando a solidificação/fusão no interior desta. Um exemplo desta aplicação é o uso de cápsulas esféricas, mas também são utilizadas cápsulas planas e cilíndricas, sendo que as cápsulas esféricas apresentam melhor relação volume sobre a área (Dinçer et al, 2002). Algumas destas cápsulas também são produzidas pela Cryogel (Cryogel, 2004). Este fabricante produz cápsulas esféricas com algumas alterações na forma, ou seja, estas cápsulas possuem alguns círculos planos com a função de permitir a expansão volumétrica do PCM, no caso da água, quando ocorre a solidificação (Figura 1.15).

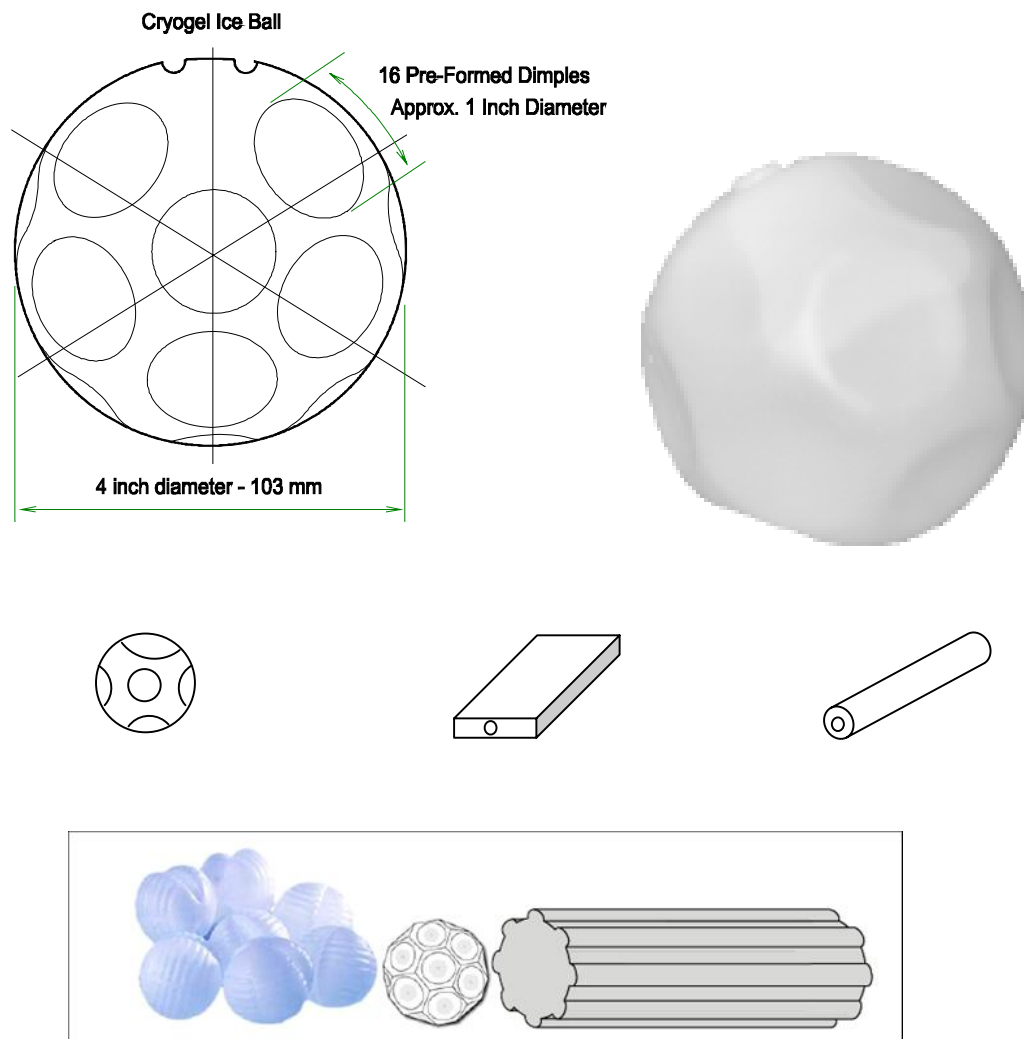


Figura 1.15 - Tipos de cápsulas utilizadas em fusão/solidificação interna (Cryogel, 2004, Guzmán, 2004)

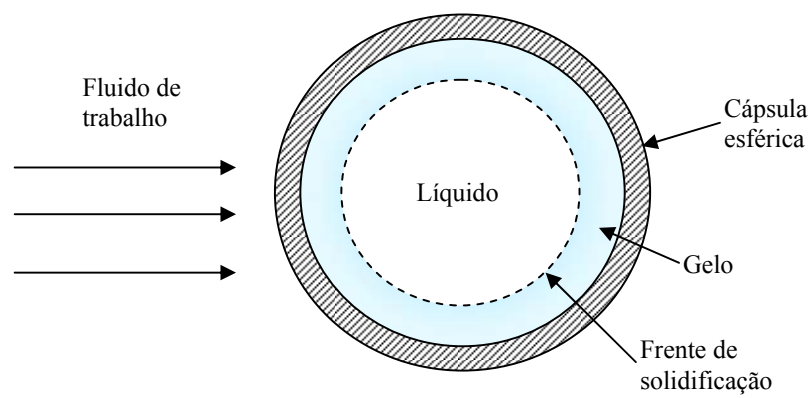


Figura 1.16 - Solidificação em cápsula esférica

As cápsulas geralmente são feitas de materiais poliméricos ou metálicos (Zalba et al, 2003). A exemplo de aplicação deste tipo de armazenamento, há os bancos de gelo (ASHRAE, 1999) que utilizam um fluido secundário para o carregamento e descarregamento, por exemplo, uma mistura de etilenoglicol, utilizando chillers com capacidade de atingir -3°C a -6°C .

Vários trabalhos têm sido realizados na investigação experimental e computacional deste tipo de armazenamento de energia térmica (Ismail et al, 2003, Ismail e Henríquez, 2002, Ismail e Henríquez, 2000). Este método de armazenamento é utilizado em tanques que são preenchidos com camadas de cápsulas esféricas e com o fluido de trabalho (Dinçer et al, 2002, Silva Jr., 2004, Kelman, 2002). Neste sistema o armazenamento de energia térmica é feito na forma calor latente no gelo contido no interior das cápsulas e na forma de calor sensível contido no fluido de trabalho, em estado líquido, que permaneceu no interior do tanque, como mostrado na figura 1.17.

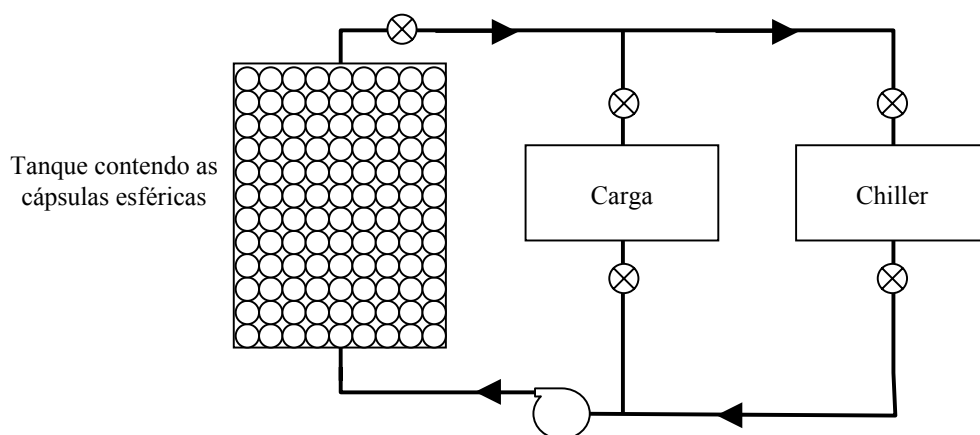


Figura 1.17 - Esquema do armazenamento de calor latente em cápsulas esféricas

O tanque é inicialmente percorrido pelo fluido de trabalho a uma temperatura abaixo do ponto de solidificação. Um chiller mantém o fluido de trabalho, circulando no circuito Chiller-Tanque, a esta temperatura até que todas as cápsulas tenham todo o conteúdo em seu interior solidificado, nesta fase diz-se que o armazenador está completamente carregado e o fluido de trabalho não passa pela carga térmica, que tem suas válvulas fechadas. O período de armazenamento depende da aplicação. Quando solicitado, o processo de descarregamento se inicia, com as válvulas do chiller fechadas, as válvulas da carga são abertas e o fluido de trabalho passa agora a percorrer o circuito Tanque-Carga, aumentando a sua temperatura na saída da carga, isto pode durar até que todas as cápsulas tenham o seu conteúdo completamente líquido. Assim ocorreu o descarregamento completo do armazenador. Havendo disponibilidade de energia para o chiller e necessidade de mais um carregamento, o processo pode ser reiniciado.

1.2.2.3. Super-resfriamento

Um fenômeno de relevância que pode ocorrer neste processo é o super-resfriamento, fenômeno aleatório no qual a temperatura do meio de armazenamento diminui abaixo da temperatura de solidificação mesmo ainda estando em estado líquido. Este pode ocorrer quando do início da solidificação, isto reduz a capacidade de armazenamento. É mais acentuado em sais hidratados e materiais mais viscosos.

Para uma substância utilizada como PCM que tem um arranjo molecular cristalino na fase sólida, as moléculas são acomodadas em uma estrutura repetitiva. Quando surge uma estrutura diferenciada com um nível de energia adequado para a formação do sólido, a partir do movimento aleatório dos átomos, a formação do primeiro cristal é obtida, isto é a nucleação. Neste processo há a possibilidade de a temperatura do material ser reduzida até abaixo da temperatura na qual ocorre a mudança de fase sem que haja formação de sólido. Este estado é denominado termodinamicamente como metaestável (Guzmán, 2004). Isto caracteriza o super-resfriamento. Guzmán (2004) define o grau de super-resfriamento (GSR) como a diferença entre a temperatura de mudança de fase e a temperatura na qual ocorre a nucleação (abaixo da temperatura de mudança de fase). A partir do instante de tempo em que começa a nucleação a temperatura tende a retornar à temperatura de mudança de fase em um breve espaço de tempo. No caso da água, neste momento começa a formação do gelo dendrítico antes de ocorrer a formação de gelo cristalino (Fig. 1.18). Este processo de super-resfriamento é prejudicial ao processo de termoacumulação com mudança de fase porque parte da energia que deveria ser armazenada como calor latente, na verdade é armazenada como calor sensível. Este fenômeno pode ser evitado ou minimizado com a adição de agentes nucleantes ou agitação do material. Estes agentes nucleantes, como o nome indica, induzem à nucleação antes que a temperatura fique inferior à temperatura de mudança de fase e podem ser compostos químicos ou até mesmo partículas de metal.

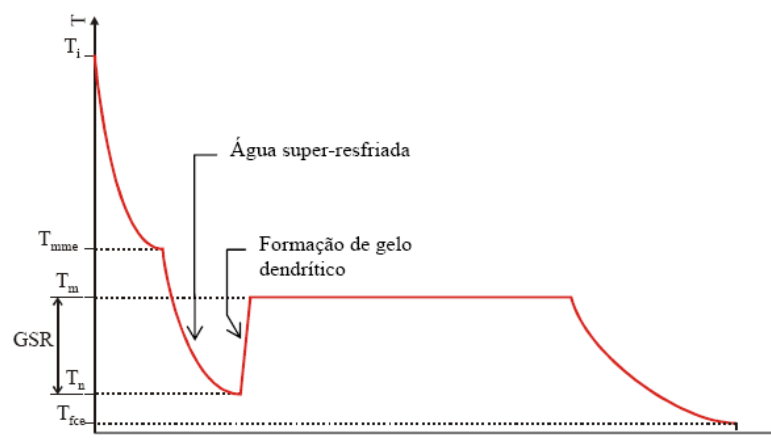


Figura 1.18 - Diagrama de mudança de fase para a água, mostrando o grau de super-resfriamento (Guzmán, 2004)

1.2.2.4 Aplicação de PCM em Energia Solar

Devido à necessidade de utilização eficiente da energia disponível na radiação solar, algumas tecnologias têm sido desenvolvidas e vários trabalhos de pesquisa vêm sendo realizados nesta área. Aghbalou et al (2006) apresentaram um trabalho com os seguintes objetivos: apresentar a otimização geral para um coletor solar, determinando a temperatura ótima de saída e fluxo de massa ótimo e a montagem de PCM em placas dentro do tanque de armazenamento de energia solar, determinando temperatura ótima de fusão e máxima energia na saída. Além disso também investigaram o processo de fusão do PCM montado em placas por meio de uma solução analítica. Neste sistema um fluido de trabalho, no caso água, é aquecido em um coletor solar e levado ao tanque de armazenamento. Este possui Placas retangulares, preenchidas com PCM, em

seu interior com a finalidade de trocar calor com o fluido de trabalho, armazenando energia na forma de calor latente.

Existem também outros estudos realizados em armazenamento de energia na forma calor latente proveniente de fonte solar e os resultados obtidos se mostram bastante otimistas quanto à sua aplicação, aqui são citados alguns deles: Esen et al, 1998, que fazem uma análise de dois tipos de tanques de armazenamento térmico em PCMs para armazenamento de energia solar; Zhou et al, 2007; Hammou e Lacroix, 2006, fazem uma análise de uma sistema híbrido de armazenamento térmico, utilizando PCMs, visando economia de energia elétrica e estocagem de calor; e Michels e Pitz-Paal, 2007, fazem um estudo de sistema que utiliza materiais de mudança de fase para armazenarem energia térmica solar para posterior utilização como fonte de calor em uma planta de geração de energia elétrica.

No que se refere à aplicação de PCMs em edificações visando a redução do consumo de energia elétrica, Ismail et al (2007) apresentaram uma comparação entre as eficiências térmicas de duas janelas compostas por duas placas de vidro, com um espaço vazio entre elas, expostas à radiação solar. Uma teve o espaço vazio preenchido por um gás que absorve radiação infravermelha e outra foi preenchida com material de mudança de fase. Apesar de o primeiro tipo apresentar uma eficiência maior, ambas apresentaram coeficientes de ganho de calor em valores adequados ao fim ao qual se destinam.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo paramétrico computacional do processo de solidificação de materiais de mudança de fase contidos em cápsulas esféricas visando sua aplicação em sistemas de armazenamento de energia térmica na forma de calor latente.

Este trabalho tem como objetivo específico utilizar um modelo matemático que represente o processo de solidificação de materiais de mudança de fase no interior de cápsulas esféricas, valendo-se de uma ferramenta computacional para implementá-lo e realizar as simulações, verificando a influência de alguns parâmetros sobre o processo. Os parâmetros avaliados foram: composição do fluido de trabalho, diâmetro externo da cápsula esférica, a velocidade média e a temperatura do fluido de trabalho, além de análises do processo de solidificação de diferentes tipos de material de mudança de fase.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho tem uma estrutura dividida por capítulos. No capítulo 1, uma breve apresentação de métodos e técnicas de armazenamento de energia térmica que são utilizados atualmente, mostrando uma descrição dos métodos que utilizam tecnologias capazes de armazenar energia na forma de calor sensível e na forma de calor latente. Também é discutido um problema comum em sistemas de armazenamento de calor latente que é o super-resfriamento. Após trazer uma visão geral das tecnologias empregadas na atualidade, o trabalho apresenta, no capítulo 2, uma revisão da literatura que trata do tema em foco, discorrendo a respeito de algumas pesquisas realizadas em armazenamento térmico na forma de calor latente. No capítulo 3 é apresentada uma modelagem matemática do processo de solidificação de um material de mudança de fase no interior de uma cápsula esférica. Também é feita uma discretização das equações governantes utilizando o método de diferenças finitas com esquema totalmente

implícito. No capítulo 4 são apresentados os dados relativos aos diferentes parâmetros, dos quais, são avaliados os efeitos sobre o processo de armazenamento de energia térmica. Os resultados obtidos são apresentados na forma de gráficos discutindo-os. No capítulo 5 são sintetizadas as conclusões tiradas a partir dos resultados obtidos e também são propostos futuros trabalhos como forma de dar continuidade ao trabalho aqui realizado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido à necessidade do uso da energia ser cada vez mais racionalizado, sendo a sua demanda crescente numa proporção bem maior que a da sua oferta, técnicas de armazenamento térmico têm sido o foco de pesquisadores em várias partes do mundo. Muitos trabalhos voltados à pesquisa na área de processos de armazenamento de energia térmica têm sido desenvolvidos há algumas décadas. Ao longo do tempo novos materiais têm sido descobertos, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas de forma a otimizar os processos de armazenamento térmico. Como há muitos parâmetros que podem influenciar no comportamento destes sistemas, existem pesquisas voltadas à modelagem computacional e verificações experimentais do comportamento destes processos, os quais possibilitam, posteriormente, a execução de projetos otimizados. Aqui são discutidos alguns destes trabalhos.

Ismail et al (2003) apresentaram um modelo de simulação numérica do processo de solidificação da água no interior de uma cápsula esférica. A modelagem do processo de solidificação foi feita utilizando-se condições de contorno puramente condutivas no interior da cápsula e resfriamento convectivo no exterior da mesma. Estas equações, que representam o processo, foram solucionadas com suas respectivas condições de contorno, utilizando diferenças finitas e o método da malha móvel. O modelo foi validado pela comparação com resultados experimentais. Neste trabalho foram feitos modelos para o processo de resfriamento do líquido no interior da cápsula, até que o instante do início da solidificação, onde a partir deste momento ocorrem as duas fases sólido e líquido. A frente de solidificação é modelada por malha móvel até a completa solidificação da água no interior da cápsula. Por fim é feita a modelagem do processo de diminuição de temperatura do sólido no interior da cápsula esférica.

Uma investigação experimental do processo de solidificação de um PCM no interior de uma cápsula esférica foi realizada por Chan e Tan (2005). Neste caso o PCM utilizado foi o n-hexadecano no interior de uma cápsula esférica imersa em um tanque com água gelada. Os efeitos sobre o processo de solidificação foram avaliados para três diferentes temperaturas na superfície externa da cápsula (13 °C, 8 °C e 3°C) e também para três diferentes temperaturas de “superaquecimento” do PCM líquido (8 °C, 2 °C e 0 °C). Estas temperaturas de superaquecimento foram definidas como sendo a diferença entre a temperatura do líquido no interior da cápsula esférica e a temperatura de fusão do PCM, a qual é corresponde a um valor de 18,2 °C. Com este experimento verificou-se que quanto menores as temperaturas da superfície externa da cápsula esférica, maiores foram as frações de massa solidificada para os mesmos intervalos de tempo. Também foi constatado que, no início do processo de solidificação, o deslocamento da frente de solidificação é mais rápido do que o observado para tempos posteriores. Quando a frente de solidificação alcança as proximidades do centro da cápsula esférica, esta ficou com uma superfície muito irregular devido à formação de vazios provocados pela retração do MMF quando solidificado. As diferentes temperaturas de superaquecimento não provocaram diferenças significativas no processo de solidificação.

Ismail e Henríquez (2000) apresentaram um modelo matemático para o estudo da solidificação de PCM no interior de cápsulas esféricas. No trabalho em questão, a cápsula esférica era mantida a uma temperatura assumida como constante, ou seja, admitiu-se que o

fluido de trabalho no exterior da cápsula estava em repouso, não havendo corrente de fluxo ao redor da mesma. Este modelo foi utilizado para determinar a influência de alguns parâmetros sobre a fração de massa solidificada e o tempo necessário para a solidificação completa do PCM. Os parâmetros avaliados foram os diâmetros internos, a espessura e o material da cápsula esférica, a temperatura inicial do PCM e a temperatura externa na parede da cápsula. Este modelo foi baseado em condução pura no PCM e foi validado comparando seus resultados com os modelos similares existentes. Desta análise, foi constatado que o aumento do diâmetro interno da cápsula esférica influi aumentando o tempo para a solidificação completa (Fig. 2.1). No que se refere à influência da espessura e do material da cápsula esférica, para os materiais testados, houve diferenças na relação entre espessura da casca esférica e tempo de solidificação completa, devido ao raio crítico na transferência de calor por condução e convecção, que é diferente para cada um dos materiais testados. Por exemplo, para uma esfera feita de cobre, quanto maior é a espessura da casca esférica menor é o tempo necessário para a solidificação completa, já para uma esfera de PVC, quanto maior for a espessura maior será o tempo necessário para a solidificação completa, mantendo o diâmetro interno fixo. Estes resultados são observados para espessuras inferiores a 10 mm. Quanto à influência das temperaturas iniciais do PCM e temperaturas externas à cápsula esférica, ambas provocam o aumento do tempo de solidificação completa quando incrementados. Os parâmetros analisados provocaram, sobre a fração de massa solidificada, os mesmos efeitos observados no tempo para solidificação completa. Também foi estabelecida uma relação entre a temperatura externa à cápsula e o tempo de solidificação completa, demonstrando que foi necessário um tempo maior para ocorrer uma completa solidificação do PCM para temperaturas menores do fluido de trabalho e maiores raios internos das cápsulas (Fig. 2.1).

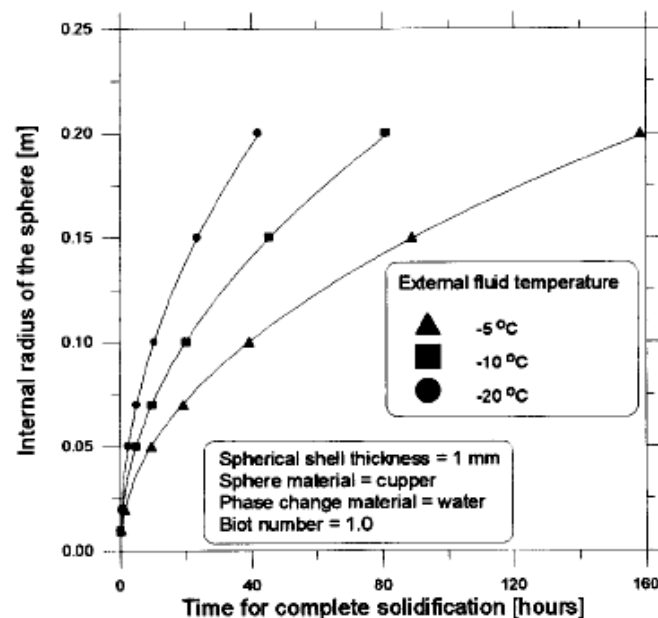


Figura 2. 1 - Efeito da temperatura do fluido de trabalho e do raio interno da cápsula esférica sobre o tempo de solidificação completa do PCM (Ismail e Henríquez, 2000).

Bédécarrats et al (1995) realizaram um estudo de um processo industrial de armazenamento de energia térmica utilizado em condicionamento de ar ou em refrigeração. Para tanto, utilizaram um tanque de pequenas proporções preenchido com cápsulas esféricas de forma aleatória (figura 2.2). As cápsulas esféricas de polietileno de alta densidade, 77 mm de diâmetro e espessura de 2 mm, com pode ser visto na figura 2.2, foram preenchidas com água, como material de mudança de fase. Foram analisados o processo de carregamento incluindo o super-resfriamento e o processo de descarga do tanque. Também foi implementado uma modelo computacional deste sistema. As principais hipóteses foram as seguintes: o reservatório está completamente isolado; foi verificado experimentalmente que a temperatura é independente do raio, ou seja, a temperatura é uniforme por camada de esferas no tanque e depende apenas da altura; a convecção natural é muito pequena no tanque, portanto foi desprezada.

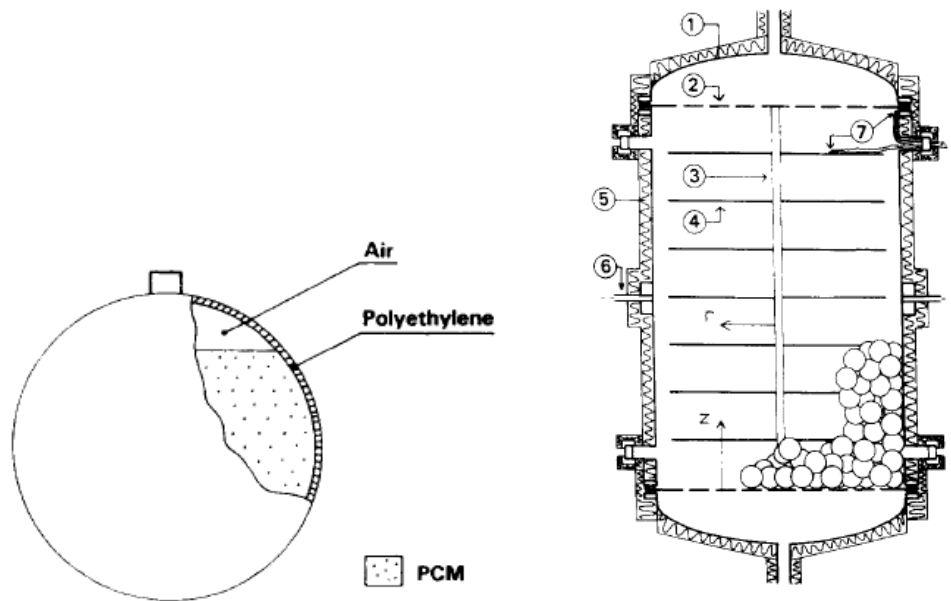


Figura 2. 2 -- Cápsula esférica preenchida com PCM e Tanque preenchido de forma aleatória com as cápsulas esféricas (Bédécarrats et al 1996).

Como resultados foram observadas assimetrias entre o processo de carga e descarga pois durante o processo de carregamento ocorre o super-resfriamento fazendo com que a temperatura de saída do tanque estabilize num valor inferior à temperatura de fusão do PCM. O tempo de armazenamento diminuiu para um fluxo do fluido de trabalho menor, como o esperado. E para o processo de descarregamento, com o fluido de trabalho a uma temperatura maior que a temperatura de fusão, na saída do tanque ocorre a quase estabilização à temperatura de mudança de fase. A duração do processo de descarregamento é menor quando a temperatura de entrada no tanque aumenta, ocorrendo o mesmo para uma vazão do fluido de trabalho maior. Os resultados do modelo computacional concordaram com os resultados experimentais.

Souza (2002) apresenta uma modelagem que se aproxime as soluções matemáticas para problemas de solidificação de materiais de mudança de fase para uma forma mais próxima da realidade física destes problemas. São realizadas simulações com formulação em entalpia para o processo de mudança de fase da água, incluído o efeito da inversão de massa específica, em geometria polar, isto é, no cilindro, num processo transiente, e as equações que descrevem o

problema são resolvidas com a utilização do método dos volumes finitos com esquema da evolução temporal totalmente implícito. A evolução da frente de fusão, durante a mudança de fase, é avaliada nas duas condições de contorno, ou seja, condutivas e convectivas, incluindo também diversos números de Rayleigh. Assim é feita uma comparação entre o volume fundido considerando apenas o processo de condução e o volume fundido levando em consideração os efeitos convectivos. São feitas comparações qualitativas entre as soluções propostas e as soluções analíticas disponíveis na literatura.

Ismail (1998) faz uma descrição detalhada do estudo de solidificação em geometrias planas, esféricas e cilíndricas tendo como foco o desenvolvimento de modelos matemáticos. Isto permite a compreensão da dinâmica dos processos de fusão e solidificação tornando possível descrever como o fenômeno físico se processa. Também foi demonstrado que a evolução da frente de solidificação que acontece no material de mudança de fase influencia a performance do processo de armazenamento de energia térmica.

Uma análise do processo de solidificação unidirecional de um material orgânico utilizado como PCM, em geometria cilíndrica, foi feita por Rodrigues (2001). O material utilizado foi o ciclohexanol com temperatura de mudança de fase de 23 °C. Neste trabalho foi realizado um estudo numérico e experimental do processo. Foram obtidos os campos de temperatura e posição da interface sólido-líquido com o aparato experimental, sendo possível a visualização do processo por se tratar de um material translúcido. Na simulação numérica, a equação da energia formulada em termos da entalpia e utilizando malha fixa foi resolvida com o uso do método dos volumes finitos. A comparação dos resultados foi feita, possibilitando a validação do modelo, devido à concordância dos resultados obtidos tanto experimentalmente quanto numericamente.

A influência de diversos parâmetros sobre o processo de armazenamento térmico em um armazenador do tipo gelo sobre serpentinas foi analisada por Micaroni (1996). Neste trabalho foi feita a implementação de um modelo matemático que utilizou o método de diferenças finitas. Foi assumido que os efeitos convectivos podem ser desprezados durante o processo de carregamento do sistema, para efeito de simplificação. Portanto foram levados em consideração apenas os efeitos condutivos para este caso de solidificação da água em torno das serpentinas. Porém no caso de descarregamento, não se pode desprezar os efeitos convectivos, visto que a influência destes efeitos aumenta ao longo do processo, ao passo que a influência dos efeitos condutivos diminui. O modelo apresentou resultados próximos aos obtidos com as soluções que eram conhecidas anteriormente e também se mostrou bastante aproximado aos resultados obtidos por soluções analíticas. Foi demonstrado pela análise dos resultados que o número de Stefan e o número de Nusselt têm influência na dinâmica da evolução da frente de solidificação, entretanto, a vazão, a temperatura de entrada do fluido de trabalho e a condutividade térmica da serpentina foram os parâmetros que exerceram maior influência no processo de solidificação. Outra hipótese que foi tomada foi a manutenção dos valores das propriedades termofísicas dos fluidos utilizados como sendo constantes, devido ao fato de as variações de temperatura serem pequenas ao ponto de não interferirem significativamente nos valores destas propriedades. No entanto, o autor faz a recomendação da utilização de fluidos com baixos valores de viscosidade tendo em vista minimizar a perda de carga no armazenador evitando assim perdas maiores de energia durante os processos de carregamento e descarregamento.

Um estudo paramétrico do processo de carregamento de um armazenador do tipo leito com cápsulas esféricas preenchidas por água como material de mudança de fase é feito por Silva Jr. (2004). Neste trabalho, as equações que descrevem o processo de transferência de calor foram desenvolvidas e discretizadas, sendo em seguida implementadas com a utilização do método de diferenças finitas com esquema totalmente implícito e malha móvel na mudança de fase. Foram avaliados os efeitos do diâmetro das cápsulas esféricas, da temperatura inicial e da vazão do fluido de trabalho sobre as perdas de energia, o tempo necessário para a solidificação completa do material no interior das cápsulas esféricas, o tempo de carregamento total do armazenador, a evolução da fração de massa solidificada, a evolução da temperatura no interior da cápsula. Como resultados da simulação foram obtidos os valores das variáveis analisadas. Foi constatado que uma diminuição dos diâmetros das cápsulas esféricas o armazenador levou um tempo menor para ser completamente carregado. Com uma temperatura do fluido de trabalho menor foi necessário um tempo menor para o carregamento completo do armazenador e com a vazão aumentada o tempo de carga também decresce. Foram geradas curvas paramétricas que descrevem o comportamento de carregamento do armazenador quanto ao tempo de carga e à quantidade de energia que pode ser armazenada.

No que diz respeito ao estudo de técnicas que permitem aumentar a capacidade de armazenamento de energia térmica de um material de mudança de fase é citado aqui um trabalho que estuda dois tipos de parafinas, a docosane e a hexacosane. Este estudo foi realizado por Alkan (2006). A eficiência de um PCM depende da quantidade de energia e da capacidade e estocagem de energia por unidade de massa durante a fusão ou solidificação. Os dois tipos de parafina estudados possuem temperaturas de mudança de fase de 44 °C e 56 °C, respectivamente. Estes materiais foram sulfonados a três percentagens molares diferentes com o objetivo de aumentar eficiência na capacidade de armazenamento de energia na forma de calor latente. As porcentagens foram de 3.59%, 2.95%, e 2.01% para o docosane e de 1.14%, 0.47% e 0.04% para o hexadocosane. As entalpias de fusão e solidificação dos compostos obtidos foram medidas pelo método de escaneamento calorimétrico. As análises das propriedades obtidas demonstraram que as amostras das parafinas sulfonadas absorveram e dissiparam mais energia que as amostras das parafinas puras, durante os processos de fusão e solidificação, respectivamente. Além disso, as alterações nas temperaturas de mudança de fase não foram significantes. Este trabalho mostrou um método que possibilita o aumento de eficiência do processo de armazenamento de energia térmica com alterações no PCM, demonstrando que este é um método apropriado e aplicável no ganho de capacidade de armazenamento térmico.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO EM CÁPSULA ESFÉRICA

No modelo de transferência de calor no interior de cápsulas esféricas dois fenômenos ocorrem em três etapas, primeiro ocorre o resfriamento do material líquido contido na cápsula até que o mesmo atinja a temperatura de mudança de fase, em seguida ocorre o processo de transferência de calor com a mudança de fase, neste momento as duas fases existem simultaneamente. Após isto ocorre outro processo de resfriamento, porém do material já completamente solidificado no interior da cápsula. Neste capítulo serão apresentadas as equações que foram utilizadas para modelar os processos de resfriamento do PCM, quando totalmente na fase líquida ou totalmente na fase sólida e da transferência de calor durante a mudança de fase.

3.1 Resfriamento Puro do Material de Mudança de Fase

A modelagem do processo de resfriamento do material de mudança de fase pode ser feita sem diferenciar a fase do material, se completamente líquido ou completamente sólido, visto que nos dois casos o fenômeno físico é matematicamente tratado da mesma forma, bastando, para distinguir uma situação da outra, modificar os parâmetros da difusividade térmica (α) e condutividade térmica (k) no momento da implementação das soluções. Aqui será desenvolvido o modelo iniciando pela equação da condução de calor em coordenadas esféricas (Eq. (3.1)) e suas respectivas condições de contorno.

$$\frac{\partial T_j}{\partial t} = \alpha_j \left[\frac{2}{r} \frac{\partial T_j}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_j}{\partial r^2} \right] \quad (3.1)$$

Onde $0 < r < r_{int}$

Índice $j \equiv \text{líq ou sol}$ (líquido ou sólido)

Condições de Contorno:

$$\text{Em } r = r_{int} : -k_j A \frac{\partial T_j}{\partial r} \bigg|_{r_{int}} = Q$$

Sendo Q obtido pela equação (3.4).

$$\text{Em } r = 0 : \frac{\partial T_j}{\partial r} = 0$$

Índice $j \equiv \text{líq ou sol}$ (líquido ou sólido)

3.2 Solidificação do Material de Mudança de Fase

Durante o processo de solidificação coexistem duas fases diferentes, a fase sólida e a fase líquida. Considerando os domínios das fases sólida e líquida de forma separada e admitindo que o processo de transferência de calor em cada uma das regiões pode ser modelado pela equação da condução de calor em coordenadas esféricas, pode-se implementar o modelo.

Para o domínio da fase líquida:

$$\frac{\partial T_{liq}}{\partial t} = \alpha_{liq} \left[\frac{2}{r} \frac{\partial T_{liq}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{liq}}{\partial r^2} \right] \quad (3.2)$$

Onde $0 \leq r \leq r_f$

Para o domínio da fase sólida:

$$\frac{\partial T_{sol}}{\partial t} = \alpha_{sol} \left[\frac{2}{r} \frac{\partial T_{sol}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{sol}}{\partial r^2} \right] \quad (3.3)$$

Onde $r_f < r \leq r_{int}$

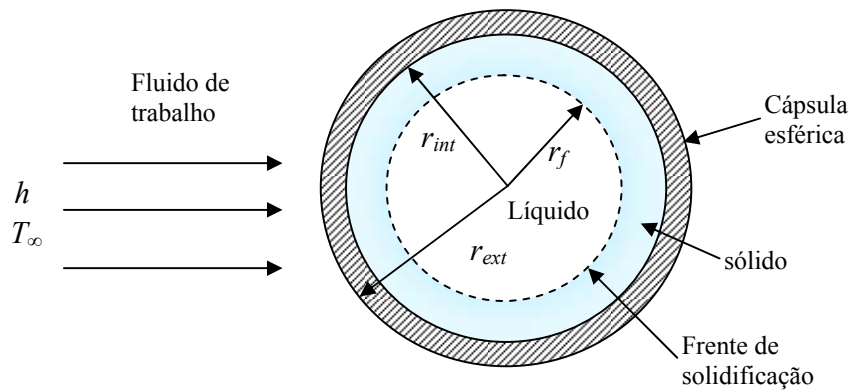


Figura 3. 1 - Coexistência de duas fases (sólido e líquido) no interior da cápsula esférica durante a solidificação

Condições de Contorno:

$$\text{Em } r = 0 : \frac{\partial T_{liq}}{\partial r} = 0$$

$$\text{Em } r = r_{int} : -k_{sol} A \frac{\partial T_{sol}}{\partial r} = Q$$

Onde Q é obtido pela equação (3.4).

$$\text{Em } r = r_f : T_{liq} = T_{sol} = T_{mf}$$

É possível determinar quantidade de calor trocada entre o fluido de trabalho e o PCM (Q) fazendo o balanço de energia na superfície da cápsula. Neste modelo assume-se que a cápsula está preenchida com PCM e a sua superfície externa está submetida a um resfriamento convectivo devido ao escoamento do fluido de trabalho que está uma temperatura mais baixa que a temperatura de mudança de fase do PCM. Neste processo há uma parcela de troca de calor por

condução e outra por convecção. Pode-se aplicar o método das resistências térmicas para obter a equação (3.4).

$$Q = \frac{T_{\infty} - T_{int}}{\frac{1}{4\pi k_{esf}} \left(\frac{1}{r_{int}} - \frac{1}{r_{ext}} \right) + \frac{1}{4\pi h r_{ext}^2}} = \frac{4\pi(T_{\infty} - T_{int})}{\frac{1}{k_{esf}} \frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{int} r_{ext}} + \frac{1}{h r_{ext}^2}} \quad (3.4)$$

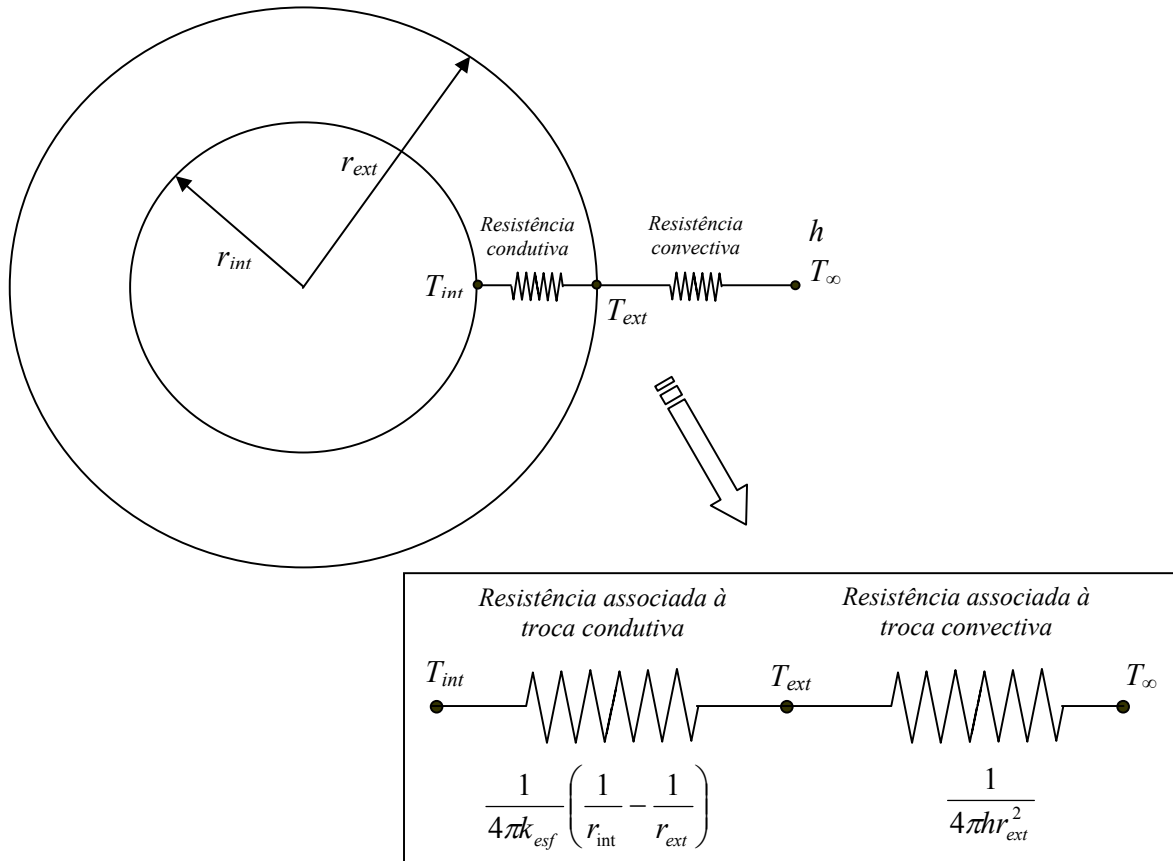


Figura 3. 2 - Parâmetros geométricos e balanço de energia entre o fluido de trabalho e a cápsula esférica, mostrando as resistências térmicas condutivas e convectivas

Para a determinação do coeficiente de transmissão de calor por convecção (h) foi utilizada a correlação para o número de Nusselt (Nu) proposta por Incropera e DeWitt (1998) para o caso de escoamento ao redor de uma esfera (eq. 3.5).

$$\overline{Nu}_{D_{ext}} = \frac{h D_{ext}}{k_{fluido}} = 2 + \left(0,4 Re_{D_{ext}}^{1/2} + 0,06 Re_{D_{ext}}^{2/3} \right) Pr^{0,4} \left(\frac{\mu}{\mu_{sup}} \right)^{1/4} \quad (3.5)$$

Onde todas as propriedades, exceto μ_{sup} , são avaliadas na temperatura do fluido de trabalho T_{∞} . Porém como simplificação, será assumido que a viscosidade do fluido na temperatura da superfície é igual à viscosidade na temperatura do fluido:

$$\left(\frac{\mu}{\mu_{\text{sup}}} \right)^{\frac{1}{4}} = 1 \quad (3.6)$$

A viscosidade dinâmica μ_{sup} é aquela medida à temperatura na superfície da cápsula esférica. O número de Reynolds é definido como:

$$\text{Re} = \frac{\rho \bar{u} (2r_{\text{ext}})}{\mu} \quad (3.7)$$

Sendo $\bar{u}$ a velocidade média do escoamento ao redor da cápsula esférica.

Para a determinação da quantidade de energia retirada da cápsula esférica é necessário conhecer a temperatura da superfície interna desta. Este valor só é calculado se o processo de transferência de calor dentro da cápsula for conhecido.

No modelo de transferência de calor no interior de cápsulas esféricas assume-se que primeiro ocorre o resfriamento do material líquido contido na cápsula até que o mesmo atinja a temperatura de mudança de fase, em seguida ocorre o processo de transmissão de calor com mudança de fase, neste momento as duas fases existem simultaneamente. Após isto ocorre outro processo de resfriamento do material que já se encontra completamente solidificado no interior da cápsula.

Aplicando um balanço de energia na interface sólido-líquido, pode-se determinar a posição da interface sólido-líquido em qualquer instante de tempo:

$$-q_{\text{liq}} + q_{\text{sol}} = -\left(-k_{\text{liq}} \frac{\partial T_{\text{liq}}}{\partial r} \right) + \left(-k_{\text{sol}} \frac{\partial T_{\text{sol}}}{\partial r} \right) = -\rho_{\text{sol}} L \frac{dr_f}{dt} \quad (3.8)$$

3.3. Discretização das Equações

Visto que a modelagem matemática do processo de solidificação do material de mudança de fase foi feita para as três etapas nas quais ele ocorre no interior da cápsula esférica, faz-se necessária a discretização das equações governantes. As três etapas são: primeiro o resfriamento do material na fase líquida, segundo: a mudança de fase, na qual coexistem as fases líquida e sólida, e por fim a terceira: o resfriamento do material na fase sólida.

Na primeira e na terceira etapas, as equações que representam o modelo matemático são discretizadas com o uso do método de diferenças finitas onde o esquema é totalmente implícito. Nestes dois casos é utilizada uma malha fixa regular, onde o domínio é subdividido em N intervalos na direção radial formando a malha.

Como na segunda etapa do processo, onde ocorre a mudança de fase, estão presentes as duas fases (sólido e líquido) as equações governantes são discretizadas utilizando o método de diferenças finitas com esquema totalmente implícito, além de serem utilizadas malhas regulares,

porém com tamanhos diferentes nas regiões de líquido e de sólido. Neste caso as malhas são móveis, pois os respectivos domínios, líquido e sólido, são divididos em N intervalos iguais na direção radial. E se estes domínios estão diminuindo e aumentando com o tempo, respectivamente, então a malha sofre modificação com o tempo. Utilizando o método com este esquema de malha, a frente de solidificação sempre está localizada em algum nó da malha, desta forma é possível fazer uma discretização mais direta para a equação de balanço de energia na fronteira entre as regiões nas fases sólida e líquida (Eq. 3.1). As malhas móveis são dependentes uma da outra, visto que o domínio da região sólida aumenta, devido ao processo de solidificação, e o domínio da região líquida diminui, portanto o tamanho de cada intervalo na região do líquido diminui proporcionalmente ao aumento dos intervalos na região do sólido. Outro fato é que antes do início da solidificação há um único domínio, o da fase líquida, onde a malha utilizada é fixa. Porém quando a mudança de fase se inicia passam a existir dois domínios com malhas móveis. Na transição entre estas duas etapas assume-se que, em uma pequena fração de tempo, todo o calor trocado entre a cápsula e o fluido de trabalho é convertido em calor latente no material de mudança de fase. Com esta suposição, é possível determinar a primeira camada de material solidificado. A partir disto há uma região líquida e outra sólida no interior da cápsula esférica, iniciando o cálculo numérico utilizando malha móvel.

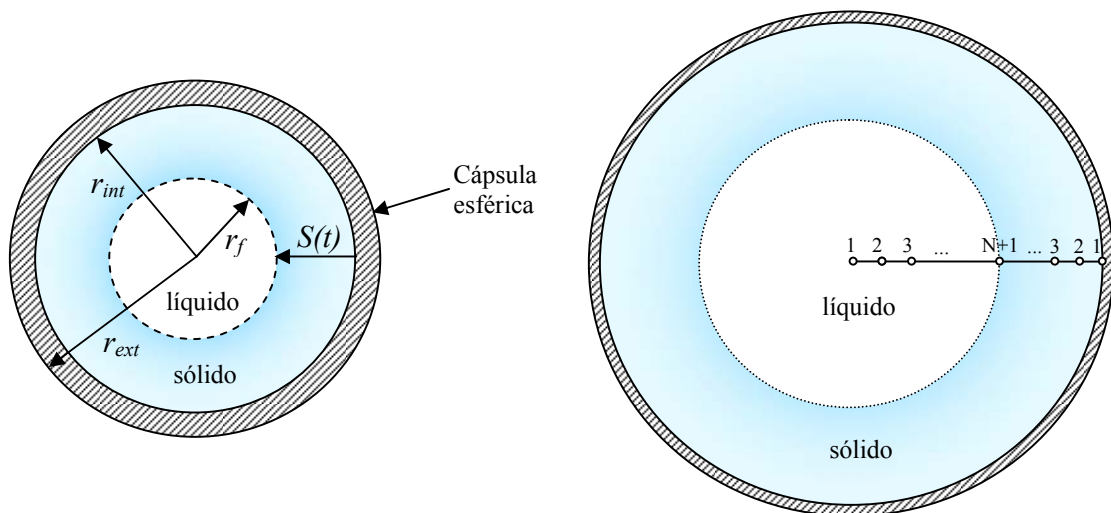


Figura 3. 3 - Domínios da fase sólida e da fase líquida durante o processo de solidificação

3.3.1. Material de mudança de fase completamente líquido ou completamente sólido

Como havia sido descrito anteriormente, a primeira e a terceira etapas do processo de transferência de calor no interior da cápsula esférica são situações similares quanto ao método numérico utilizado na solução das equações de modelagem do fenômeno físico. O que diferencia os dois casos são as propriedades termofísicas do material em suas diferentes fases. O modelo utiliza o método das diferenças finitas com esquema totalmente implícito. A figura a seguir mostra a divisão do domínio que possui uma única fase. O domínio é dividido em N partes iguais na direção radial.

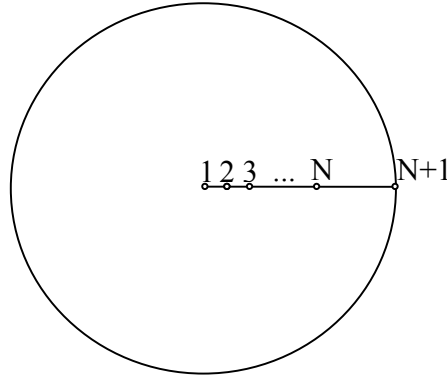


Figura 3. 4 - Divisão do domínio em N camadas quando existe apenas uma fase.

É feita a aproximação das primeiras derivadas temporais e espaciais, com uma aproximação de três pontos para a segunda derivada espacial e substituindo na equação 3.5 para obter a aproximação por diferenças finitas para a equação de condução de calor no interior da cápsula esférica com esquema totalmente implícito como mostrado na equação 3.9.

$$\frac{T_i^{t+1} - T_i^t}{\Delta t} = \alpha \left[\frac{2}{r_i} \left(\frac{T_{i+1}^{t+1} - T_i^{t+1}}{\Delta r} \right) + \left(\frac{T_{i+1}^{t+1} - 2T_i^{t+1} + T_{i-1}^{t+1}}{\Delta r^2} \right) \right] \quad (3.9)$$

Isolando o termo que representa a temperatura num instante em um determinado nó:

$$T_i^t = T_{i-1}^{t+1} \left(-\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \right) + T_i^{t+1} \left(1 + \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2} + \frac{2\alpha \Delta t}{r_i \Delta r} \right) + T_{i+1}^{t+1} \left(-\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} - \frac{2\alpha \Delta t}{r_i \Delta r} \right) \quad (3.10)$$

A equação 3.10 é válida para a parte interna do domínio, isto é, para os pontos internos de 2 a N-1, sendo:

$r_i = (i-1)\Delta r$ onde Δr é a subdivisão do domínio, ou seja, a distância entre dois pontos adjacentes.

Devido ao fato de que a equação 3.10 não pode ser aplicada ao ponto 1, devido à singularidade que este ocasiona, deve utilizar uma análise concentrada numa esfera de raio igual à metade de Δr ($r_1 = \Delta r/2$) para encontrar uma equação que permita avaliar a temperatura neste ponto, fazendo um balanço de energia, como visto na equação (3.11).

$$\rho C \nabla \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{4\pi k(T_2 - T_1)}{\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}} = \frac{4\pi k(T_2 - T_1)}{\frac{\Delta r - \frac{\Delta r}{2}}{\frac{\Delta r}{2}}} \quad (3.11)$$

Simplificando e reescrevendo em diferenças finitas com esquema totalmente implícito:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{24\alpha(T_2 - T_1)}{\Delta r^2} \Rightarrow \frac{T_1^{t+1} - T_1^t}{\Delta t} = \frac{24\alpha(T_2^{t+1} - T_1^{t+1})}{\Delta r^2}$$

Portanto:

$$T_1^t = -\frac{24\alpha\Delta t}{\Delta r^2}T_2^{t+1} + \left(\frac{24\alpha\Delta t}{\Delta r^2} + 1\right)T_1^{t+1} \quad (3.12)$$

Neste caso $\alpha = \alpha_{liq}$ ou $\alpha = \alpha_{sol}$, depende da fase na qual o material estiver.

Escrevendo a equação (3.10) para o ponto $i=N$ com a condição de contorno definida em $r=r_{int}$ obtém-se a equação (3.13).

$$T_N^t = \left(-\frac{\alpha\Delta t}{\Delta r^2}\right)T_{N+1}^{t+1} + \left(1 + \frac{2\alpha\Delta t}{(N-1)\Delta r^2} + \frac{2\alpha\Delta t}{\Delta r^2}\right)T_N^{t+1} + \left(-\frac{2\alpha\Delta t}{(N-1)\Delta r^2} - \frac{\alpha\Delta t}{\Delta r^2}\right)T_{N+1}^{t+1} \quad (3.13)$$

A discretização da condição de contorno na superfície interna da cápsula esférica é feita pela determinação da temperatura no ponto $N+1$ que é obtida pela aplicação da condição de contorno na fronteira da esfera, como mostra a equação a seguir.

$$-kA \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{N+1} - T_\infty}{R_t'} \quad (3.14)$$

Neste caso, R_t' é a resistência térmica para uma casca esférica. Esta resistência pode ser escrita da seguinte forma:

$$R_t' = \frac{1}{4\pi r_{int}^2} \left[\left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \frac{r_{ext} - r_{int}}{k_{esf}} \right) + \left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \right)^2 \frac{1}{h} \right] = \frac{1}{A} R_t \quad (3.15)$$

A discretização é feita da seguinte forma:

$$-k_{ft} \frac{T_{N+1} - T_N}{\Delta r} = \frac{T_{N+1} - T_\infty}{R_t} \quad (3.16)$$

$$T_{N+1} = \left[\frac{T_N + \frac{\Delta r}{k_{esf} R_t} T_\infty}{\left(1 + \frac{\Delta r}{k_{esf} R_t} \right)} \right] \quad (3.17)$$

A equação (3.17) é substituída na equação 3.13 para encontrar a temperatura num ponto N (eq. 3.18). Com a condição de contorno em questão é obtido um sistema de equações que torna

possível determinar as temperaturas nos diversos pontos no interior do domínio. Neste caso $\alpha = \alpha_{liq}$ ou $\alpha = \alpha_{sol}$, depende da fase na qual o material estiver.

$$T_N^t = \left(-\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \right) T_{N-1}^{t+1} + \left(1 + 2\alpha \Delta t \left(\frac{1}{(N-1)\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta r^2} \right) + \frac{-2\alpha \Delta t \left(\frac{1}{(N-1)\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta r^2} \right)}{1 + \frac{\Delta r}{k_{esf} R_t}} \right) T_N^{t+1} + \left(\frac{-2\alpha \Delta t \left(\frac{1}{(N-1)\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta r^2} \right)}{1 + \frac{\Delta r}{k_{esf} R_t}} \right) T_\infty \quad (3.18)$$

Na etapa onde o material está em mudança de fase existem as duas regiões distintas que estão separadas por uma interface que se desloca continuamente a partir da superfície interna da cápsula esférica até o centro da mesma. Assim a região sólida aumenta enquanto a região líquida diminui, proporcionalmente, com o tempo. A determinação da posição desta interface é imprescindível para determinar o tamanho dos domínios presentes no sólido e no líquido.

Quando ocorre o início da solidificação é necessária a determinação da primeira camada de sólido. Como já foi assumido, em uma pequena fração de tempo todo o calor transferido da cápsula para o fluido de trabalho equivale ao calor latente para a formação da primeira camada de sólido. O balanço de energia é apresentado a seguir (3.19).

$$\begin{aligned} Q_f &= -\rho L \frac{dV}{dt} \\ Q_f &= -4\pi \rho L r_f^2 \frac{dr_f}{dt} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Onde Q_f é o calor transferido pela cápsula e r_f representa a posição da interface entre o sólido e o líquido quando se forma a primeira camada de sólido na figura 3.3.

O fluxo de calor em função das temperaturas e das resistências térmicas associadas ao processo de transferência de calor entre a cápsula esférica e o fluido de trabalho tem a seguinte forma (eq. 3.20):

$$Q_f = \frac{T_f - T_\infty}{R_s + R_{esf} + R_h} \quad (3.20)$$

Onde os termos R_s , R_{esf} e R_h representam as resistências térmicas associadas à camada de sólido, à cápsula esférica e à troca de calor convectiva, respectivamente.

$$R_s = \frac{r_{int} - r_f}{4\pi k_{sol} r_{int} r_f} \quad (3.21)$$

$$R_{esf} = \frac{r_{ext} - r_{int}}{4\pi k_{esf} r_{int} r_{ext}} \quad (3.22)$$

$$R_h = \frac{1}{4\pi r_{ext}^2 h} \quad (3.23)$$

Igualando as equações 3.19 e 3.20 obtêm-se:

$$-4\pi\rho L r_f^2 \frac{dr_f}{dt} = \frac{T_f - T_\infty}{\frac{r_{int} - r_f}{4\pi k_{sol} r_{int} r_f} + \frac{r_{ext} - r_{int}}{4\pi k_{esf} r_{int} r_{ext}} + \frac{1}{4\pi r_{ext}^2 h}} \quad (3.24)$$

Quando os termos são rearranjados e integrando é possível obter:

$$\frac{r_f^2}{2r_{int}} - \frac{r_f^3}{3r_{int}^2} + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}} \frac{r_f^3}{r_{int}^2} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_{int}} \frac{r_f^3}{r_{ext}^2} + C = -\frac{(T_f - T_\infty) k_{sol}}{\rho L} \frac{t}{r_{int}} \quad (3.25)$$

A suposição é válida para um pequeno intervalo de tempo na primeira camada de sólido que é formada, portanto $\Delta t \rightarrow 0$ e $r_f \rightarrow r_{int}$. Aplicando esta condição na equação 3.19 determina-se a constante de integração C:

$$C = -\left[\frac{r_{int}}{6} + \frac{r_{int}}{3} \frac{k_{sol}}{k_{esf}} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_{int}} \frac{r_{int}^3}{r_{ext}^2} \right] \quad (3.26)$$

Quando a constante de integração é substituída na equação 3.25 esta fica:

$$\begin{aligned} r_{int} \left[\frac{r_f^2}{2r_{int}} - \frac{r_f^3}{3r_{int}^2} + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}} \frac{r_f^3}{r_{int}^2} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_{int}} \frac{r_f^3}{r_{ext}^2} \right] - \left[\frac{r_{int}}{6} + \frac{r_{int}}{3} \frac{k_{sol}}{k_{esf}} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_{int}} \frac{r_{int}^3}{r_{ext}^2} \right] = \\ = -\frac{(T_f - T_\infty) k_{sol}}{\rho L} \frac{t}{r_{int}} \end{aligned} \quad (3.27)$$

É possível fazer uma mudança de variável:

$$S(t) = 1 - \frac{r_f}{r_{int}}$$

Portanto:

$$\frac{r_f}{r_{int}} = 1 - S(t) \quad (3.28)$$

Esta mudança de variável aplicada à equação 3.27 resulta em:

$$\left[\frac{(1-S(t))^2}{2} - \frac{(1-S(t))^3}{3} + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}}(1-S(t))^3 \left(\frac{r_{ext}-r_{int}}{r_{ext}} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_{int}} \frac{(1-S(t))^3}{r_{ext}^2} r_{int}^2 \right] - \left[\frac{1}{6} + \frac{1}{3} \frac{k_{sol}}{k_{esf}} \left(\frac{r_{ext}-r_{int}}{r_{ext}} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_{int}} \frac{r_{int}^3}{r_{ext}^2} \right] = - \frac{(T_f - T_{\infty})k_{sol}}{\rho L r_{int}^2} t \quad (3.29)$$

É possível adotar os seguintes parâmetros adimensionais a fim de serem substituídos na equação 3.29:

$$\tau = \frac{\alpha t}{r_{int}^2}$$

$$t = \frac{r_{int}^2 \tau \rho c_p}{k_{sol}}$$

$$Bi = \frac{hr}{k_{sol}}$$

$$Ste = \frac{c_p (T_f - T_{\infty})}{L}$$

Reescrevendo a equação 3.29 para o tempo adimensionalizado (τ) com os respectivos parâmetros substituídos:

$$\tau = \frac{1}{Ste} \left[\frac{1}{6} + \frac{1}{3Bi} \left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \right)^2 \left(1 - (1-S(t))^3 \right) + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}} \left(1 - (1-S(t))^3 \right) \left(\frac{r_{ext}-r_{int}}{r_{ext}} \right) - (1-S(t))^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{(1-S(t))}{3} \right) \right] \quad (3.30)$$

Quando o processo de solidificação se inicia $S(t)$ é muito pequeno ($S(t) \ll 1$), portanto o último termo da equação tende a ao valor igual a $-1/6$, levando a equação 3.30 a ficar da seguinte forma:

$$\tau = \frac{1}{Ste} \left(1 - (1-S(t))^3 \right) \left[\frac{1}{3Bi} \left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \right)^2 + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}} \left(\frac{r_{ext}-r_{int}}{r_{ext}} \right) \right] \quad (3.31)$$

$$S(t) = 1 - \left[1 - \frac{\tau Ste}{C1} \right] \quad (3.32)$$

Onde:

$$Cl = \left[\frac{1}{3Bi} \left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \right)^2 + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right) \right]$$

A equação 3.32 fornece a posição da interface sólido-líquido imediatamente após a formação da primeira camada de sólido, a partir deste instante haverá dois domínios coexistindo no interior da cápsula. Como estas regiões estão sendo modificadas ao longo do tempo faz-se necessária a utilização do método de malhas móveis. Aqui serão incluídos mais dois parâmetros adimensionais.

$$x = 1 - \frac{r}{r_{int}}$$

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_f - T_{\infty}}$$

Escrevendo a equação 3.6 na forma adimensionalizada para o domínio do líquido,
 $0 \leq x \leq S(t)$:

$$\frac{\partial \theta_{liq}}{\partial \tau} = \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \left[\frac{2}{x} \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial x} + \frac{\partial^2 \theta_{liq}}{\partial x^2} \right] \quad (3.33)$$

Para o domínio do sólido, $S(t) \leq x \leq 1$:

$$\frac{\partial \theta_{sol}}{\partial \tau} = \frac{2}{(1-x)} \frac{\partial \theta_{sol}}{\partial x} + \frac{\partial^2 \theta_{sol}}{\partial x^2} \quad (3.34)$$

Com as respectivas condições de contorno:

$$\text{Para } x = S(t), \theta_{liq} = \theta_{sol} = 1 \quad (3.35)$$

$$\text{Para } x = 0, \frac{\partial \theta_{sol}}{\partial x} = \frac{\theta_{int}}{\frac{k_{sol}}{k_{esf}} \frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} + \frac{1}{Bi} \left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \right)^2} \quad (3.36)$$

θ_{int} é a temperatura adimensionalizada na superfície interna da cápsula.

A equação de balanço de energia na interface sólido-líquido (eq. 3.8) adimensionalizada fica:

$$Ste \frac{\partial \theta_{sol}}{\partial x} - Ste \frac{k_{liq}}{k_{sol}} \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial x} = \frac{\partial S(t)}{\partial \tau} \quad (3.37)$$

O método da malha móvel é utilizado por facilitar o procedimento numérico no cálculo das variáveis envolvidas no processo de solidificação. Devido à característica dinâmica dos domínios líquido e sólido que diminuem e aumentam respectivamente ao longo do tempo. Assim este comportamento deve ser contemplado pelas equações que descrevem o processo por meio do procedimento matemático fundamentado na derivada total da temperatura.

$$d\theta(x, \tau) = \frac{\partial \theta}{\partial x} dx + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau \quad (3.38)$$

Na variação por unidade de tempo tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (3.39)$$

A aplicação da eq. 3.39 aos domínios sólido e líquido leva às equações modificadas em malhas que se ajustam de forma dinâmica à dimensão variável do domínio.

Na região sólida:

$$\frac{\partial \theta_{sol}}{\partial \tau} = \frac{\partial \theta_{sol}}{\partial x_{sol}} \frac{\partial x_{sol}}{\partial \tau} + \frac{\partial \theta_{sol}}{\partial \tau} \quad (3.40)$$

Num ponto qualquer da malha tem-se:

$$x_i = \frac{i}{N} S(t) \quad (3.41)$$

$$\frac{dx_i}{d\tau} = \frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} \quad (3.42)$$

Substituindo as equações 3.41 e 3.42 na equação 3.34 obtém-se a equação da condução de calor para a região sólida contemplando o efeito do deslocamento da malha.

$$\frac{\partial \theta_{sol}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta_{sol}}{\partial x^2} + \left(\frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{(1-x)} \right) \frac{\partial \theta_{sol}}{\partial x} \quad (3.43)$$

Discretizando a equação 3.43 e escrevendo para θ_{sol} num ponto i num instante de tempo t :

$$\begin{aligned} \theta_{sol,i}^t = & \left[\frac{\Delta \tau}{2\Delta x} \left(\frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{(1-x)} \right) - \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} \right] \theta_{sol,i-1}^{t+1} + \left[1 + \frac{2\Delta \tau}{\Delta x^2} \right] \theta_{sol,i}^{t+1} - \\ & - \left[\frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} + \frac{\Delta \tau}{2\Delta x} \left(\frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{(1-x)} \right) \right] \theta_{sol,i+1}^{t+1} \end{aligned} \quad (3.44)$$

Onde:

$$\Delta x_{sol} = \frac{S(t)}{N}$$

A equação 3.44 é válida para os pontos entre 2 e N na região sólida. No ponto que fica na interface sólido-líquido (N+1) a temperatura é igual à temperatura de mudança de fase, isto é, a condição de contorno (3.35) e no ponto que fica na superfície interna da cápsula utiliza-se a condição de contorno (3.36). Desta forma o sistema de equações é completado e as temperaturas podem ser determinadas.

Na fase líquida a equação de condução de calor adimensionalizada é:

$$\frac{\partial \theta_{liq}}{\partial \tau} = \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial x_{liq}} \frac{\partial x_{liq}}{\partial \tau} + \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial \tau} \quad (3.45)$$

$$x_{liq,i} = \frac{i}{N} S(t) \quad (3.46)$$

$$\frac{dx_{liq,i}}{d\tau} = \frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} \quad (3.47)$$

Substituindo as equações 3.46 e 3.47 em 3.45:

$$\frac{\partial \theta_{liq}}{\partial \tau} = \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \frac{\partial^2 \theta_{liq}}{\partial x_{liq}^2} + \left[\frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \frac{2}{x_{liq,i}} - \frac{x_{liq,i}}{1-S(t)} \frac{dS(t)}{d\tau} \right] \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial x_{liq}} \quad (3.48)$$

Discretizando a equação 3.48 e escrevendo para θ_{liq} no instante t e num ponto i:

$$\begin{aligned} \theta_{liq,i}^t = \theta_{liq,i+1}^{t+1} & \left[\frac{1}{2\Delta x_{liq}} \frac{x_{liq,i}}{1-S(t)} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{1}{\Delta x_{liq}^2} - \frac{1}{\Delta x_{liq} x_{liq,i}} \right] \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \Delta \tau + \theta_{liq,i}^{t+1} \left[2 \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \frac{\Delta \tau}{\Delta x_{liq}^2} + 1 \right] + \\ & + \theta_{liq,i-1}^{t+1} \left[\frac{1}{\Delta x_{liq} x_{liq,i}} - \frac{1}{\Delta x_{liq}^2} - \frac{1}{2\Delta x_{liq}} \frac{x_{liq,i}}{1-S(t)} \frac{dS(t)}{d\tau} \right] \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \Delta \tau \end{aligned} \quad (3.49)$$

Onde:

$$\Delta x_{liq} = \frac{1-S(t)}{N}$$

A equação 3.49 é válida para determinação das temperaturas nos pontos 2 a N na região líquida. No ponto 1 que se situa no centro da esfera é utilizada a equação 3.12 na forma adimensionalizada, que leva à sua forma discretizada (eq. 3.50). No ponto N+1 a temperatura de mudança de fase do material é a temperatura prescrita na forma adimensionalizada, ou seja, $\theta_{N+1} = 1$.

$$\theta_{liq,1}^t = \left[1 + 24 \left(\frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \right) \frac{\Delta \tau}{\Delta x_{liq}^2} \right] \theta_{liq,1}^{t+1} + \left(1 + 24 \frac{\Delta \tau}{\Delta x_{liq}^2} \right) \theta_{liq,2}^{t+1} \quad (3.50)$$

A fração de massa solidificada é calculada em função da massa total do material contido na cápsula esférica e da massa da parcela que ainda permanece na fase líquida. Primeiramente é determinada a massa de material sólido no interior da cápsula, num instante de tempo t (eq. 3.51).

$$M_{sol,t} = \left[\frac{4}{3} \pi (r_{int}^3 - r_f^3) \right] \rho_{sol} \quad (3.51)$$

Em seguida a massa total de material completamente solidificado no interior da cápsula (eq. 3.52):

$$M_{sol} = \left[\frac{4}{3} \pi r_{int}^3 \right] \rho_{sol} \quad (3.52)$$

A fração de massa solidificada num instante de tempo t pode ser determinada pela seguinte relação:

$$FM_t = \frac{M_{sol,t}}{M_{sol}} \quad (3.53)$$

Assim foram obtidas as equações que possibilitam o cálculo que resolve o problema apresentado de forma numérica sendo possível utilizar uma ferramenta computacional adequada.

3.4 Validação do Modelo

A validação do modelo apresentado foi realizada comparando os resultados obtidos no presente trabalho com os dados coletados e apresentados em trabalhos experimentais (Ismail e Moraes (2007) e Ismail et al (2003)), apresentando concordância com os mesmos, conforme a figura (3.5).

Para efeito de comparação, foram feitas simulações numéricas utilizando as mesmas condições adotadas nos procedimentos realizados nos trabalhos experimentais. O modelo assume que o único mecanismo de transferência de calor no material de mudança de fase em estado líquido é a condução pura. Portanto, é feita uma compensação do efeito da transferência de calor por convecção, presente durante o resfriamento do PCM da fase líquida, utilizando uma condutividade térmica efetiva (k_{ef}). Esta condutividade possui um valor maior que o da condutividade térmica do material na fase líquida. Neste caso foi adotado um valor de 2,5 W/mK na fase líquida para a condutividade térmica efetiva na fase líquida.

Houve concordância nos casos de resfriamento do PCM quando na fase totalmente líquida e durante a mudança de fase, porém ocorre uma diferença entre os resultados obtidos com o modelo e as temperaturas medidas nos experimentos durante o processo de resfriamento do PCM na fase sólida. Esta diferença provavelmente se deve ao fato de haver gradientes de temperatura

no centro da cápsula, ao passo que o modelo assume que o gradiente de temperatura neste ponto é nulo. Além disto, deve haver variações no coeficiente convectivo de transferência de calor no exterior da cápsula devido à mudança de temperatura da cápsula ao longo do tempo sendo que, no modelo, assume-se que este coeficiente seja constante. Apesar disto, os resultados tendem a uma temperatura em comum a ser atingida em tempos decorridos semelhantes, como visto nos gráficos da figura (3.5).

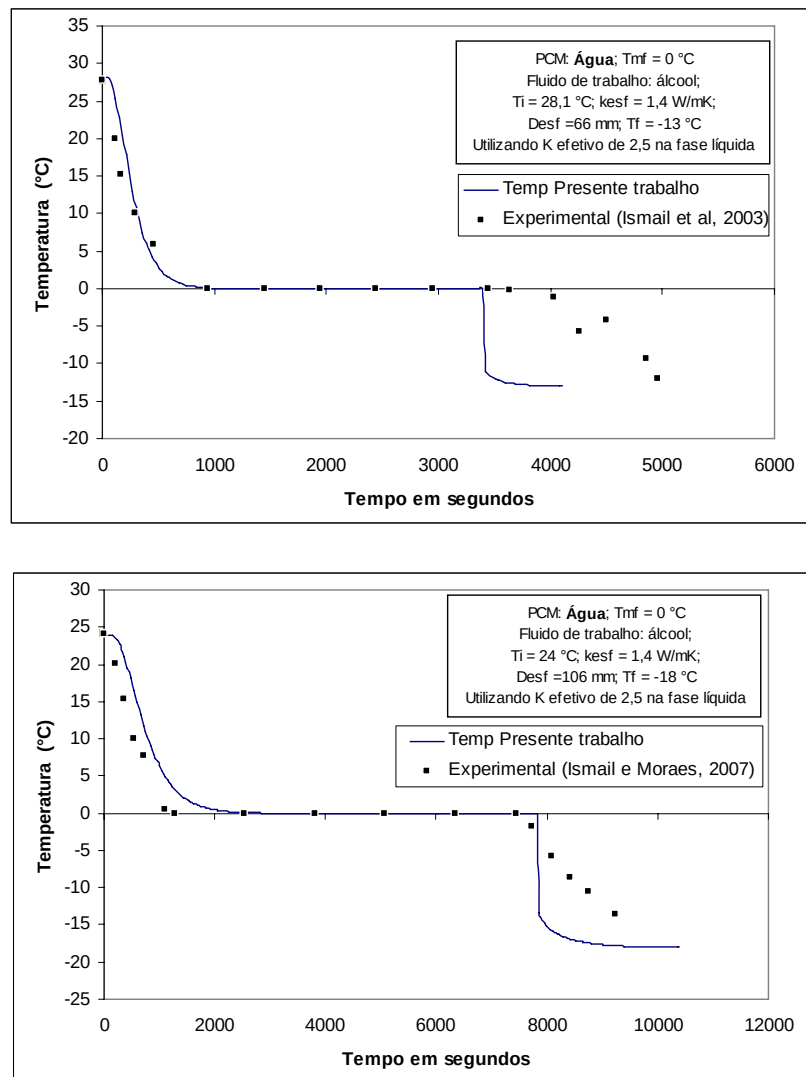


Figura 3. 5 - Evolução da temperatura no centro da cápsula esférica. Comparação entre os resultados obtidos no presente trabalho e medições experimentais apresentadas na bibliografia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação de ferramentas computacionais cada vez mais avançadas nos últimos anos tornou-se possível graças ao desenvolvimento tecnológico no que diz respeito ao processamento de dados. Este cenário fez com que as simulações numéricas se tornassem indispensáveis em muitos projetos, pois permitem avaliar seus diferentes parâmetros e sua eficácia antes de ter um custo, muitas vezes dispendioso, na construção de protótipos e equipamentos, nos quais torna-se difícil a análise e controle de algumas variáveis (Rodrigues, 2001).

O modelo computacional foi implementado utilizando o método de diferenças finitas e o programa foi feito na linguagem FORTRAN. A simulação numérica foi realizada para avaliar a influência da composição, velocidade de escoamento e temperatura do fluido de trabalho e do diâmetro da esfera.

Os resultados produzidos pelas simulações numéricas realizadas neste trabalho serão apresentados a seguir. O formato adotado para apresentação destes resultados foi o formato gráfico, pois este propicia uma melhor compreensão e visualização dos dados obtidos e sua interligação com os parâmetros analisados. As simulações que aqui foram realizadas buscam retratar o processo de solidificação no interior de cápsulas esféricas preenchidas com material de mudança de fase. Portanto aqui trata-se de um processo de carregamento de uma célula de armazenamento de energia térmica.

As curvas das variáveis analisadas no processo de carregamento foram plotadas em função do tempo para os diferentes parâmetros considerados. Assim é possível visualizar a influência de cada um deles sobre o processo de solidificação do PCM. As grandezas avaliadas, em função do tempo, foram a quantidade de calor armazenada no PCM, as evoluções da fração de massa solidificada e a temperatura no centro da cápsula esférica.

Foi verificada a influência dos seguintes parâmetros no processo: a composição do fluido de trabalho, o diâmetro da cápsula esférica, a velocidade média do fluido de trabalho e a temperatura do fluido de trabalho. Para as simulações foram adotados valores padrão de temperatura inicial do PCM igual a 20 °C, cápsula esférica de polipropileno com espessura de 2 mm e condutividade térmica igual a 0,24 W/mK (Santos, 2005).

Na utilização de água como PCM as propriedades termofísicas são mostradas na tabela a seguir (ASHRAE, 1997, Perry, 1999).

Tabela 4. 1 - Propriedades da água utilizada como material de mudança de fase

Condutividade térmica da fase sólida	2,24 W/mK
Condutividade térmica efetiva da fase líquida	2,5 W/mK
Calor específico da fase sólida	2040 J/kgK
Calor específico da fase líquida	4210 J/kgK
Calor latente	333400 J/kg
Temperatura de mudança de fase	0 °C
Densidade da fase sólida	917.8 kg/m ³
Densidade da fase líquida [kg/m ³]	999.8 kg/m ³

As propriedades do fluido de trabalho foram alvo de análise e foram consideradas como parâmetros que poderiam influenciar no processo, portanto foram testadas as composições do fluido de trabalho, que é uma mistura de álcool e água, contendo diferentes porcentagens, em massa, de álcool diluído em água. As demais simulações foram feitas utilizando a proporção padrão de 18,7%, em massa, de álcool diluído em água.

O algoritmo utilizado para realização da simulação numérica computacional foi desenvolvido por Ismail e Henríquez (2002) e adaptado aqui para contemplar o escoamento ao redor de cápsulas esféricas. Neste modelo foram inseridos os dados de entrada referentes às condições adotadas no presente trabalho.

4.1. Influência da Composição do Fluido de Trabalho

Visando avaliar a influência da composição do fluido de trabalho sobre o processo de solidificação de PCM em cápsula esférica, foram realizadas simulações com algumas proporções de misturas de álcool e água. As proporções em massa testadas foram 18,7%, 24,5%, 29,7%, 40,7% e 53,1%. As propriedades termofísicas do fluido de trabalho para as diferentes proporções da mistura álcool-água são listadas na tabela a seguir (Melinder, 2007).

Tabela 4. 2 - As propriedades termofísicas do fluido de trabalho para as diferentes proporções da mistura álcool-água

c_A [wt-%]	T_m [°C]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	k [W/mK]	ν [m ² /s]
18,7	-10	977,35	4402,5	0,450	$7,21 \cdot 10^{-6}$
24,5	-15	973,05	4294,0	0,421	$8,84 \cdot 10^{-6}$
29,7	-20	967,80	4146,5	0,396	$9,76 \cdot 10^{-6}$
40,7	-30	951,20	3830,0	0,347	$1,02 \cdot 10^{-5}$
53,1	-40	927,15	3480,5	0,300	$9,02 \cdot 10^{-6}$

Primeiramente foram plotados gráficos individuais para cada proporção, mostrando cada grandeza avaliada em função do tempo. Aqui os dados utilizados para as simulações são os dados padrão mostrados anteriormente e o diâmetro da cápsula esférica de 35,2 mm, temperatura do fluido de trabalho de -5 °C, a uma velocidade média de escoamento de 0,5 m/s.

Ao analisar a figura 4.1 pode-se verificar a diferença entre as temperaturas do centro e da superfície interna da cápsula esférica devido ao processo de transferência de calor através da cápsula esférica promovida pelo gradiente de temperatura entre a cápsula e o fluido de trabalho escoando no exterior da mesma. A parte do PCM na fase líquida que está em contato com a superfície interna da cápsula perde calor de forma mais rápida que no ponto central da esfera, na forma de calor sensível. Como o modelo prevê a transferência de calor apenas por condução, o fato de os pontos mais próximos à superfície da cápsula terem um decréscimo mais rápido na temperatura se deve à condução de calor promovida através do líquido até que se inicie a mudança de fase. A partir do instante em que se inicia a solidificação, a condução ocorre através da fase sólida e da fase líquida remanescente, e a energia é armazenada na forma de calor sensível e latente. Também pode-se observar no gráfico da figura 4.1 que a superfície interna da cápsula pode atingir a temperatura de mudança de fase antes que o líquido no centro atinja esta temperatura. Depois de decorrido algum instante de tempo, a temperatura do centro também

atinge a temperatura de mudança de fase, permanecendo assim até que a frente de solidificação alcance. É a partir deste instante que a solidificação é completa e o sólido passa a perder calor por condução e armazena esta energia na forma calor sensível até atingir a temperatura do fluido de trabalho.

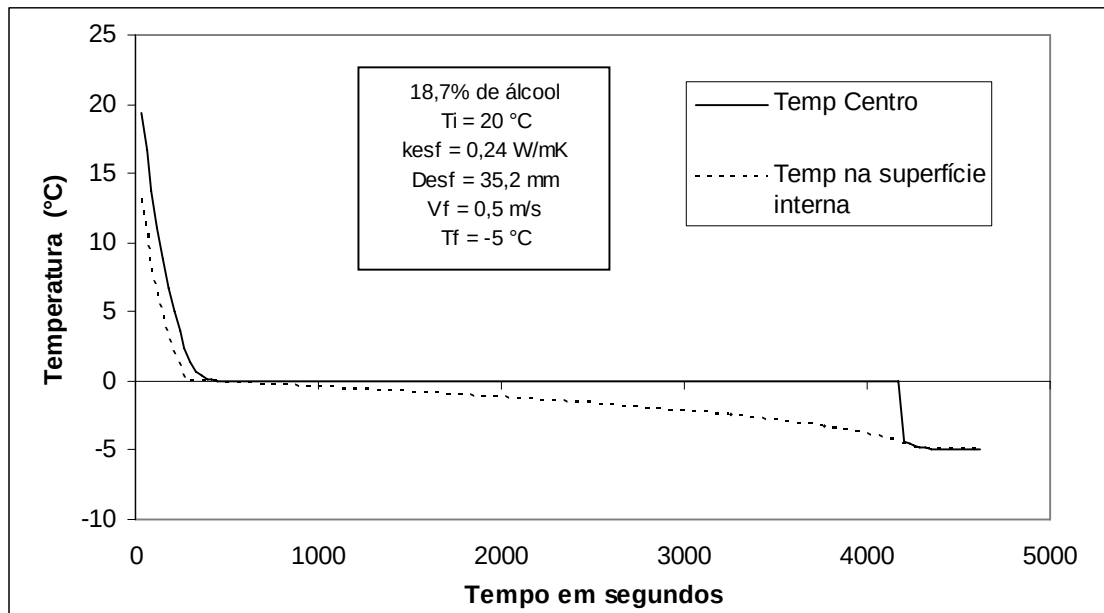


Figura 4. 1 - Temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica ao longo do tempo para uma proporção de 18%, em massa de álcool, na mistura álcool-água.

Variando a composição será possível observar o efeito deste parâmetro sobre a dinâmica do processo de solidificação.

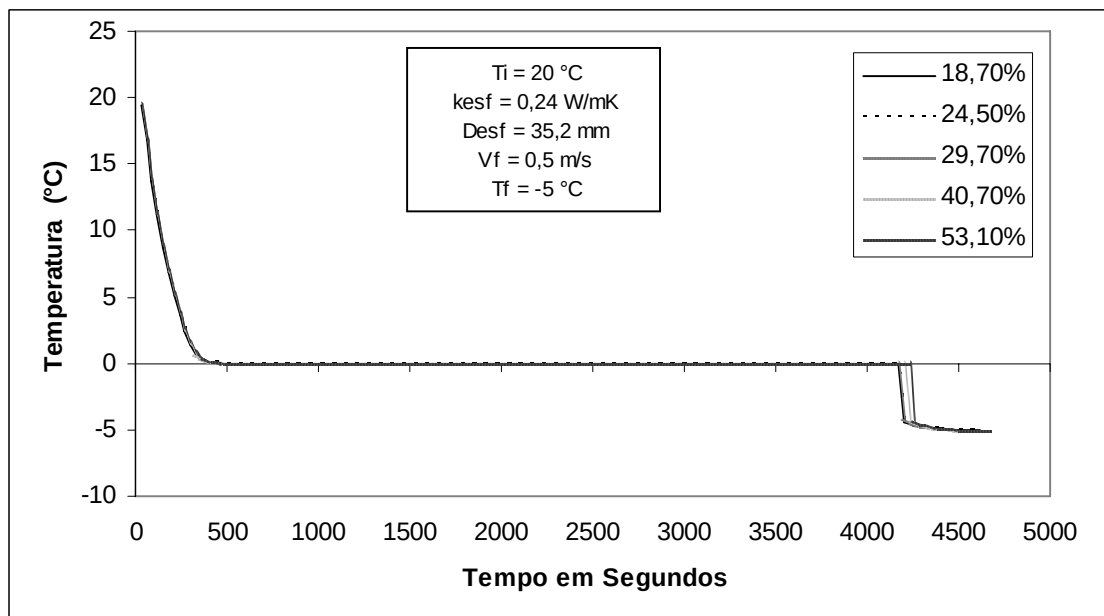


Figura 4. 2 - Temperatura no centro da cápsula esférica em função do tempo - Influência da composição do fluido de trabalho (porcentagem de álcool na mistura álcool-água em massa).

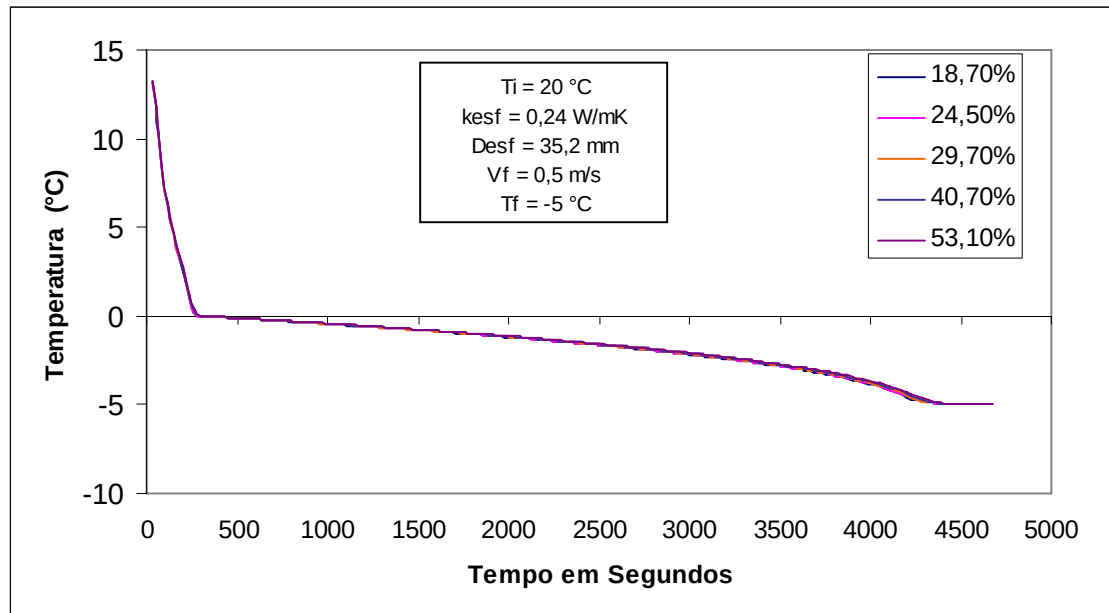


Figura 4.3 - Temperatura na superfície interna da cápsula esférica em função do tempo - Influência da composição do fluido de trabalho (porcentagem de álcool na mistura álcool-água em massa).

A partir da observação das figuras 4.2 e 4.3 pode-se inferir que tanto para uma porcentagem em massa de 18,7% de álcool em água quanto para 53,1% a evolução da temperatura não teve diferenças significativas no centro ou na superfície interna da cápsula esférica. Isto evidencia que a variação na proporção da mistura álcool-água no fluido de trabalho não afeta significativamente a temperatura no interior da cápsula esférica, tanto na fase sólida quanto na fase líquida. Isto ocorreu apesar do fato que com a variação da composição, as propriedades termofísicas do fluido de trabalho também sofrem modificação. Esta poderia favorecer ou prejudicar a transferência de calor por convecção, isto é, aumentando ou diminuindo o coeficiente convectivo, visto que a temperatura do fluido é constante. Porém esta diferença não se verificou de forma significativa, provavelmente devido ao fato das propriedades termofísicas para diferentes proporções da mistura água-álcool terem valores bastante próximos, resultando em pequena influência sobre a dinâmica do processo.

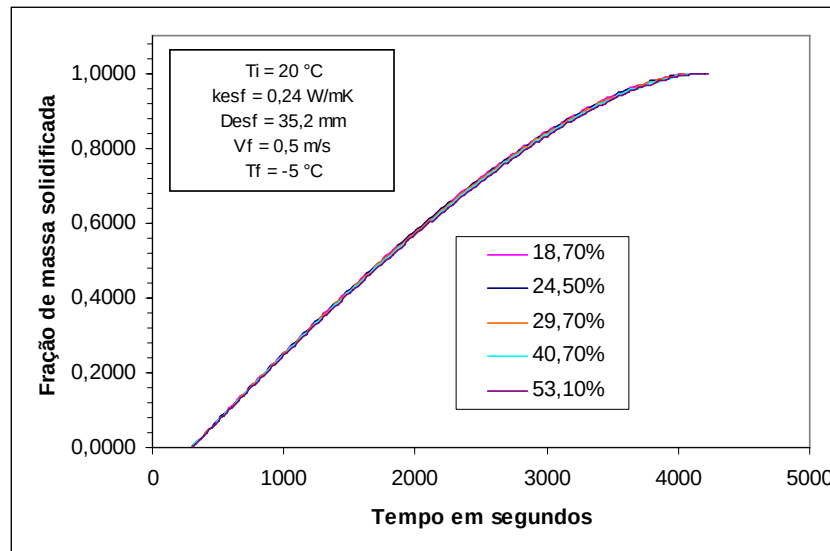


Figura 4. 4 - Fração de massa solidificada - Influência da Composição do fluido de trabalho (porcentagem de álcool na mistura álcool-água em massa).

Como observado anteriormente, a fração de massa solidificada não sofreu alteração significativa com a variação da proporção de álcool na mistura. Em todos os casos houve a completa solidificação em aproximadamente 4000 segundos.

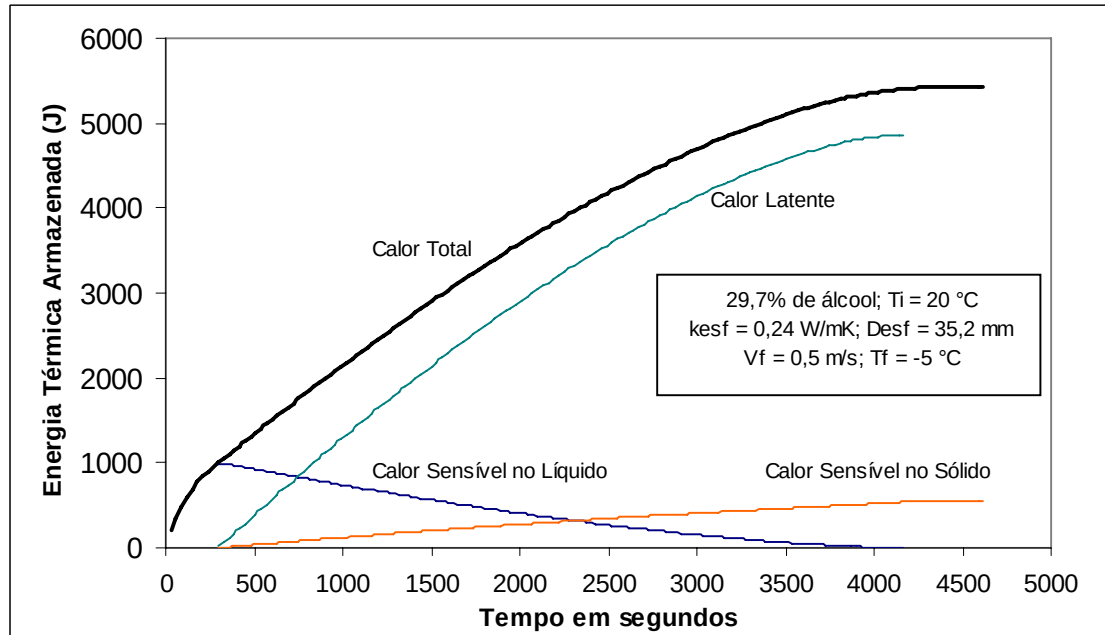


Figura 4. 5 - Energia Térmica Armazenada para uma mistura de 29,7% de álcool como fluido de trabalho.

Na figura 4.5 é possível observar as três parcelas de calor armazenado no PCM que está no interior da cápsula esférica. A quantidade de calor sensível na fase líquida eleva-se rapidamente até o ponto que se inicia a solidificação. A partir deste instante passa a haver a

parcela do calor latente e do calor sensível na fase sólida. A contribuição de calor sensível na fase líquida começa a diminuir enquanto as parcelas do calor sensível na fase sólida e calor latente passam a ser maiores. A quantidade de energia necessária para que ocorra mudança de fase, na forma de calor latente, é muito maior que a energia necessária para promover variações de temperatura no material, determinada pelo calor específico do mesmo, para uma mesma quantidade de massa. Assim, a contribuição do calor latente no armazenamento de energia também é muito maior que a contribuição do calor sensível. Isto quer dizer que a maior parcela de energia é armazenada durante a mudança de fase do material. Esta afirmativa pode ser confirmada observando a curva do gráfico da figura 4.5, que mostra a contribuição do calor latente no armazenamento de energia. Comparando com as curvas que correspondem às parcelas do calor sensível no líquido e no sólido, fica evidente a grande diferença entre a energia armazenada na forma de calor latente e sensível durante o processo de armazenamento.

Após a solidificação, o PCM inda continua a armazenar calor, porém na forma de calor sensível novamente, por isso, numa quantidade relativamente pequena. O resultado plotado no gráfico mostra também a soma destas três parcelas como o calor total armazenado no PCM.

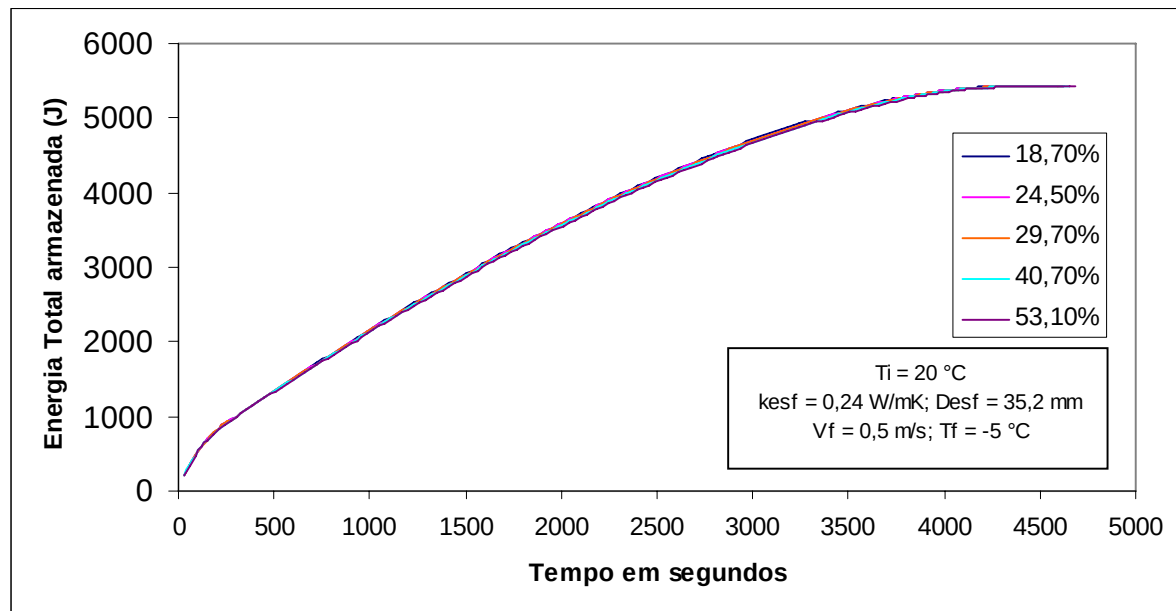


Figura 4. 6 - Energia Total Armazenada no PCM em função do tempo - Influência da composição do fluido de trabalho (porcentagem de álcool na mistura álcool-água em massa).

Como pode ser verificado na figura 4.6, a variação da proporção de álcool no fluido de trabalho também não afetou significativamente a quantidade de calor armazenada no PCM ao longo do tempo. Para ambos o carregamento completo ocorreu após aproximadamente 4500 segundos.

4.2. Influência do Diâmetro Externo da Cápsula Esférica

Com o objetivo de verificar a influência das dimensões da cápsula esférica no processo de armazenamento de energia térmica foram feitas simulações numéricas para diferentes diâmetros. Aqui foram utilizadas dimensões de cápsulas com 2 mm de espessura com os diâmetros externos

de 20 mm, 35,2mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm e 107 mm. As simulações foram feitas com uma velocidade média de escoamento do fluido de trabalho de 0,5 m/s a uma temperatura de -5°C e uma proporção de 18,7% de álcool na mistura álcool-água. As esferas são de polipropileno com condutividade térmica igual a 0,24W/mK.

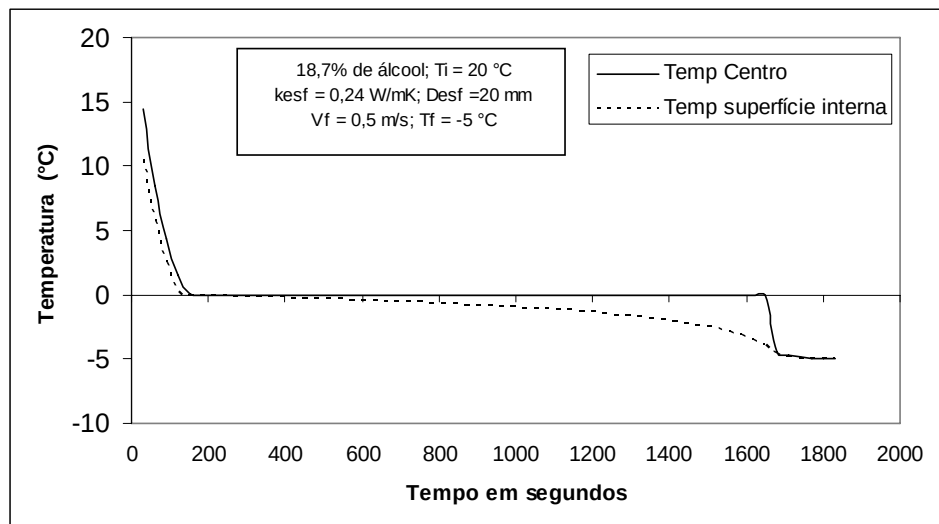


Figura 4. 7 - Histórico da Temperatura - Diâmetro 20mm

Na figura 4.7 é mostrado um exemplo de comportamento da curva de evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para um diâmetro de 20 mm. Neste caso a solidificação completa ocorreu após 1600 segundos. E a seguir é mostrado o gráfico com as curvas de temperatura no centro da cápsula em função do tempo para diferentes diâmetros.

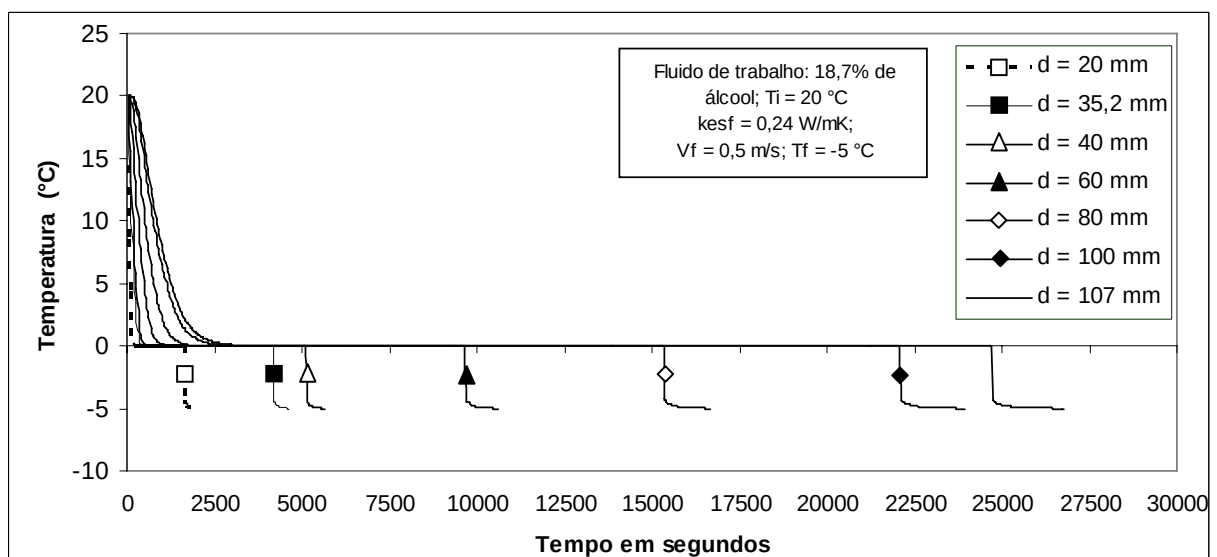


Figura 4. 8 - Histórico da Temperatura no Centro da cápsula esférica – Influência do diâmetro

Segundo o gráfico da figura 4.8 o diâmetro da cápsula esférica afeta significativamente a dinâmica do processo de solidificação do PCM. Isto corresponde ao resultado esperado, visto que com um diâmetro menor, a massa de PCM a ser resfriada e solidificada também é menor, necessitando de menos tempo para que os processos aconteçam. Na mudança de fase, quando foi utilizado um diâmetro de 20 mm a solidificação completa ocorreu após 1600 segundos, enquanto que com 40 mm houve solidificação completa após 5000 segundos e assim sucessivamente até o maior diâmetro, 107 mm, que levou aproximadamente 25000 segundos para solidificar completamente. Ou seja, a quantidade de massa contida na cápsula, que é determinada pelo diâmetro da mesma, afetou grandemente o processo de mudança de fase. O resfriamento do sólido também foi bastante influenciado pelas dimensões da cápsula esférica. Para um diâmetro de 20 mm quase não se observa a parte da curva que corresponde ao calor sensível no sólido, após a solidificação completa. Enquanto para o diâmetro de 107 mm ainda há um instante de tempo até o sólido atingir a temperatura do fluido de trabalho. Isto se deve à quantidade de massa a ser resfriada, para um diâmetro menor, a resistência à passagem do calor também diminui. Com o aumento do diâmetro, a camada de sólido formada após o processo de mudança de fase aumenta e torna-se cada vez mais difícil retirar calor do centro da cápsula esférica. Com isto a inércia térmica de uma cápsula esférica de maior diâmetro aumenta o tempo de resfriamento do sólido no interior da mesma. O mesmo pode-se dizer da temperatura do PCM na superfície interna da cápsula. Quanto menor for o diâmetro menor será quantidade de energia a ser retirada, devido ao fato de haver uma quantidade menor de massa do PCM a ser resfriada.

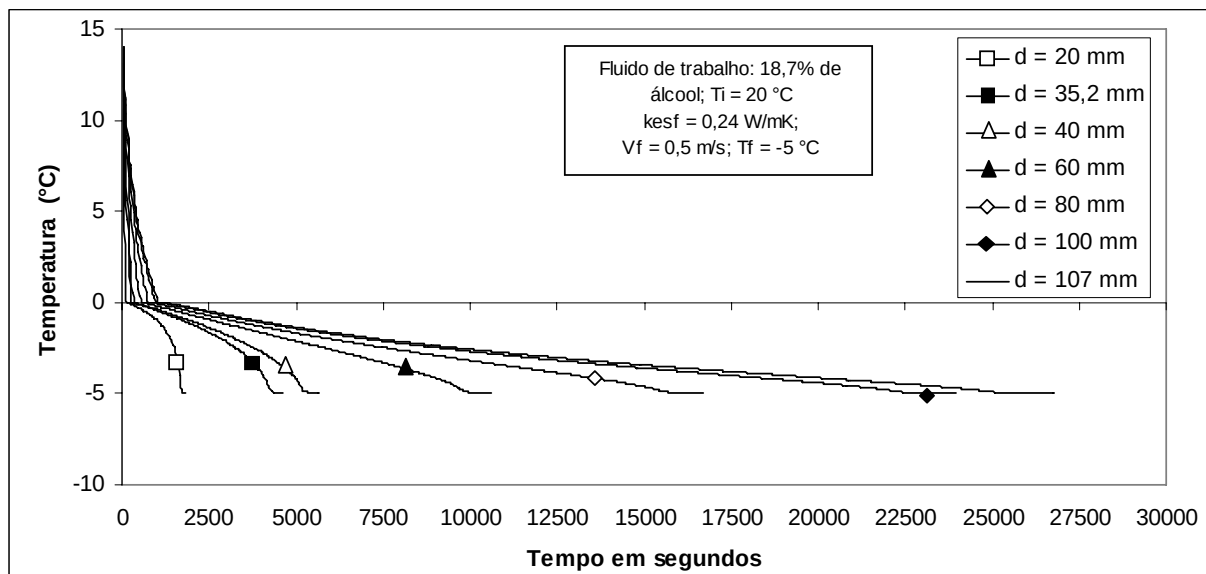


Figura 4. 9 - Histórico da Temperatura na superfície interna da cápsula esférica

Foram plotadas curvas de fração de massa solidificada para todos os diâmetros testados (figura 4.10). Assim pode-se verificar a influência deles sobre a solidificação.

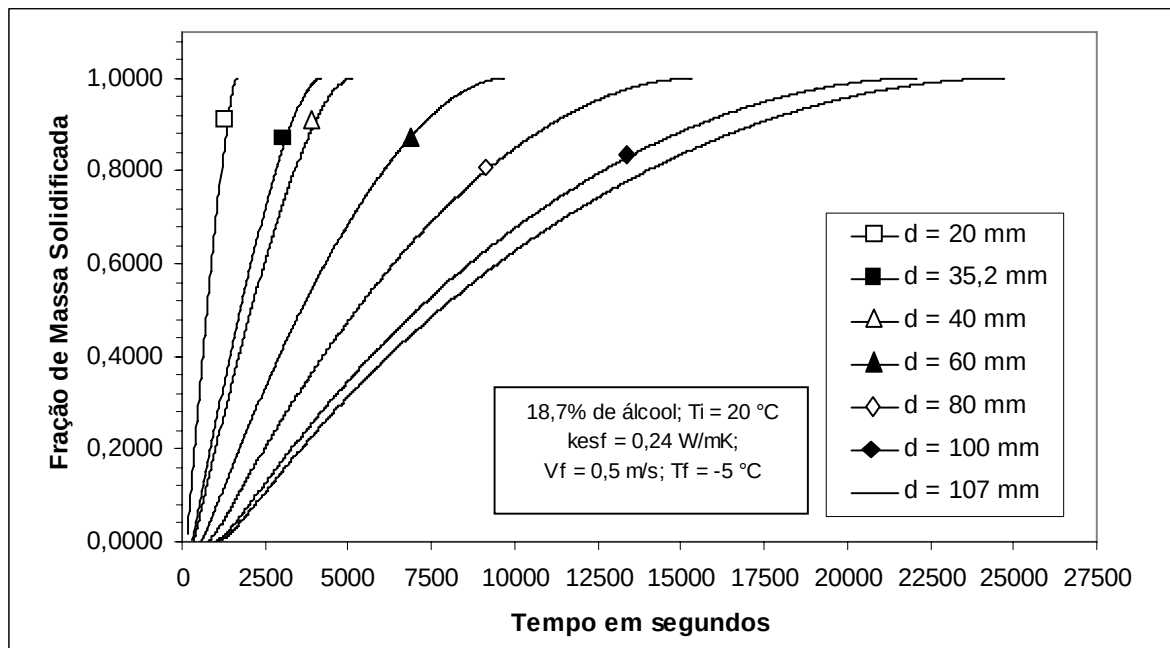


Figura 4. 10 - Fração de massa solidificada em função do tempo - Influência do Diâmetro da cápsula esférica

A figura 4.10 comprova o que foi discutido anteriormente. Para diâmetros menores a completa solidificação ocorreu em um intervalo de tempo menor que para os diâmetros maiores. A figura 4.11 mostra a relação entre o tempo de carregamento total e os diâmetros.

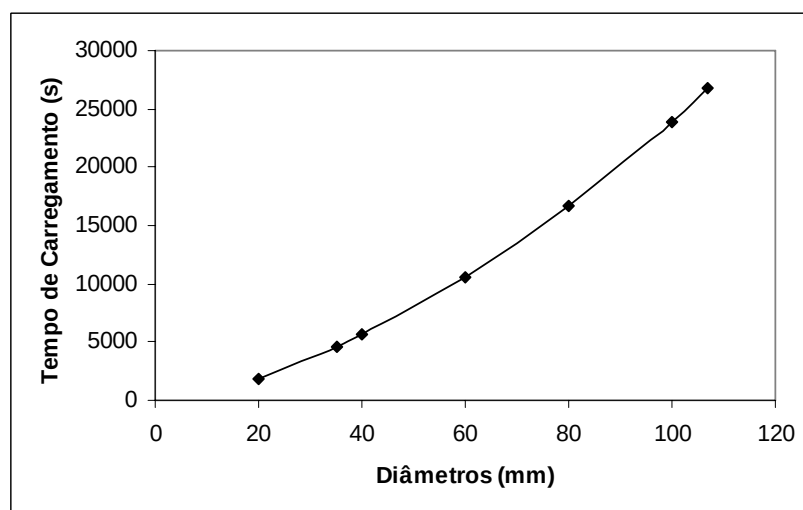


Figura 4. 11 - Tempo para o Carregamento Completo em função do diâmetro

Outra característica importante é a quantidade de energia armazenada do PCM. O diâmetro da esfera influencia a massa deste no interior da cápsula e, portanto, a quantidade de energia armazenada. A figura 4.12 mostra a curva de carregamento do PCM numa cápsula esférica de 40 mm de diâmetro. Foram incluídas também as curvas de calor sensível na fase líquida e sólida e o calor latente.

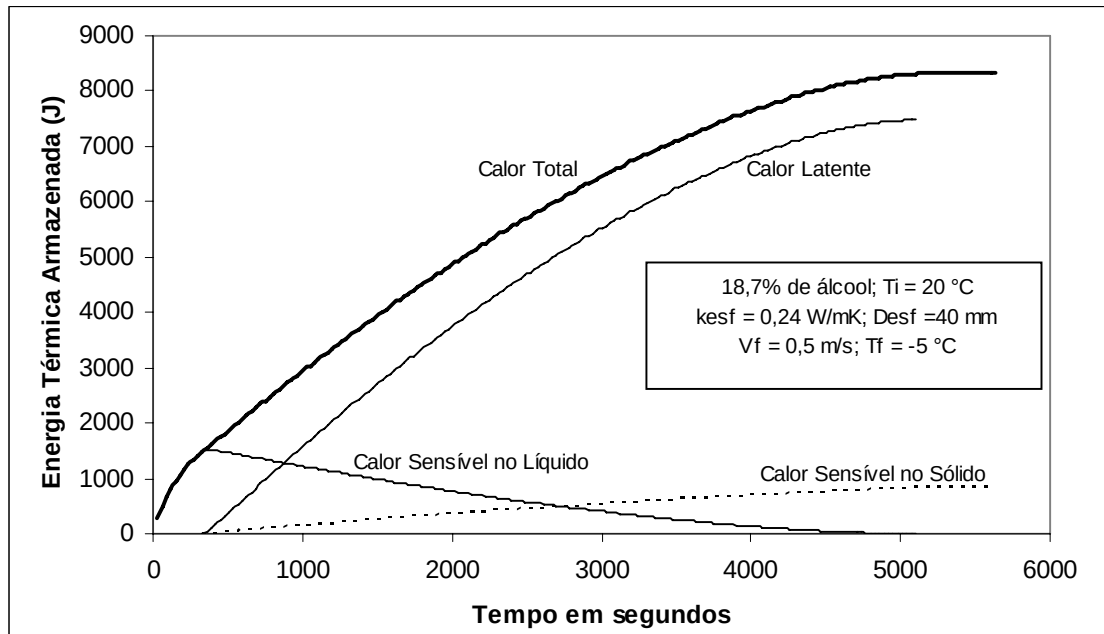


Figura 4. 12 - Energia Térmica Armazenada - Diâmetro 40 mm

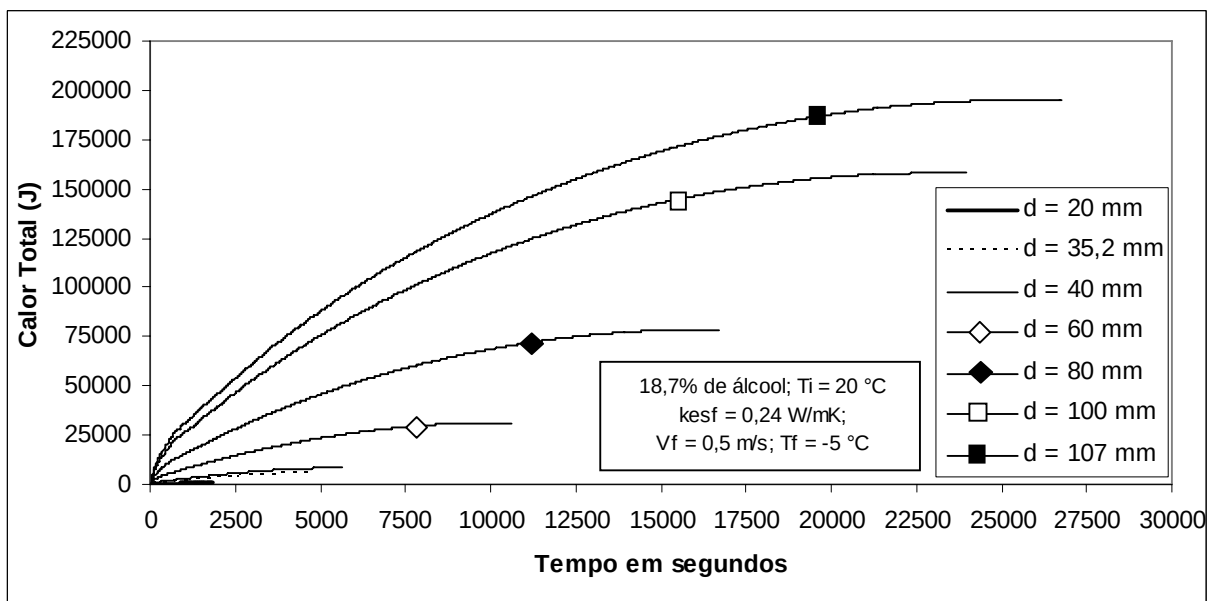


Figura 4. 13 - Energia Total Armazenada na Esfera - Influência do diâmetro

Na figura 4.13 pode-se perceber a influência do diâmetro da cápsula esférica sobre a quantidade de energia armazenada. Nota-se que a quantidade de energia armazenada para os diâmetros de 20 mm e 35,2 mm são da ordem de grandeza muito inferior que para os diâmetros de 100 mm e 107 mm. Sendo também o tempo muito inferior. Visando complementar a visualização do efeito do diâmetro da cápsula sobre o calor armazenado também foi plotado o

gráfico na figura 4.14 que mostra a curva de energia armazenada em função do diâmetro, para as mesmas situações. É notório que a energia armazenada na esfera de 20 mm é praticamente desprezível em relação às esferas de 60 mm, 80 mm, 100 mm, 107 mm, esta última atingiu aproximadamente 200 kJ de energia total armazenada. Enquanto que com 20 mm este montante foi de 0,730 kJ. Porém deve ser salientado que, em aplicações práticas, cápsulas esféricas de diâmetros menores permitem que os processos de carregamento e descarregamento dos tanques de armazenamento ocorram de forma mais rápida, ao passo que as esferas maiores não propiciam esta rapidez para a mesma capacidade de armazenamento.

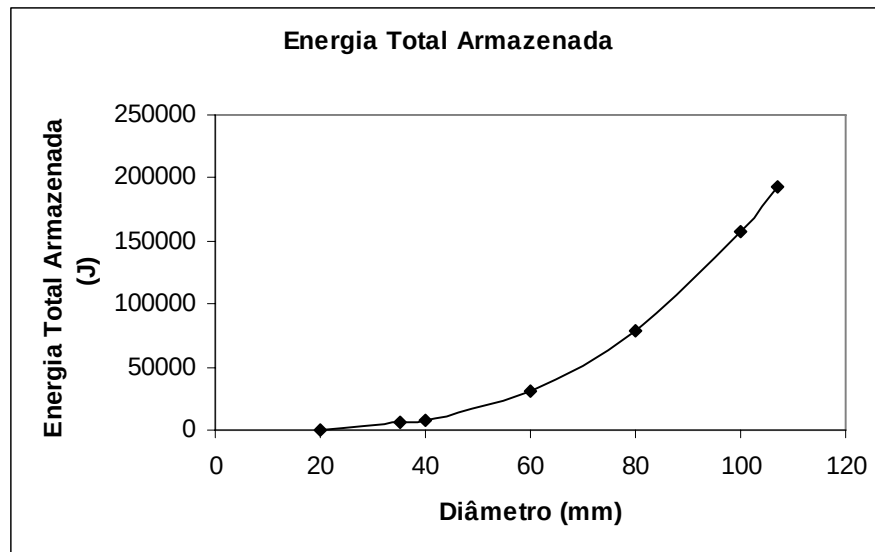


Figura 4. 14 - Energia Total Armazenada em função do diâmetro

4.3. Influência da velocidade média de escoamento do fluido de trabalho

Para uma comprovação da influência da velocidade média de escoamento do fluido de trabalho sobre o processo de carregamento, foram realizadas simulações numéricas com diferentes valores. As velocidades avaliadas foram 0,25 m/s; 0,5 m/s; 1 m/s; 1,5 m/s e 2 m/s. Foi utilizado como fluido de trabalho a mistura álcool-água (18,7%) a uma temperatura de -5 °C. A cápsula esférica utilizada possui 2 mm de espessura com o diâmetro externo de 35,2mm.

Ao analisar a influência da velocidade média do fluido de trabalho sobre a temperatura no centro da esfera (figura 4.15), nota-se uma sobreposição das curvas de temperatura ao longo do tempo para a fase líquida e apenas uma pequena diferença para a fase sólida. Em todos os casos a solidificação iniciou-se pouco antes dos 500 segundos. A solidificação completa ocorreu entre 4000 e 4500 segundos para todas as velocidades. Isto evidencia uma influência não significativa da velocidade de escoamento do fluido de trabalho sobre a temperatura no centro da esfera, para os valores utilizados. O mesmo fato se verifica na temperatura interna da cápsula esférica. Com isto, nota-se que a variação no número de Reynolds não é suficiente para promover diferenças significativas na transferência de calor por convecção dentro do intervalo de velocidades adotado.

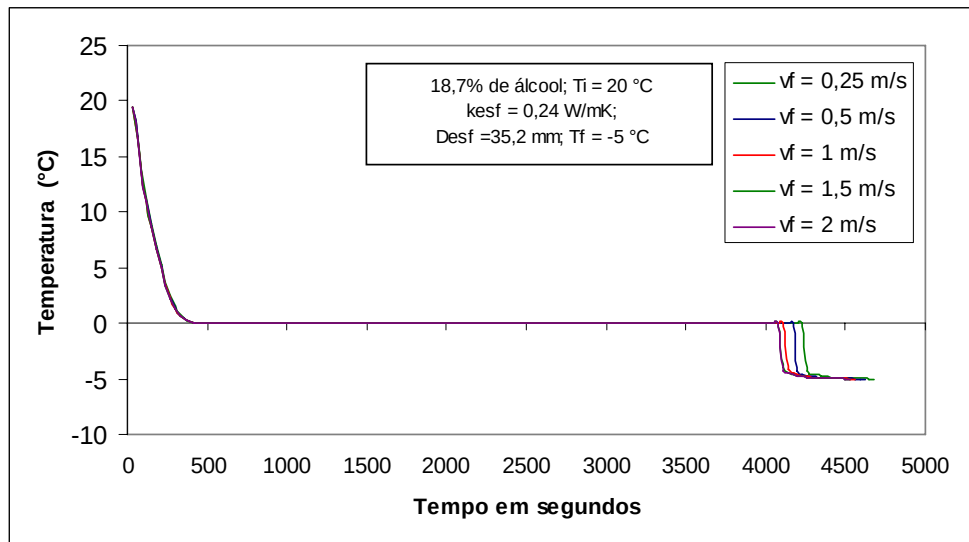


Figura 4. 15 - Evolução da temperatura no centro da esfera - Influência da velocidade média de escoamento do fluido de trabalho

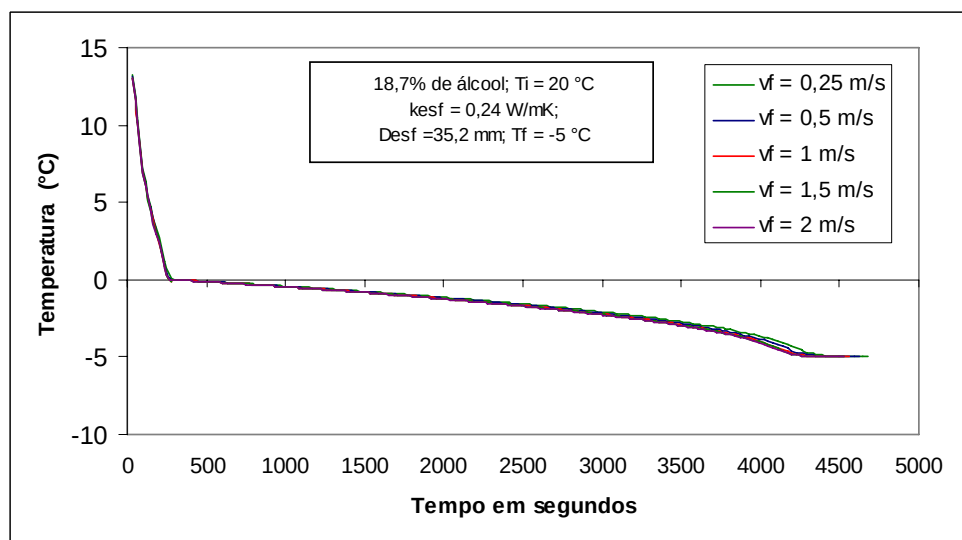


Figura 4. 16 - Evolução da temperatura na superfície interna da cápsula esférica - Influência da velocidade média de escoamento do fluido de trabalho.

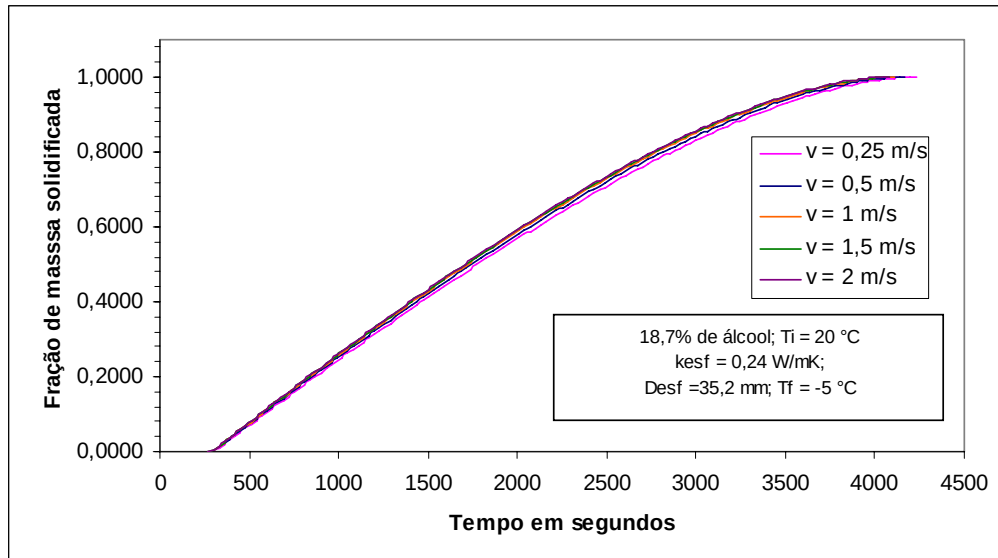


Figura 4. 17 - Fração de massa solidificada - Influência da velocidade média do fluido de trabalho

Como observado anteriormente, a fração de massa solidificada evoluiu sem grandes diferenças para todas as velocidades do fluido de trabalho (figura 4.17). O mesmo fato ocorreu para a quantidade de calor armazenada no PCM. Com as velocidades escolhidas não ocorreu o efeito esperado, isto é, com o aumento da velocidade média do fluido de trabalho o coeficiente convectivo de transferência de calor por convecção na superfície externa da cápsula esférica deve ser incrementado. Isto favorece a transmissão de calor da cápsula para o fluido de trabalho e conseqüentemente do PCM para a cápsula. Porém como esta variação, para as velocidades escolhidas, acontece de forma bastante discreta, não influenciando significativamente o resultado. Em praticamente todos os casos o carregamento total de energia, aproximadamente 5400 J, ocorre em aproximadamente 4700 segundos (Fig. (4.18)).

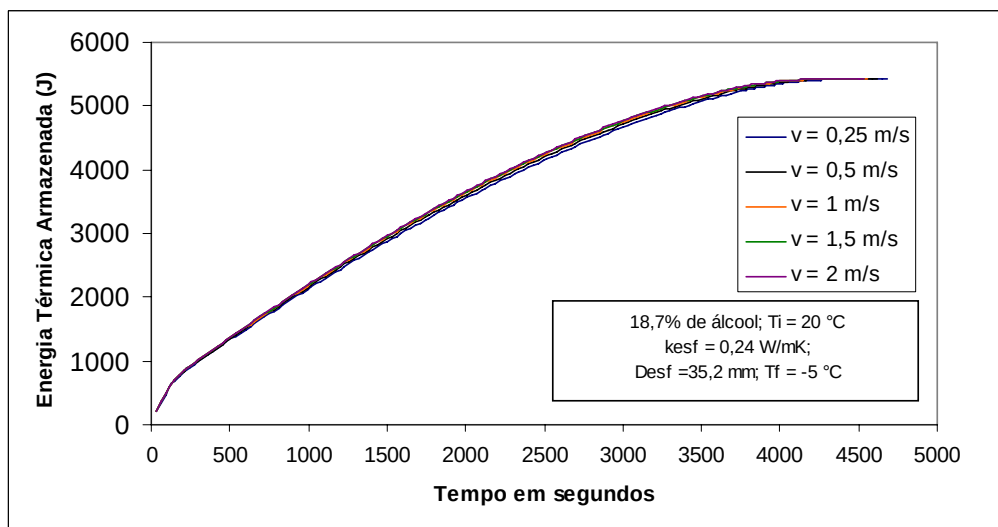


Figura 4. 18 - Energia Total Armazenada na Esfera - Influência da velocidade média do fluido de trabalho.

4.4. Influência da Temperatura do Fluido de Trabalho

O efeito da temperatura do fluido de trabalho também foi analisado. Aqui foram realizadas simulações com as seguintes temperaturas do fluido de trabalho: $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os outros parâmetros foram mantidos: velocidade do fluido de trabalho de $0,5\text{ m/s}$, o fluido de trabalho foi uma mistura álcool-água (18,7%). A cápsula esférica utilizada possui 2 mm de espessura com o diâmetro externo de $35,2\text{ mm}$ feita de polipropileno com uma condutividade térmica de $0,24\text{ W/mK}$.

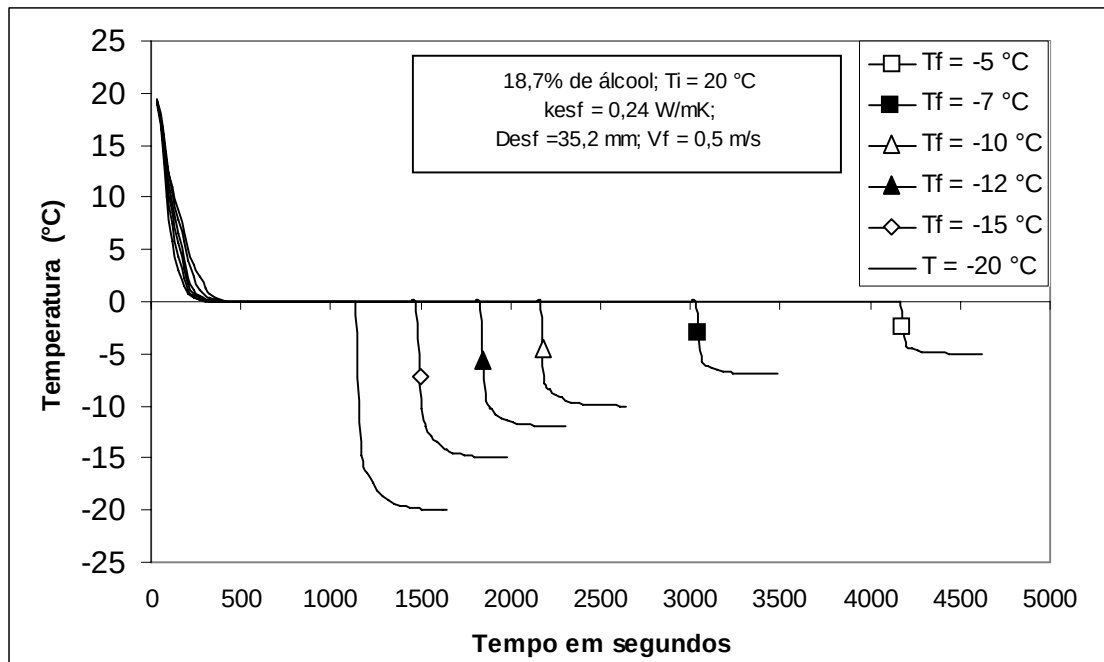


Figura 4. 19 - da Temperatura no Centro da Esfera - Influência da temperatura do fluido de trabalho.

A figura 4.19 mostra que houve uma diminuição substancial do tempo de solidificação. Apesar de não haver diferenças significativas no processo de resfriamento do PCM na fase líquida, o processo como um todo é bastante influenciado pela temperatura do fluido de trabalho. Em todos os casos, a solidificação foi iniciada pouco antes dos 500 segundos. Porém o processo de solidificação durou até 1140 segundos, para a temperatura do fluido de trabalho de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto para uma outra temperatura de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ o tempo aumentou para 4170 segundos. Isto evidencia uma influência da temperatura do fluido de trabalho visto que, com um gradiente maior de temperatura entre as superfícies interna e externa da cápsula o fluxo de calor tende a ser incrementado, facilitando a transferência de calor por convecção. O mesmo pode ser observado para a evolução da temperatura na superfície interna da cápsula, na figura 4.20.

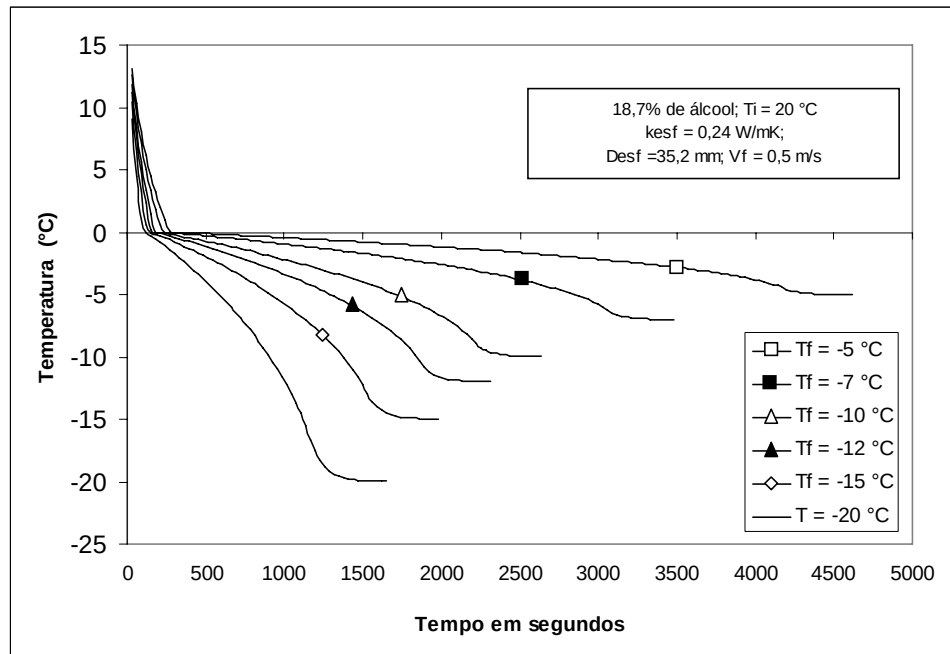


Figura 4. 20 - Histórico da Temperatura na superfície interna da cápsula esférica - Influência da temperatura do fluido de trabalho.

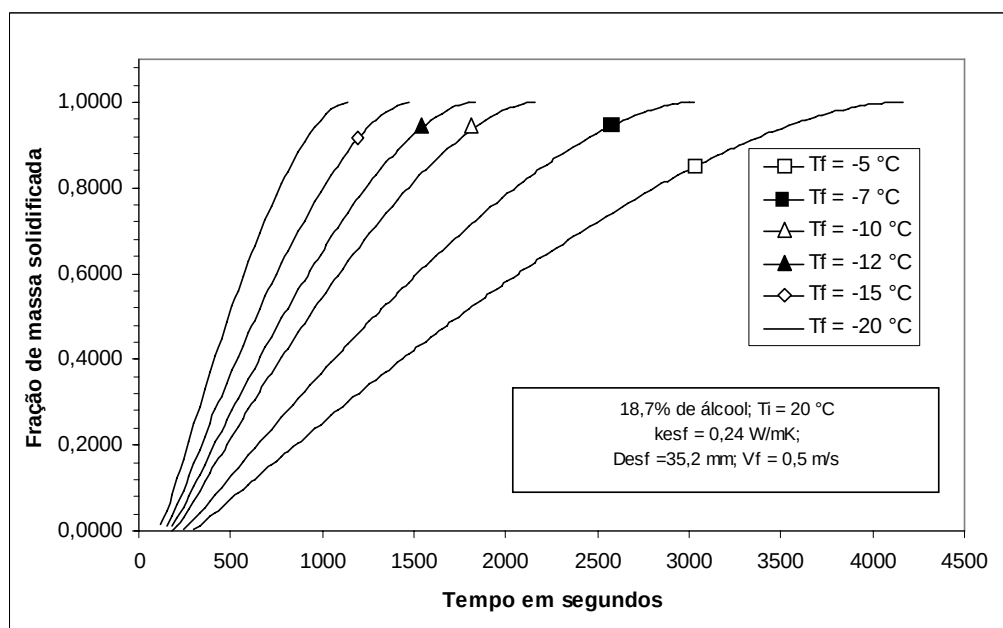


Figura 4. 21 - Fração de massa Solidificada Influência da Temperatura do Fluido de Trabalho.

A figura 4.21 mostra que da temperatura do fluido de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ houve um aumento no tempo necessário para solidificação completa de mais de 3000 segundos. Mostrando que o processo de solidificação é extremamente dependente da temperatura do fluido de trabalho.

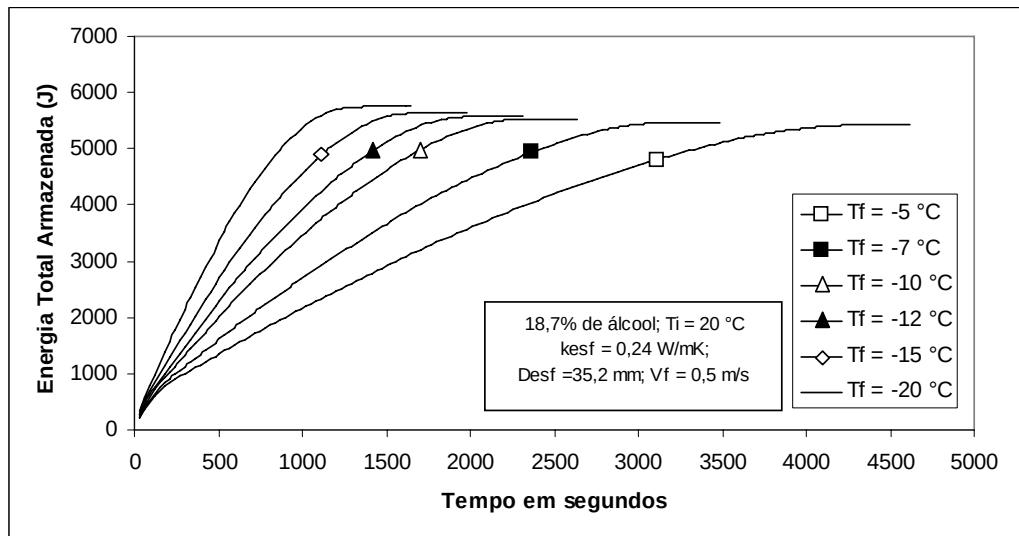


Figura 4. 22 - Energia Total Armazenada na Esfera - Influência da Temperatura do Fluido de trabalho

A quantidade de energia armazenada na no PCM também é influenciada pela temperatura do fluido de trabalho. Como poderia ser previsto, a cápsula pode armazenar mais energia térmica para temperaturas menores. Porém a diferença não é muito grande, pois o acréscimo na quantidade de energia se deve apenas a parcela de calor sensível no sólido, visto que o calor latente não irá variar para uma mesma quantidade de massa presente na cápsula esférica, mesmo que haja diferentes temperaturas do fluido de trabalho. Portanto neste processo as diferentes temperaturas afetam fortemente a dinâmica do processo de armazenamento, isto é, diminuem significativamente ao tempo necessário ao total carregamento (figura 4.22 e 4.23) e exercem pequena influência na energia total armazenada. Por exemplo, quando se utiliza um fluido de trabalho a -5 °C , o PCM armazena em torno de 5000 J em aproximadamente 4500 segundos, enquanto para uma temperatura do fluido de trabalho de -20 °C a energia armazenada alcança aproximadamente 5800 J por volta de 1500 segundos. Esta diferença é o calor sensível armazenado na fase sólida.

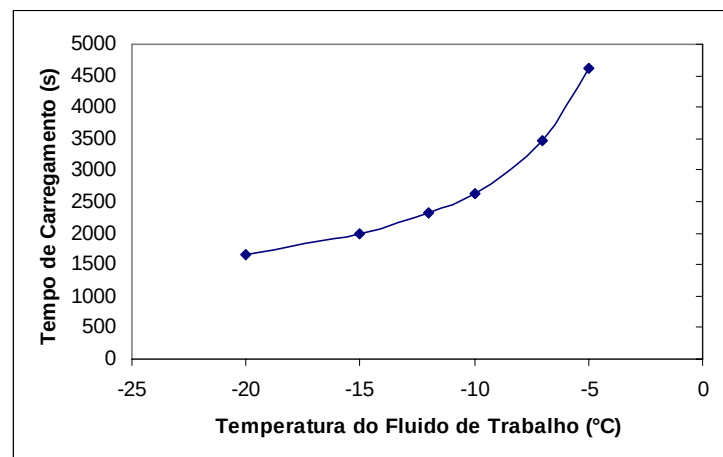


Figura 4. 23 - Tempo para o Carregamento Completo

4.5. Influência do Material de Mudança de Fase

Tendo como objetivo avaliar a influência do material de mudança de fase no processo de solidificação e armazenamento térmico, foram feitas simulações utilizando as propriedades termofísicas de cinco substâncias diferentes. As substâncias avaliadas foram as seguintes: água, glicerina, polietilenoglicol E400, parafinas do fabricante Rubitherm: RT2, RT5 e RT6. As propriedades termofísicas, para os estados sólido e líquido, disponíveis na bibliografia são apresentadas na tabela a seguir (Perry, 1997, ASHRAE, 1999, Rubitherm, 2007, Zalba et al, 2003).

Tabela 4.3 - Propriedades termofísicas das substâncias adotadas como material de mudança de fase

PCM	T_{mf}	L (kJ/kg)	Estado	k (W/mK)	c_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
Água	0 °C ⁽³⁾	333,4 ⁽²⁾	Líquido	2,5**	4210 ⁽¹⁾	999,8 ⁽²⁾
			Sólido	2,25 ⁽¹⁾	2040 ⁽¹⁾	917,8 ⁽²⁾
Glicerina	18 °C ⁽¹⁾	198,831 ⁽¹⁾	Líquido	0,286 ⁽¹⁾	2367 ⁽¹⁾	1265,8 ⁽¹⁾
			Sólido*	0,286	2367	1265,8
Polietilenoglicol E400	8 °C ⁽³⁾	99,6 ⁽³⁾	Líquido	0,187 ⁽³⁾	2080 ⁽⁵⁾	1125 ⁽³⁾
			Sólido*	0,187	2080	1125
RT2 ⁽⁴⁾	2 °C	214	Líquido	0,2	2400	770
			Sólido	0,2*	1800	860
RT5 ⁽⁴⁾	5 °C	156	Líquido	0,2	2400	770
			Sólido	0,2*	1800	860
RT6 ⁽⁴⁾	6 °C	174	Líquido	0,2	2400	770
			Sólido	0,2*	1800	860

* Propriedades assumidas como sendo iguais às da fase líquida.

** k efetivo; ⁽¹⁾ Perry,(1999); ⁽²⁾ ASHRAE; ⁽³⁾ Zalba et al (2003); ⁽⁴⁾ Rubitherm (2007); ⁽⁵⁾ Ismail (1998)

As simulações foram realizadas utilizando os seguintes parâmetros:

Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados na simulação de vários PCMs diferentes

Temperatura inicial do PCM	28 °C
Diâmetro externo da cápsula esférica	35,2 mm
Espessura da cápsula esférica	2 mm
Condutividade térmica da cápsula esférica	0,24 W/mK
Velocidade média do fluido de trabalho	0,5 m/s
Temperatura do fluido de trabalho	-5 °C
Proporção de álcool na mistura álcool-água	18,7 % (massa)

As propriedades do fluido de trabalho, mistura álcool-água, são as mesmas da tabela 4.2.

As primeiras propriedades analisadas foram as temperaturas do centro e da superfície interna da cápsula esférica. Foram plotadas as curvas de evolução da temperatura, tanto no centro quanto na superfície interna da cápsula esférica, em função do tempo para as substâncias utilizadas.

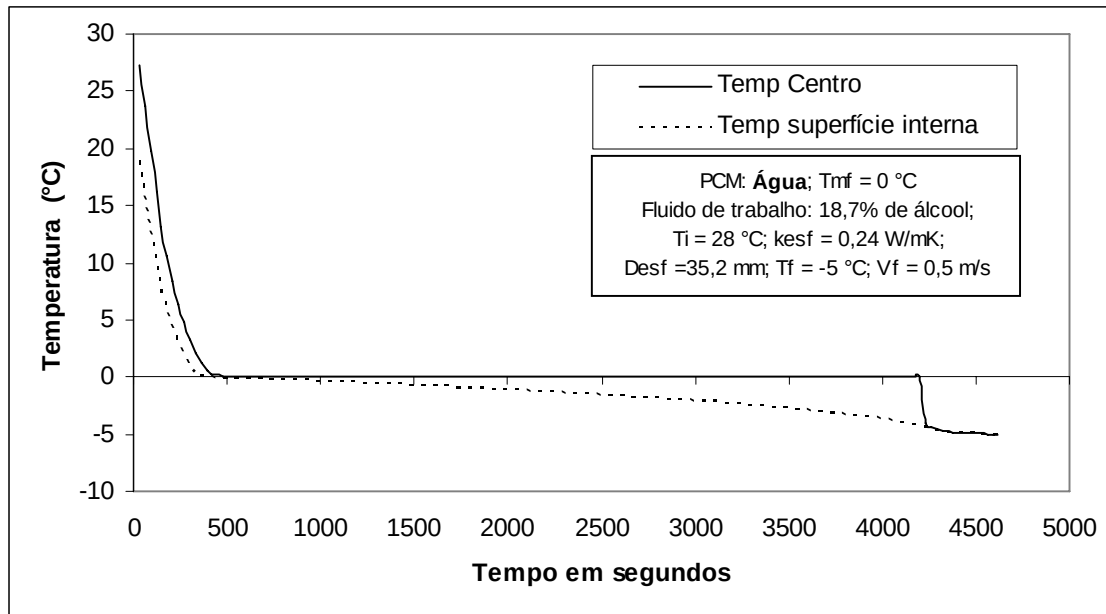


Figura 4. 24 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para a água como PCM

A curva de resfriamento da água é mostrada na figura 4.24. A temperatura de mudança de fase é relativamente próxima à temperatura do fluido de trabalho, o líquido é resfriado até $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura na qual permanece durante toda a mudança de fase até que todo o material é solidificado e em seguida a temperatura diminui até atingir um valor de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

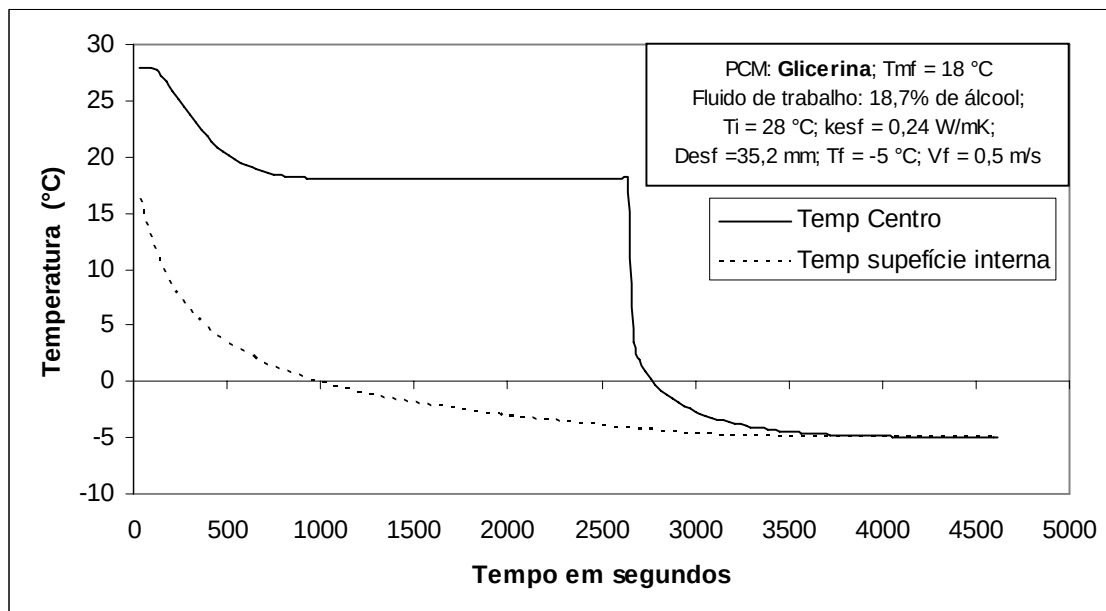


Figura 4. 25 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para a Glicerina como PCM

No caso da glicerina ocorre uma diferença maior entre a temperatura do centro e a temperatura na superfície interna da cápsula, antes que ocorra a solidificação completa, pelo fato de a temperatura de mudança de fase da glicerina (18 °C) ser bem maior que a temperatura do fluido de trabalho (-5 °C).

Nas figuras a seguir é possível visualizar as curvas de evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para o polietilenoglicol E400 e parafinas RT2, RT5, RT6 utilizados como material de mudança de fase (figuras 4.26 a 4.29, respectivamente).

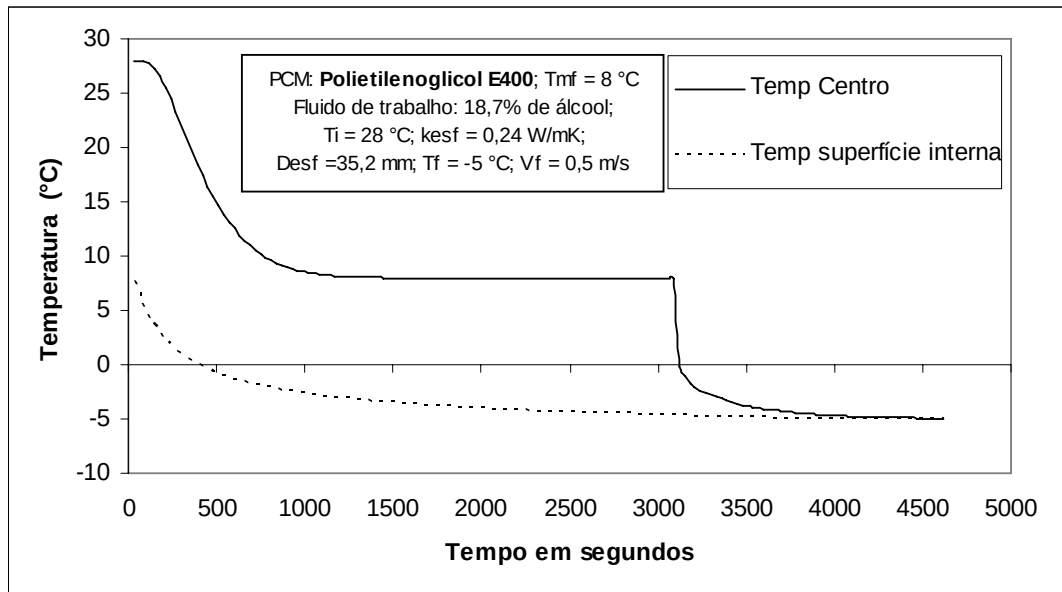


Figura 4. 26 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para o Polietilenoglicol E400 como PCM

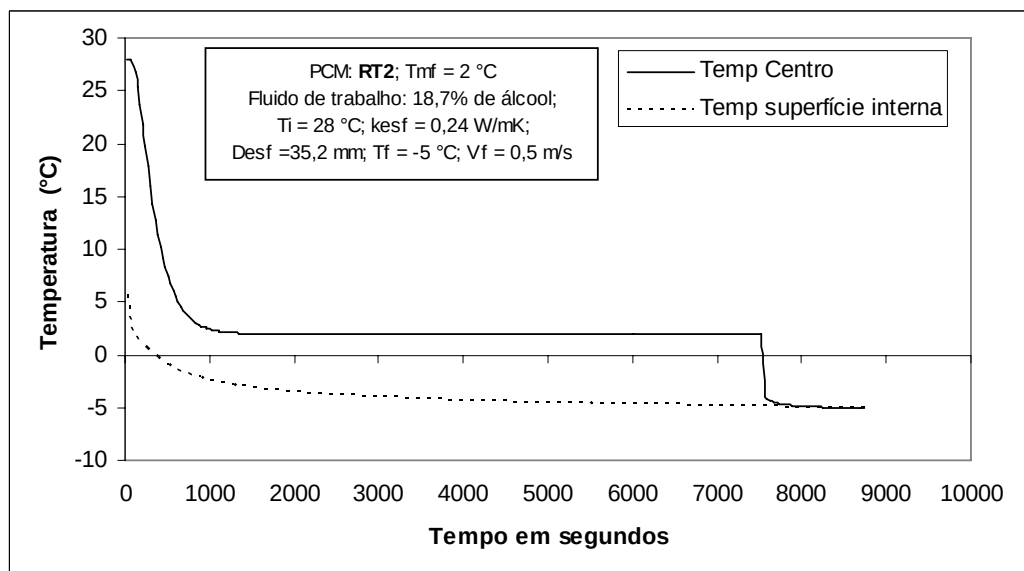


Figura 4. 27 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para o RT2 como PCM

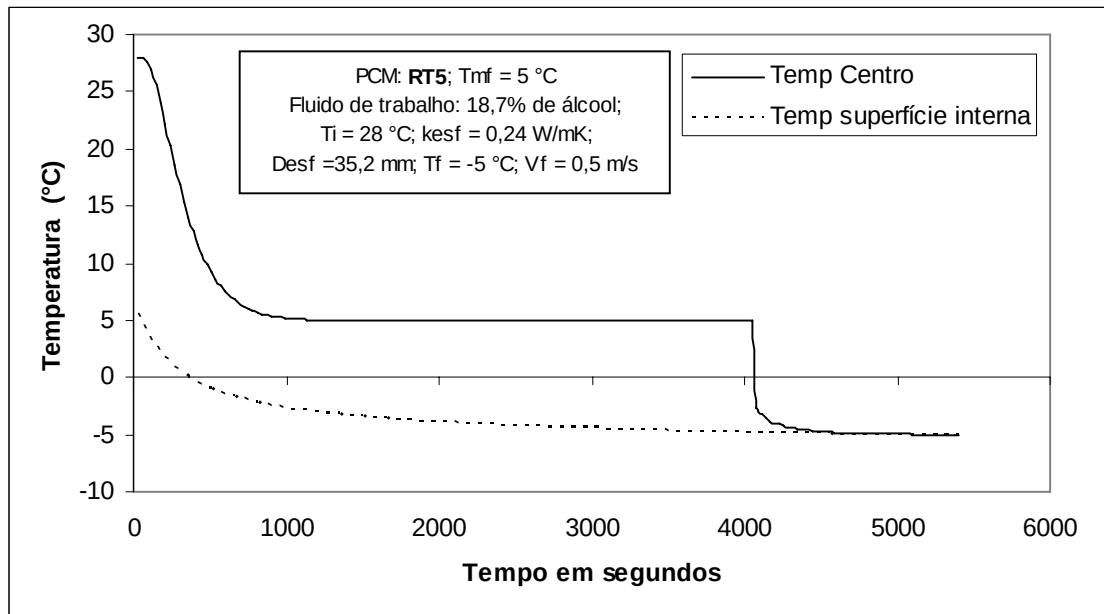


Figura 4. 28 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para o RT5 como PCM

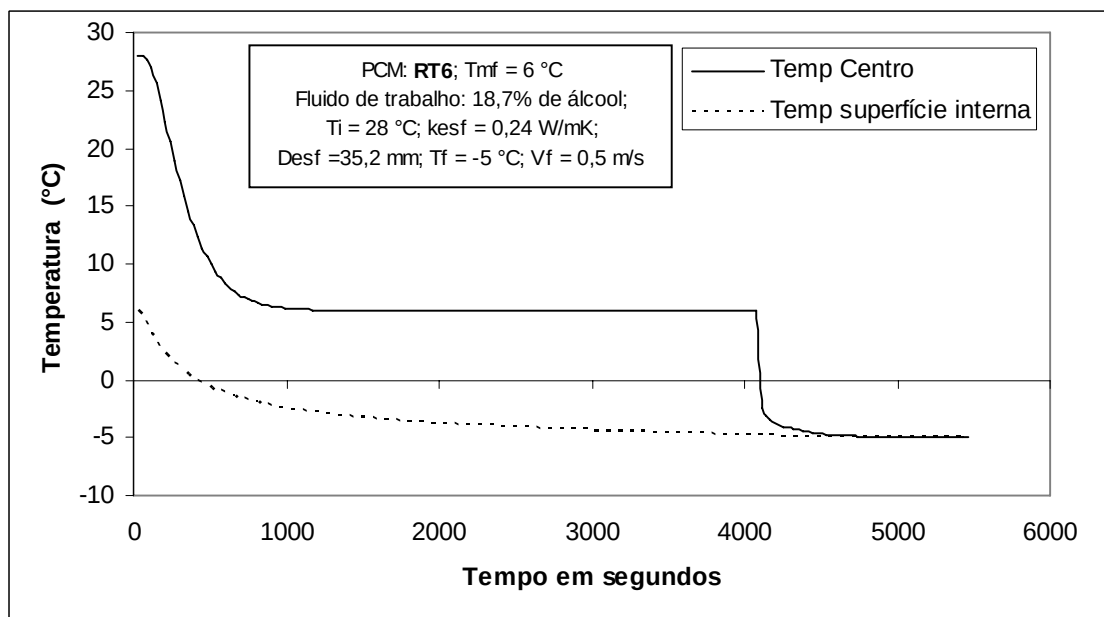


Figura 4. 29 - Evolução das temperaturas no centro e na superfície interna da cápsula esférica para o RT6 como PCM

É possível fazer uma comparação entre as curvas de evolução da temperatura na superfície interna da cápsula esférica em função do tempo observando a figura 4.30, que mostra as curvas para todos os materiais utilizados nas simulações.

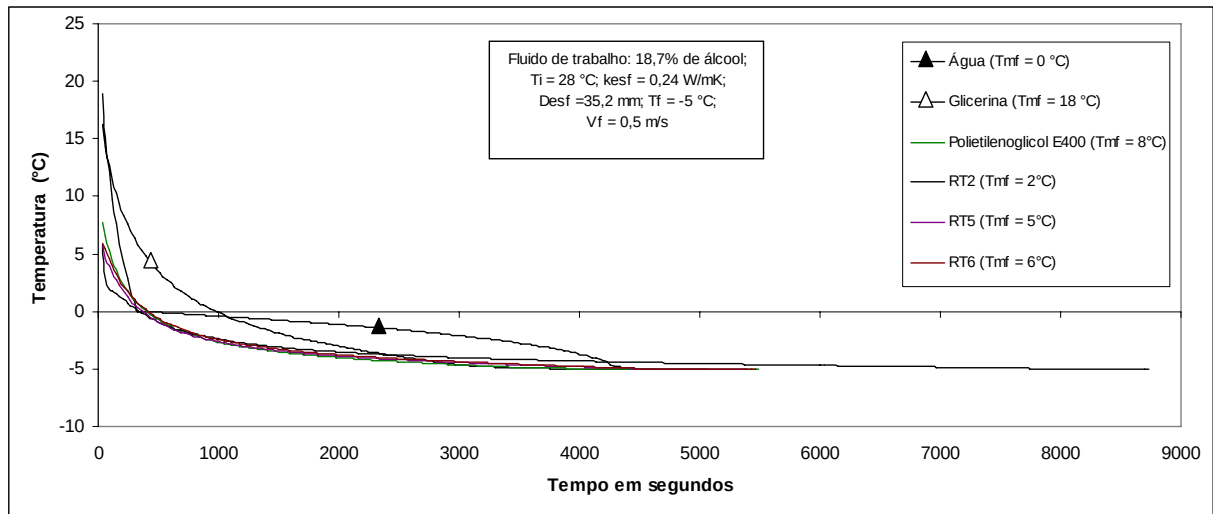


Figura 4. 30 - Histórico da Temperatura na superfície interna da cápsula esférica

Para as temperaturas na superfície interna da cápsula (fig. 4.30) não houve variação significativa no comportamento das curvas para os diferentes materiais adotados, com exceção da água, que apresentou uma queda de temperatura menos acentuada em função do tempo, durante a mudança de fase no interior da cápsula, que durou até aproximadamente 4200 segundos. Isto ocorreu devido à alta condutividade térmica da água na fase sólida ($2,25\text{ W/mK}$) em relação a dos outros materiais da ordem de $0,2\text{ W/mK}$. O gradiente de temperatura na espessura da região solidificada é inversamente proporcional à condutividade térmica, assim a diferença entre a temperatura de mudança de fase, na interface sólido-líquido, e a temperatura na superfície interna da cápsula esférica é menor para uma condutividade térmica maior.

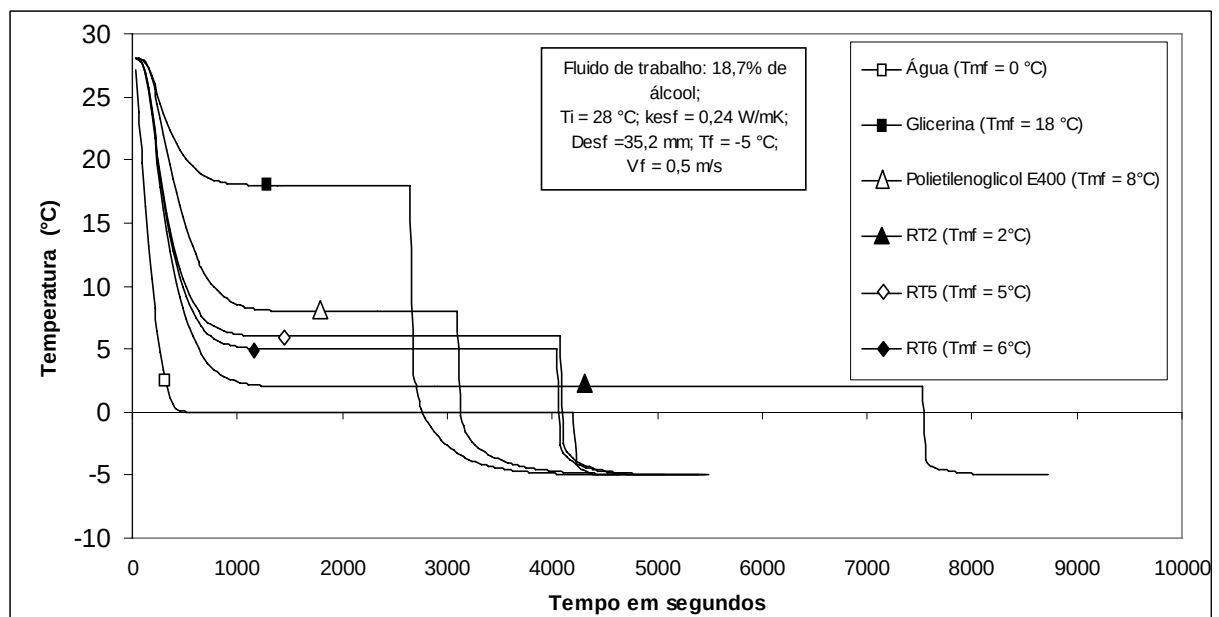


Figura 4. 31 - Evolução da temperatura do centro da cápsula esférica no tempo para todos os materiais

A parafina RT2 requer um tempo maior para alcançar a temperatura do fluido de trabalho, aproximadamente 8700 segundos enquanto a glicerina completou a solidificação em torno de 2600 segundos e atingiu a temperatura do fluido de trabalho em torno de 5000 segundos. No gráfico da figura 4.31 pode-se perceber uma pequena influência do tipo de PCM sobre tempo necessário para que a temperatura de mudança de fase seja alcançada, em todos os materiais as respectivas temperaturas de mudança de fase foram atingidas em torno de 1000 segundos, no centro da cápsula esférica.

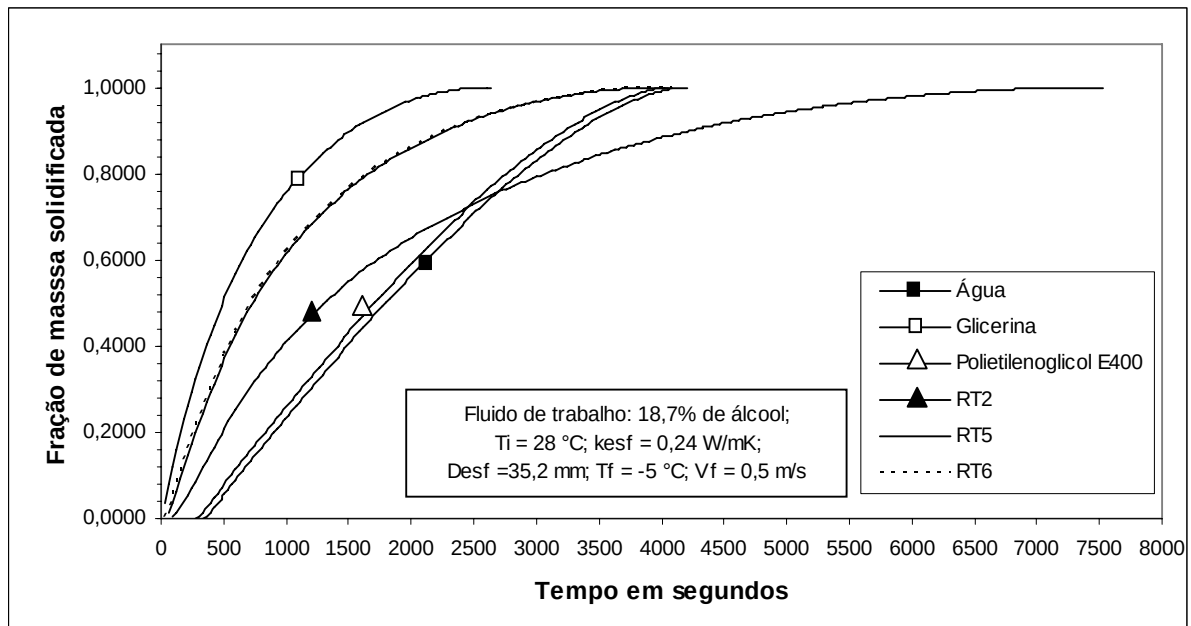


Figura 4. 32 - Fração de massa solidificada - Influência do PCM

Na figura 4.32 observa-se que a diferença entre o tempo de início de solidificação da água e da parafina RT2 é bem menor que a diferença entre o término da solidificação para estes dois PCMs, enquanto o primeiro completou a solidificação em torno de 4200 segundos o último completou o processo em aproximadamente 7000 segundos. Porém esta diferença não ocorre entre as parafinas RT5 e RT6 que, no gráfico estão praticamente sobrepostas, devido ao fato de terem as mesmas propriedades termofísicas diferindo apenas no calor latente e na temperatura de mudança de fase. Comparando a água com o polietilenoglicol E400 as curvas apresentam uma mesma dinâmica, porém com uma pequena diferença entre os tempos de início e término do processo de solidificação.

Foi avaliada a energia térmica acumulada para cada material de mudança de fase e nesta análise também foram incluídas as parcelas de calor sensível na fase líquida e na fase sólida e calor latente durante o carregamento.

Na figura 4.33 percebe-se que a parcela de calor latente armazenado no material é muito maior que as parcelas de calor sensível no sólido e no líquido. Sendo que, entre as parcelas de calor sensível, a maior contribuição no armazenamento ocorreu para o resfriamento do líquido. Isto ocorreu devido à temperatura inicial da água ter sido $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ superior à temperatura de mudança de fase, enquanto o sólido só precisa ter uma redução de sua temperatura em apenas 5°C , isto é, a energia necessária para resfriar o líquido, entre as temperaturas utilizadas, é maior que a necessária para resfriar o sólido. Além disto, o calor específico na fase sólida ser menor.

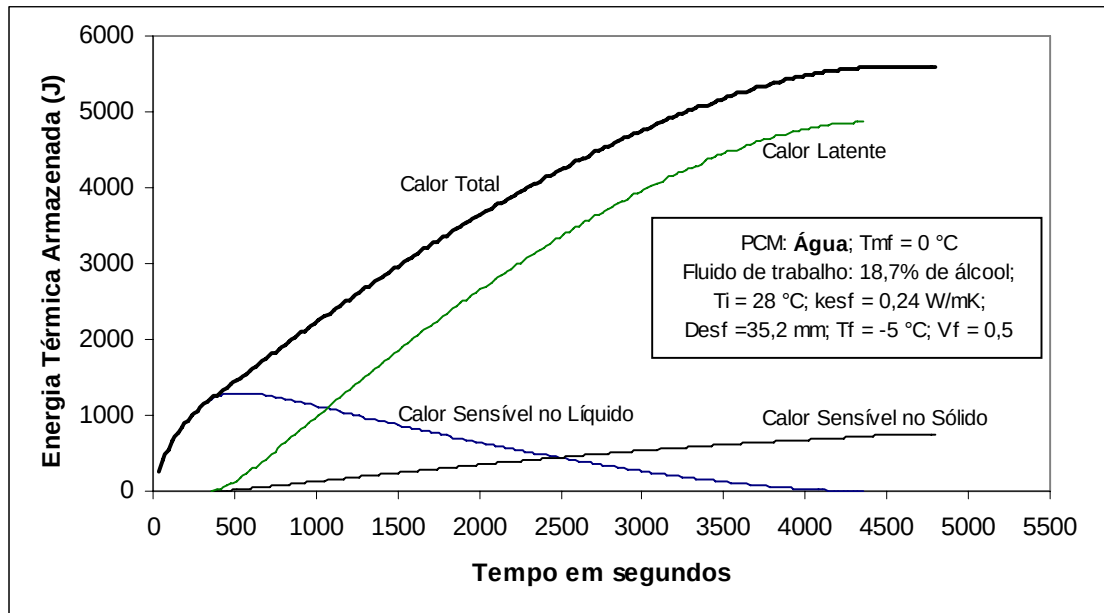


Figura 4. 33 - Energia Térmica Armazenada - PCM água

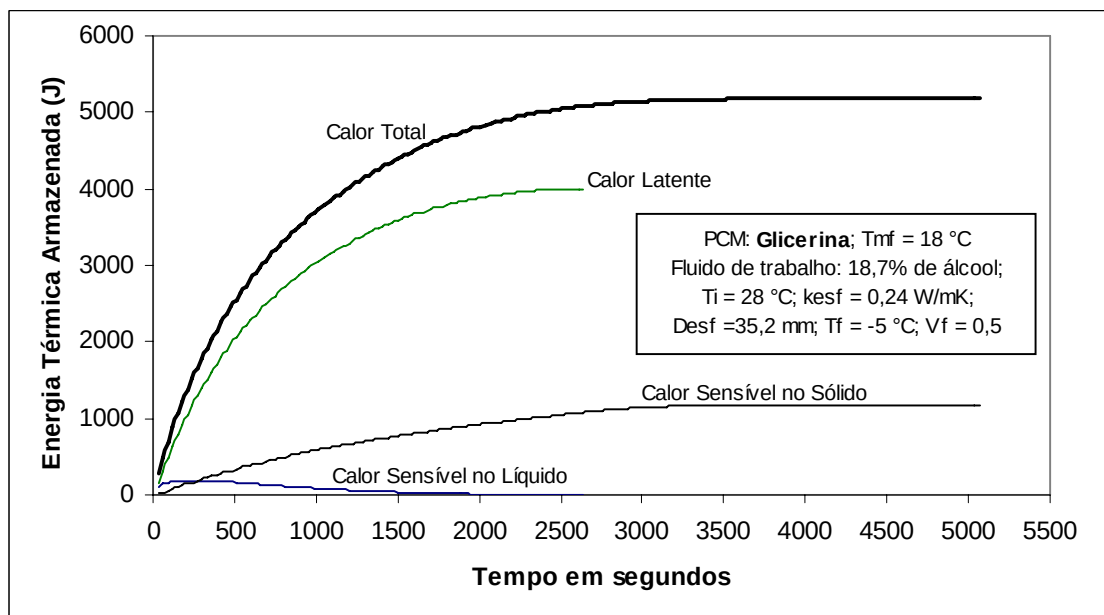


Figura 4. 34 - Energia Térmica Armazenada - PCM Glicerina

Para a glicerina ocorre o inverso do caso da água (Fig. 4.34). A energia armazenada possui a maior parcela na forma de calor latente e, em segundo lugar, na forma de calor sensível no sólido. Isto pode ser explicado pelo fato de a temperatura de mudança de fase da glicerina ser de $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, ou seja, o líquido deve ser resfriado em $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ para atingir a temperatura de mudança de fase, visto que a temperatura inicial é de $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Porém após a solidificação completa, o material é resfriado de $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ o que equivale a um armazenamento de energia muito maior devido à grande diferença de temperaturas inicial e final do resfriamento do sólido.

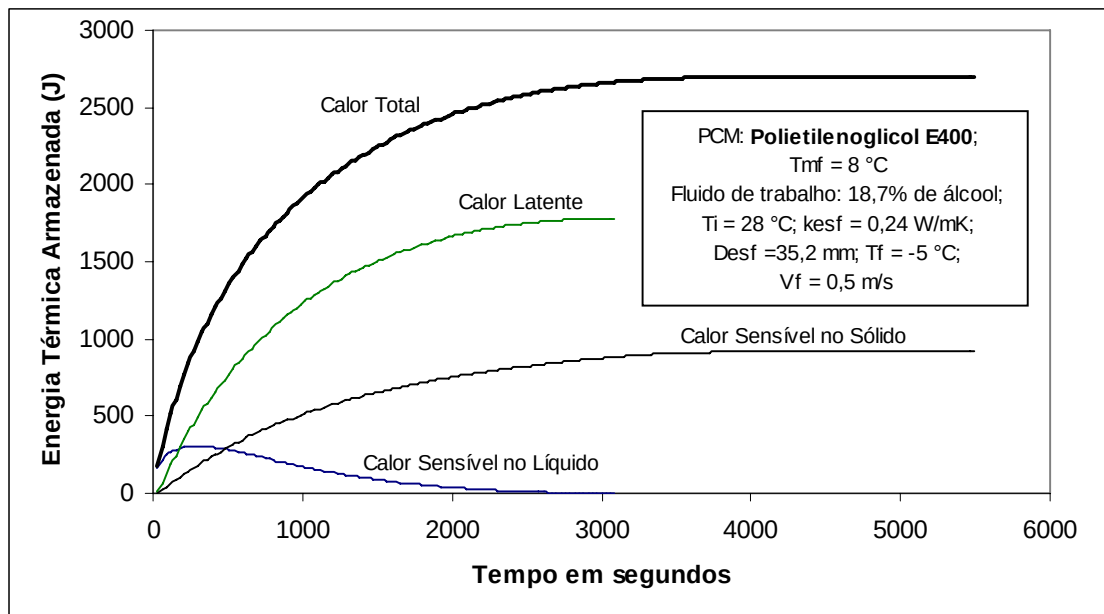


Figura 4. 35 - Energia Térmica Armazenada - PCM Polietilenoglicol E400

Na figura 4.35 é mostrado o comportamento das curvas de calor sensível, tanto no líquido quanto no sólido, e a curva que mostra a evolução do calor latente no processo de armazenamento térmico utilizando o Polietilenoglicol E 400. Convém notar que a parcela de calor sensível no sólido não é insignificante em relação à parcela de calor latente. Isto ocorre devido à temperatura de mudança de fase deste material ($T_{mf} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$) estar muito acima da temperatura final do processo ($T_f = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Após a solidificação completa do PCM, este continua sendo resfriado pela transferência de calor com o fluido de trabalho que escoa sobre a superfície externa da cápsula. Como a diferença entre as temperaturas inicial e final deste processo é relativamente elevada, a parcela de calor sensível no sólido é consequentemente maior que nos outros materiais.

No caso das parafinas Rubitherm RT2, RT5 e RT6 as parcelas de energia armazenadas tanto no sólido quanto no líquido são da mesma ordem de grandeza, como visto nas figuras 4.36, 4.37, 4.38.

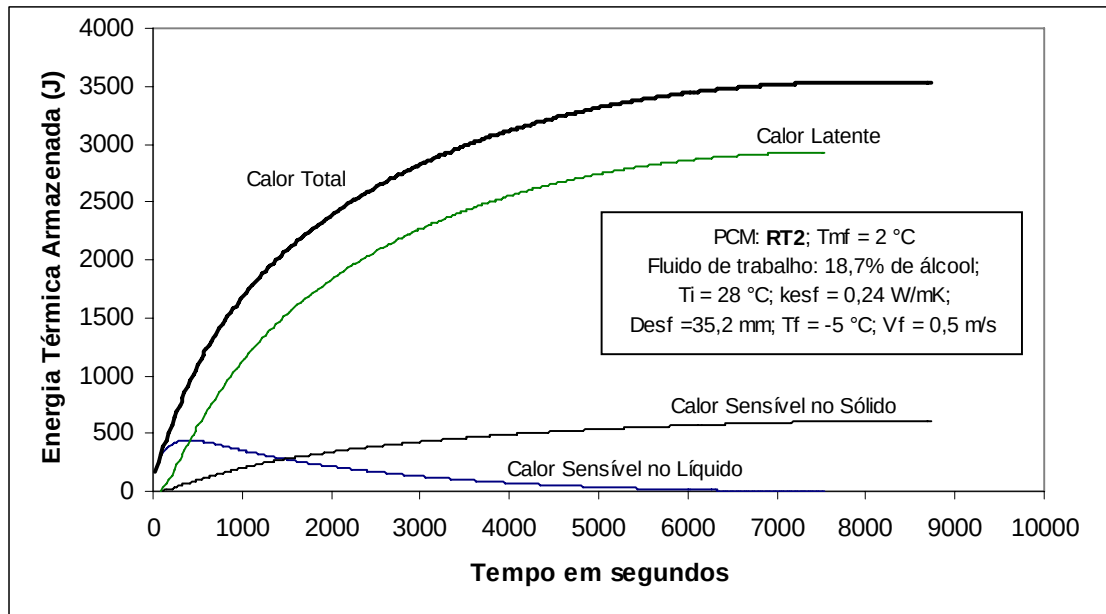


Figura 4. 36 -Energia Térmica Armazenada - PCM RT2

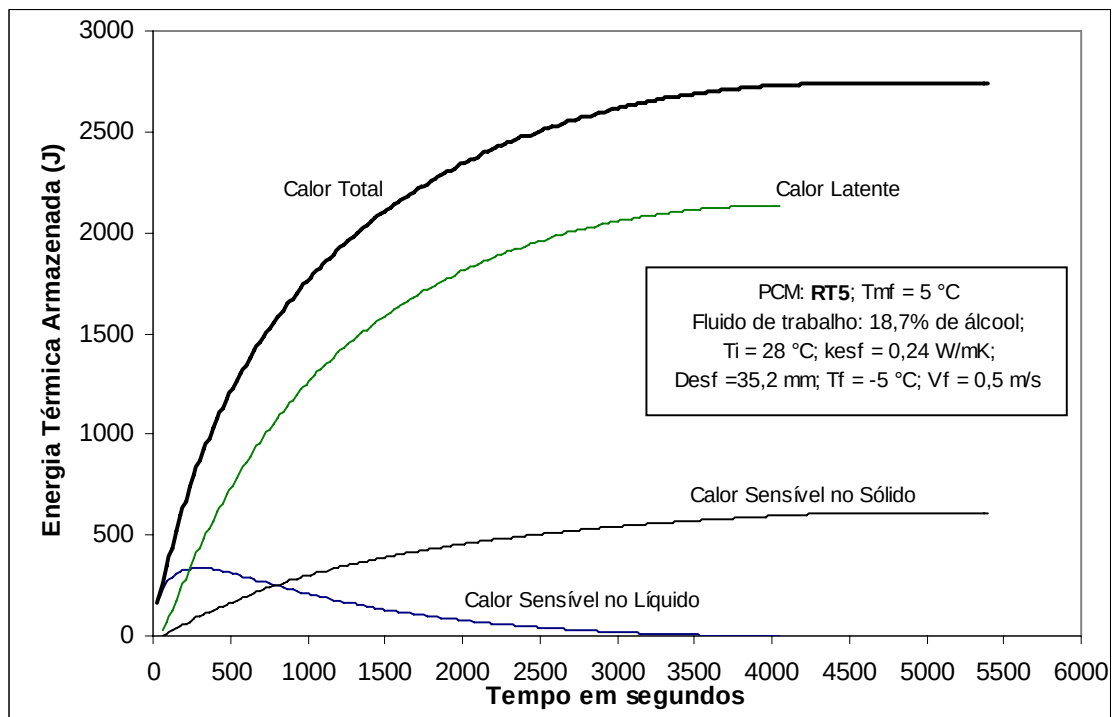


Figura 4. 37 - Energia Térmica Armazenada - PCM RT5

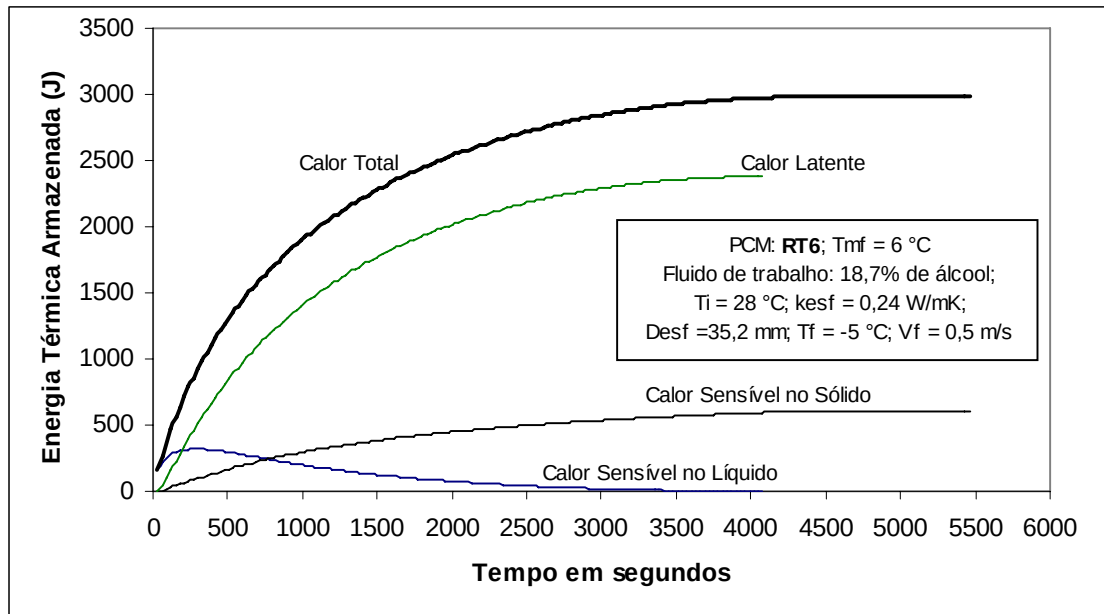


Figura 4. 38 - Energia Térmica Armazenada - PCM RT6

Na figura 4.39 é possível fazer uma comparação entre as energias armazenadas pelos materiais de mudança de fase.

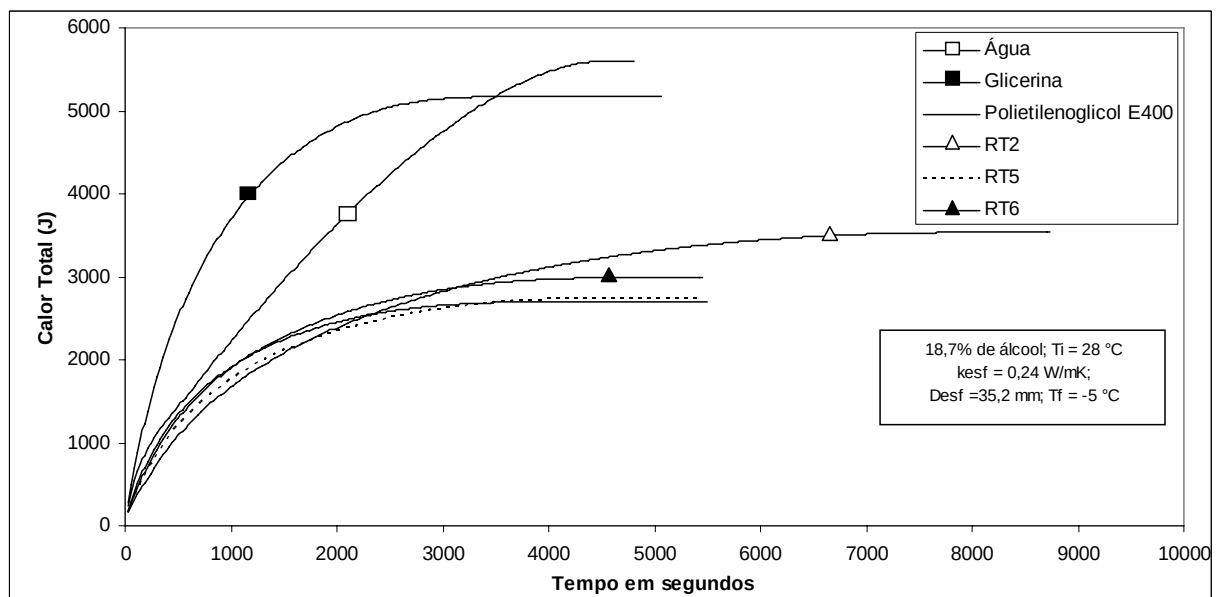


Figura 4. 39 - Energia Total Armazenada na Esfera - Influência do PCM

Observa-se, no gráfico da figura 4.38, que o material que acumulou uma maior quantidade de energia foi a água, aproximadamente 5600 J. Isto pode ser explicado pelo fato de este meio de armazenamento possuir calor sensível e latente maiores em relação aos outros materiais. A água também apresentou uma dinâmica do processo de armazenamento bastante vantajosa em relação aos outros materiais, pois teve um tempo de carregamento inferior para uma

maior quantidade de energia total armazenada. A glicerina também apresentou resultados semelhantes aos da água sendo a quantidade de energia armazenada pouco inferior à da água e um tempo bastante próximo, em torno de 5000 segundos. Porém, deve-se ressaltar o fato que a glicerina armazenou uma quantidade de energia considerável, aproximadamente 5100 J em um período de tempo em torno de 2600 segundos. Para o mesmo período de tempo, a água armazenou aproximadamente 4400 J, porém com uma curva crescente, como visto na figura 4.38. A partir deste instante de tempo a glicerina passa a armazenar ganhos de energia insignificantes, permanecendo a quantidade de energia total armazenada praticamente constante, ou seja, o completo armazenamento de energia térmica ocorreu, na prática, para a glicerina, em um tempo aproximado de 2600 segundos e não de 5000 segundos. A água ainda possui capacidade de continuar armazenando energia até atingir o patamar de aproximadamente 5600 J. Desta forma, para o tempo de armazenamento por volta de 2600 segundos a aplicação da glicerina é mais interessante que a da água.

Existe uma motivação para encontrar aplicações para a utilização glicerina, devido ao fato de a mesma ser um subproduto do processo produtivo do biodiesel, tendo em vista que o custo deste material deve ser diminuído por causa do aumento de sua disponibilidade quando do crescimento da produção do biocombustível em questão. A aplicação como material de mudança de fase mostrou-se bastante favorável devido às suas propriedades termofísicas que favoreceram um comportamento que viabiliza o seu uso como um material adequado ao armazenamento de energia térmica na forma de calor latente.

A parafina RT2 alcançou aproximadamente 3500 J por volta de 8700 segundos. As demais parafinas, RT5 e RT6 e o polietilenoglicol E400 armazenaram entre 2500 J e 3000 J, bem próximos de 5500 segundos, apresentando uma dinâmica de carregamento melhor se comparada ao RT2. Nas figuras 4.40 e 4.41 pode-se fazer um comparativo da energia total armazenada e o tempo necessário para o carregamento completo.

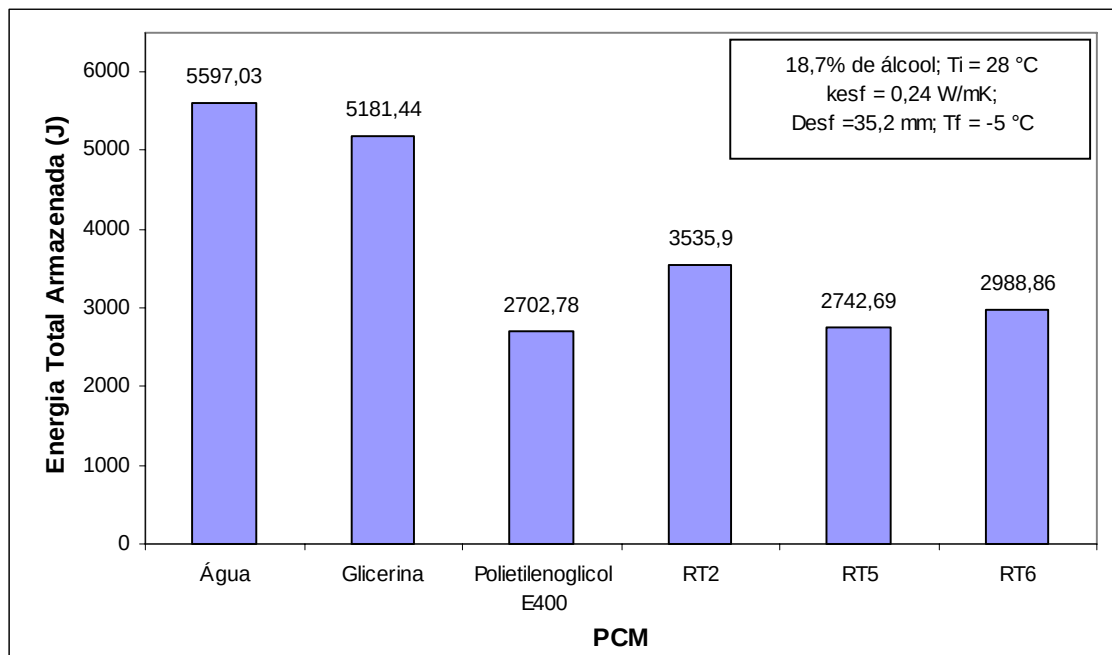


Figura 4. 40 - Energia Total Armazenada por PCM

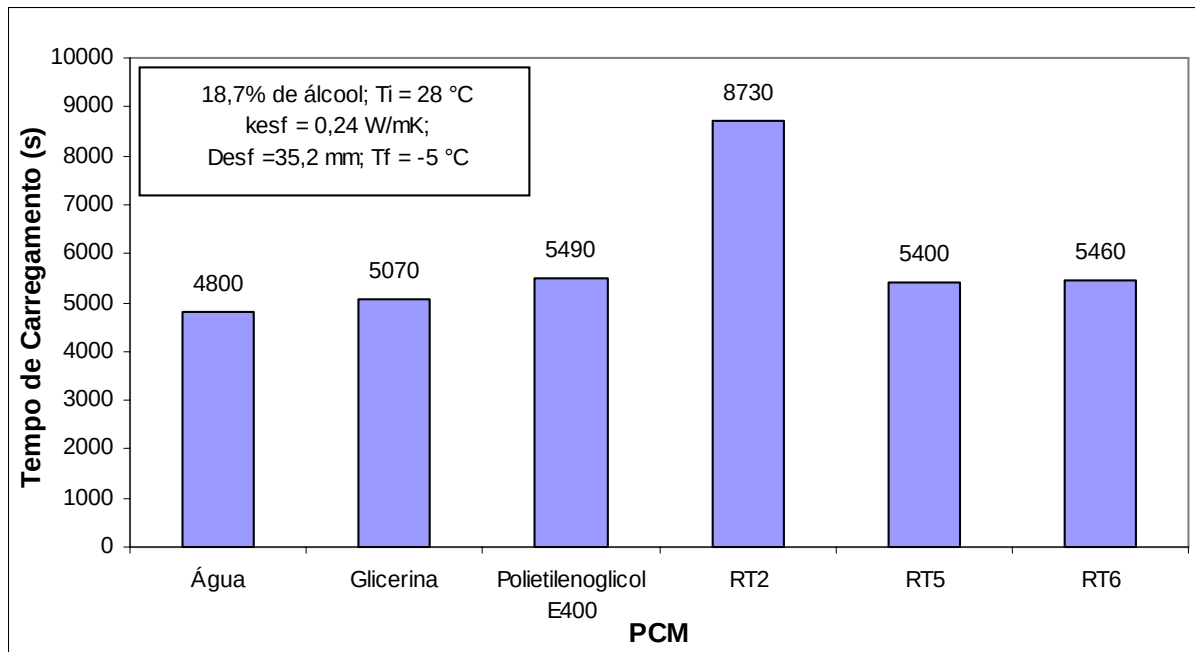


Figura 4. 41 - Tempo para o Carregamento Completo

A água e a glicerina possuem as maiores capacidades de armazenamento térmico em um tempo de carregamento menor que os demais materiais, demonstrando que são mais promissoras na utilização como materiais de mudança de fase, em relação aos demais compostos avaliados.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 – Conclusões

Com os resultados obtidos pelas simulações, é possível chegar a algumas conclusões sobre a influência dos diversos parâmetros avaliados, os quais foram: a composição do fluido de trabalho, o diâmetro externo da cápsula esférica, a velocidade e a temperatura do fluido de trabalho e o tipo de material de mudança de fase utilizado.

O modelo desenvolvido apresentou resultados coerentes com os dados experimentais disponíveis na literatura.

A Composição do Fluido de Trabalho não afetou grandemente as temperaturas no interior da cápsula, a fração de massa solidificada e a energia armazenada. Em todos os casos avaliados o comportamento do material foi praticamente o mesmo, não houve diferenças significativas na dinâmica do processo de solidificação do PCM.

O diâmetro externo da cápsula Esférica influencia as temperaturas no interior da cápsula, a fração de massa solidificada e a energia armazenada de forma significativa. Para maiores diâmetros o tempo necessário para a solidificação completa é maior, mas a quantidade de energia armazenada também é maior.

A Influência da velocidade média de escoamento do fluido de trabalho não foi significativa sobre a dinâmica do processo de solidificação e armazenamento de energia térmica, para os valores escolhidos.

A Temperatura do Fluido de Trabalho influencia grandemente a temperatura final do processo e a dinâmica de armazenamento, porém não influencia de forma significativa a quantidade de energia armazenada.

O tipo de material de mudança de fase tem uma grande influência na dinâmica do processo de armazenamento de energia térmica. As diferentes temperaturas de mudança de fase, para os diferentes tipos de PCMs, tendem a modificar os tempos necessários para a completa solidificação e os perfis de temperatura do material no interior da cápsula esférica, além de diferirem quando à quantidade de energia armazenada no final do processo de armazenamento térmico.

A água e a glicerina apresentaram resultados com valores próximos, no que se refere à quantidade total de energia armazenada e ao tempo necessário para o completo carregamento.

Devido ao fato de a glicerina ser um subproduto do processo de produção do biodiesel, há uma necessidade de encontrar aplicações para sua utilização, visto que o custo deste material tende a ser minimizado. A aplicação como material de mudança de fase mostrou-se bastante favorável devido às suas propriedades termofísicas que favoreceram um comportamento adequado para armazenamento de energia térmica na forma de calor latente.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

- Realizar um estudo experimental do processo simulado no presente trabalho.
- Realizar simulações do processo de descarregamento.
- Estudar o efeito convectivo no interior da cápsula durante o processo de fusão e solidificação.
- Estudar experimentalmente o efeito de um leito sobre o processo de armazenamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghbalou, F., Badia, F., Illa, J. *Exergetic optimization of solar collector and thermal energy storage system International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006) 1255–1263
- Alkan, Cemil. *Enthalpy of melting and solidification of sulfonated paraffins as phase change materials for thermal energy storage*. *Thermochimica Acta*, vol. 451, pp. 126–130, 2006
- ALPINA-CALMAC – Guia Técnico Bancos de Gelo Alpina-Calmac. São Paulo, 1992.
- ASHRAE *Design Guide for Cool Thermal Storage*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1993
- ASHRAE HANDBOOK APPLICATIONS, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 1997.
- Bass, J., *Cours de Mathematiques*, vol. 2, Masson, 1961.
- Bédécarrats, J. P. Strub, F. Falcon, B. Dumas, J. P. *Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant*. *Int. J. Refrig.* Vol. 19, No. 3, pp. 187-196, 1996.
- Calmac. Off-Peak Cooling – Icebank. Disponível em:
<http://www.calmac.com/products/icebank.asp>
 Acesso em: dezembro de 2007
- Carvalho, Maurício. *Estudo da Viabilidade de Instalação de um Sistema de Termoacumulação Visando Redução no Consumo de Energia Elétrica*, 2002.
- Chan, C.W., Tan, F.L. *Sólidoifcation inside a sphere - an experimental study*. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33, 335–341, 2006.
- Chen, B. Chen, X. Ding, Y.H. Jia, X. *Shading effects on the winter thermal performance of the Trombe wall air gap: An experimental study in Dalian*, *Renewable Energy* 31 (2006) 1961–1971
- Cryogel. Catalog Information. Ice Ball Thermal Storage*. Disponível em: www.cryogel.com
 Acessado em: abril de 2007
- Cristopia Energy Systems*.
 disponível em:
www.cristopia.fr/english/products/images/Commercial%20leaflet%20GB_1Mo.pdf
 Acesso em dezembro de 2007.
- Dinçer, Ibrahim; Rosen, Marc A. 2002. *Thermal Energy Storage, Systems and Applications*, John Wiley & Sons, England.

Esen, Mehmet, Durmus, Aydin, Durmus, Ayla. *Geometric Design of Solar-Aided Latent Heat Store Depending on Various Parameters and Phase Change Materials*. Solar energy, vol. 62, pp. 19-28, 1998

Fraidenraich, Naum. *Energia Solar: Fundamentos e tecnologia de conversão heliotérmica e fotovoltaica*. Ed. Universitária da UFPE, 1995.

González, Alfredo Fernández, *Analysis of the thermal performance and comfort conditions produced by the different passive solar heating strategies in the United States Midwest*, Solar Energy, 2006

Guzmán, Juan José Milón. *Estudo experimental do super-resfriamento da água em cápsulas cilíndricas*. Tese de doutorado, PUC-Rio de Janeiro, 2004.

Hammou, Zouhair Ait, Lacroix, Marcel. *A hybrid thermal energy storage system for managing simultaneously solar and electric energy*. Energy Conversion and Management, vol. 47, pp. 273–288, 2006

Incropera, Frank P., DeWitt, David P. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 4ª ed. Rio de Janeiro, 1998.

Ismail, Kamal A. R. *Bancos de gelo: fundamentos e modelagem*. Campinas, Ed. do autor, 1998.

Ismail, Kamal A. R. *Modelagem de processos Térmicos – Fusão e solidificação*. Campinas, Ed. do autor, 1998

Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R, Moura, L.F.M., Ganzarolli, M.M., *Ice formation around isothermal radial finned tubes* . Energy Conversion & Management, vol. 41, pp. 585-605 , 2000

Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R., *Numerical and experimental study of spherical capsules packed bed latent heat storage system*, Applied Thermal Engineering, vol. 22, pp. 1705–1716, 2002

Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R, Silva,T.M.da. *A parametric study on ice formation inside a spherical capsule*. International Journal of Thermal Sciences, vol. 42, pp. 881–887, 2003

Ismail, K. A.R., Henríquez, J.R., *Solidification of PCM inside a spherical capsule*, Energy Conversion & Management, vol. 41, pp. 173-187, 2000.

Ismail, K.A.R, Moraes, R.I.R, *Análise Experimental Da Solidificação Completa em Geometrias Esféricas*.

Ismail, Kamal A.R., Salinas, Carlos T., Henríquez, Jorge R. *Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows*. Energy and Buildings, artigo em fase de impressão, 2007

Jie, Ji, Hua, Yi, Gang, Pei, Jianping, Lu, *Study of PV-Trombe wall installed in a fenestrated room with heat storage*. Applied Thermal Engineering. Article in press, 2006

Kelman, James. *Thermal Management*, Cranfield University, 2002.

Melinder, Åke. *Thermophysical Properties of Aqueous Solutions Used as Secondary Working Fluids*. Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology, KTH. Stocolmo, Suécia. 2007.

Mendonça, Ana, Carvalho, Maria Susana de, *Cogeração*, Instituto Superior Técnico, 2002.

Micaroni, F. *Estudo Paramétrico de Um Armazenador Térmico Tipo Gelo sobre Serpentinhas*. Dissertação de mestrado, Universidade de Campinas, Campinas, 1996

Michels, Horst, Pitz-Paal, Robert. *Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants*. Solar Energy, vol. 81 pp. 829–837, 2007

Nallusamy, N. Sampath, S. Velraj, R. *Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources*. Renewable Energy, vol. 32, pp. 1206–1227, 2007

PAVAN, L. B. B. *Termoacumulação: Gelo ou Água?* 2004. 26f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

Perry, Robert H., Green, Don W., Maloney, James O. *Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill, 7ª ed, New York, 1999.

Portal de Energias Renováveis

Disponível em: http://www.energiasrenovaveis.com/html/energias/solar_tecnologias.asp#topo

Acesso em 16 de outubro de 2007.

Rodrigues, Antonio Flavio Aires. *Análise Experimental e Numérica da Solidificação Direcional de Materiais de Mudança de Fase*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

Santos, Wilson N. dos. *Aplicação da técnica de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros fundidos*. Polímeros, , vol.15, no.4, pp.289-295, 2005

Santos, Wilson N. dos, Gregorio Fº, Rinaldo, Mummery, Paul et al. *Propriedades térmicas de polímeros por métodos transientes de troca de calor*. Polímeros, vol.13, no.4, pp.265-269, 2003

Souza, Itamar Schäfer de. *Simulação Numérica do Processo de Fusão e Solidificação da água no Interior de Cilindros*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

Spyridonos, A.V., Argiriou, A.A., Nickoletatos, J.K. *Thermal storage efficiencies of two solar saltless water ponds*. Solar Energy 75, 207–216, 2003

Silva Jr, Malvino André da. *Estudo da Influência de Parâmetros no processo de Armazenamento de Calor Latente em um Banco Gelo Formado por Cápsulas Esféricas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

Tecunseh, Modelos de Unidades Condensadoras.
Disponível em: www.tecumseh.com.br
Acessado em março de 2007.

Thermal Storage, em: ASHRAE (Eds.) *ASHRAE Handbook*, HVAC Applications, 1999.

Thumann, A. Paul, *Handbook of Energy Engineering*, 2001

University of Akron Chilled Water Tank
Disponível em: <http://www3.uakron.edu/capplan/completedprojects/ChilledWater.html>
acessado em novembro de 2007

Watanabe, Takayuki e Kanzawa, Atsushi. *Second Storage Law Optimization Of A Latent Heat System With Pcms Having Different Melting Points*. Heat Recovery Systems & CHP Vol 15, No. 7, pp. 641-653, 1995

Zalba, Belén, Marín, José M^a, Cabeza, Luisa F, Mehling, Harald. *Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, heat transfer, analysis and applications*. Applied Thermal Engineering 23, 251-283, 2003

Zhou, Guobing, Zhang, Yinping, Zhang Qunli, Lin, Kunping, Di, Hongfa. *Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates*. Applied Energy, vol. 84, pp. 1068–1077, 2007