



Ronaldo Vitorino dos Santos

**Modelagem de um Sistema de
Termoacumulação em Encapsulados
Esféricos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do
Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Alberto do Reis Parise
Co-orientador: Prof. Sérgio Leal Braga

Rio de Janeiro
Outubro de 2015



Ronaldo Vitorino dos Santos

**Modelagem de um Sistema de
Termoacumulação em Encapsulados
Esféricos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovado pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Sérgio Leal Braga

Coorientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Sergio Libanio de Campos

Centro Federal de Educação Tecnológica

Celso Suckow Fonseca – CEFET/RJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de outubro de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Ronaldo Vitorino dos Santos

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia Industrial (FEI) de São Bernardo do Campo (São Paulo, Brasil) em 1997. Em 1998 entrou para Veranum Tempus Engenharia e Planejamento Térmico, onde atuou na área de comissionamento e projetos de sistemas de HVAC. Em 2012 fundou a empresa Termociências Consultoria e Projetos LTDA prestando serviços em diversas áreas da engenharia.

Ficha Catalográfica

Santos, Ronaldo Vitorino dos

Modelagem de sistema de termoacumulação em encapsulados esféricos / Ronaldo Vitorino dos Santos ; orientador: José Alberto dos Reis Parise ; co-orientador: Sérgio Leal Braga. – 2015.

103 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Refrigeração. 3. Termoacumulação. 4. Cápsulas esféricas. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Braga, Sérgio Leal. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD:621

Agradecimentos

Aos meus orientadores José Alberto dos Reis Parise e Sergio Leal Braga pelo estímulo e parceria na realização deste trabalho.

A PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Agradeço a todos os prestadores de serviço da PUC pela gentileza e a PUC como instituição que coloca a educação na frente de todas as outras questões, burocrática financeira etc.

Aos meus pais, que sempre frisaram que o futuro estaria na educação.

A minha esposa que teve paciência de suportar, as horas e horas na qual não pude dar atenção necessária, tempo para que eu pudesse realizar este meu objetivo.

Resumo

Santos, Ronaldo Vitorino dos; Parise, José Alberto dos Reis. **Modelagem de um sistema de termoacumulação em encapsulados esféricos**. Rio de Janeiro, 2015. 103p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O propósito deste trabalho é a modelagem de um sistema de termoacumulação utilizando cápsulas esféricas com material de mudança de fase (MMF) o programa computacional desenvolvido utilizado, foi à plataforma Matlab. O ponto principal do presente trabalho, no seu inédito modelo, está no fato de se estudar este sistema utilizando diferentes dimensões de esferas em único tanque de estocagem (Usualmente a termoacumulação em cápsulas esféricas utiliza no interior do tanque cápsulas esféricas com um único diâmetro). Para formar o gelo (calor latente) nas cápsulas, um fluido com temperatura abaixo da temperatura de congelamento da água escoar em regime permanente através das cápsulas. Desta forma há uma troca de calor entre o fluido e as cápsulas com MMF (neste caso água). O ideal seria que toda água no interior das cápsulas se tornasse gelo. Porém, a resistência térmica formada pelo gelo começa a interferir na formação total da água no interior da cápsula. Outro problema é a temperatura do fluido que circula. Com o decorrer do escoamento a temperatura do fluido aumenta ao trocar calor com as cápsulas. Desta forma, as esferas em planos diferentes irão receber um fluido com uma temperatura maior que do plano anterior. Assim o gradiente de temperatura entre o fluido e a água fica cada vez menor influenciando o tempo de formação de gelo em todas as cápsulas. O estudo deste processo de termoacumulação prevê um tempo menor de circulação de fluido para formação de gelo e melhor uso da energia estocada.

Palavras-chave

Refrigeração; Termoacumulação; Cápsulas esféricas.

Abstract

Santos, Ronaldo Vitorino dos Parise, José Alberto dos Reis (Advisor). **Modeling of a Thermal Storage System with Spherical Encapsulated Material**. Rio de Janeiro, 2015. 103p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The study and use of thermal storage has increased in recent years due to the need to reduce production cost. The purpose of this paper is the modeling of a thermal storage system using spherical capsules with phase change material (water). The main point of the present work lies in the fact that this system uses different sizes of balls in a single storage tank (usually, in thermal storage spherical capsules systems spherical capsules with a simple diameter only is employed). To form the ice caps, a fluid, with a temperature below the freezing temperature of water, flows permanently through the capsules, so there is an exchange of heat between the fluid and the capsules with water, which freezer. Ideally, all water inside the capsule should become ice, but the thermal resistance posed by the ice begins to interfere with the formation of the total water within the capsule. Another problem is the temperature of the fluid that exchanges heat with the water capsules. As the fluid temperature increases, downstream, time of ice formation is affected by the smaller temperature difference between fluid and capsule external wall.

Keywords

Thermal storage tank; Capsule PCM; Latent heat storage.

Sumário

1.	Introdução	18
1.1.	Objetivo	18
1.2.	Conceito de termoacumulação	19
1.2.1	Termoacumulação de Refrigeração	20
1.2.1.1.	Armazenamento de água gelada (Calor Sensível)	21
1.2.1.1.1.	Tanque de Estratificação	21
1.2.1.1.2.	Tanque Labirinto	22
1.2.1.1.3.	Sistemas de Defletoras	23
1.2.1.1.4.	Múltiplos Tanques	23
1.2.1.1.5.	Tanque com Diafragma ou Membrana	24
1.2.1.2.	Armazenamento de Gelo (Calor Latente)	24
1.2.1.2.1.	Placas de Gelo ou “Ice Harvesting”	24
1.2.1.2.2.	Pasta de Gelo ou “Ice Slurry”	25
1.2.1.2.3.	“External Melt Ice-on-Coil”	26
1.2.1.2.4.	“Internal Melt Ice-on-Coil”	26
1.2.1.2.5.	Encapsulado	27
1.2.2	Termoacumulação de Aquecimento	27
1.3.	Descrição do Problema	27
1.4.	Organização do trabalho.	28
2.	Revisão Bibliográfica	30
2.1.	Encapsulados de Geometrias Diversas	31
2.2.	Encapsulados Placas Planas Paralelas	31
2.3.	Encapsulados Cilíndricos	32
2.4.	Encapsulados Esféricos	32
3.	Modelagem Matemática	37
3.1.	Porosidade (ε).	38
3.2.	Número de esferas (N_{esf}).	40

3.3.	Velocidade Média do Fluido de Trabalho no Leito.....	40
3.4.	Modelo para Coeficiente de Convecção	40
3.5.	Troca de Calor Entre o Fluido de Trabalho e as Camadas do Leito.	41
3.6.	Modelo de transferência de Calor do MMF nas Cápsulas Esféricas.....	43
3.5.1	Modelo de Transferência de Calor Sensível.....	43
3.7.	Modelagem Transferência de Calor Latente	45
4.	Solução Numérica	47
4.1.	Dados de Entrada.....	48
4.1.1.	Tanque de armazenamento.	48
4.1.2.	Cápsulas esféricas.	49
4.1.3.	Dados de entrada do material de mudança de fase.....	49
4.1.4.	Dados de entrada do fluido de trabalho.....	49
4.1.5.	Porosidade média (ε).	50
4.1.6.	Velocidade média do fluido de trabalho no leito.	50
4.2.	Balanco de Energia.	51
4.2.1.	Balanco de Energia: Fluido de Trabalho e Camadas de Esferas.....	51
4.2.2.	Transferência de Calor na Cápsula Esférica.	52
4.2.2.1.	Resfriamento MMF Fase totalmente Líquida e Totalmente Sólida.	52
4.3.	Modelagem para Transferência de Calor Latente	57
4.4.	Forma Adimensional.....	59
4.5.	Fluxograma da Lógica da Simulação	62
5.	Validação do Programa	63
6.	Resultado das Simulações	68
7.	Análise dos Resultados	87

8.	Conclusões.....	89
9.	Sugestões de Trabalhos Futuros	90
10.	Referências Bibliográficas	91
11.	Apêndice	95

Lista de Figuras

Figura 1 - Fluxograma básico de termoacumulação de refrigeração.	21
Figura 2 - Representação de tanque de estratificação A) Carregamento B) Utilização (Nelson et. al, 1999).	22
Figura 3 - Tanque de labirinto (Mackie e Reeves, 1988)	22
Figura 4 - Sistema de defletoras (Mackie e Reeves, 1988).....	23
Figura 5 - Esquema de múltiplos tanques (Yau, Rismanchi, 2012).....	23
Figura 6 - Tanque com membrana (Yau, Rismanchi, 2012).....	24
Figura 7 - “Ice Harvester” (Energy Design Resources, 2009).	25
Figura 8 - Esquema de geração de pasta de gelo (Nelson, 1998)	25
Figura 9 - External Melt Ice-on-Coil, (EVAPCO, INC., 2007).	26
Figura 10 - Internal Melt Ice-on-Coil (EVAPCO, INC., 2007).....	26
Figura 11 - A) tanque com esferas de diâmetro único, B) exemplo de configuração a ser estudado.	28
Figura 12 - Divisão de levantamentos bibliográficos.	30
Figura 13 - Modelo simplificado do tanque.....	42
Figura 14 - Representação gráfica das coordenadas esféricas da condução de calor.	44
Figura 15 - Esfera em solidificação	45
Figura 16 - Representação da divisão de “N” camadas do MMF.	54
Figura 17 - Representação no interior da esfera.	55
Figura 18 - Fluxograma de Lógica de Simulação.	62
Figura 19 - Resultados experimentais: tempo de carregamento em função do material da cápsula (ElGhnam et al, 2012).	64
Figura 20 - Comparação simulação e resultados experimentais com variação da vazão (ElGhnam et al, 2012).	65
Figura 21 - Simulação e resultados experimentais com variação de temperatura do fluido de trabalho (ElGhnam et al, 2012).....	65

Figura 22 - Comparação simulação e resultados experimentais com variação de temperatura do fluido de trabalho na entrada do tanque (dados experimentais ISMAIL, 2002).	66
Figura 23 - Comparação simulação e resultados experimentais com variação de vazão do fluido de trabalho na entrada do tanque (dados experimentais ISMAIL, 2002).	67
Figura 24 - Configuração de distribuição de Cápsulas $D1 < D2 < D3$	68
Figura 25 - Distribuição de temperatura do fluido de trabalho na simulação com um grupo de esferas ($d=50\text{mm}$) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.	73
Figura 26 - Distribuição de temperatura do fluido de trabalho na simulação com um grupo de esferas ($d=75\text{mm}$) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.	74
Figura 27 - Distribuição de temperatura do fluido de trabalho na simulação com um grupo de esferas ($d=100 \text{ mm}$) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.	74
Figura 28 - Distribuição de temperatura na simulação com 2 grupos de esferas (50 e 75mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do FT de -15°C na entrada do tan que.....	75
Figura 29 - Distribuição de temperatura na simulação com 2 grupos de esferas (50 e 75mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do FT de -6°C na entrada do tanq ue.....	76
Figura 30 - Distribuição de temperatura do FT na simulação com 2 grupos de esferas (24 camadas de 50 mm e 4 camadas de 75mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do FT de -15°C na entrada do tanque.	77
Figura 31 - Distribuição de temperatura na simulação com 2 grupos de esferas (15 camadas de 50 mm e 10 camadas de 75mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do FT de -15°C na entrada do tanque.	78
Figura 32 - Distribuição de temperatura na simulação com 2 grupos de esferas (16 camadas de 50 mm e 6 camadas de 75mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do FT de -15°C na entrada do tanque.	78
Figura 33 - Distribuição de temperatura na simulação com 2 grupos de esferas (16 camadas de 75 mm e 6 camadas de 50mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do FT de -15°C na entrada do tanque.	79

Figura 34 - Gráfico da Distribuição de esferas utilizados na simulação numérica com 2 grupos de esferas (50 e 75 mm), diâmetro de esfera de 75mm na base.....81

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros experimentais utilizados para esfera unitária (ElGhnam et al, 2012).	64
Tabela 2 - Dados de entrada utilizados na simulação.....	69
Tabela 3 - Distribuição utilizando na simulação numérica com 1 grupo de esfera.	70
Tabela 4 - Distribuição utilizada na simulação numérica com 2 grupos de esferas, diâmetro de esfera de 50mm na base.	70
Tabela 5 - Distribuição de esferas utilizados na simulação numérica com 2 grupos, com diâmetro de esfera de 100mm na base.	71
Tabela 6 - Distribuição com 3 grupos de esferas.	71
Tabela 7 - Simulação com 1 grupo de esferas no tanque. Velocidade de $1,8 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura de fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.	72
Tabela 8 - Simulação com 1 grupo de esferas no tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura de fluido de trabalho a -6°C na entrada do tanque.	72
Tabela 9 - Simulação com 1 grupo de esferas no tanque. Velocidade $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura de fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.	73
Tabela 10 - Tempo de carregamento para 2 grupos de esferas de diâmetro, 50 mm na base e 75 mm na parte superior do tanque (velocidade de $1,8 \cdot 10^{-4}$ m/s e Temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque).	75
Tabela 11 - Tempo de carregamento para 2 grupos de esferas, 50 mm na base e 75 mm na parte superior do tanque utilizando velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ e temperatura do fluido de trabalho de -6°C na entrada do tanque).	76
Tabela 12 - Tempo de carregamento para 2 grupos de esferas, 50 mm na base e 75 mm na parte superior do tanque variando a altura de leito (velocidade de $5,4 \cdot 10^{-6}$ m/s e temperatura do de trabalho de -15°C ambos na entrada do tanque).	77
Tabela 13 - Tempo de carregamento para 2 grupos de esferas de diâmetro de 50 mm na base e 75 mm na parte superior do tanque, utilizando velocidade de $1,8 \cdot 10^{-4}$ e temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.	79

Tabela 14 - Tempo de carregamento para esferas de diâmetro de 75 mm na base e 50 mm na parte superior do tanque utilizando velocidade de $1,8 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura do fluido de trabalho de -6°C na entrada do tanque.80

Tabela 15 - Tempo de carregamento para esferas de diâmetro de 50 mm na base e 75 mm na parte superior do tanque utilizando velocidade de $5,4 \cdot 10^{-6}$ e Temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.80

Tabela 16 - Tempo de carregamento para esferas de diâmetro de 100 mm na base (velocidade de $1,8 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura do fluido de trabalho a -15°C ambos na entrada do tanque).82

Tabela 17 - Tempo de carregamento para esferas de diâmetro de 100 mm na base (velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura do fluido de trabalho de -6°C ambos na entrada do tanque).82

Tabela 18 - Tempo de carregamento para esferas de diâmetro de 100 mm na base (velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ e Temperatura do fluido de trabalho de -15°C ambos na entrada do tanque).83

Tabela 19 - Tempo de carregamento com 3 grupos com esferas de diâmetro de 100 mm na base, velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do leito.83

Tabela 20 - Taxa de energia armazenada em leitos formados por um grupo de esferas, com temperatura de FT de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s na entrada do tanque.84

Tabela 21 - Taxa de energia armazenada em leitos formados por 2 grupo de esferas, 50 mm na base e 75 mm no superior, utilizando temperatura de fluido de trabalho de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s na entrada do tanque.84

Tabela 22 - Taxa de energia armazenada em leitos formados por 2 grupo de esferas, base 50 mm, superior 75mm , utilizando temperatura de fluido de trabalho de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s na entrada do tanque.85

Tabela 23 - Taxa de energia armazenada no tanque formados por 2 grupo de esferas, 100 mm na base e 75mm na região superior, com temperatura de fluido de trabalho de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s na entrada do tanque.85

Tabela 24 - Taxa de energia armazenada no tanque formados por 3 grupos de esferas, 100 mm na base e 75mm na região central e 50 mm na área superior, com temperatura de fluido de trabalho de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s na entrada do tanque.86

Lista de Símbolos

A	Área [m ²]
Bi	Numero de Biot []
c	Calor específico [J/(kg K)]
d	Diâmetro [m]
$ Fo$	Numero de Fourier []
hc	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² K]
k	Condutividade térmica [W/m K]
L	Altura [m]
m	Massa [kg]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
N	Quantidade []
Nu	Número de Nusselt []
Pe	Número de Peclet []
Pr	Número de Prandtl []
Q	Calor transferido [J]
q	Taxa de transferência de calor [W]
\dot{q}	Taxa de geração de energia por unidade de volume [W/m ³]
R	Raio [m]
R_t	Resistência térmica [K/W]
Re	Número de Reynolds []
Ste	Número de Stefan modificado []
T	Temperatura [°C]
t	Tempo [s]
v	Velocidade [m/s]
V	Volume [m ³]
\dot{V}	Vazão em volume [m ³ /s]

Letras Gregas

α	Difusividade térmica [m ² /s]
ε	Porosidade []
ρ	Massa específica [kg/m ³]
γ	Calor Latente [J/kg]
μ	Viscosidade dinâmica [kg/sm-Pa s]
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s]

Subscritos

<i>ca</i>	Cápsula
<i>cap</i>	Cápsula
<i>esf</i>	Esferas
<i>ext</i>	Externo da esfera
<i>ft</i>	Fluido de trabalho
<i>fs</i>	Frente de solidificação
<i>h</i>	<i>Convecção</i>
<i>int</i>	Interno da esfera
<i>p</i>	Pobre
<i>d</i>	Densa
<i>m</i>	Média
<i>mf</i>	Mudança de fase
<i>mmf</i>	Material de mudança de fase
<i>tan</i>	Tanque
<i>V</i>	Espaço vazio
<i>T</i>	Total
<i>tan</i>	Tanque

1. Introdução

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é a modelagem de um sistema de termoacumulação de refrigeração, utilizando cápsulas esféricas com material de mudança de fase (MMF) e o estudo do comportamento da termoacumulação, para um tanque com grupos de cápsulas esféricas de diferentes diâmetros. Os estudos atuais concentram em modelos de tanque preenchido com esferas de um único diâmetro.

O aumento da população global e a urbanização crescente exigem uma igualmente crescente demanda de energia, especialmente para fins de HVAC. Como resultado deste aumento na demanda de energia tem havido muito esforço dedicado a reduzir o custo e quantidade do uso de energia aplicada no aquecimento e resfriamento. Em edifícios residenciais e comerciais, os avanços em tecnologias de refrigeração tais como adsorção e chillers de absorção, têm facilitado o uso da combinação de refrigeração e aquecimento (MacPhee et. al, 2012).

O termo “demanda” foi criado no início de 1980 pela “Electric Power Research Institute” e foi definido como planejamento, execução e acompanhamento das atividades de consumo de energia elétrica, concebido para influenciar o cliente de uma maneira a produzir alterações no consumo de carga da concessionária, ou seja, mudanças no padrão e magnitude da carga de consumo. (Arteconi et. al, 2012).

A produção de termoacumulação é realizada em horários pré definidos, horário fora de ponta e baixa carga térmica para refrigeração ou acumulando energia para aquecimento (energia solar), ficando disponível para ser utilizada no horário de ponta e períodos onde a demanda é maior que a capacidade da geração do sistema.

O entendimento dos processos de solidificação e fusão dentro do sistema de termoacumulação é importante para o projeto de estocagem térmica utilizando tais cápsulas. Há muitas maneiras de estocagem em MMF, utilizando cápsulas

cilíndricas, placas ou esféricas. As cápsulas esféricas são preferencialmente utilizadas, pois pode estocar uma maior quantidade de energia devida uma maior taxa de volume por superfície área de troca de calor e a facilidade de armazenagem dentro de tanque de estocagem (Chan e Tan, 2006).

O presente estudo aborda uma das formas de estocagem de energia térmica, utilizando um material de mudança de fase (MMF) no interior de cápsulas nos quais armazena calor latente.

1.2. Conceito de termoacumulação

A termoacumulação é um processo de armazenamento de energia na qual pode ser utilizada em momentos na qual não se tenha capacidade instalada necessária para carga pontual e utilmente aplicada em uma dada operação. Tem o potencial de aumentar a utilização efetiva de um equipamento de energia e é normalmente aplicada para equilibrar um possível desencontro entre a oferta e a demanda de energia. Um processo de armazenamento de energia é baseado em três passos fundamentais: o carregamento (carga), armazenamento e a descarga. (Fernandes et al. , 2012).

Os sistemas de termoacumulação são usados principalmente em edifícios e processos industriais. Nestas instalações, aproximadamente metade da energia consumida é sob a forma de energia térmica, para os quais a procura pode variar durante o dia e de um dia para outro. Portanto, os sistemas termoacumulação podem ajudar no equilíbrio e oferta em uma base diária, semanal e até sazonal da demanda de energia. Também podem reduzir a demanda de pico, o consumo de energia, emissões de CO₂ e de custos, enquanto aumenta a eficácia global dos sistemas de energia (International Renewable Energy Agency, 2013).

Embora o problema da armazenagem de energia térmica dentro de cápsulas seja extensivamente estudado, pouca informação sobre o seu desempenho está disponível. Os sistemas de armazenamento de energia térmica na forma de calor latente em leito fixo têm sido utilizados para aplicações tais como, armazenamento de energia solar térmica, sistemas de baixa temperatura de armazenamento de ar condicionado central, edifícios energeticamente eficientes e sistemas de recuperação de calor residual (Regin et al. , 2006).

O presente trabalho aborda a termoacumulação utilizada nos sistemas de condicionamento de ar (refrigeração). Desta forma o armazenamento de energia térmica do nosso estudo é realizado transferindo a energia interna de um material em forma de calor sensível e calor latente.

No armazenamento de calor sensível, a energia térmica armazenada é obtida aumentando-se ou diminuindo-se a temperatura de um sólido ou líquido. A quantidade de calor armazenada depende do calor específico, da alteração da temperatura e da quantidade de material de armazenamento do meio (Sharma et al., 2009).

O armazenamento de calor latente ocorre na absorção ou liberação de calor, quando um material de armazenamento sofre uma mudança de fase (Sharma et al., 2009).

Especificamente, abordar-se-á o armazenamento de energia em um material encapsulado na forma esférica com MMF, que tem a capacidade de acumular calor sensível (resfriamento) e calor latente (mudança de fase).

Nos subitens a seguir serão detalhados os principais processos e técnicas para obtenção da termoacumulação para refrigeração ou aquecimento.

1.2.1 Termoacumulação de Refrigeração

Os três tipos principais de sistema de termoacumulação de refrigeração considerados hoje são: água gelada, gelo e sal eutético. Destes, os dois primeiros são os mais promissores para uso geral. Todos os sistemas possuem três componentes básicos: um resfriador, um tanque de armazenamento e um meio para fornecer água fria ou ar fresco para o espaço ocupado (Hasnain, 1998).

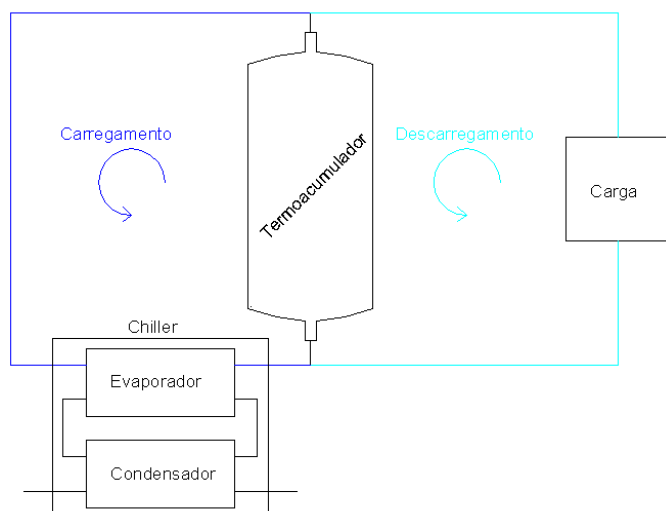


Figura 1 - Fluxograma básico de termoacumulação de refrigeração.

1.2.1.1.

Armazenamento de água gelada (Calor Sensível)

O armazenamento de água gelada é baseado em manter o estado de separação térmica entre água fria e água de retorno quente. Os principais sistemas de armazenamento que realizam esta separação são os seguintes (ASHRAE, 1993).

1.2.1.1.1.

Tanque de Estratificação

A termoacumulação por estratificação é realizada por meio de estratificação gravitacional. O desempenho de um dispositivo de armazenamento estratificado depende da capacidade de armazenar água quente e gelada com pouca incursão de temperaturas durante o seu armazenamento. A zona de interface entre a água “quente” e a água gelada no tanque de armazenamento, onde existe um grande gradiente de temperatura, é chamado de “termocline”. A sua espessura deve ser tão pequena quanto possível. O aumento da espessura do “termocline” é uma medida da deterioração da estratificação e conduz à perda da capacidade de refrigeração. A estratificação em um tanque de armazenamento depende principalmente do volume e altura do tanque, da localização e concepção das entradas e saídas de água, e das taxas de fluxo de entrada e saída da água (Nelson et. al, 1999).

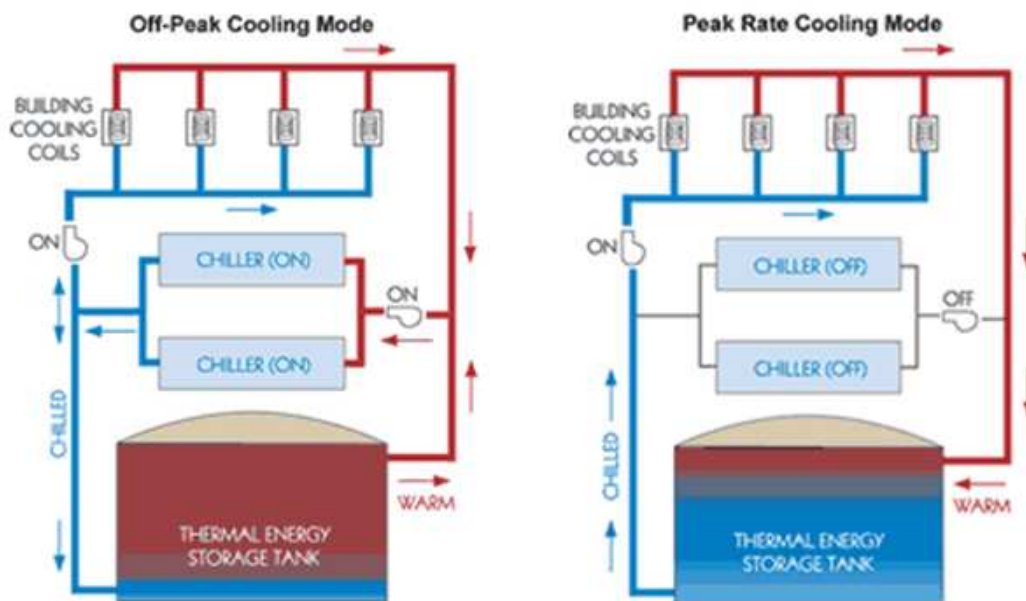


Figura 2 - Representação de tanque de estratificação A) Carregamento B) Utilização (Nelson et. al, 1999).

1.2.1.1.2. Tanque Labirinto

Os tanques labirintos foram desenvolvidos originalmente no Japão, onde o tipo de rede de alicerces era utilizado para apoiar as estruturas a serem construídas.

A construção consiste em uma rede de vigas em diferentes níveis formando uma série de cubículos vazios, criando um labirinto. O espaço vazio é aproveitado para o uso de armazenamento de água gelada (Mackie e Reeves, 1988).

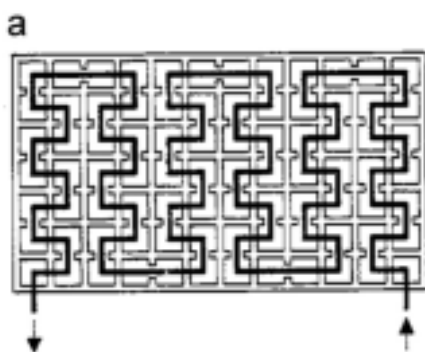


Figura 3 - Tanque de labirinto (Mackie e Reeves, 1988).

1.2.1.1.3. Sistemas de Defletoras

Desenvolvidos com o mesmo princípio dos tanques labirinto o sistema consiste em um único tanque dividido em vários compartimentos por uma série de chicanas verticais, o fluxo varia de cima para baixo como um labirinto. A diferença em relação ao sistema de labirinto é que se pode ter uma maior estratificação de água. (Mackie e Reeves, 1988).

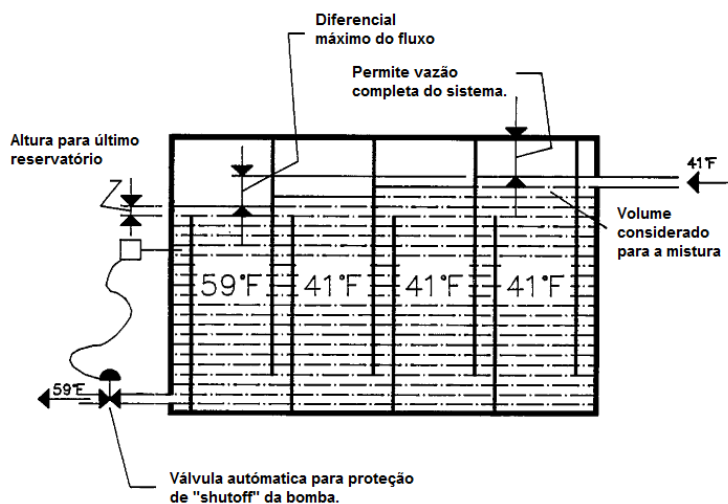


Figura 4 - Sistema de defletoras (Mackie e Reeves, 1988).

1.2.1.1.4. Múltiplos Tanques

Neste caso a termoacumulação é realizada em vários tanques onde há uma separação entre a água resfriada pelo chiller e a água aquecida de retorno do sistema.

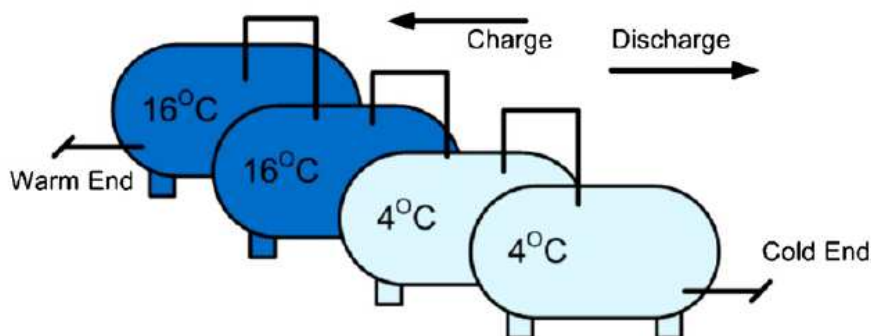


Figura 5 - Esquema de múltiplos tanques (Yau, Rismanchi, 2012).

1.2.1.1.5.

Tanque com Diafragma ou Membrana

Este processo de termoacumulação é semelhante ao da termoacumulação de estratificação. Porém, neste caso, há uma membrana separando fisicamente a água resfriada e água de retorno (ASHRAE, 1993).

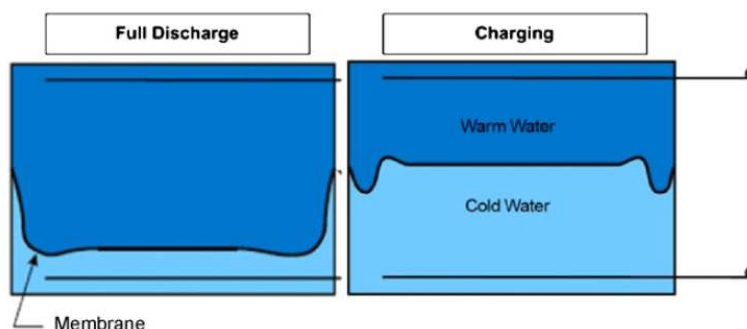


Figura 6 -Tanque com membrana (Yau, Rismanchi, 2012).

1.2.1.2.

Armazenamento de Gelo (Calor Latente)

O armazenamento de gelo pode ser classificado em cinco técnicas, nomeadamente: “external melt ice on coil”, “internal melt ice on coil”, “ice harvesting”, gelo encapsulado, e “ice slurry” (pasta de gelo) (Chaichana, 2001).

Os sistemas de estocagem de calor latente são classificados em sistemas estáticos e sistemas dinâmicos. O “external ice-on-coil”, “internal ice-on-coil” e gelo encapsulado são sistemas estáticos. O “ice-harvest”, “ice slurry”, são sistemas dinâmicos (Cho e Choi, 2000).

1.2.1.2.1.

Placas de Gelo ou “Ice Harvesting”

O “ice harvesting” consiste na estocagem de raspas de gelo, formado pela passagem de água gelada próximo do ponto de congelamento. Evaporadores formam a camada de gelo, que é raspada frequentemente e depositada pela força da gravidade em tanques.

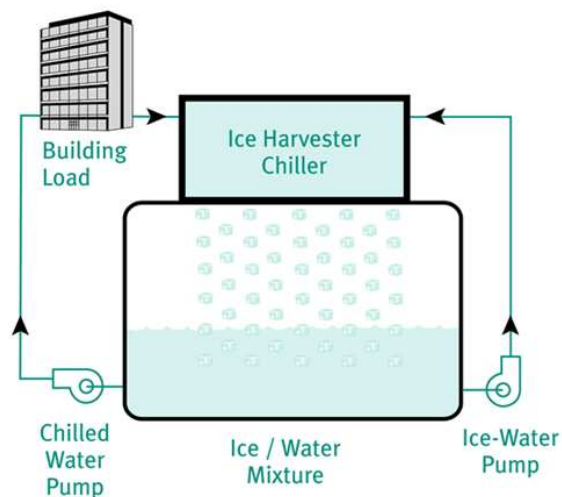


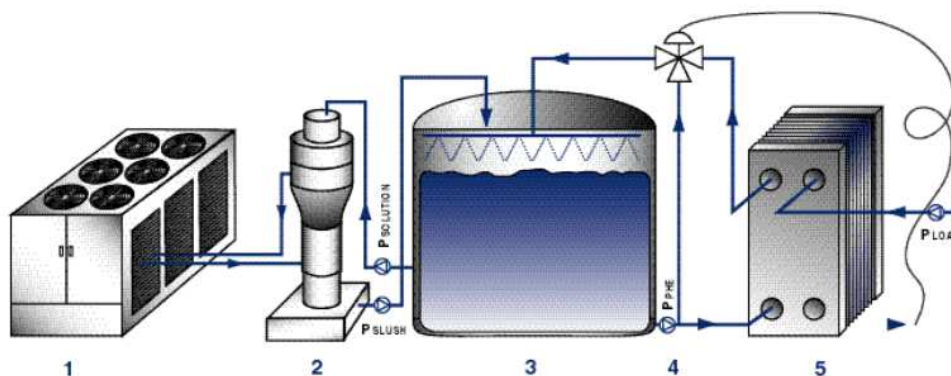
Figura 7 - "Ice Harvester" (Energy Design Resources,2009).

1.2.1.2.2.

Pasta de Gelo ou "Ice Slurry"

Um fluido funcional composto de uma mistura de óleo e água com um aditivo é transformado numa pasta de gelo por refrigeração (Matsumoto et al., 2004).

Este sistema pode utilizar a pasta de gelo circulando nos trocadores de calor.



- (1) Chiller (Resfriador).
- (2) Gerador de pasta de gelo.
- (3) Tanque de estocagem da pasta de gelo.
- (4) Bomba e Válvula de Controle.
- (5) Trocador de Calor.

Figura 8 - Esquema de geração de pasta de gelo (Nelson,1998) .

1.2.1.2.3. “External Melt Ice-on-Coil”

O carregamento ocorre quando um fluxo de água circula do lado externo de um conjunto de tubos e troca calor uma solução aquosa com temperatura abaixo da temperatura de congelamento da água, que circula no interior dos tubos, iniciando um processo de solidificação na parede externa dos tubos. O processo de descarregamento ocorre quando a água é utilizada no processo e não há troca de calor com a solução aquosa.

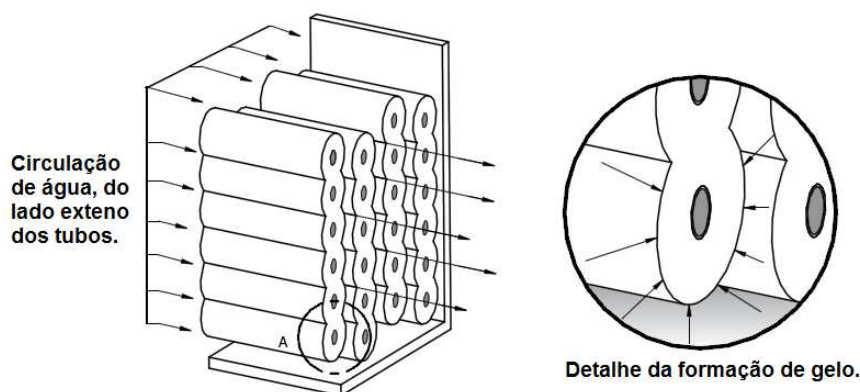


Figura 9 - External Melt Ice-on-Coil, (EVAPCO, INC., 2007).

1.2.1.2.4. “Internal Melt Ice-on-Coil”

Neste modelo semelhante ao “external melt ice-on-coil” porém neste caso a água fica estocada em um reservatório e muda de fase em função da circulação da solução nos tubos que tem a função de fluido de carregamento e descarregamento.

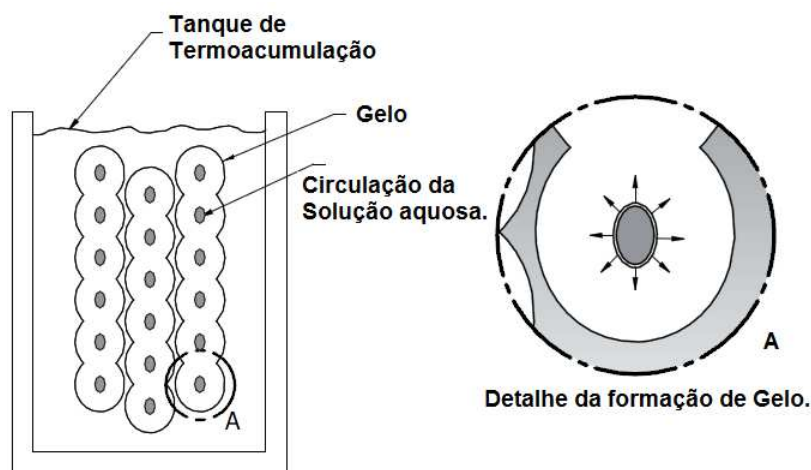


Figura 10 - Internal Melt Ice-on-Coil (EVAPCO, INC., 2007).

1.2.1.2.5. Encapsulado

O processo de termoacumulação que utiliza encapsulado consiste em acumular energia em tanques contendo cápsulas que em seu interior contêm material suscetível a mudança de fase. O fluido de trabalho, uma solução aquosa de etileno glicol, circula através dos encapsulados com uma temperatura inferior à temperatura de fusão do material encapsulado (no ciclo de carregamento). Este processo faz com que haja uma troca de calor entre o fluido de trabalho e o material de mudança de fase (MMF), formando um banco de gelo. A utilização do banco de gelo é obtida circulando, através destas cápsulas, o fluido de trabalho, agora com temperatura inferior a de fusão do MMF (ciclo de descarregamento). A troca de calor se dá em uma forma inversa.

Este processo tem grande vantagem em relação a outros processos que utilizam estocagem de calor latente, pois a troca de calor se torna mais eficiente, devido à grande área de troca entre o fluido de trabalho e as cápsulas.

1.2.2 Termoacumulação de Aquecimento

A energia solar térmica é a mais abundante e está disponível tanto diretamente, bem como de formas indiretas. O Sol emite energia a uma taxa de $3,8 \times 10^{23}$ kW, dos quais, cerca de $1,8 \times 10^{14}$ kW é interceptada pela Terra. (Tyagi et al, 2012). A literatura mostra que os estudos de termoacumulação de aquecimento têm sido amplamente utilizados para sistemas de energia solar.

1.3. Descrição do Problema

Comparando processos de termoacumulação que utilizam o calor latente, o encapsulado é o processo de maior eficiência. A grande eficiência é resultado da maior área de troca de calor entre o fluido de trabalho e o volume a ser acumulado. Estudos indicam que quanto menor for o tamanho das cápsulas melhor será sua eficiência (Nóbrega e Braga, 2007). Porém, ao reduzir a dimensão

das cápsulas, a taxa de material do encapsulamento será maior, ou seja, menor será o acúmulo de energia.

O presente trabalho irá estudar numericamente o uso da termoacumulação utilizando cápsulas esféricas, analisando a troca de calor do fluido de trabalho e o material de mudança de fase (MMF) contida nos encapsulados esféricos.

A inovação deste estudo reside no fato de que o fluido de trabalho, ao invés de percorrer todo o volume de controle (tanque) com esferas de um único diâmetro, flui por um leito com esferas de diferentes diâmetros, as quais estão agrupadas em conjuntos de mesmo diâmetro (figura 11).

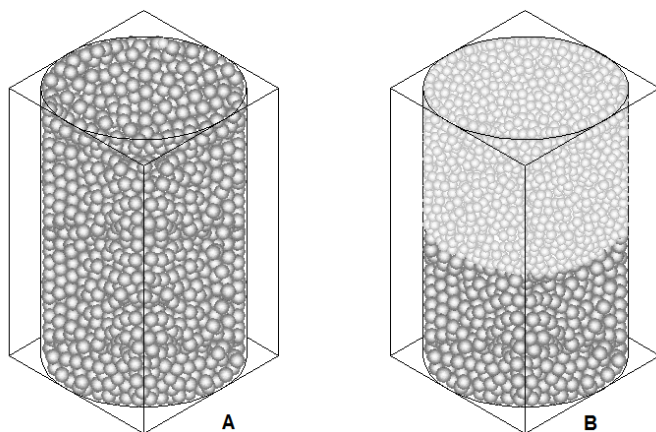


Figura 11 - A) tanque com esferas de diâmetro único, B) exemplo de configuração a ser estudado.

1.4. Organização do trabalho.

O capítulo 2 faz um resumo da revisão bibliográfica dos casos de termoacumulação de refrigeração e aquecimento. Esta revisão foi organizada em função das geometrias estudadas: placas paralelas, cilíndricas e esféricas. Para cada geometria são mostrados estudos experimentais e numéricos. Foi apresentado um número maior de trabalhos para estudos sobre termoacumulação de refrigeração utilizando cápsulas esféricas em função de ser o tema principal do presente trabalho. No capítulo 3, apresenta-se a modelagem matemática a qual resolve alguns parâmetros relevantes como: tempo de carregamento, variações de temperaturas entre as camadas que formam o leito de esferas. Este capítulo também aborda o estudo da distribuição de esferas em função da altura e diâmetro interno do tanque. Apresentando dois balanços de energia do fluido de trabalho: na entrada e na saída de cada camada do leito e um balanço de energia entre o

fluido de trabalho e o material de mudança de fase contido na cápsula. No primeiro balanço as esferas liberam ou armazenam energia do fluido de trabalho. No segundo balanço é analisada a troca de calor entre uma esfera e a porção de fluido de trabalho que a circunda. O capítulo 4 descreve resultados computacionais, desenvolvidos na plataforma do Matlab. O capítulo 5 apresenta a solução numérica e o programa gerados no Matlab comparando valores experimentais com dados de literatura, para validar o modelo. O capítulo 6 compara os resultados supondo esferas de mesmo diâmetro e de diâmetro diferentes verificando o tempo de carregamento de cada um dos casos. O capítulo 7 analisa e discute os resultados de cada caso estudado, comparando com a termoacumulação tradicional de uma única dimensão de esfera e também é analisado entre a variação de agrupamentos de esferas. O capítulo 8 descreve as conclusões do estudo e no capítulo 9 são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Recentemente, sistemas de armazenamento de energia térmica na forma de calor latente têm sido amplamente utilizados em áreas de refrigeração e aquecimento. Estes sistemas permitem o uso racional dos recursos disponíveis e aperfeiçoam a utilização das energias renováveis. Os principais materiais de mudança de fase, largamente empregados para armazenamento de calor latente são: água para resfriamento e parafina para aquecimento.

Vários trabalhos podem ser encontrados na literatura atual abordando estudos de termoacumulação de aquecimento e resfriamento. O presente trabalho terá como tema central a termoacumulação de refrigeração utilizando encapsulados esféricos. Para estudar o assunto foram consultadas várias referências bibliográficas as quais foram organizadas em grupos de acordo com a geometria das cápsulas:

- Placas planas paralelas
- Cilíndricas.
- Esféricas

Cada grupo geométrico apresenta artigos com estudos experimentais e numéricos dentro das áreas de aquecimento e refrigeração.

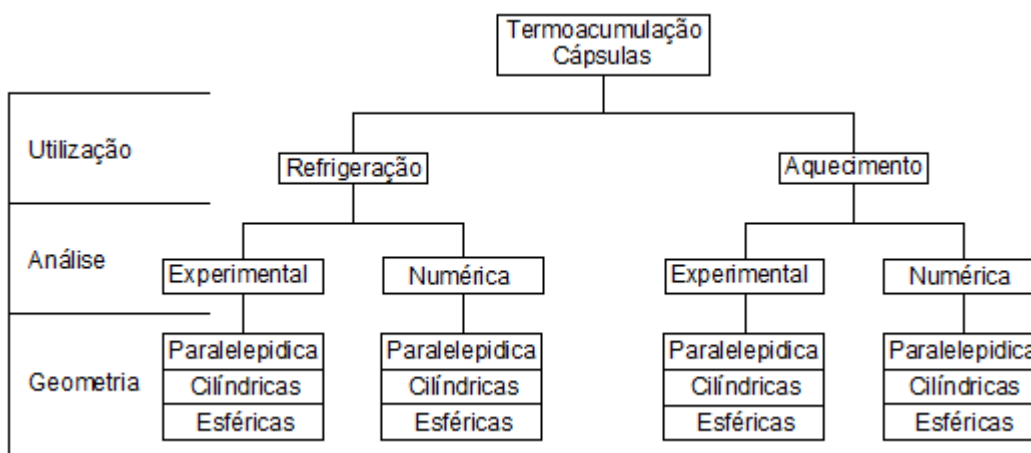


Figura 12 - Divisão de levantamentos bibliográficos.

2.1. Encapsulados de Geometrias Diversas

Oka & Carey (1996) apresentaram um estudo teórico do processo de fusão da água em cápsulas para três geometrias: placa plana, cilíndrica e esférica. Seus resultados mostraram que o transporte de energia para as três geometrias é essencialmente governado por um sistema de equação, e os resultados para todos os três casos podem ser expressos como uma solução básica para fluidos de baixa inércia.

Usando a transformação de similaridade as equações de baixa inércia do escoamento são reduzidas para um sistema de equação diferencial ordinária de uma variável independente. Eles mostraram que existem soluções exatas para este sistema e podem ser obtidas usando qualquer método de aproximação ou técnica numérica.

2.2. Encapsulados Placas Planas Paralelas

Neste item serão apresentados alguns trabalhos utilizando encapsulados de placas planas.

Ismail et al. (1999) apresentaram os resultados de experimentos e estudos numéricos de um banco de gelo de placas paralelas, com o objetivo de identificar a importância relativa da geometria, os parâmetros de operação e sua influência na performance de termoacumulação.

O modelo foi baseado em formulações unidirecionais de problemas de mudança de fase, as soluções numéricas foram realizadas usando método de diferença finita e os modelos foram comparados com experimentos.

A energia armazenada, a posição de interface sólido/líquido e o tempo de completa solidificação foram apresentados e discutidos em função da temperatura inicial do material de mudança de fase, da temperatura da parede do plano congelado e do espaço entre cápsulas.

Lacroix (2001) apresentou um modelo matemático para a fusão de um material de mudança de fase (MMF) no interior de uma cápsula de forma paralelepíptica. Os resultados indicaram que o processo de fusão do MMF é governado pela

magnitude do número de Stefan e também é influenciado pela dimensão da cápsula.

2.3.

Encapsulados Cilíndricos

Bansal & Buddhi (1992) estudaram o armazenamento de calor latente em cápsulas cilíndricas para armazenar o calor originado pelo aquecimento solar e utilizado para aquecimento de água em sanitários. Um modelo teórico foi desenvolvido para o sistema.

Chen et al. (2000) realizaram experimentos e investigaram o desempenho térmico e o diferencial de pressão de um tanque de termoacumulação com encapsulados cilíndricos durante o processo de carregamento. O MMF utilizado foi água com agente de nucleação e o fluido de trabalho, uma solução aquosa de etileno glicol. Os experimentos foram realizados para investigar o efeito da temperatura do fluido, a taxa de nucleação das cápsulas, a transferência de calor e a pressão diferencial do tanque.

Wang et al. (2001) estudaram um experimento com processo de carregamento de termoacumulação de aquecimento utilizando cilindros como geometria das cápsulas. Utilizaram nos encapsulados, uma mistura de parafina, ácido láurico e ácido esteárico.

Regin et al. (2006) estudaram o processo de fusão de parafina como material do encapsulado e geometria cilíndrica, utilizando como aquecimento a energia fornecida pelo coletor solar (aquecimento de água). Foi realizada uma análise numérica comparando com dados experimentais. Identificaram que o processo de fusão é regulado principalmente pelo número de Stefan, pela faixa de temperatura do fluido de trabalho e pelo raio da cápsula e a análise mostra que se deve considerar a convecção natural na fase líquida do MMF e não apenas o processo de condução.

2.4.

Encapsulados Esféricos

Ismail & Henriquez (2000) estudaram numericamente a solidificação de um MMF de uma cápsula esférica. O modelo matemático foi baseado em uma

condução pura em um MMF sujeito a condições de contorno de temperatura constante e transferência de calor por convecção na superfície externa da cápsula esférica. O modelo foi validado por comparação com a avaliação de modelos similares. O modelo foi utilizado para prever o efeito de tamanho de esfera, espessura e material da cápsula, temperatura inicial do MMF e temperatura externa da fração de massa solidificada e o tempo de completa solidificação.

Eames & Adref (2002) descreveram e avaliaram os resultados de um estudo experimental visando a caracterização do processo de solidificação e fusão da água contida em uma cápsula esférica. Os resultados incluem equações semi-empíricas que prevê a massa de gelo dentro da esfera a qualquer momento da solidificação ou fusão. As equações podem ser utilizadas para modelar a dinâmica do sistema de termoacumulação.

Ismail et al (2003) estudaram numericamente a transferência de calor durante o processo de solidificação de água dentro de uma cápsula esférica. A equação que governa o problema estava associado a condição de contorno. Foram formuladas e resolvidas utilizando uma aproximação de diferença finita do esquema de movimento. O modelo foi validado por comparação com resultados experimentais realizados pelos autores. O modelo também foi utilizado para investigar o efeito do tamanho e material da cápsula.

Kousksou et al. (2005) estudaram um processo industrial de estocagem de energia em um tanque cilíndrico, preenchido de cápsulas esféricas contendo material de mudança de fase (MMF). Desenvolveu um modelo bidimensional para o armazenamento do frio. O modelo foi comparado com os resultados de um experimento de tanque vertical e em seguida o modelo foi utilizado para estudar tanques na posição horizontal. Após os experimentos estudaram um modelo numérico para um processo industrial.

Ettouney et al. (2006) estudaram a melhoria da transferência de calor entre cápsulas esféricas devido à adição de fragmentos de metais, sendo a parafina o material de mudança de fase e ar como fluido de trabalho. Os estudos mostraram uma diminuição no tempo de fusão conforme o aumento e o número de grão de metais no interior das cápsulas.

Kousksou et al. (2007) desenvolveram um modelo teórico para análise e otimização do sistema de aquecimento solar utilizando material de mudança de fase (MMF). Análises de energia e exergia foram realizadas para compreender o

comportamento do sistema usando o MMF único ou múltiplos MMFs. Os resultados numéricos mostraram que o desempenho do sistema de armazenamento de calor latente pode ser melhorado pela escolha ótima da temperatura de fusão do MMF.

Cheralathan et al. (2007) compararam os resultados de um estudo numérico e experimental de um sistema de termoacumulação de cápsula esféricas. Um programa foi desenvolvido para avaliar a transferência de calor do fluido de trabalho e o material de mudança de fase em qualquer localização axial durante o período de carregamento. O estudo avaliou a influência da temperatura de entrada do fluido de trabalho, a porosidade e desempenho do sistema. Foi projetado e construído um experimento para validar o programa e os resultados comparativos foram aceitáveis.

Nóbrega & Braga (2007) apresentaram o desenvolvimento e a solução de um modelo matemático, do fenômeno de transferência de calor em um sistema de estocagem de calor latente, que consistia de um tanque contendo encapsulados esféricos com MMF. Muitas hipóteses foram adotadas para tornar o modelo o mais simples possível com o cuidado da precisão e impacto na confiança da simulação. O modelo resultou em sistema de equação parcial parabólico, com descrição do campo de temperatura ao longo do canal e uma equação integral que representa a evolução da mudança de fase dentro da cápsula esférica. O modelo foi resolvido usando o método dos volumes finitos.

Bédécarrats et al. (2009) realizaram experimentos em um sistema de termoacumulação de cápsulas esféricas durante o processo de carregamento e descarregamento, os principais resultados foram: influencia significativa do fenômeno superresfriamento durante o processo de carregamento. Concluíram que quanto menor a temperatura e maior a vazão do fluido de trabalho mais rápido será processo total de carregamento.

Wu et al. (2015) estudaram a performance térmica do calor latente acumulado em um sistema de termoacumulação usando cápsulas esféricas durante o carregamento e descarregamento. Os efeitos de temperatura de entrada do fluido de trabalho e sua vazão, a porosidade e o diâmetro das cápsulas, o tempo de fusão e solidificação foram discutidos. Uma das conclusões foi que quanto menor a porosidade mais rápida será o carregamento para uma mesma temperatura e vazão de fluido de trabalho.

Wu et al. (2011) estudaram mediante a simulação do comportamento térmico de um leito de cápsulas esféricas com parafina como material de mudança de fase (MMF) e a água como fluido de trabalho, os dados de entrada da simulação foram temperatura e vazão de entrada do fluido de trabalho, temperatura inicial do MMF e porosidade. Verificou-se que o tempo de solidificação diminui conforme aumenta a vazão de fluido de trabalho até um valor limite.

Eighnam et al. (2012) estudaram o resultado de um experimento de transferência de calor durante o carregamento e descarregamento da água no interior de uma cápsula esférica circulada por uma solução aquosa de etileno glicol. Os estudos se concentraram no material da cápsula esférica, vazão do fluido de trabalho e sua temperatura nos efeitos destes parâmetros no tempo de carregamento e descarregamento. Os resultados mostraram melhor quando utilizado cápsulas metálicas, incluindo cápsulas de menores tamanhos.

MacPhee et al. (2012) estudaram o processo de solidificação no armazenamento de energia térmica sistema de termoacumulação de gelo em encapsulado esféricos. Os efeitos de parede do tanque de armazenamento e penetração de calor foram desprezados. A eficiência de energia e exergia foram calculadas, no estudo foi variada a dimensão de cápsula, temperatura de entrada de fluido e vazão mássica do fluido de trabalho.

Moraes (2012) investigou numérica e experimentalmente o carregamento de um leito fixo com material de mudança de fase no interior de cápsulas esféricas. O modelo matemático utilizado foi baseado na equação da energia e a uma solução foi obtida com a técnica numérica em diferenças finitas com o esquema da malha móvel. Para o acoplamento do fluido de trabalho com as cápsulas foi utilizado o balanço de energia com o material de mudança de fase, obtendo-se a temperatura em função do tempo e da posição no leito. O modelo desenvolvido mostra os efeitos da temperatura de entrada, vazão mássica, diâmetro da cápsula esférica, material das cápsulas e tempo de carregamento.

Amin et al. (2014) realizaram um estudo experimental sobre a transferência de calor através de uma única esfera variando-se a temperatura do fluido de trabalho. Um modelo de dinâmica de fluidos computacional, que despreza a flutuabilidade do MMF em uma esfera foi desenvolvido. Usando este modelo a condutividade térmica eficaz da porção líquida do MMF. Uma relação para a condutividade

térmica foi desenvolvido em função do número de Rayleigh. O estudo demonstra a aplicabilidade da determinação condutividade térmica efetiva para representar convecção natural em sistemas de armazenamento térmico de MMF.

Narasimhan et al. (2014) investigaram numericamente o desempenho de um armazenamento térmico de calor latente com encapsulado, contendo um material de mudança de fase (MMF) disperso com partículas de alta condutividade. Um modelo numérico que incorpora o efeito das partículas através de um modelo de condutividade térmica efetiva foi desenvolvido considerando o processo de carga de energia (solidificação). O sistema de equações foi resolvido usando esquema de diferenças finitas empregando técnica iteração de Gauss-Seidel. Os resultados demonstraram uma redução significativa no tempo necessário para a solidificação completa do MMF, devido à adição de partículas de alta condutividade.

Wu J. et al. (2015) propuseram um modelo dinâmico para o processo de carregamento de um armazenamento de energia frio feito de um leito fixo de cápsulas esféricas contendo um material de mudança de fase (MMF). Durante o processo de carga, mesmo que a temperatura do líquido de refrigeração fluindo através do armazenamento uniforme, a solidificação processo não se inicia à mesma temperatura entre os nódulos devido ao super-refriamento. O modelo é aplicado para simular o ciclo de carga de um sistema de armazenamento de gelo. Os resultados da simulação e os dados experimentais alcançados foram aceitáveis.

A partir dos estudos pode-se verificar que a influência da vazão e temperatura do fluido de trabalho, porosidade, dimensão das cápsulas e utilização (refrigeração ou aquecimento) apresentam resultados semelhantes.

Não foi encontrado, na literatura consultada, trabalho apresentando o estudo de termoacumulação de diferentes grupos de esferas de diferentes diâmetros em um mesmo tanque de armazenamento. A presente dissertação busca preencher esta lacuna.

3. Modelagem Matemática

A modelagem matemática foi desenvolvida para o seguinte problema: um tanque cilíndrico adiabático é preenchido por grupos de cápsulas esféricas que diferem apenas no seu diâmetro, formando um leito poroso. As cápsulas são preenchidas com um material de mudança de fase (MMF). No presente estudo o MMF é a água pura. Um fluido de trabalho entra pela parte inferior do tanque com velocidade uniforme, com uma vazão e temperatura constante menor que a temperatura de mudança de fase do MMF. Circula no interior do leito trocando calor com as cápsulas e sai pela parte superior do tanque. No início do processo o fluido de trabalho, que preenche todo o espaço vazio do leito, está parado e em equilíbrio térmico com as cápsulas que estão a uma temperatura acima da temperatura de mudança de fase. O problema é resolvido por camadas do leito e cada camada será considerada de espessura igual ao diâmetro da cápsula conforme o grupo no qual o fluido percorre.

Em consequência da troca de calor com o fluido de trabalho, o MMF passa por três etapas distintas: resfriamento líquido, mudança de fase (líquido/sólido) e resfriamento sólido.

Os processos de resfriamentos e mudança de fase ocorrem de maneiras distintas em cada camada do leito, sendo que as camadas inferiores tem um carregamento mais rápido que as camadas superiores, pois, ao percorrer o leito o fluido de trabalho, tem um ganho na temperatura, por consequência, uma redução no gradiente de temperatura entre o fluido e a cápsula, diminuindo a capacidade de troca de calor.

O final do processo ocorre quando a temperatura do fluido de trabalho tende para a temperatura de entrada do tanque. Neste momento as cápsulas estão em equilíbrio térmico com o fluido de trabalho.

O modelo matemático foi desenvolvido para prever:

- A variação de temperatura entre as camadas de cápsulas esféricas.
- Os tempos de resfriamentos e mudança de fase do MMF.
- A análise comparativa do uso de termoacumulação de cápsulas esféricas para um, dois e três grupos de leitos de cápsulas esféricas preenchidas em tanques com a mesma altura e diâmetro.

O modelo matemático foi desenvolvido a partir das seguintes hipóteses:

- As cápsulas e o fluido e trabalho não trocam calor com o meio externo (tanque adiabático).
- As paredes verticais são impermeáveis.
- As cápsulas estão distribuídas de forma randômica.
- O calor sensível durante a mudança de fase estocado no interior das cápsulas será desprezível comparado com o calor latente.
- O leito formado pelas cápsulas esféricas no interior de todo o tanque será considerado como um meio poroso.
- A variação de temperatura do fluido de trabalho será apenas na direção axial.
- Vazão em massa do fluido de trabalho será unidirecional.
- As Propriedades termofísicas do fluido de trabalho serão consideradas constantes em todo o processo de carregamento.
- Não será considerado o efeito de sub-resfriamento, ou seja, a mudança de fase do MMF de todas as cápsulas terá início assim que o material de mudança de fase atingir a temperatura de mudança de fase.
- O material de mudança de fase (MMF) será considerado como água pura.

Condições iniciais e de contorno:

- No início do processo o MMF contido nas cápsulas estará em equilíbrio térmico com o fluido de trabalho e estarão inicialmente à temperatura ambiente.
- A temperatura de entrada e a vazão mássica do fluido de trabalho terão valores constantes do início ao fim do processo.

A seguir serão apresenta a lista de modelos matemáticos escolhidos:

3.1.

Porosidade (ε).

Um meio poroso pode ser definido como um meio sólido ou uma matriz sólida que contenha espaços vazios, denominados de poros. A porosidade (ε) é a fração do volume total de uma amostra porosa que é ocupada por poros ou espaços vazios (Dullien, 1979).

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} \quad (3.1)$$

Baseado na definição acima, um tanque com esferas pode ser considerado como meio poroso. A matriz sólida são as cápsulas e espaços “vazios” o local onde o fluido de trabalho circula. Adequando a equação tem-se:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{V_{esf}}{V_{tan}} \right) \quad (3.2)$$

Sendo que:

$$V_{tan} = L_{tan} \pi R_{tan}^2 \quad (3.3)$$

$$V_{esf} = N_{esf} * \left(\frac{4}{3} \pi R_{ext}^3 \right) \quad (3.4)$$

onde N_{esf} é a quantidade de esferas contidas no tanque.

Considerando a relação entre diâmetro da cápsula e diâmetro do tanque, podemos utilizar as seguintes equações de resultados empíricos para uma distribuição de esferas no tanque de forma randômica (Zou e Yu, 1995):

Para distribuição randômica espaça:

$$\varepsilon_p = 0,400 + 0,010(e^{10,686(d_{ext}/D_{tan})} - 1), \quad (d_{ext}/d_{tan}) \leq 0,256 \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_p = 0,846 - 1,8980(d_{esf}/d_{tan}) + 2,725(d_{esf}/d_{tan})^2, \quad 0,256 \leq (d_{esf}/d_{tan}) \leq 0,538 \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{2}{3} \frac{(d_{esf}/d_{tan})^3}{\sqrt{2(d_{esf}/d_{tan})} - 1}, \quad (d_{esf}/d_{tan}) > 0,538 \quad (3.7)$$

Para distribuição randômica densa.

$$\varepsilon_d = 0,372 + 0,002(e^{15,306(d_{esf}/d_{tan})} - 1), \quad (d_{esf}/d_{tan}) \leq 0,253 \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_d = 1 - \frac{2}{3} \frac{(d_{esf}/d_{tan})^3}{\sqrt{2(d_{esf}/d_{tan})} - 1}, \quad (d_{esf}/d_{tan}) > 0,530 \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_d = 0,681 - 1,363(d_{esf}/d_{tan}) + 2,241(d_{esf}/d_{tan})^2, \quad 0,253 \leq (d_{esf}/d_{tan}) \leq 0,530 \quad (3.10)$$

Para nosso estudo adotaremos a porosidade média entre as duas distribuições.

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_p + \varepsilon_d}{2} \quad (3.11)$$

3.2.

Número de esferas (N_{esf}).

O número de esferas pode ser determinado adequando as equações de 3.1 a 3.4:

$$N_{esf} = \frac{3}{4} \frac{V_{tan}}{\pi R_{ext}^2} (1 - \varepsilon_m) \quad (3.12)$$

3.3.

Velocidade Média do Fluido de Trabalho no Leito.

A velocidade média do fluido de trabalho no leito de esferas pode ser obtida utilizando a seguinte equação (Ismail e Henriquez, 2002):

$$\dot{m}_{ft} = v_m \varepsilon_m \rho_{ft} A_{tan} \quad (3.13)$$

3.4.

Modelo para Coeficiente de Convecção

O coeficiente de convecção é função das propriedades termofísicas do fluido de trabalho, taxa de ocupação do tanque, velocidade de entrada do fluido de trabalho no tanque e do diâmetro externo da cápsula.

O modelo de coeficiente de convecção utilizado é obtido através da determinação do número de Nusselt apresentado por (Beek, 1962) aplicado nos casos onde o fluido de trabalho escoar entre esferas arranjadas de forma randômica:

$$Nu = 3,22 Re^{\frac{1}{3}} Pr^{\frac{1}{3}} + 0,117 Re^{0,8} Pr^{0,8} \quad (3.14)$$

O número de Reynolds (Re) é obtido a partir da relação:

$$Re = \frac{\rho_{ft} v d_e}{\mu_{ft}} \quad (3.15)$$

O número de Prandtl (Pr) pode ser obtido pela seguinte relação:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_{p_{ft}} \mu_{ft}}{k_{ft}} \quad (3.16)$$

Finalmente, o coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser determinado através da equação:

$$h_c = \frac{k_f Nu}{d_e} \quad (3.17)$$

3.5. Troca de Calor Entre o Fluido de Trabalho e as Camadas do Leito.

O modelo de transferência de calor entre o fluido de trabalho (FT) e as camadas do leito, que é formado pelas cápsulas esféricas, será desenvolvido mediante o balanço de energia para uma camada do leito individualmente.

Para a equação do balanço de energia, considerando o fluido percorrendo o meio poroso formado pelas cápsulas esféricas e considerando o fluxo unidirecional, podemos utilizar a seguinte equação (Cheralathan et al., 2006):

$$Q_x + N_{esf} Q_e = Q_{x+dx} + \varepsilon_m \rho_{ft} c_{ft} A_l L_l \frac{\partial T_{ft}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} m_{ft} c_{ft} T_{ft} L_l \quad (3.18)$$

Na equação (3.18) o primeiro termo Q_x , à esquerda, representa a energia entrando no volume de controle, o segundo termo, $N_{esf} Q_e$, representa a energia transferida por convecção pelo fluido de trabalho e a cápsula. Os termos à direita representam a energia saindo do volume de controle Q_{x+dx} , a taxa de variação de energia interna do fluido de trabalho e a troca de energia durante o escoamento do fluido de trabalho no volume de controle, onde A_{ext} é a área da superfície molhada da cápsula, h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, k_{ft} é a condutividade térmica do fluido de trabalho, T_{ext} é a temperatura externa da cápsula, $T_{ft,x}$ é a temperatura média do fluido de trabalho, ε_m é a porosidade média do leito, ρ_{ft} é a massa específica do fluido de trabalho e u_{ft} é a velocidade na entrada do leito.

Após simplificação e rearranjo a seguinte equação pode ser obtida:

$$\varepsilon A_t L_l \rho_{ft} c_{ft} \left[\frac{\partial T_{ft}}{\partial t} + u_{ft} \frac{\partial T_{ft}}{\partial x} \right] = N_{ec} Q_e + k_{ft} A_t L_l \frac{\partial^2 T_{ft}}{\partial x^2} \quad (3.19)$$

A energia por convecção Q_e , é a parcela de energia acumulada por cápsula e N_{ec} o número de esferas na camada:

$$Q_e = h A_e (T_e - T_{ft,x}) \quad (3.20)$$

onde $T_{ft,x}$ é a temperatura média entre a entrada e saída do fluido de trabalho, em cada camada.

$$T_{ft,x}(t) = \frac{T_{ft,in}(t) + T_{ft,out}(t)}{2} \quad (3.21)$$

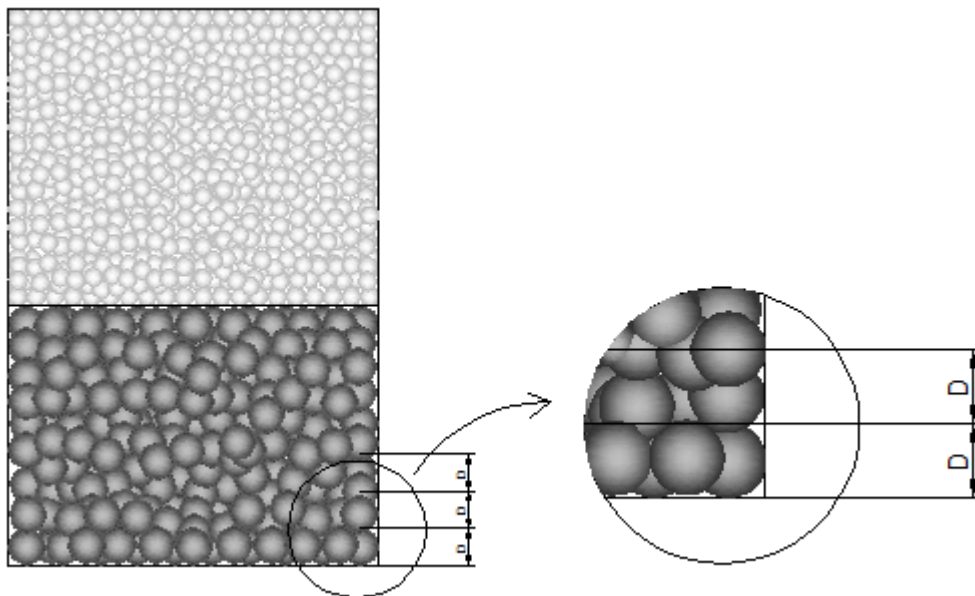


Figura 13 - Modelo simplificado do tanque

Assim, é possível calcular a temperatura de entrada e saída do fluido de trabalho nas “n” camadas que formam o leito de cápsulas esféricas. Desta forma teremos “n” equações diferenciais permitindo conhecer a evolução da temperatura na direção axial do leito.

3.6. Modelo de transferência de Calor do MMF nas Cápsulas Esféricas

Será apresentado o modelo matemático da transferência de calor do MMF contido no interior das cápsulas esféricas. Ao longo do processo de carregamento ocorrem, no MMF, três fenômenos: inicialmente, quando o fluido de trabalho começa a circular no tanque com a temperatura abaixo da temperatura de mudança de fase do MMF, tem o início a troca de calor entre o MMF e o fluido de trabalho. O primeiro fenômeno é o resfriamento do MMF até que seja atingida a temperatura de mudança de fase. A partir deste momento ocorre o segundo fenômeno que é o início da solidificação. Este processo é bem definido, onde temos no interior na cápsula duas fases líquida e sólida. A solidificação tem início na camada interna da cápsula e vai em direção ao centro, quando finaliza esta etapa. Quando todo MMF torna-se sólido a temperatura de mudança de fase e inicia-se o terceiro fenômeno que é o resfriamento do sólido até atingir a temperatura de equilíbrio térmico com o fluido de trabalho. No primeiro e terceiro fenômeno há uma troca de calor sensível e, no segundo fenômeno uma troca de calor latente. Será apresentado o modelo de transferência de calor nas cápsulas esféricas nestas duas formas, iniciando pela troca de calor sensível.

3.5.1 Modelo de Transferência de Calor Sensível

Durante os fenômenos inicial e final, isto é, quando temos o MMF totalmente líquido e totalmente sólido, respectivamente, o processo de transferência de calor é assumido como convecção e, a equação que governa este processo é a seguinte (Wu et al, 2010):

$$\rho_{mmf} c_{mmf} (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_{mmf}}{\partial t} = h A_e (T_e - T_{ft,x}) \quad (3.22)$$

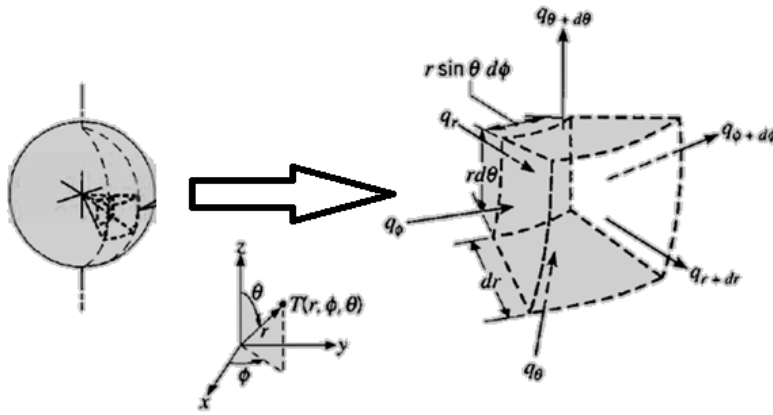


Figura 14 - Representação gráfica das coordenadas esféricas da condução de calor.

A equação de condução de calor em coordenadas esféricas, Figura 14, é a seguinte:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \dot{q} = \\ = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Da esquerda para direita, os três primeiros termos representam as taxas de energia líquida transferida por condução na direção de cada eixo por unidade de volume. O quarto termo representa a taxa volumétrica da geração de energia térmica. O termo à direita representa a taxa de variação da energia térmica (sensível) do MMF por unidade de volume.

Considerando condução de calor apenas na direção radial e sem geração de energia:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.24)$$

Condições de contorno:

$$\text{Em } r = r_i, \quad -kA \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r_i} = Q \quad (3.25)$$

onde Q é obtido pela equação:

$$Q = \frac{(T_i - T_{fx})}{R_{t,h} + R_{t,cap}} \quad (3.26)$$

Onde $R_{t,h}$ é a resistência térmica de convecção e $R_{t,cap}$ é a resistência térmica de condução da cápsula e são determinadas através das seguintes equações:

$$R_{t,h} = \frac{1}{4\pi h_c R_{ext}} \quad (3.27)$$

$$R_{t,cap} = \frac{1}{4\pi k_{cap}} \left[\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_e} \right] \quad (3.28)$$

3.7. Modelagem Transferência de Calor Latente

Nesta modelagem vai-se analisar os processos de solidificação do MMF. Nesta fase a energia é transferida na forma de calor latente, iniciando na primeira formação da primeira lâmina de gelo no interior da cápsula esférica, considerando que esta formação se inicia a partir do diâmetro interno da cápsula e cresce em direção radial ao centro da mesma, formando uma área de fronteira entre o sólido e líquido, chamada de interface sólido/líquido que se desloca continuamente.

A posição da fronteira de solidificação (interface sólido/líquido) será determinada utilizando um modelo quase estacionário na mudança de fase (Nóbrega e Braga, 2007):

$$\frac{K_{mmf}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_{mmf}}{\partial r} \right) = 0 \quad r_0 > r > r_s \quad t > 0 \quad (3.29)$$

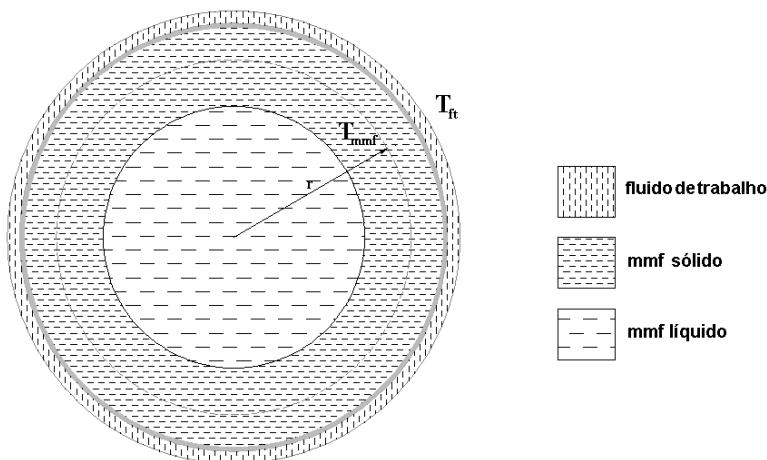


Figura 15 - Esfera em solidificação

Condições de contorno:

A temperatura do MMF na fronteira sólido/líquido é igual à temperatura de mudança de fase.

$$T_{mmf}(r_{fs}, t) = T_{mf} \quad (3.30)$$

O calor transferido por condução em uma parcela de MMF formado é igual ao calor transferido por convecção entre o fluido de trabalho e a área externa da cápsula.

$$K_{mmf} \frac{\partial T_{mmf}}{\partial r} \bigg|_{r_0} = h_c [T_{ft}(t) - T_{mmf}(r_0, t)] \quad t > 0 \quad (3.31)$$

Utilizando a equação 3.31 pode-se obter o perfil de distribuição de temperatura no sólido formado. Conhecendo o perfil de temperatura é possível aplicar um balanço na fronteira de solidificação:

$$Q_{mmf} = -\lambda_{mmf} \rho_{mmf} \frac{\partial \forall}{\partial t} = -k_{mmf} \frac{\partial T_{mmf}}{\partial r} \bigg|_{r_{mmf}} \quad (3.32)$$

O λ_{mmf} é o calor latente do MMF de solidificação, $\frac{\partial \forall}{\partial t}$ é a taxa de volume de sólido formado.

A equação (3.32) pode ser escrita como (Ismail e Moraes, 2009):

$$\lambda_{mmf} \rho_{mmf} \frac{\partial \forall}{\partial t} = -4\pi \lambda_{mmf} \rho_{mmf} R_{fs}^2 \frac{\partial R_{fs}}{\partial t} \quad (3.33)$$

4. Solução Numérica

Neste capítulo apresentaremos a solução numérica para a solução das equações do modelo matemático apresentado no capítulo 3, de tal maneira que seja possível utilizá-las na simulação computacional.

O modelo numérico computacional montado tem por finalidade obter a simulação de sistemas de termoacumulação, que utilizam cápsulas esféricas inseridas em um tanque cilíndrico, formando um leito poroso. Um conjunto de equações irá simular a troca de calor entre as cápsulas, que estão preenchidas com o MMF e o fluido de trabalho, que está circulando na face externa das cápsulas. Na simulação serão geradas soluções para uma camada do meio poroso, que convenientemente será de espessura do diâmetro da esfera, sendo que a temperatura de saída de cada camada será a temperatura de entrada da próxima camada. Desta forma pode-se prever a distribuição de temperatura entre as camadas da entrada do tanque até a sua saída. Além disso, determina-se o tempo de solidificação de cada camada.

A modelagem numérica serviu como base para a simulação computacional e as equações geradas em conjunto foram resolvidas na plataforma do **Matlab**.

O problema é resolvido por camadas do leito, a altura de cada camada será considerada como o diâmetro da esfera que forma o leito. O início do processo de carregamento da termoacumulação dar-se-á quando o fluido de trabalho, com a temperatura abaixo da temperatura de mudança de fase do MMF, tocar a base da primeira camada da base do leito. A temperatura na face superior da camada será considerada a mesma do sistema em repouso, ou seja, a temperatura ambiente. O primeiro cálculo realizado será a determinação do valor médio entre a temperatura de entrada do leito e a temperatura de repouso. A temperatura média obtida será a de referência externa para as cápsulas. Como a temperatura média será menor que a temperatura da cápsula e do MMF, terá início a troca de calor entre o fluido de trabalho e a camada formada pelas cápsulas, seguindo o procedimento de cálculos. Assim, será possível determinar a quantidade de calor retirado das cápsulas. Este valor será utilizado para determinar o conjunto de temperatura de saída da camada. O conjunto de temperatura de saída será considerado para os cálculos da

entrada da segunda até a última camada. Este procedimento é realizado em cada camada, até que a temperatura de saída da última camada seja a temperatura de entrada do leito. Neste momento todas as cápsulas e o MMF do leito estarão em equilíbrio térmico com o fluido de trabalho.

As equações de balanço de energia que compõem o modelo matemático do problema, apresentadas no capítulo 3, serão resolvidas numericamente por meio da técnica de diferenças finitas, com esquema explícito para as equações que representam a transferência de calor ao longo do leito e esquema totalmente implícito, para as equações que governam a transferência de calor dentro das cápsulas. A seguir serão apresentados os dados de entrada e as discretizações numéricas das equações governantes.

4.1. Dados de Entrada

Para utilizar os modelos matemáticos alguns dados de entradas são fundamentais para as simulações. As variáveis foram agrupadas em função de cada componente que forma o sistema de termoacumulação. São elas:

- Tanque de armazenamento;
- Cápsula esférica;
- Material de Mudança de Fase (MMF);
- Fluido de trabalho (FT);

4.1.1. Tanque de armazenamento.

O tanque de armazenamento é o reservatório onde ocorrerá todo o processo de troca de calor entre o MMF e o fluido de trabalho. Como mencionado nas hipóteses, o tanque será considerado como impermeável e não terá troca de calor para meio externo (adiabático). Os seguintes dados do tanque serão fundamentais para as simulações:

- **Altura do leito:** altura desde a base do leito de esferas até a superfície superior da última camada de esferas. Como em nosso trabalho vamos utilizar 2 ou 3 grupos de tamanhos de esferas, a altura do tanque será a soma de cada altura do grupo de esferas;

4.1.2. Cápsulas esféricas.

As cápsulas esféricas estão preenchidas de material de mudança de fase, serão necessários os seguintes dados de entrada em função das características dimensionais e termofísicas:

- Número de esferas, para cada grupo de esferas;
- Diâmetro externo, para cada grupo de esferas;
- Espessura na nossa simulação: será utilizada apenas uma espessura única;
- Condutividade Térmica, que será similar para todos os grupos de esferas;

4.1.3. Dados de entrada do material de mudança de fase.

O material de mudança de fase é o elemento que será responsável por “armazenar” a energia do sistema de termoacumulação. Os dados de entrada do serão de características termofísicas da água pura e serão:

- Condutividade térmica das fases sólida e líquida;
- Calor específico das fases líquida e líquida;
- Calor latente de solidificação;
- Massa específica fase sólida e líquida;
- Temperatura de mudança de fase (líquido/sólido);

4.1.4. Dados de entrada do fluido de trabalho.

O fluido de trabalho é o elemento responsável por transferir a energia a ser “armazenada” para o MMF, e será, no presente estudo, uma mistura aquosa com Etileno Glicol que possui o ponto de solidificação bem menor que o ponto de solidificação do MMF, que será a água. A única variável termofísica do fluido de trabalho que será mudado será a temperatura mantendo constante os demais valores. Os dados de entrada do fluido de trabalho necessários são:

- Viscosidade dinâmica;
- Calor específico;
- Velocidade de entrada na base do tanque;
- Condutividade térmica;

4.1.5.

Porosidade média (ε).

A porosidade média a ser utilizada poderá ser obtida através das equações apresentadas no capítulo 3, as equações diferenciavam uma das outras por meio da relação entre diâmetro externo da cápsula e diâmetro interno do tanque. Como vamos adotar para nossa simulação esferas de três tamanhos específicos (50, 75 e 100 mm) e um tanque único com diâmetro de 1 m, adotaremos a seguintes equações a seguir:

$$\varepsilon_p = 0,400 + 0,010(e^{10,686(d_{ext}/d_{tan})} - 1), \quad (d_{ext}/d_{tan}) \leq 0,256 \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_d = 0,372 + 0,002(e^{15,306(d_{esf}/d_{tan})} - 1), \quad (d_{esf}/d_{tan}) \leq 0,253 \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_p + \varepsilon_d}{2} \quad (4.3)$$

4.1.6.

Velocidade média do fluido de trabalho no leito.

O modelo matemático apresentado no Capítulo 3 relaciona a vazão em massa e área da base do tanque e a porosidade. Por conveniência e para ampliar a área de estudo vamos adotar, ao invés da vazão mássica, a velocidade de entrada pois o presente estudo está voltado na determinação no tempo de solidificação do MMF do leito. Desta forma, a equação a ser utilizada pode ser como a seguir:

$$u_m = \frac{u_{ft}}{\varepsilon_m} \quad (4.4)$$

4.2. Balanço de Energia.

Como apresentado anteriormente, para modelarmos o balanço de energia do sistema de termoacumulação dividimos o estudo em duas partes:

- Balanço de energia entre o fluido de trabalho e cada camada do leito.
- Transferência de calor nas cápsulas esféricas para o fluido de trabalho.

4.2.1. Balanço de Energia: Fluido de Trabalho e Camadas de Esferas.

Discretizando a equação (3.18) e obtemos:

$$\varepsilon A_t L_l \rho_{ft} c_{ft} \left[\frac{T_{ft,x}^{t+1} - T_{ft,x}^t}{\Delta t} + v_{ft} \frac{T_{ft,s}^t - T_{ft,e}^t}{\Delta x} \right] = k_{ft} A_t L_l \frac{T_{ft,m+1}^{t+1} + T_{ft,m-1}^t - 2T_{ft,m}^{t+1}}{\Delta x^2} + N_{ec} Q_e \quad (4.5)$$

Podemos considerar que:

$$\Delta x = d_e \quad (4.6)$$

$$L_t = d_e \quad (4.7)$$

$$T_{ft,m-1} = T_{ft,e} \quad (4.8)$$

$$T_{ft,m+1} = T_{ft,s} \quad (4.9)$$

$$T_{ft,m} = T_{ft,x} \quad (4.10)$$

A temperatura T_{fx} é a temperatura média do fluido de trabalho na entrada $T_{ft,e}$ e saída $T_{ft,s}$:

$$T_{ft,x} = \frac{T_{ft,e} + T_{ft,s}}{2} \quad (4.11)$$

Desta forma, substituindo:

$$\varepsilon A_i d_e \rho_{ft} c_{ft} \left[\frac{T_{ft,x}^{t+1} - T_{ft,x}^t}{\Delta t} + v_{ft} \frac{T_{ft,s}^t - T_{ft,e}^t}{d_e} \right] = k_{ft} A_i d_e \frac{T_{ft,s}^{t+1} + T_{ft,e}^t - 2T_{ft,x}^{t+1}}{d_e^2} + N_{ec} Q_e \quad (4.12)$$

4.2.2.

Transferência de Calor na Cápsula Esférica.

Para modelar o balanço de energia da cápsula, serão considerados três processos:

- Troca de calor sensível, resfriamento do MMF até a temperatura de mudança de fase (fase: líquida).
- Troca de calor latente, mudança de fase do MMF (fases: líquida e sólida).
- Troca de calor sensível, o MMF com temperatura de mudança de fase até equilíbrio com o fluido de trabalho (fase: sólida).

As equações que representam o modelo matemático do processo que ocorre na transferência nas fases totalmente líquido e sólido serão discretizada com malhas regulares. Ambas situações são similares do ponto de vista de tratamento numérico das equações que modelam o fenômeno físico, diferenciando apenas dos propriedades termofísicas do material de mudança de fase. A malha utilizada é obtida dividindo o domínio, diâmetro interno da cápsula, em N partes iguais na direção radial como indicado na Figura 16.

Para modelamos primeiro o conceito de energia total da cápsula e MMF, em seguida a distribuição de temperatura desde parede interna da cápsula até o centro do MMF.

4.2.2.1.

Resfriamento MMF Fase totalmente Líquida e Totalmente Sólida.

Em $t=0$ o sistema está em equilíbrio térmico com o meio. A temperatura inicial será considerada a temperatura ambiente, o fluido de trabalho só entra no sistema quando sua temperatura estiver constante, ou seja, o fluido circula no resfriador (chiller) até atingir a temperatura de controle em uma linha paralela. Após o fluido alcançar a temperatura desejada ele estará pronto para entrar no tanque.

O processo de resfriamento será considerado até o MMF atingir a temperatura de mudança de fase T_{mf} . Desta forma, podemos estimar a energia a ser retirada discretizando o segundo termo a direita da equação (3.18):

$$Q_i = m_{mmf} c_{mmf} \frac{T_{mmf}^{t+1} - T_{mmf}^t}{\Delta t} \quad (4.13)$$

A energia Q_i considerada como a energia transferida por convecção entre o fluido de trabalho e a cápsula esférica apresentada na Equação (3.20) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Q_e^t = h_c A_e (T_{cap,ext}^t - T_{ft,x}^t) \quad (4.14)$$

A temperatura $T_{ft,x}$ apresentada na Equação (22) pode ser modelada da seguinte forma:

$$T_{ft,x}^t = \frac{T_{ft,in}^t + T_{ft,out}^t}{2} \quad (4.15)$$

Como anunciado anteriormente, as equações que representam o modelo matemático do processo que ocorre na transferência nas fases totalmente líquido e sólido serão discretizadas com malhas regulares. Ambas as situações são similares do ponto de vista de tratamento numérico das equações que modelam o fenômeno físico, diferenciando-se apenas das propriedades termofísicas do material de mudança de fase. A malha utilizada é obtida dividindo geometricamente o diâmetro interno da cápsula em N partes igual na direção radial como indicado na Figura 16. Desta forma poderemos avaliar a distribuição de temperatura no interior da cápsula desde $r = 0$ até $r = r_{int}$.

O domínio formado pelo diâmetro interno da cápsula formado pelo MMF foi dividido em N camadas na direção radial com Δr de espessura:

$$\Delta r = \frac{r_{int}}{N} \quad (4.16)$$

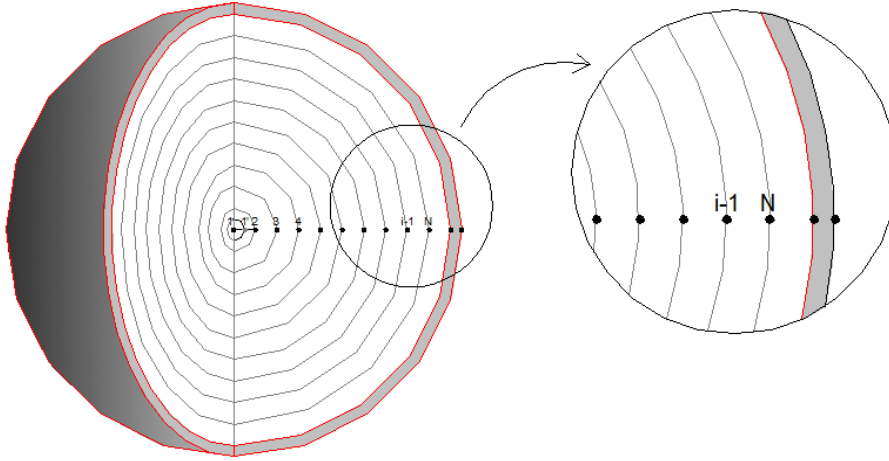


Figura 16 - Representação da divisão de “N” camadas do MMF.

Utilizando aproximações para as primeiras derivadas (temporal e espacial) e uma aproximação de três pontos para segunda derivada espacial, e substituindo estas equações na Equação 3.24, será obtida uma aproximação por diferenças finitas para a equação da condução de calor dentro da cápsula esférica. O esquema adotado representa uma formulação totalmente implícita, como mostra a equação abaixo.

$$\frac{(T_{mmf,i}^{t+1} - T_{mmf,i}^t)}{\Delta t} = \alpha_{mmf,liq} \left(\frac{2}{r_i} \frac{(T_{mmf,i+1}^t - T_{mmf,i}^t)}{\Delta r} + \frac{T_{mmf,i+1}^{t+1} - 2T_{mmf,i}^{t+1} + T_{mmf,i-1}^{t+1}}{\Delta r^2} \right) \quad (4.17)$$

Reescrevendo de forma conveniente para termos como resultado o valor da distribuição de temperatura no interior da cápsula:

$$T_{mmf,i}^{t+1} = T_{mmf,i}^t + \alpha_{mmf,liq} \left(\frac{2}{r_i} \frac{(T_{mmf,i+1}^t - T_{mmf,i}^t)}{\Delta r} + \frac{T_{mmf,i+1}^{t+1} - 2T_{mmf,i}^{t+1} + T_{mmf,i-1}^{t+1}}{\Delta r^2} \right) \Delta t \quad (4.18)$$

O centro da esfera formada pelo MMF será $i = 1$. As interfaces de cada camada de MMF numeramos de $i = 2$ a $i = N$, a interface do MMF e face interna da cápsula será $i = N + 1$.

onde:

$$r_i = (i - 1) \Delta r \quad (4.19)$$

Reescrevendo:

$$T_{mmf,i}^t = T_{mmf,i}^{t+1} + \alpha_{mmf,iq} \left(\frac{2(T_{mmf,i+1}^{t+1} - T_{mmf,i}^{t+1})}{(i-1)\Delta r^2} + \frac{T_{mmf,i+1}^{t+1} - 2T_{mmf,i}^{t+1} + T_{mmf,i-1}^{t+1}}{\Delta r^2} \right) \Delta t \quad (4.20)$$

Adotando:

$$F = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \quad (4.21)$$

Rearranjando temos:

$$T_{mmf,i}^{t+1} = T_{mmf,i}^t + \frac{2(T_{mmf,i+1}^t - T_{mmf,i}^t)}{(i-1)} F + (T_{mmf,i+1}^t - 2T_{mmf,i}^t + T_{mmf,i-1}^t) F \quad (4.22)$$

A equação acima é válida entre os pontos 2 a $N-1$.

O ponto $i+1$ será a interface formada entre o MMF e a parede interna da cápsula:

$$T_{mmf,i+1} = T_{cap,int} \quad (4.23)$$

A equação será:

$$T_{mmf,N}^t = T_{mmf,N}^{t+1} + \frac{2(T_{cap,int}^{t+1} - T_{mmf,N}^{t+1})}{N} F + T_{cap,int}^{t+1} - 2T_{mmf,N}^{t+1} + T_{mmf,i}^{t+1} F \quad (4.24)$$

Como foi dito anteriormente, a equação (4.22) é válida para pontos internos entre 2 e $N-1$, a equação não pode ser aplicada no ponto 1 do domínio por causa da singularidade que provocaria. A alternativa para encontrar uma equação para calcular a temperatura no centro da cápsula foi fazer uma análise concentrada numa esfera de raio $\Delta r / 2$. Tomando como referência a figura 17 e fazendo um balanço de energia para encontrar a equação que permita determinar a temperatura no centro do MMF.

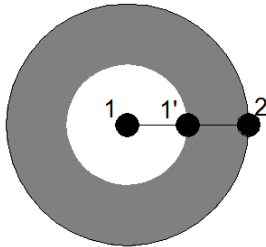


Figura 17 - Representação no interior da esfera.

Fazendo o balanço de energia:

$$\rho_{mmf} c_{mmf} \forall_{mmf,1-1'} \frac{\partial T_{mmf,1-1'}}{\partial t} = \frac{(T_{mmf,1'}(t) - T_{mmf,2}(t))}{Rt_{1'-2}} \quad (4.25)$$

A resistência térmica entre os pontos 1' e 2 será:

$$Rt_{1'-2} = \frac{1}{4\pi k_{mmf}} \left(\frac{1}{r_{1'}} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.26)$$

Então

$$\rho_{mmf} c_{mmf} \forall_{mmf,1-1'} \frac{\partial T_{mmf,1-1'}}{\partial t} = \frac{(T_{mmf,1'}(t) - T_{mmf,2}(t))}{\frac{1}{4\pi k_{mmf}} \left(\frac{1}{r_{1'}} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (4.27)$$

Considerando:

$$r_{1'} = \frac{\Delta r}{2} \quad (4.28)$$

$$r_2 = \Delta r \quad (4.29)$$

Então:

$$\rho_{mmf} c_{mmf} \forall_{mmf,1-1'} \frac{\partial T_{mmf}}{\partial t} = \frac{(T_{mmf,1'} - T_{mmf,2})}{\frac{1}{4\pi k_{mmf}} \left(\frac{2}{\Delta r} - \frac{1}{\Delta r} \right)} \quad (4.30)$$

$$\frac{\partial T_{mmf}}{\partial t} = \frac{4\pi k_{mmf} \Delta r}{\rho_{mmf} c_{mmf} \forall_{mmf,1-1'}} (T_{mmf,1'} - T_{mmf,2}) \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial T_{mmf}}{\partial t} = \frac{4\pi \Delta r \alpha_{mmf}}{\forall_{mmf,1-1'}} (T_{mmf,1'} - T_{mmf,2}) \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial T_{mmf}}{\partial t} = \frac{4\pi \Delta r \alpha_{mmf}}{\frac{4}{3} \left(\frac{\Delta r}{2} \right)^3} (T_{mmf,1'} - T_{mmf,2}) \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial T_{mmf}}{\partial t} = \frac{24\alpha_{mmf} (T_{mmf,1'} - T_{mmf,2})}{\Delta r^2} \quad (4.34)$$

Discretizando:

$$\frac{T_1^{t+1} - T_1^t}{\Delta t} = \frac{24\alpha(T_{mmf,1'}^{t+1} - T_{mmf,2}^{t+1})}{\Delta r^2} \quad (4.35)$$

$$T_1^t = T_1^{t+1} - \frac{24\alpha(T_{mmf,1'}^{t+1} - T_{mmf,2}^{t+1})}{\Delta r^2} \Delta t \quad (4.36)$$

Considerando:

$$T_{mmf,1'} = T_{mmf,1} \quad (4.37)$$

Então:

$$T_{mmf,1}^t = -(24F)(T_{mmf,2}^{t+1}) + (T_{mmf,1}^{t+1})(24F + 1) \quad (4.38)$$

Resumindo as equações que descrevem a distribuição de temperatura no interior da cápsula na fase totalmente líquida ou sólida:

Para os pontos 1 e 2:

$$T_{mmf,1}^t = -(24F)(T_{mmf,2}^{t+1}) + (T_{mmf,1}^{t+1})(24F + 1)$$

Para os pontos entre 2 e N-1:

$$T_{mmf,i}^{t+1} = T_{mmf,i}^t + \frac{2(T_{mmf,i+1}^t - T_{mmf,i}^t)}{(i-1)}F + (T_{mmf,i+1}^t - 2T_{mmf,i}^t + T_{mmf,i-1}^t)F$$

Para o Ponto N

$$T_{mmf,N}^t = T_{mmf,N}^{t+1} - \frac{2(T_{cap,int}^{t+1} - T_{mmf,N}^{t+1})}{(i-1)}F + (T_{cap,int}^{t+1} - 2T_{mmf,N}^{t+1} + T_{mmf,i}^{t+1})F$$

4.3.

Modelagem para Transferência de Calor Latente

Como mencionado anteriormente, a transferência de calor latente se inicia a partir do momento em que o MMF atinge a tempera de mudança de fase. Por hipótese é considerado que não haja sub-resfriamento, o processo de solidificação na área formada pelo diâmetro interno da cápsula, formando uma fronteira entre o sólido e líquido do MMF, que vai avançando em direção ao centro da cápsula. A localização da interface é fundamental para determinar o tamanho dos domínios sólidos e líquido e malha correspondente para implementar a discretização das equações governantes.

$$Q_{mmf} = -4\pi\lambda_{mmf}\rho_{mmf}R_{fs}^2 \frac{\partial R_{fs}}{\partial t} \quad (4.39)$$

A taxa de geração de calor Q_{mmf} pode ser calculada pela resistência térmica total, R_t , que é determinada pela soma de $R_{t,h}$, que é a resistência térmica formada pela convecção, $R_{t,cap}$, que é a resistência térmica formada pelo material da cápsula e $R_{t,fs}$ que é a resistência térmica devido a formação de sólido. Na forma de equação fica:

$$Q_{mmf}(t,r) = \frac{(T_{fs} - T_{fx})}{R_{t,h} + R_{t,cap} + R_{t,fs}(t,r)} \quad (4.40)$$

$$R_t(t,r) = R_{t,h} + R_{t,cap} + R_{t,fs}(t,r) \quad (4.41)$$

A resistência térmica do MMF sólido formado é dada por:

$$R_{t,fs}(r_{fs},t) = \frac{1}{4\pi k_{mmf}} \left[\frac{1}{r_{fs}} - \frac{1}{r_i} \right] \quad (4.42)$$

A equação (4.32) fica:

$$-4\pi\lambda_{mmf}\rho_{mmf}R_{fs}^2 \frac{\partial R_{t,fs}}{\partial t} = \frac{(T_{fs} - T_{fx})}{\frac{1}{4\pi h_c R_e} + \frac{1}{4\pi k_{cap}} \left[\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_e} \right] + \frac{1}{4\pi k_{mmf}} \left[\frac{1}{R_{fs}} - \frac{1}{R_i} \right]} \quad (4.43)$$

Após algumas manipulações matemáticas obtemos:

$$\begin{aligned} r_i \left[\frac{R_{fs}^2}{2R_i^2} - \frac{R_{fs}^3}{3R_i^3} \right] + \frac{k_{mmf}}{3k_{cap}} \frac{R_{fs}^3}{R_i^3} \left(\frac{R_e - R_i}{R_e} \right) + \frac{k_{mmf}}{3hr_i^2} \frac{R_{fs}^3}{R_e^2} - \left[\frac{R_i}{6} + \frac{r_i}{3} \frac{k_{mmf}}{k_{cap}} \left(\frac{R_e - R_i}{R_e} \right) + \frac{k_{mmf}}{3hr_i} \right] \\ = - \frac{k_{mmf}}{\lambda_{mmf}\rho_{mmf}R_i} (T_{fs} - T_{fx}) \partial t \end{aligned} \quad (4.44)$$

Integrando a equação 3.31 pode-se obter o perfil de distribuição de temperatura no sólido formado (dedução Item 11):

$$T_{mmf}(R, t) = T_{mf} + \left[(T_{ft}(t) - T_{mf}) \frac{1 - \frac{R_{fs}(t)}{r}}{1 - \left(1 - \frac{k_{mf}}{hR_0}\right) \frac{R_{fs}(t)}{r_0}} \right] \quad r_0 \leq r \leq r_{fs} \quad (4.45)$$

$t > 0$

4.4. Forma Adimensional

Considerando a equação que prescreve o campo de temperaturas nas camadas dos leito (Repetida aqui por conveniência):

$$\varepsilon A_l L_l \rho_{ft} c_{ft} \left[\frac{\partial T_{ft}}{\partial t} + v_{ft} \frac{\partial T_{ft}}{\partial x} \right] = N_{ec} Q_e + k_{ft} A_l L_l \frac{\partial^2 T_{ft}}{\partial x^2} \quad (4.46)$$

Podemos também escrever da seguinte forma:

$$\varepsilon A_l L_l \left[\frac{\partial T_{ft}}{\partial t} + v_{ft} \frac{\partial T_{ft}}{\partial x} \right] = \frac{N_{ec} Q_e}{\rho_{ft} c_{ft}} + \alpha_{ft} A_l L_l \frac{\partial^2 T_{ft}}{\partial x^2} \quad (4.47)$$

Definindo como tempo crítico de advecção como sendo o tempo consumido pela frente de advecção para atravessar todo o leito:

$$t_c = L / v_{ft} \quad (4.48)$$

Podemos definir as seguintes variáveis adimensionais:

$$x^* = x / L_{ft} \quad (4.49)$$

$$\theta = \frac{T - T_{fti}}{T_{mmfi} - T_{mf}} \quad (4.50)$$

$$\tau = t / t_c \quad (4.51)$$

Substituindo na equação (4.5), temos:

$$\varepsilon A_l L_l \left[(T_{mmfi} - T_{mf}) \frac{v_{ft}}{L_l} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + (T_{mmfi} - T_{mf}) \frac{v_{ft}}{L_l} \frac{\partial \theta}{\partial x^*} \right] = \frac{N_{ec} Q_e}{\rho_{ft} c_{ft}} + \alpha_{ft} A_l L_l \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{*2}} \quad (4.52)$$

Como:

$$Pe = L_l v_{ft} / \alpha \quad (4.53)$$

Então adequando a equação:

$$\varepsilon A_t L_t \left[\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \theta}{\partial x^*} \right] = \frac{N_{ec} Q_e}{\rho_{ft} v_{ft} c_{ft} (T_{mmfi} - T_{mf})} + Pe A_t L_t \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{*2}} \quad (4.54)$$

Lembrando que e substituindo na equação:

$$\rho_{ft} v_{ft} c_{ft} = \frac{Pe k_{ft}}{L_t} \quad (4.55)$$

Obtemos:

$$\varepsilon A_t \left[\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \theta}{\partial x^*} \right] = \frac{1}{Pe k_{ft}} \frac{N_{ec} Q_e}{(T_{mmfi} - T_{mf})} + Pe A_t \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{*2}} \quad (4.56)$$

Condição inicial:

$$\theta(x^*, 0) = 1 \quad (4.57)$$

Condições de contorno:

$$\theta(0, \tau) = 0, \tau > 0 \quad (4.58)$$

$$x^* = 1, \frac{\partial \theta}{\partial x^*} = 0 \quad (4.59)$$

Reescrevendo a equação que descreve o a formação de sólido no interior das cápsulas:

$$\begin{aligned} r_i \left[\frac{r_{fs}^2}{2r_i^2} - \frac{r_{fs}^3}{3r_i^3} \right] + \frac{k_{mmf}}{3k_{cap}} \frac{r_{fs}^3}{r_i^3} \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{k_{mmf}}{3hr_i^2} \frac{r_{fs}^3}{r_e^2} - \left[\frac{r_i}{6} + \frac{r_i}{3} \frac{k_{mmf}}{k_{cap}} \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{k_{mmf}}{3hr_i} \frac{r_i^3}{r_e^2} \right] = \\ = - \frac{k_{mmf}}{\lambda_{mmf} \rho_{mmf} r_i} (T_{fs} - T_{fix}) \partial t \end{aligned} \quad (4.60)$$

Definindo algumas equações e utilizando algumas relações conhecidas:

$$r^* = r_{fs} / r_i \quad (4.61)$$

$$k^* = k_{mmf} / k_{cap} \quad (4.62)$$

$$Ste = \frac{C_p (T_{fs} - T_{fix})}{\lambda_{mmf}} \quad (4.63)$$

$$Bi = \frac{h d_i}{k_{mmf}} \quad (4.64)$$

$$\tau = \frac{\alpha t}{r_i} \quad (4.65)$$

$$t = \frac{r_i^2 \tau \rho_{mmf} C_p}{k_{mmf}} \quad (4.66)$$

Substituindo temos:

$$\begin{aligned} r_i \left[\frac{r^{*2}}{2} - \frac{r^{*3}}{3} \right] + \frac{k^*}{3} r^{*3} \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{1}{3 Bi r_i} \frac{r_{fs}^3}{r_e^2} - \left[\frac{r_i}{6} + \frac{r_i}{3} k^* \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{1}{3 Bi} \frac{r_i^3}{r_e^2} \right] = \\ = -Ste \partial \tau \end{aligned} \quad (4.67)$$

4.5. Fluxograma da Lógica da Simulação

A Figura abaixo representa o fluxograma da lógica do programa utilizado na simulação:

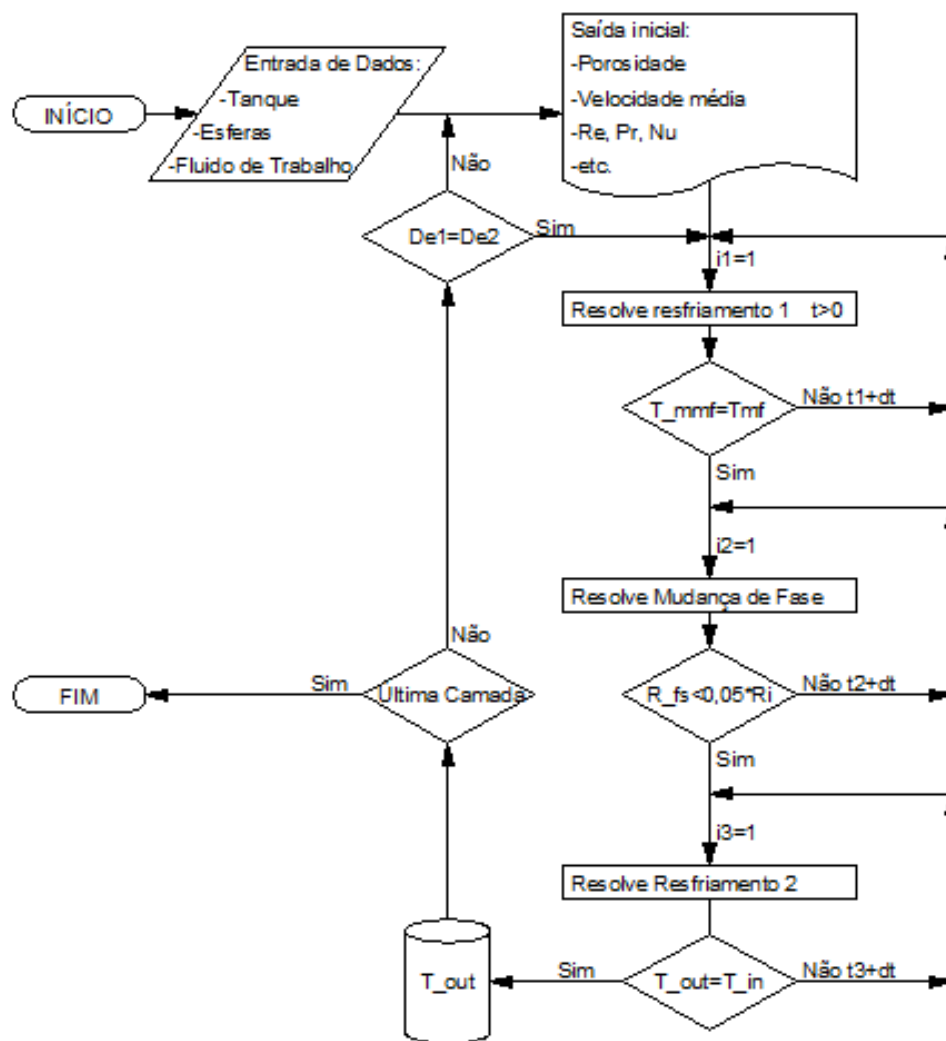


Figura 18 - Fluxograma de Lógica de Simulação.

5. Validação do Programa

O modelo foi validado comparando resultados de experimentos com os resultados de simulações. A validação da modelagem matemática teve como foco principal a verificação do tempo de carregamento do leito, utilizando as mesmas variáveis dos experimentos.

A validação da modelagem foi realizada utilizando dois grupos de experimentos:

- Experimento utilizando um reservatório com uma única esfera.
- Experimento utilizando tanques preenchidos com cápsulas esféricas.

Os dados de entrada para a simulação foram os mesmos dados utilizados nos experimentos e variando algumas propriedades como vazão mássica, temperatura de entrada no tanque, diâmetro e material da cápsula.

A seguir serão apresentados os resultados da validação.

5.1. Validação: Esfera Unitária.

A partir de dados experimentais (ElGhnam et al, 2012), estudaram a distribuição de temperatura e o processo de formação de gelo em cápsulas esféricas.

Os dados de entrada para validação foram considerados os valores apresentados na Tabela 1, na qual variava a temperatura de entrada e vazão do fluido de trabalho, diâmetros e materiais das esferas.

Tabela 1 - Parâmetros experimentais utilizados para esfera unitária (ElGhnam et al, 2012).

<i>HTF parameters</i>	
Temperature (during charge process)	-4, -6, -8, -10, and -12 °C
Temperature (during discharge process)	6, 8, 10, 12, and 14 °C
Volume flow rate	1, 3, 4, 5, and 7 Lpm
<i>Spherical capsule parameters</i>	
Size (internal diameter)	0.042, 0.07, 0.092, 0.11, and 0.126 m
Material	Copper, brass, stainless steel, glass, and plastic

A Figura 19 apresenta a comparação do tempo adimensional do experimento e dos resultados da simulação, nesta simulação a variável foi o material da cápsula.

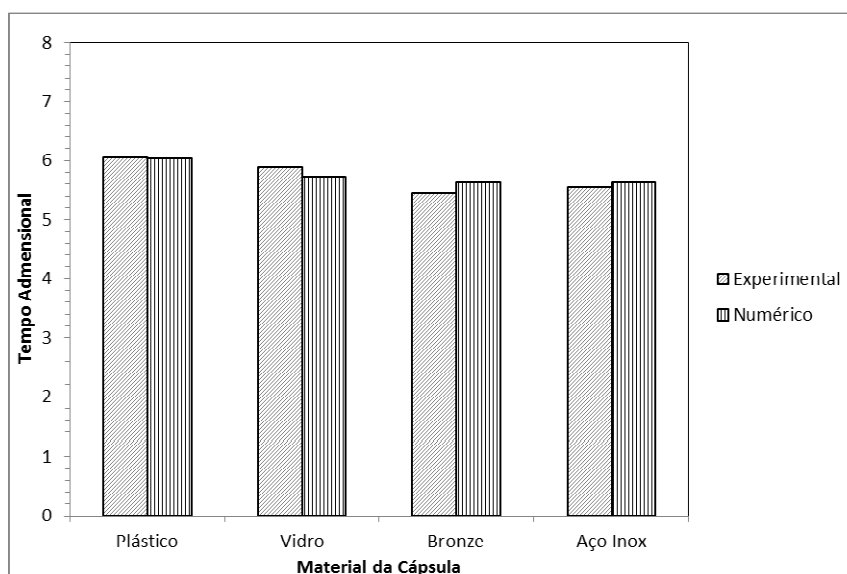


Figura 19 - Resultados experimentais: tempo de carregamento em função do material da cápsula (ElGhnam et al, 2012).

A Figura 20 apresenta os dados da simulação comparando-os com os dados experimentais em função da vazão do fluido de trabalho.

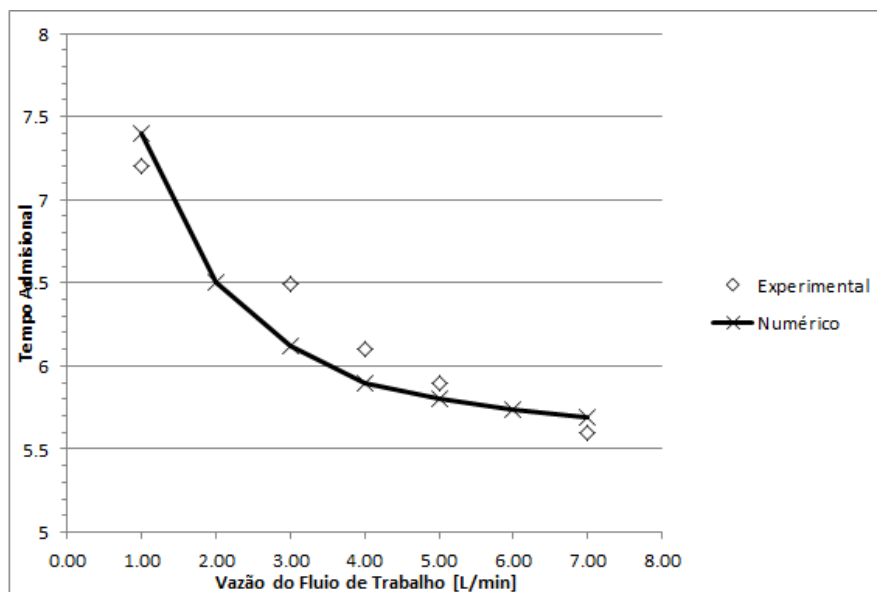


Figura 20 - Comparação simulação e resultados experimentais com variação da vazão (ElGhnam et al, 2012).

A Figura 21 foi gerada utilizando-se os valores dos tempos adimensionais dos valores numéricos da simulação e os valores experimentais. Nesta simulação a temperatura do fluido de trabalho foi a variável.

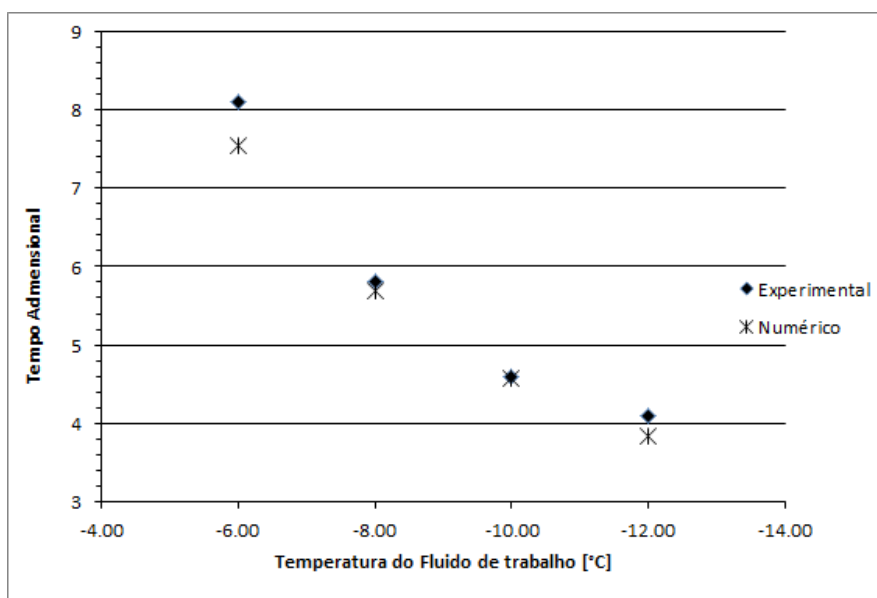


Figura 21 - Simulação e resultados experimentais com variação de temperatura do fluido de trabalho (ElGhnam et al, 2012).

Entre os resultados experimentais e os valores determinados mediante as simulações para esfera unitária observa-se uma boa concordância.

5.2.

Validação: Leito de esferas.

Para validação foram utilizados dados experimentais (ISMAIL, 2002), a qual realizou experimentos em um tanque com um leito de esferas com um único diâmetro, variando individualmente a temperatura de entrada no leito e vazão em massa.

A Figura 22 apresenta a comparação dos valores de tempo de carregamento entre os dados numéricos e os valores gerados na simulação.

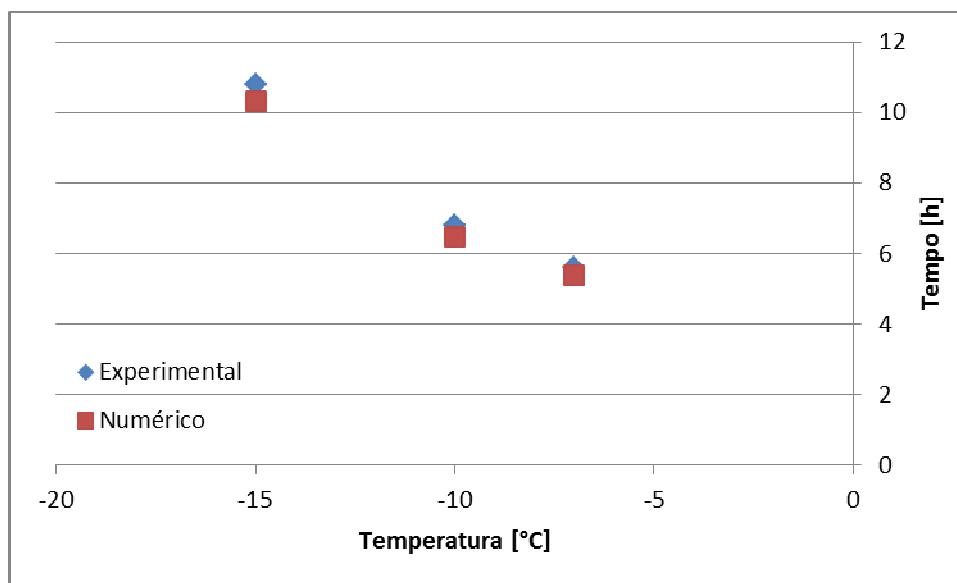


Figura 22 - Comparação simulação e resultados experimentais com variação de temperatura do fluido de trabalho na entrada do tanque (dados experimentais ISMAIL, 2002).

A Figura 23 apresenta os valores de tempo de carregamento variando-se a vazão do fluido de trabalho, do experimento e dos resultados da simulação.

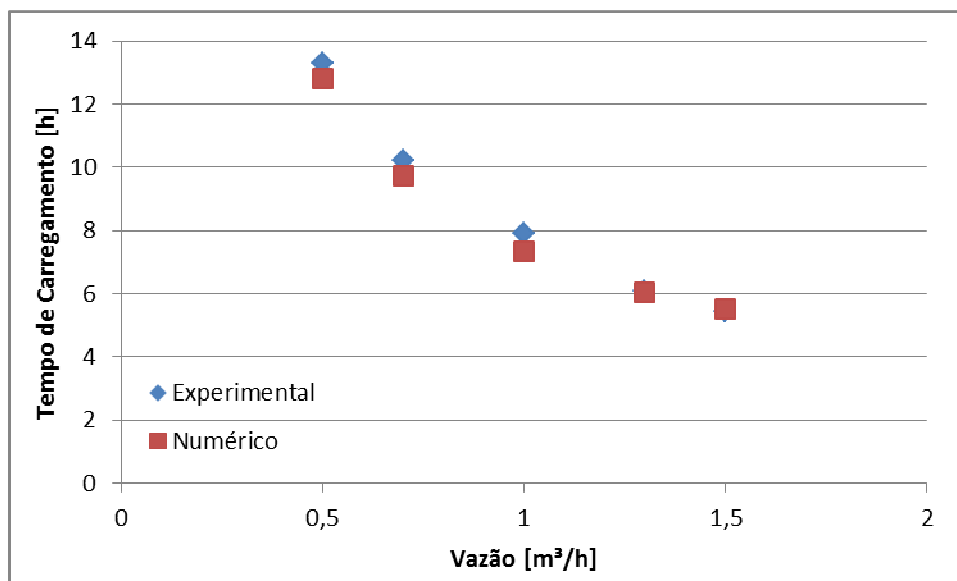


Figura 23 - Comparação simulação e resultados experimentais com variação de vazão do fluido de trabalho na entrada do tanque (dados experimentais ISMAIL, 2002).

Todos os resultados comparados com os dados experimentais não possuem variações maiores que 10%. Sendo assim, o procedimento de verificação do modelo foi considerado aceitável para que se possa seguir com a análise numérica.

6. Resultado das Simulações

Validado o modelo matemático e o programa a etapa seguinte foi a simulação entre um tanque preenchido com um único grupo de diâmetro de esferas e o mesmo tanque preenchido com grupos de diâmetros de esferas diferentes. As simulações foram realizadas para comparar principalmente o tempo de carregamento de diferentes distribuições do grupo de cápsulas, outro ponto importante foi a verificação da quantidade de massa de MMF estocada, este valor está diretamente ligado à quantidade de energia a ser armazenada. A Figura 25 mostra as diferentes configurações da distribuição de cápsulas no tanque padrão, utilizadas na simulação numérica.

As simulações foram realizadas utilizando cápsulas de 50, 75 e 100 mm, com espessura da parede de 1 mm, o tanque padrão considerado para todas as simulações foi um tanque de altura de 1,5 m com raio de 0,5m. Para cada distribuição foi variada a velocidade e temperatura de entrada na base do tanque.

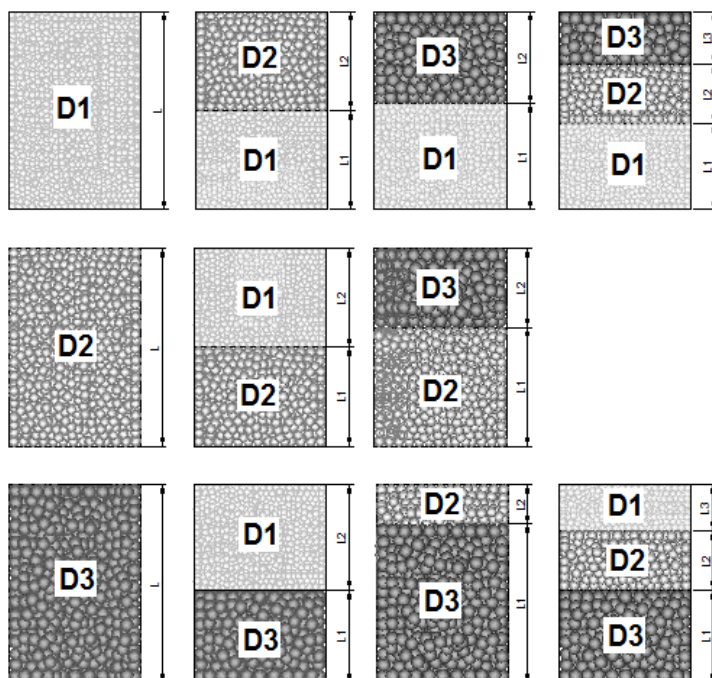


Figura 24 - Configuração de distribuição de Cápsulas $D1 < D2 < D3$.

A Figura 24 está representada as configurações de distribuição de Grupos de Cápsulas simulados, onde D1 representa as cápsulas de 50 mm, D2 representa as

cápsulas de 75 mm de diâmetro e D3, as cápsulas de 100 mm de diâmetro, L é a altura do tanque e L1, L2 e L3 correspondem à altura de cada grupo de esferas.

O fluido de trabalho circula entre as cápsulas, entrando pela parte inferior do tanque com vazão e temperatura constantes.

A Tabela 2 informa os valores de todas as variáveis utilizadas no estudo numérico.

Tabela 2 - Dados de entrada utilizados na simulação.

$T_{ft} =$	-6 e -15	Temperatura Fluido de Trabalho [°C]
$Raio_{ext} =$	0.25 , 0.375 e 0.50	Raio Externo da Cápsula [m]
$v_{ent_ft} =$	0.00018 e 0.00054	Velocidade de entrada [m/s]
$Al_{tq} =$	1.5	Altura do Tanque [m]
$T_{in} =$	25	Temperatura inicial [°C]
$T_{mf} =$	0.0	Temperatura de Mudança de Fase [°C]
$e =$	0.002	Espessura da Cápsula [m]
$Raio_{tq} =$	0.5	Raio do Tanque [m]
$Rho_{mmf_l} =$	1000	Massa Específica do MMF Líquido [kg/m³]
$Rho_{mmf_s} =$	917.8	Massa Específica do MMF Sólido [kg/m³]
$Rho_{ft} =$	1056	Massa Específica do Fluido de Trabalho [kg/m³]
$L =$	333600	Calor Latente de Solidificação [J/kg]
$N_r =$	50	Número de Dr []
$k_{cap} =$	0.35	Coeficiente de Transferência de Calor da Cápsula [w/mk]
$k_{ft} =$	0.485	Coeficiente de Transferência de Calor do Fluido de Trabalho [w/mk]
$k_{mmf_l} =$	0.566	Coeficiente de Transferência de Calor do MMF Líquido [w/mk]
$k_{mmf_s} =$	2.45	Coeficiente de Transferência de Calor do MMF Sólido [w/mk]
$c_{p_mmf_l} =$	4180	Calor Específico MMF Líquido [J/kg*k]
$c_{p_mmf_s} =$	2040	Calor Específico MMF Sólido [J/kg*k]
$c_{p_ft} =$	3598	Calor Específico Fluido de Trabalho [J/kg*k]
$mi_{ft} =$	0.006457	Calor Específico Fluido de Trabalho [J/kg*k]
$\Delta t =$	1	Delta t [s]

A simulação foi realizada inicialmente utilizando apenas um único diâmetro de esferas preenchendo o tanque. Como foi informado anteriormente, estamos utilizando apenas três diâmetros de esferas (50, 75 e 100 mm).

Antes de iniciar a simulação, foram montadas tabelas para indicar diâmetro de esferas, altura do leito e quantidade de camadas por grupo no interior do tanque que seriam analisados.

A Tabela 3 apresenta os dados de um tanque comum, que é preenchido totalmente por um único grupo de esfera (esferas de um único diâmetro). O valor do número de camadas é determinado por meio da relação entre a altura do tanque e o diâmetro externo da cápsula.

Tabela 3 - Distribuição utilizando na simulação numérica com 1 grupo de esfera.

Diâmetro da Esfera	Altura do Grupo	Número de Camadas
[mm]	[mm]	[]
50	1500	30
75	1500	20
100	1500	15

A análise dos resultados das simulações inicialmente irá comparar o tempo de carregamento entre os 3 tanques com um único grupo de esferas. Depois será analisado o tempo de carregamento de tanques com um único grupo e com tanque preenchidos com dois ou três grupos com diâmetros diferentes, e no final a comparação entre os tanques com grupos diferentes.

A Tabela 4 apresenta os três tanques preenchidos com esferas de com 2 grupos de diâmetros diferentes. Nesta análise, será verificado o tempo de carregamento quando temos o grupo de esferas de diâmetro menor na base do tanque.

Tabela 4 - Distribuição utilizada na simulação numérica com 2 grupos de esferas, diâmetro de esfera de 50mm na base.

Diâmetro da Esfera	Altura do Grupo	Número de Camadas
[mm]	[mm]	[]
75	300	4
50	1200	24
75	750	10
50	750	15
75	1200	16
50	300	6

A Tabela 5 apresenta as variações do número de camadas e altura para 2 grupos de esferas tendo como distribuição na base esferas de 100 mm de diâmetro

neste caso será analisado o tempo de carregamento quando na base do tanque temos o grupo de esferas com diâmetro maior.

Tabela 5 - Distribuição de esferas utilizados na simulação numérica com 2 grupos, com diâmetro de esfera de 100mm na base.

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Número de Camadas []
50	300	6
100	1200	12
75	300	4
100	1200	12

A Tabela 6 apresenta 2 tanques com os mesmos grupos de diâmetros (3 grupos de esferas de 100, 75 e 50 mm). Neste caso o estudo irá verificar a variação no tempo de carregamento, quando variamos a quantidade de camadas de determinado grupo.

Tabela 6 - Distribuição com 3 grupos de esferas.

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Número de Camadas []
50	350	7
75	450	6
100	700	7
50	500	10
75	600	8
100	400	4

A seguir serão apresentados os resultados de tempo de carregamento das simulações. A apresentação conta com uma Tabela com o grupo de esfera, altura de cada leito e o tempo total de carregamento.

Também é apresentado um conjunto de gráficos de tempo de carregamento final em função da altura do leito onde podem ser verificadas as variações de tempo quando há mudança de grupo.

Apresentamos também gráficos com a variação de temperatura do fluido de trabalho em diversas camadas do leito em função do tempo.

6.1.

Resultados de simulação numérica com um único grupo de esferas.

O objetivo principal deste trabalho é a comparação entre a utilização de um único grupo de esferas em um tanque e a utilização de 2 ou 3 grupos de esferas no tanque. Desta forma iniciamos o resultado da simulação utilizando no tanque apenas um único grupo de cápsulas e depois este resultado foi comparado com as outras simulações que utilizaram diferentes grupos sob a mesma temperatura e velocidade de entrada no leito formado pelas cápsulas.

A Tabela 7 mostra o tempo de carregamento utilizando apenas um grupo de esferas no tanque por simulação e o resultado dos diferentes tempos de carregamento total, com temperatura de fluido de trabalho entrando de -15°C e com velocidade na base de $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Tabela 7 - Simulação com 1 grupo de esferas no tanque. Velocidade de $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura de fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Temperatura de entrada [$^{\circ}\text{C}$]	Velocidade de Entrada [m/s]	Tempo total de Resfriamento	
					[s]	[h]
50	1500	Total d=50	-15	0.00018	30632	8.5
75	1500	Total d=75	-15	0.00018	34636	9.6
100	1500	Total d=100	-15	0.00018	38439	10.7

A Tabela 8 mostra o tempo de carregamento utilizando apenas um grupo de esferas no tanque por simulação e o resultado dos diferentes tempos de carregamento total, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -6°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Tabela 8 - Simulação com 1 grupo de esferas no tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura de fluido de trabalho a -6°C na entrada do tanque.

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Temperatura de entrada [$^{\circ}\text{C}$]	Velocidade de Entrada [m/s]	Tempo total de Resfriamento	
					[s]	[h]
50	1500	Total d=50	-6	0.00054	25695	7.1
75	1500	Total d=75	-6	0.00054	31992	8.9
100	1500	Total d=100	-6	0.00054	39189	10.9

A Tabela 9 mostra o tempo de carregamento utilizando apenas um grupo de esferas no tanque por simulação e o resultado dos diferentes tempos de carregamento total, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Tabela 9 - Simulação com 1 grupo de esferas no tanque. Velocidade $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura de fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Temperatura de entrada [$^{\circ}\text{C}$]	Velocidade de Entrada [m/s]	Tempo total de Resfriamento	
					[s]	[h]
50	1500	Total d=50	-15	0.00054	11967	3.3
75	1500	Total d=75	-15	0.00054	14539	4.0
100	1500	Total d=100	-15	0.00054	17492	4.9

As Figuras 25, 26 e 27 correspondem aos valores da distribuição de temperaturas o fluido de trabalho na saída de cada camada do leito no decorrer do tempo.

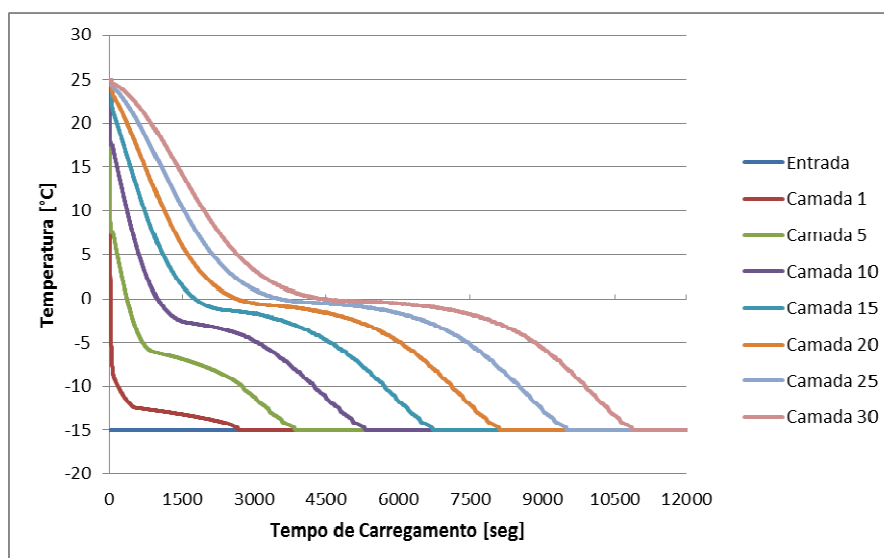


Figura 25 - Distribuição de temperatura do fluido de trabalho na simulação com um grupo de esferas ($d=50\text{mm}$) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.

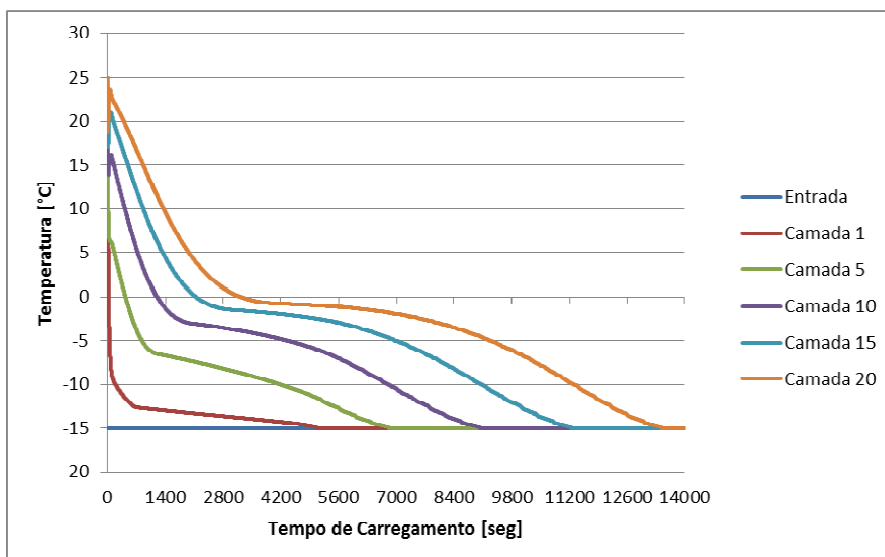


Figura 26 - Distribuição de temperatura do fluido de trabalho na simulação com um grupo de esferas ($d=75\text{mm}$) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.

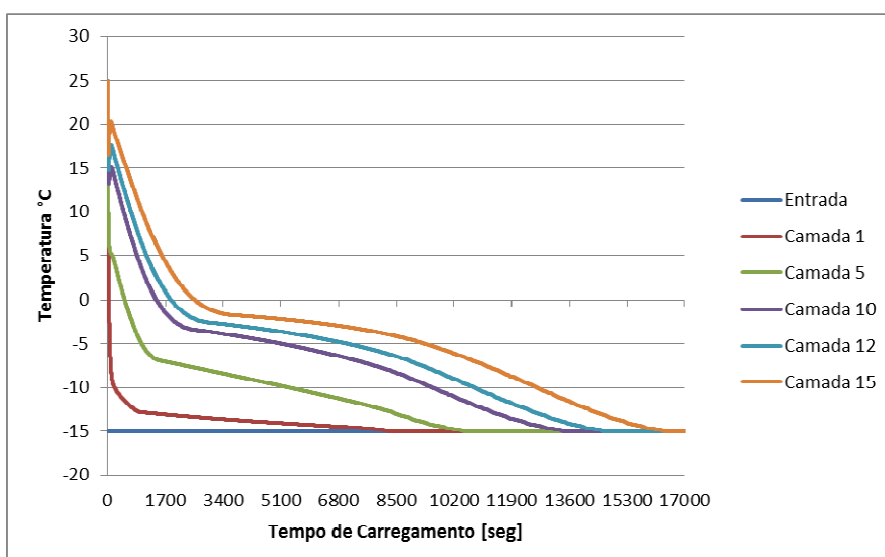


Figura 27 - Distribuição de temperatura do fluido de trabalho na simulação com um grupo de esferas ($d=100\text{ mm}$) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.

6.2.

Resultados de Grupos de Cápsulas de 50 mm na Base do Leito.

Neste item serão apresentados os resultados das simulações de leito com dois grupos de cápsulas tendo em comum o grupo de cápsulas de 50 mm na base do tanque.

A Tabela 10 mostra o resultado obtido do tempo de carregamento utilizando 2 grupos de esferas no tanque por simulação, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Tabela 10 - Tempo de carregamento para 2 grupos de esferas de diâmetro, 50 mm na base e 75 mm na parte superior do tanque (velocidade de $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e Temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque).

Diâmetro da Esfera	Altura do Grupo	Distribuição do Grupo	Temperatura de entrada	Velocidade de Entrada	Tempo total de Resfriamento	
[mm]	[mm]	[]	[$^{\circ}\text{C}$]	[m/s]	[s]	[h]
75	300	Superior d=75	-15	0.00018	32845	9.1
50	1200	Inferior d=50				

A figura 29 mostra a variação da temperatura do fluido de trabalho (FT) nas camadas do leito utilizando 24 camadas de esferas na parte inferior do tanque de 50 mm e 4 camadas de 75mm na parte superior com temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

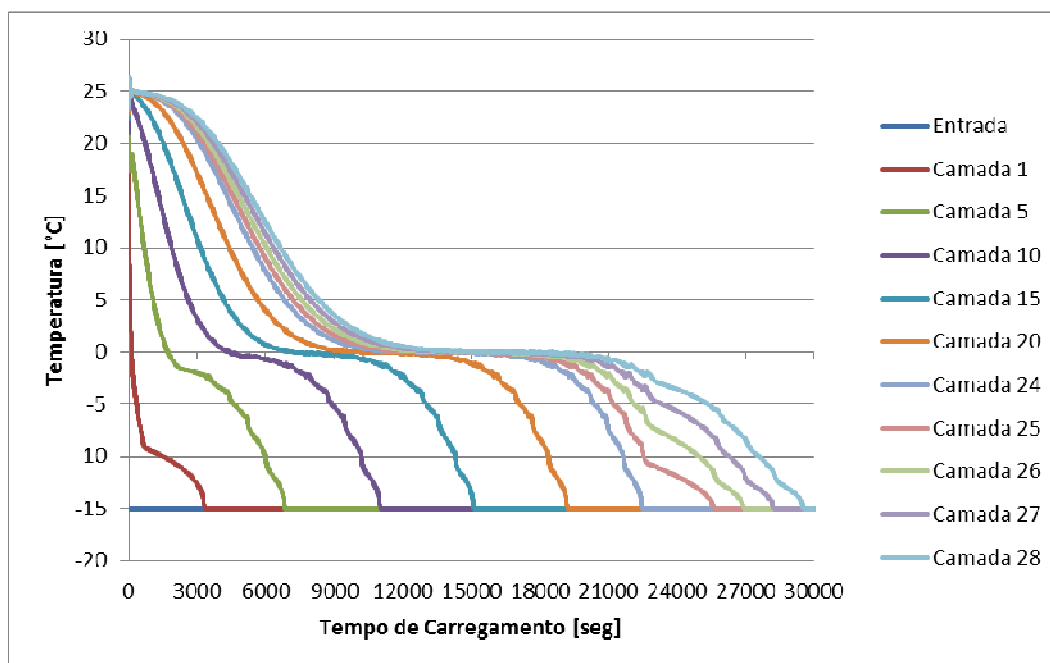


Figura 28 - Distribuição de temperatura na simulação com 2 grupos de esferas (50 e 75mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do FT de -15°C na entrada do tanque.

A Tabela 11 mostra o tempo de carregamento utilizando 2 grupos de esferas no tanque por simulação e o resultado dos diferentes tempos de carregamento total, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -6°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. Nestas simulações foram utilizadas cápsulas de 75 mm além das cápsulas com diâmetro 50 mm na parte inferior do tanque.

Tabela 11 - Tempo de carregamento para 2 grupos de esferas, 50 mm na base e 75 mm na parte superior do tanque utilizando velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ e temperatura do fluido de trabalho de -6°C na entrada do tanque).

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Temperatura de entrada [$^{\circ}\text{C}$]	Velocidade de Entrada [m/s]	Tempo total de Resfriamento	
					[s]	[h]
75	300	Superior d=75	-6	0.00054	30322	8.4
50	1200	Inferior d=50				

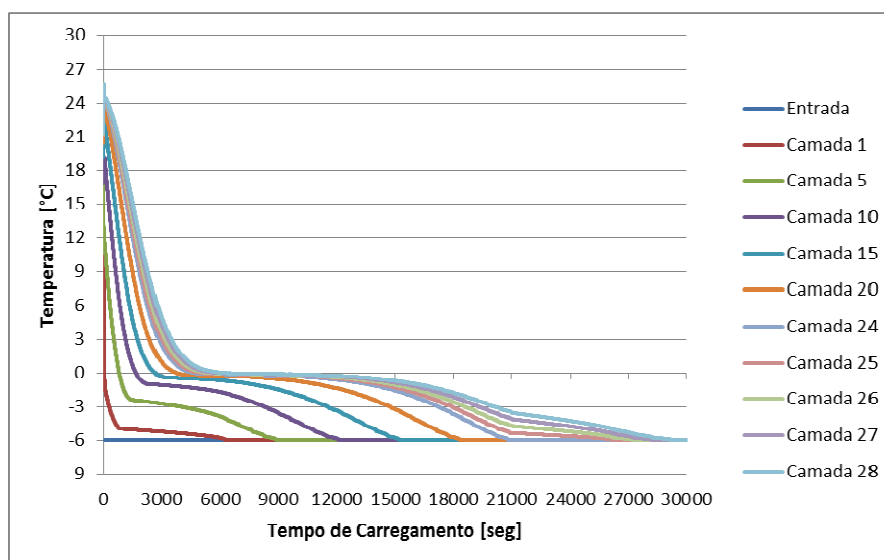


Figura 29 - Distribuição de temperatura na simulação com 2 grupos de esferas (50 e 75mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do FT de -6°C na entrada do tanque.

A Tabela 12 apresenta os resultados de tempo de carregamento para mesmo grupos de esferas, com diferentes alturas de camadas. Este estudo verificou o tempo de carregamento para temperatura de entrada do fluido de trabalho no tanque de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Tabela 12 - Tempo de carregamento para 2 grupos de esferas, 50 mm na base e 75 mm na parte superior do tanque variando a altura de leito (velocidade de $5,4 \cdot 10^{-6}$ m/s e temperatura do de trabalho de -15°C ambos na entrada do tanque).

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Temperatura de entrada [$^{\circ}\text{C}$]	Velocidade de Entrada [m/s]	Tempo total de Resfriamento	
					[s]	[h]
75	300	Superior d=75	-15	0.00054	13848	3.8
50	1200	Inferior d=50				
75	750	Superior d=75	-15	0.00054	12982	3.6
50	750	Inferior d=50				
75	1200	Superior d=75	-15	0.00054	14363	4.0
50	300	Inferior d=50				

As figuras 30, 31 e 32 mostram a variação da temperatura do fluido de trabalho (FT) nas camadas do leito com dois grupos de esferas (50 mm na base e 75 mm na parte superior). A temperatura de fluido de trabalho na entrada utilizado na simulação foi de -15°C e com velocidade na base de $1,8 \cdot 10^{-4}$ m/s.

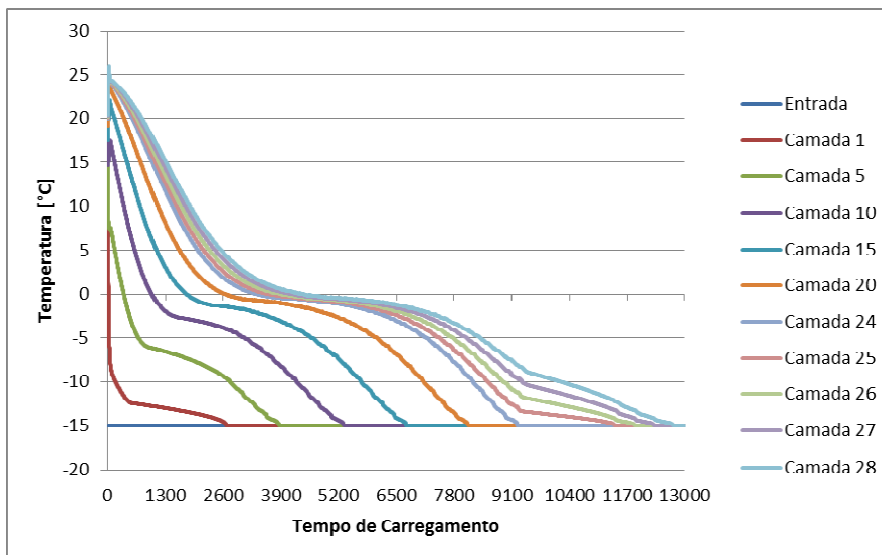


Figura 30 - Distribuição de temperatura do FT na simulação com 2 grupos de esferas (24 camadas de 50 mm e 4 camadas de 75mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura do FT de -15°C na entrada do tanque.

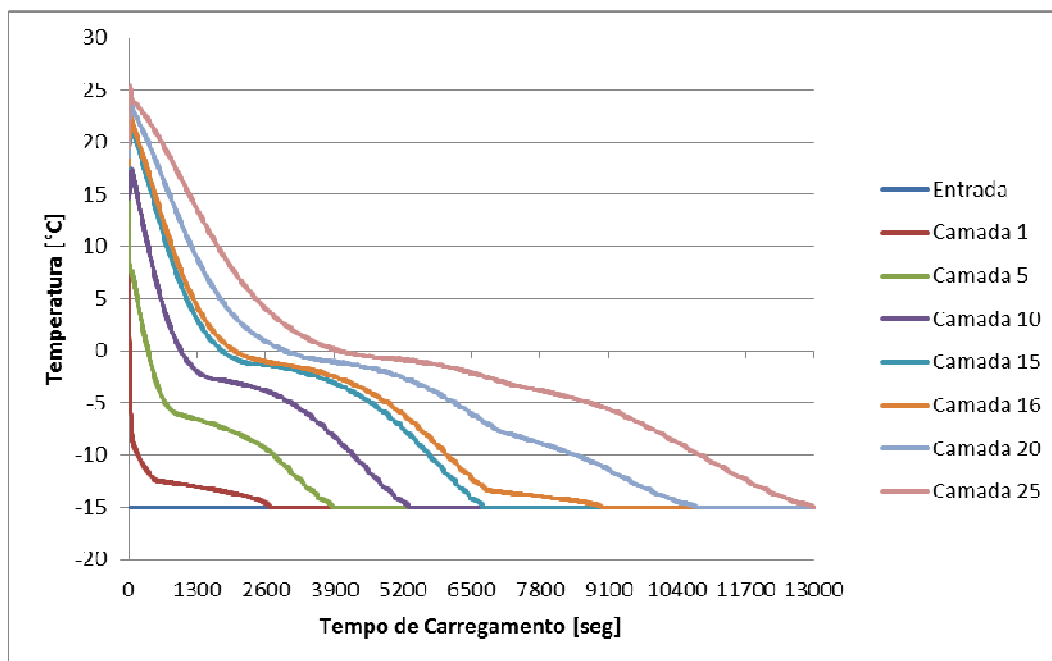


Figura 31 - Distribuição de temperatura na simulação com 2 grupos de esferas (15 camadas de 50 mm e 10 camadas de 75mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura do FT de -15°C na entrada do tanque.

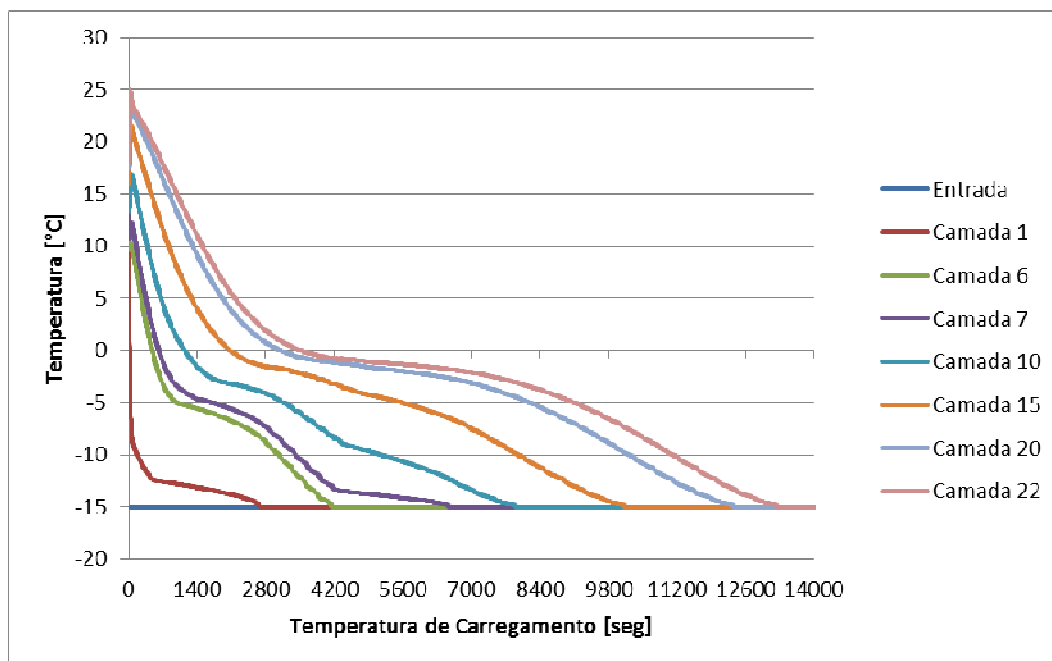


Figura 32 - Distribuição de temperatura na simulação com 2 grupos de esferas (16 camadas de 50 mm e 6 camadas de 75mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura do FT de -15°C na entrada do tanque.

6.3.

Resultados de Grupos de Cápsulas de 75 mm na Base do Leito.

Apresentamos neste item simulações com grupos de cápsulas de 75 mm de diâmetro externo na base do tanque e as variações de temperatura e velocidade de entrada no tanque.

A Tabela 13 mostra o tempo de carregamento utilizando 2 grupos de esferas no tanque por simulação e o resultado dos diferentes tempos de carregamento total, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. Nestas simulações foram utilizadas cápsulas de 75 mm na base do tanque e um grupo cápsulas com diâmetro 50 mm na parte superior do leito.

Tabela 13 - Tempo de carregamento para 2 grupos de esferas de diâmetro de 50 mm na base e 75 mm na parte superior do tanque, utilizando velocidade de $1,8 \cdot 10^{-4}$ e temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Temperatura de entrada [$^{\circ}\text{C}$]	Velocidade de Entrada [m/s]	Tempo total de Resfriamento	
					[s]	[h]
50	300	Superior d=50	-15	0.00018	32408	9.0
75	1200	Inferior d=75				
50	750	Superior d=50	-15	0.00018	31835	8.8
75	750	Inferior d=75				

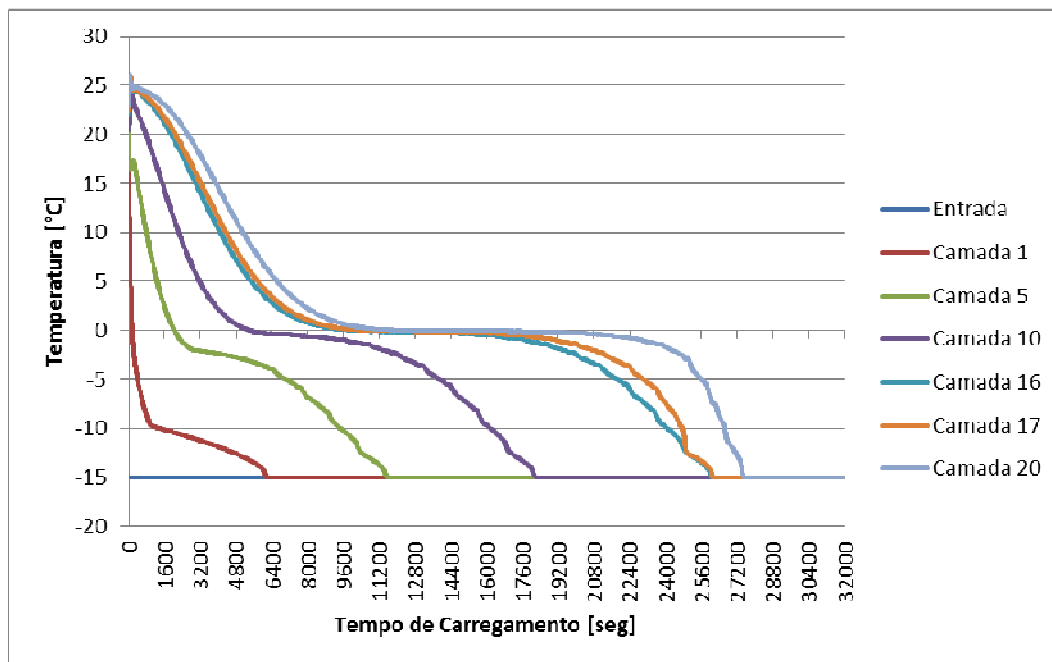


Figura 33 - Distribuição de temperatura na simulação com 2 grupos de esferas (16 camadas de 75 mm e 6 camadas de 50mm) em diversas camadas do tanque. Velocidade de $1,8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do FT de -15°C na entrada do tan que.

A Tabela 14 mostra o tempo de carregamento utilizando 2 grupos de esferas no tanque por simulação e o resultado dos diferentes tempos de carregamento total, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -6°C e com velocidade na base de $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. Nestas simulações foram utilizadas cápsulas de 75 mm na base do tanque e um grupo cápsulas com diâmetro 50 mm na parte superior do leito.

Tabela 14 - Tempo de carregamento para esferas de diâmetro de 75 mm na base e 50 mm na parte superior do tanque utilizando velocidade de $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e temperatura do fluido de trabalho de -6°C na entrada do tanque.

Diâmetro da Esfera	Altura do Grupo	Distribuição do Grupo	Temperatura de entrada	Velocidade de Entrada	Tempo total de Resfriamento	
[mm]	[mm]	[]	[$^{\circ}\text{C}$]	[m/s]	[s]	[h]
50	300	Superior d=50	-6	0.00018	69741	19.4
75	1200	Inferior d=75				
50	750	Superior d=50	-6	0.00018	68398	19.0
75	750	Inferior d=75				

A Tabela 15 apresenta 4 simulações utilizando 2 grupos de esferas no tanque (75 e 50 mm) por simulação e o resultado dos diferentes tempos de carregamento total, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. A variação das simulações neste caso foram as alturas de cada grupo que compõem o leito dentro do tanque.

Tabela 15 - Tempo de carregamento para esferas de diâmetro de 50 mm na base e 75 mm na parte superior do tanque utilizando velocidade de $5,4 \cdot 10^{-6}$ e Temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do tanque.

Diâmetro da Esfera	Altura do Grupo	Distribuição do Grupo	Temperatura de entrada	Velocidade de Entrada	Tempo total de Resfriamento	
[mm]	[mm]	[]	[$^{\circ}\text{C}$]	[m/s]	[s]	[h]
50	300	Superior d=50	-15	0.00054	12952	3.6
75	1200	Inferior d=75				
50	450	Superior d=50	-15	0.00054	12540	3.5
75	1050	Inferior d=75				
50	750	Superior d=50	-15	0.00054	12382	3.4
75	750	Inferior d=75				
50	1200	Superior d=50	-15	0.00054	12123	3.4
75	300	Inferior d=75				

O gráfico da Figura 34 apresenta o tempo de carregamento final de cada camada em função da altura do tanque com diferentes grupos de esferas (diâmetros de 50 e 75 mm). A temperatura do fluido utilizado foi de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ambos na entrada do tanque.

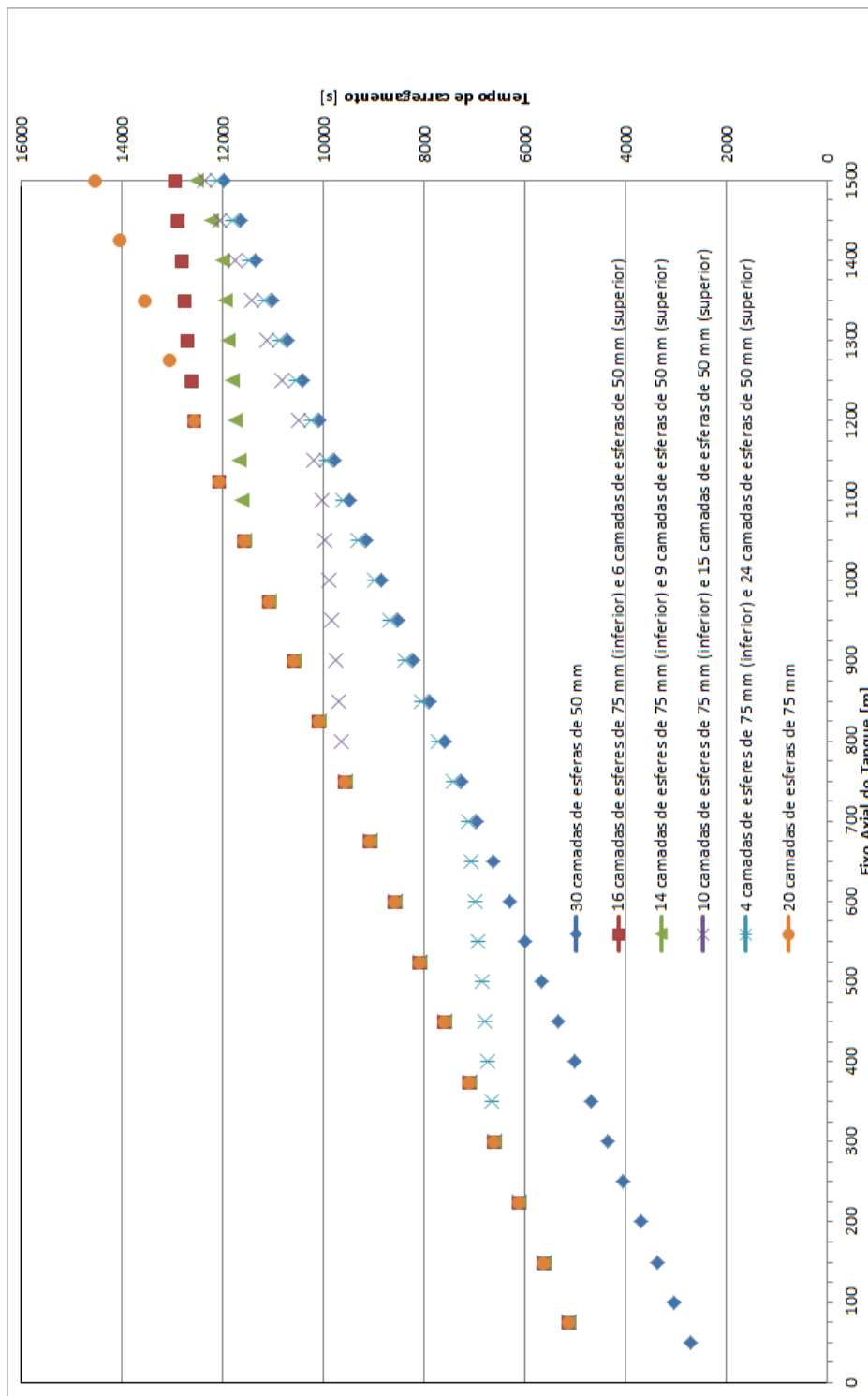


Figura 34 - Gráfico da Distribuição de esferas utilizados na simulação numérica com 2 grupos de esferas (50 e 75 mm), diâmetro de esfera de 75mm na base.

6.4.

Resultados de Grupos de Cápsulas de 100 mm na Base do Leito.

Apresentamos neste item simulações com cápsulas de 100 mm de diâmetro externo na base do tanque e as variações de temperatura e velocidade de entrada no tanque.

A Tabela 16 apresenta simulação utilizando 2 grupos de esferas no tanque (100 e 50 mm) e o resultado do tempo de carregamento total, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $1,8 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Tabela 16 - Tempo de carregamento para esferas de diâmetro de 100 mm na base (velocidade de $1,8 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura do fluido de trabalho a -15°C ambos na entrada do tanque).

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Temperatura de entrada [$^{\circ}\text{C}$]	Velocidade de Entrada [m/s]	Tempo total de Resfriamento	
					[s]	[h]
50	300	Superior d=50	-15	0.00018	33555	9.3
100	1200	Inferior d=100				

A Tabela 17 apresenta simulação utilizando 2 grupos de esferas no tanque (100 e 50 mm) e o resultado do tempo de carregamento total, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -6°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Tabela 17 - Tempo de carregamento para esferas de diâmetro de 100 mm na base (velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura do fluido de trabalho de -6°C ambos na entrada do tanque).

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Temperatura de entrada [$^{\circ}\text{C}$]	Velocidade de Entrada [m/s]	Tempo total de Resfriamento	
					[s]	[h]
50	300	Superior d=50	-6	0.00054	35328	9.8
100	1200	Inferior d=100				

A Tabela 18 apresenta 2 simulações utilizando 2 grupos de esferas no tanque a simulação 11 com cápsulas de 100 e 75 mm e a simulação 12 com cápsulas de 100 e 75 mm em ambas simulações o grupo de cápsulas de 100 mm foi posicionado na base inferior do tanque, foram utilizados nestas simulações temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Tabela 18 - Tempo de carregamento para esferas de diâmetro de 100 mm na base (velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ e Temperatura do fluido de trabalho de -15°C ambos na entrada do tanque).

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Temperatura de entrada [°C]	Velocidade de Entrada [m/s]	Tempo total de Resfriamento	
					[s]	[h]
50	300	Superior d=50	-15	0.00054	15870	4.4
100	1200	Inferior d=100				
75	300	Superior d=75	-15	0.00054	15871	4.4
100	1200	Inferior d=100				

6.5.

Resultados de Simulação utilizando 3 Grupos de Cápsulas, com esferas de D=100 mm na Base do Leito.

Apresentamos neste item simulações com três grupos de cápsulas 100 mm, 75 mm e 50 mm na base, centro e superior respectivamente no interior do tanque. Foi realizada 2 simulações para cada par de temperatura e velocidade de entrada.

A Tabela 19 apresenta a simulações utilizando 3 grupos de esferas no tanque (100, 75 e 50 mm) e o resultado do tempo de carregamento total, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Tabela 19 - Tempo de carregamento com 3 grupos com esferas de diâmetro de 100 mm na base, velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s e temperatura do fluido de trabalho de -15°C na entrada do leito.

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Temperatura de entrada [°C]	Velocidade de Entrada [m/s]	Tempo total de Resfriamento	
					[s]	[h]
50	350	Superior d=50	-15	0.00054	13136	3.6
75	450	Centro =75				
100	700	Inferior d=100				
50	500	Superior d=50	-15	0.00054	12663	3.5
75	600	Centro d=75				
100	400	Inferior d=100				

6.6.

Resultados das Simulações: Taxa de Carregamento

Apresentamos neste item os resultados das simulações referentes à taxa de carregamento. Os resultados foram obtidos através da energia latente armazenada dividido pelo tempo de carregamento final. Segue as Tabelas com os valores:

A Tabela 20 apresenta a taxa de energia armazenada em leito formado com um grupo de esferas, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Tabela 20 - Taxa de energia armazenada em leitos formados por um grupo de esferas, com temperatura de FT de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ na entrada do tanque.

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Taxa de Energia Armazenada [kJ/s]
50	1500	Total d=50	14.28
75	1500	Total d=75	12.71
100	1500	Total d=100	10.95

A Tabela 21 apresenta os resultados da taxa de energia armazenada em leito formado com 2 grupo de esferas (50 mm na base e 75 mm na parte superior) , com temperatura do fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Tabela 21 - Taxa de energia armazenada em leitos formados por 2 grupo de esferas, 50 mm na base e 75 mm no superior, utilizando temperatura de fluido de trabalho de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ na entrada do tanque.

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Taxa de Energia Armazenada [kJ/s]
75	300	Superior d=75	12.54
50	1200	Inferior d=50	
75	750	Superior d=75	13.70
50	750	Inferior d=50	
75	1200	Superior d=75	12.67
50	300	Inferior d=50	

A Tabela 22 apresenta os resultados da taxa de energia armazenada em leito formado com 2 grupo de esferas, 75 mm na base e 50 mm na parte superior, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Tabela 22 - Taxa de energia armazenada em leitos formados por 2 grupo de esferas, base 50 mm, superior 75mm, utilizando temperatura de fluido de trabalho de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s na entrada do tanque.

Diâmetro da Esfera	Altura do Grupo	Distribuição do Grupo	Taxa de Energia Armazenada
[mm]	[mm]	[]	[kJ/s]
50	300	Superior d=50	14.05
75	1200	Inferior d=75	
50	450	Superior d=50	14.40
75	1050	Inferior d=75	
50	750	Superior d=50	14.36
75	750	Inferior d=75	
50	1200	Superior d=50	14.32
75	300	Inferior d=75	

A Tabela 23 apresenta os resultados da taxa de energia armazenada em tanque com 2 grupo de esferas, 100 mm na base e 50 mm na parte superior, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Tabela 23 - Taxa de energia armazenada no tanque formados por 2 grupo de esferas, 100 mm na base e 75mm na região superior, com temperatura de fluido de trabalho de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s na entrada do tanque.

Diâmetro da Esfera	Altura do Grupo	Distribuição do Grupo	Taxa de Energia Armazenada
[mm]	[mm]	[]	[kJ/s]
50	300	Superior d=50	11.81
100	1200	Inferior d=100	
75	300	Superior d=75	11.98
100	1200	Inferior d=100	

A Tabela 24 apresenta os resultados da taxa de energia armazenada em tanque com 3 grupo de esferas, 100 mm na base e 50 mm na parte superior, com temperatura de fluido de trabalho entrando a -15°C e com velocidade na base de $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Tabela 24 - Taxa de energia armazenada no tanque formados por 3 grupos de esferas, 100 mm na base e 75mm na região central e 50 mm na área superior, com temperatura de fluido de trabalho de -15°C e velocidade de $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ na entrada do tanque.

Diâmetro da Esfera [mm]	Altura do Grupo [mm]	Distribuição do Grupo []	Taxa de Energia Armazenada [kJ/s]
50	350	Superior d=50	14.06
75	450	Centro =75	
100	700	Inferior d=100	
50	500	Superior d=50	14.37
75	600	Centro d=75	
100	400	Inferior d=100	

7. Análise dos Resultados

- Comparando os resultados das simulações utilizando um único grupo de esferas (Tabelas: 7, 8 e 9), pode-se verificar que, utilizando a mesma velocidade e temperatura de fluido de trabalho, o tempo de carregamento é menor para esferas menores.
- Podemos verificar, nas Tabelas 6 a 8, que com o aumento da velocidade do fluido de trabalho, o tempo para carregamento se reduz, como era de esperar.
- Comparando as Tabelas 10 e 11, que possuem no tanque a mesma quantidade de esferas, mesma distribuição, o tempo de carregamento calculado foi menor quando o valor da temperatura de entrada do fluido de trabalho foi menor.
- Pode-se verificar, na Tabela 12, que nas simulações utilizando a mesma velocidade e temperatura de entrada no tanque, o tempo de carregamento foi diferente ao se alterar a altura dos grupos de esferas.
- Podemos observar, no gráfico da figura 34, que, no momento em que o fluido de trabalho muda de grupo de esferas, há uma alteração considerável na curva do tempo de carregamento.
- Observando as Tabelas 12 e 13 na qual são utilizadas esferas de 50 e 75 mm, há uma variação no tempo de carregamento quando invertido o volume ocupado pelas esferas, quando o grupo de esferas de 75 mm esta na base o tempo de carregamento é menor quando o mesmo volume é ocupado por esferas de 50 mm na base o tempo é maior.
- Simulando um tanque com três grupos de esferas com $D=100$ mm na base, $D=75$ mm no centro e $D=50$ mm no superior. O tanque com maior porcentagem de esferas menores teve um tempo menor de carregamento.
- Verifica-se na Tabela 20 que a melhor taxa de armazenamento de energia foi para o leito formado exclusivamente com cápsulas de 50 mm de diâmetro.

- Analisando o resultado da Tabela 21, pode-se verificar que a melhor taxa de carregamento foi quando o tanque estava com metade do volume com esferas de 50 mm e a outra metade com esferas de 75 mm de diâmetros.
- Pode-se verificar, na Tabela 24, onde mostra o resultado da simulação de um tanque com três grupos de esferas (diâmetros de 50 , 75 e 100 mm), o valor da taxa de armazenamento é maior com o tanque com grupos de cápsulas de 100 mm na base e 50 mm na parte superior do tanque,

8. Conclusões

Após analisar os resultados das simulações podemos concluir que:

- Se três tanques Ta_1 , Ta_2 e Ta_3 de mesmo volume e abastecido com fluido de trabalho com a mesma temperatura e velocidade na entrada no leito tais que, o tanque Ta_1 seja totalmente preenchido com esferas de diâmetro D_1 , o tanque Ta_2 seja totalmente preenchido com esferas de diâmetro $D_2 \neq D_1$ e o tanque Ta_3 com 2 grupos de esferas D_1 e D_1 , o tempo de carregamento do tanque Ta_3 estará entre o tempo de carregamento dos tanques Ta_1 e Ta_2 .
- Simulando o carregamento de dois tanques Ta_1 e Ta_2 de mesma dimensão, abastecidos com fluido de trabalho com a mesma temperatura e velocidade na entrada no leito. Considerando também duas dimensões de cápsulas com diâmetros D_1 e D_2 , sendo $D_2 > D_1$. Caso o tanque Ta_1 seja preenchido da base até altura L_1 , menor que a altura total do tanque, com esferas de diâmetros D_1 e o restante do tanque preenchido até o topo com esferas de diâmetro D_2 e o tanque Ta_2 preenchido de forma inversa, da base até altura L_1 com esferas D_2 e o restante até o topo de esferas D_1 . O tempo de carregamento do tanque Ta_2 será menor que o tanque Ta_1 independente da altura L_1 .
- Comparando tanques com o mesmo grupo de esferas, o tempo de carregamento é influenciado pela temperatura e velocidade na entrada do tanque. Com velocidades maiores o tempo de carregamento é menor, ocorrendo também para temperaturas menores utilizando os mesmos, a temperatura entrada tem uma influência maior no tempo de carregamento.
- Podemos concluir que, utilizando um determinado arranjo de grupos de esferas em um tanque de armazenamento, podemos ter um valor de taxa de carregamento melhor que os praticados usualmente.

9. Sugestões de Trabalhos Futuros

As sugestões para trabalhos futuros podem-se verificar os seguintes itens:

- Realização de experimentos utilizando a mesma proposta deste trabalho;
- Realização de estudo para descarregamento numérica e experimental e avaliar todo o processo de carregamento e descarregamento;
- Realizar um trabalho similar para um sistema de termoacumulação de aquecimento solar que utilizam cápsulas esféricas.
- Estudo de perda de carga para diferentes diâmetros de esferas;
- Estudo técnico econômico da viabilidade de utilizar em tanque de termoacumulação com cápsulas esféricas 2 ou três grupos de esferas.

10. Referências Bibliográficas

AMIN N.A.M., BRUNO F.; Belusko M.; **Effective thermal conductivity for melting in PCM encapsulated in a sphere**, Applied Energy 122 ,280-287, 2014.

ARTECONI A.; Hewitt, N.J.; Polonara F. ; **State of the art of thermal storage for demand-side management**, Applied Energy 93, 371–389, 2012.

ASHRAE, **Design guide for cool thermal storage**, ASHRAE Transaction, Atlanta, Georgia, 1994.

BANSAL, N.K.; BUDDHI, D.; **An analytical study of a latent heat storage system in a cylinder**, Energy Convers. Mgmt. Vol. 33, No. 4, pp. 235-242, 1992.

BÉDÉCARRATS, J.P.; CASTAING-LASVIGNOTTES, J.; DUMAS J.P.; **Study of a phase change energy storage using spherical capsules. Part I: Experimental results**; Energy Conversion and Management 50, 2527–2536, 2009.

BÉDÉCARRATS, J.P.; CASTAING-LASVIGNOTTES, J.; DUMAS J.P.; **Study of a phase change energy storage using spherical capsules. Part II: Numerical modeling**; Energy Conversion and Management 50, 2537–2546, 2009.

BEEK J., **Design of packed catalytic reactor. Advanced in Chemical Engineering** 3 , 203-271, 1962.

CHAICHANA, WILLIAN, W.S. , LU AYE, **An ice thermal storage computer model**, Applied Thermal Engineering 21, 1769-1778, 2001.

CHAN C.W. , TAN F.L., **Solidification inside a sphere—an experimental study**, International Communications in Heat and Mass Transfer 33, 335–341, 2006.

CHERALATHAN M., VELRAJ R., RENGANARAYANAN S., **Heat transfer and parametric studies of an encapsulated phase change material based cool thermal energy storage system**, Journal of Zhejiang University, 7(11):1886-1895, 2006.

CHEN, SIH-LI et al.; **An experimental investigation of cold storage in an encapsulated thermal storage tank**, Experimental Thermal and Fluid Science 23, 133-144, 2000.

CHERALATHAN, M.; VELRAJ, R.; RENGANARAYANAN, S.; **Effect of porosity and the inlet heat transfer fluid temperature**, Heat Mass Transfer, 43:833–842, 2007.

- CHO, KEUMNAM; CHOI, S.H.; **Thermal characteristics of paraffin a spherical capsule during freezing and melting processes**, International Journal of Heat and Mass Transfer 43, 3183-3196, 2000.
- FERNANDES D., PITIÉ F. et al.; **Thermal energy storage: “How previous findings determine current research priorities”**, Energy 39, 246-257, 2012.
- DULLIEN, F. A. L.; **Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure**, New York: Academic, 1979.
- EAMES, IAN W.; ADREF, K. T.; **Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems**, Applied Thermal Engineering 22, 733–745, 2002.
- EIGHNAM, R. I. et al., **An experimental study of freezing and melting of water inside spherical capsules used in thermal energy storage systems**, Ain Shams Engineering Journal, 3, 33–48, 2012.
- ETTOUNEY, H. et al.; **Heat transfer enhancement in energy storage in spherical capsules filled with paraffin wax and metal beads**, Energy Conversion and Management 47, 211–228, 2006.
- EVAPCO, INC.; **Thermal Ice Storage, Application & Design Guide**, 2007.
- HASNAIN, S. M.; **Review on sustainable thermal energy storage technologies, part II: Cool Thermal Storage**, Energy Convers. Mgmt Vol. 39, No. 11, pp. 1139-1153, 1998.
- ISMAIL, K.A.R.; QUISPE, O.C.; HENRIQUEZ J.R.; **A Numerical and experimental study on a parallel plate ice bank**, Applied Thermal Engineering 19, 163-193, 1999.
- ISMAIL, K.A.R.; HENRIQUEZ, J.R.; **Solidification of pcm inside a spherical capsule**, Energy Conversion & Management 41, 173-187, 2000.
- ISMAIL, K.A.R.; HENRIQUEZ, J.R.; **Numerical and experimental study of spherical capsules packed bed latent heat storage system**, Applied Thermal Engineering 22, 1705–1716, 2002.
- ISMAIL, K.A.R.; HENRIQUEZ, J.R.; SILVA, T.M., **A parametric study on ice formation inside a spherical capsule**, International Journal of Thermal Sciences 42, 881–887, 2003.
- ISMAIL, K.A.R.; MORAES, R.I.R., **A numerical and experimental investigation of different containers and PCM options for cold storage modular units for domestic applications**, International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 4195–4202, 2009.
- KOUSKSOU, T et al.; **Dynamic modeling of the storage of an encapsulated ice tank**, Applied Thermal Engineering 25, 1534–1548, 2005.

KOUSKSOU, T et al.; **Second law analysis of latent thermal storage for solar system**, Solar Energy Materials & Solar Cells 91, 1275–1281, 2007.

MACKIE, E.L, REEVES, G.; **Stratified Chilled-Water Storage Design Guide**, Electric Power Research Institute, 1988.

MACPHEE, D.; DINCER I.; BEYENE A. , **Numerical simulation and exergetic performance assessment of charging process in encapsulated ice thermal energy storage system**, Energy 41, 491 e 498, 2012.

MARCEL, L., **Contact melting of a phase change material inside a heated parallelepiped capsule**, Energy Conversion & Management 42, 35-47, 2001.

MATSUMOTO, K. et al., **Continuous ice slurry formation using a functional fluid for ice storage**, International Journal of Refrigeration 27, 73–81, 2004.

MORAES R., **Estudo Numérico e Experimental do Armazenamento de Energia por Calor Latente em um Leito Fixo**, 2012

MUELLER, G. E.; **Numerically packing spheres in cylinders**, Powder Technology 159, 105 – 110, 2005.

NARASIMNHAN N. L. et al., **Numerical studies on the performance enhancement of an encapsulated thermal storage unit**, International Journal of Thermal Sciences 84, 184 e 195, 2014.

NELSON, J.E.B; BALAKRISHNAN, A.R.; MURTHY S. S., **Experiments on stratified chilled-water tanks**, International Journal of Refrigeration 22, 216–234, 1999.

NELSON K. P.; **Ice Slurry Generator**, 1998.

NOBREGA L.;BRAGA L., **A numerical analysis of thermal energy storage packed beds**, 19th International Congress of Mechanical Engineering, 2007.

OKA, M.; CAREY, V.P.; **A unified Treatment of the Direct Contact Melting Processes, in Several Geometric Cases**, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 23, No. 2, pp. 187-202, 1996.

ORÓ E. et al.; **Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications**, Applied Energy 99, 513–533, 2012.

REGIN, A.F.; SOLANKI, S.C.; SAINI, J.S.; **Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations**, Renewable Energy 31, 2025–2041, 2006.

SHARMA ATUL; V.V. TYAGI et al.; **Review on thermal energy storage with phase change materials and applications**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 318–345, 2009.

YAU,Y.H.;RISMANCHI B.; **A review on cool thermal storage technologies and operating strategies**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 787–797, 2012.

TYAGI V.V., PANWAR N.L., RAHIN N.A., **Review on solar air heating system with and without thermal energy storage system**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 2289– 2303, 2012.

ZOU, R.P,YU, A.B., **The packing of spheres in a cylindrical container: the thickness effect**, Chemical Engineering Science, Vol. 50, n° 9, pp. 1504-1507,1995.

WANG, J.; OUYANG, Y.; CHEN, G.; **Experimental study on charging processes of a cylindrical heat storage capsule employing multiple-phase-change materials**, Int. J. Energy Res. ; 25:439-447, 2001.

WU J. et al.; **Population balance modeling for the charging process of a PCM cold energy storage tank**; International Journal of Heat and Mass Transfer 85, 647–655, 2015.

WU, S.; FANG G.; LIU X.; **Thermal performance simulations of a packed bed cool thermal energy storage system using n-tetradecane as phase change material**, International Journal of Thermal Sciences 49, 1752e1762, 2010.

WU, S.; FANG G.; LIU X.; **Dynamic discharging characteristics simulation on solar heat storage system with spherical capsules using paraffin as heat storage material**, Renewable Energy 36, 1190-1195, 2011.

11. Apêndice

Neste capítulo serão apresentadas as resoluções de algumas equações e os comandos de programação utilizada para as simulações.

11.1. Resolução da Equação de Transferência de Calor entre FT e Camada de Esferas.

$$\lambda_{mmf} \rho_{mmf} \frac{\partial \forall}{\partial t} = -4\pi \lambda_{mmf} \rho_{mmf} R_{fs}^2 \frac{\partial R_{fs}}{\partial t} \quad (11.1)$$

$$4\pi \lambda_{mmf} \rho_{mmf} r_{fs}^2 \frac{\partial r_{fs}}{\partial t} = \frac{(T_{fs} - T_{ftx})}{\frac{1}{4\pi k_{mmf}} \left[\frac{1}{r_{fs}} - \frac{1}{r_i} \right] + \frac{1}{4\pi k_{cap}} \left[\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e} \right] + \frac{1}{4\pi h r_e}} \quad (11.2)$$

$$\lambda_{mmf} \rho_{mmf} r_{fs}^2 \frac{\partial r_{fs}}{\partial t} = \frac{(T_{fs} - T_{ftx})}{\frac{1}{k_{mmf}} \left[\frac{1}{r_{fs}} - \frac{1}{r_i} \right] + \frac{1}{k_{cap}} \left[\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e} \right] + \frac{1}{h r_e}} \quad (11.3)$$

$$\lambda_{mmf} \rho_{mmf} r_{fs}^2 \left(\frac{1}{k_{mmf}} \left[\frac{1}{r_{fs}} - \frac{1}{r_i} \right] + \frac{1}{k_{cap}} \left[\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e} \right] + \frac{1}{h r_e} \right) \partial r_{fs} = (T_{fs} - T_{ftx}) \partial t \quad (11.4)$$

$$\lambda_{mmf} \rho_{mmf} \left(\frac{1}{k_{mmf}} \left[r_{fs}^2 \frac{1}{r_{fs}} - r_{fs}^2 \frac{1}{r_i} \right] + \frac{1}{k_{cap}} \left[r_{fs}^2 \frac{1}{r_i} - r_{fs}^2 \frac{1}{r_e} \right] + r_{fs}^2 \frac{1}{h r_e} \right) \partial r_{fs} = (T_{fs} - T_{ftx}) \partial t \quad (11.5)$$

$$\lambda_{mmf} \rho_{mmf} \left(\frac{1}{k_{mmf}} \left[r_{fs} - \frac{r_{fs}^2}{r_i} \right] + \frac{1}{k_{cap}} \left[\frac{r_{fs}^2}{r_i} - \frac{r_{fs}^2}{r_e} \right] + \frac{r_{fs}^2}{h r_e} \right) \partial r_{fs} = (T_{fs} - T_{ftx}) \partial t \quad (11.6)$$

Multiplicando por k_{mmf}

$$\left(\left[r_{fs} - \frac{r_{fs}^2}{r_i} \right] + \frac{k_{mmf}}{k_{cap}} \left[\frac{r_{fs}^2}{r_i} - \frac{r_{fs}^2}{r_e} \right] + \frac{k_{mmf}}{h r_e} r_{fs}^2 \right) \partial r_{fs} = \frac{k_{mmf}}{\lambda_{mmf} \rho_{mmf}} (T_{fs} - T_{ftx}) \partial t \quad (11.7)$$

Integrando a equação:

$$\left[\frac{r_{rf}^2}{2} - \frac{r_{fs}^3}{3r_i} \right] + \frac{k_{mmf}}{k_{cap}} \left[\frac{r_{fs}^3}{3r_i} - \frac{r_{fs}^3}{3r_e} \right] + \frac{k_{mmf}}{3h} \frac{r_{fs}^3}{r_e} + C = \frac{k_{mmf}}{\lambda_{mmf} \rho_{mmf}} (T_{fs} - T_{fix}) \partial t \quad (11.8)$$

Condição de contorno:

$$t = 0, \quad r_i = r_{fs} \quad (11.9)$$

Então:

$$\left[\frac{r_{rf}^2}{2} - \frac{1}{3} \right] + \frac{k_{mmf}}{k_{cap}} \left[\frac{1}{3} - \frac{r_{fs}^3}{3r_e} \right] + \frac{k_{mmf}}{3h} \frac{r_{fs}^3}{r_e} + C = 0 \quad (11.10)$$

$$C = \left[\frac{1}{3} - \frac{r_{rf}^2}{2} \right] - \frac{k_{mmf}}{k_{cap}} \left[\frac{1}{3} - \frac{r_{fs}^3}{3r_e} \right] - \frac{k_{mmf}}{3h} \frac{r_{fs}^3}{r_e} \quad (11.11)$$

Substituindo na equação:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{r_{rf}^2}{2} - \frac{r_{fs}^3}{3r_i} \right] + \frac{k_{mmf}}{k_{cap}} \left[\frac{r_{fs}^3}{3r_i} - \frac{r_{fs}^3}{3r_e} \right] + \frac{k_{mmf}}{3h} \frac{r_{fs}^3}{r_e} + \left[\frac{1}{3} - \frac{r_{rf}^2}{2} \right] - \frac{k_{mmf}}{k_{cap}} \left[\frac{1}{3} - \frac{r_{fs}^3}{3r_e} \right] - \frac{k_{mmf}}{3h} \frac{r_{fs}^3}{r_e} = \\ & = \frac{k_{mmf}}{\lambda_{mmf} \rho_{mmf}} (T_{fs} - T_{fix}) \partial t \end{aligned} \quad (11.12)$$

11.2. Linhas de Programação para as Simulações.

```
% Modelagem de um Sistema de Termoacumulação em Encapsulados Esféricos
% Dados de Entrada
Tft = -15; % Temperatura Fluido de Trabalho [°C]
Tft(1:100000,1) = Tft; % Temperatura Fluido de Trabalho [°C]
Tfti = -15; % Temperatura Fluido de Trabalho [°C]
Raio_ext = 0.025; % Raio Externo da Cápsula [m]
v_ent_ft = 5.40E-04; % Vazão do Fluido de Trabalho [kg/s]
Altq = 1.5; % Altura do Tanque [m]
Tin = 25; % Temperatura Inicial [°C]
Tmf = 0.0; % Temperatura de Mudança de Fase [°C]
e = 0.002; % Espessura da Cápsula [m]
Raio_tq = 0.5; % Raio do Tanque [m]
epsilon_p = 0.400 + 0.0100 * (exp(10.686 * (Raio_ext / Raio_tq)) - 1); % Poros. Pobre
epsilon_d = 0.372 + 0.002 * (exp(15.306 * (Raio_ext / Raio_tq)) - 1); % Poros. densa
epsilon = (epsilon_p + epsilon_d) / 2; % Porosidade média
Rho_MMF_l = 1000; % Massa Específica do MMF Líquido [kg/m³]
Rho_MMF_s = 917.8; % Massa Específica do MMF Sólido [kg/m³]
Rho_ft = 1056; % Massa Específica do Fluido de Trabalho [kg/m³]
L = 333600; % Calor Latente de Solidificação [J/kg]
N_r = 50; % Número de Dr [ ]
kcap = 0.35; % Coefic. de Transferência de Calor da Cápsula [w/mk]
kft = 0.485; % Coefic. de Transferência de Calor do Fluido de Trabalho [w/mk]
kMMF_l = 0.566; % Coeficiente de Transferência de Calor do MMF Líquido [w/mk]
kMMF_s = 2.45; % Coeficiente de Transferência de Calor do MMF Sólido [w/mk]
c_p_MMF_l = 4180; % Calor Específico MMF Líquido [J/kg*k]
c_p_MMF_s = 2040; % Calor Específico MMF Sólido [J/kg*k]
c_p_ft = 3598; % Calor Específico Fluido de Trabalho [J/kg*k]
mi_ft = 0.006457; % Calor Específico Fluido de Trabalho [J/kg*k]
Delta_t = 1; % Delta t [s]
Area_esf_ex = 4 * pi * (Raio_ext^2); % Área externa da Cápsula [m²]
```

```

Raio_int = Raio_ext-e ;%Raio interno da Cápsula [m]
Area_esf_in = 4*pi*(Raio_int^2) ;%Área externa da Cápsula [m²]
Vol_ext=(4/3)*pi*(Raio_ext^3) ;%Volume externo da Cápsula [m³]
Vol_int=(4/3)*pi*(Raio_int^3) ;%Volume interno da Cápsula [m³]
Atanque=pi*(Raio_tq^2) ;%Área transversal do tanque [m²]
Voltanque=Atanque*Altq ;%Área transversal do tanque [m²]
Vol_esferas= (1-epsilon)*Voltanque ;%Volume Total de Cápsula [m³]
N_esferas_tot=Vol_esferas/Vol_ext ;
N_esferas=N_esferas_tot/(Altq/(2*Raio_ext)) ;
N_esferas=fix(N_esferas) ;
N_esferas_tot=fix((N_esferas)*(Altq/(2*Raio_ext))) ;
Vol_esferas= Vol_ext*N_esferas_tot ;
Vol_MMF=N_esferas_tot*Vol_int ;
epsilon=1-(Vol_esferas/Voltanque) ;
Volcamada= Atanque.*2*Raio_ext ;
Porcentagem_MMF= (Vol_MMF/Voltanque)*100 ;
Vft = (v_ent_ft*Atanque*Rho_ft) ;%Velocidade de entrada do tanque [m/s]
v_med_ft=v_ent_ft/epsilon ;%Velocidade Média do tanque [m/s]
M_MMF_s=Vol_int* Rho_MMF_l ;%Massa de MMF Líquido [kg]
M_MMF_l=Vol_int* Rho_MMF_s ;%Massa de MMF Sólido [kg]
Alpha_MMF_l =kMMF_l/(Rho_MMF_l*c_p_MMF_l) ;%Difusividade Térmica
do MMF Líquido [m²/s]
Alpha_MMF_s =kMMF_s/(Rho_MMF_s*c_p_MMF_s) ;%Difusividade Térmica
do MMF Sólido [m²/s]
Delta_r =Raio_int/N_r ;%Delta r [m]
Di=[Delta_r:Delta_r:Raio_int] ;%Di [m]
Re= (Rho_ft*v_med_ft*(2*Raio_ext))/mi_ft ;% #Reynolds [ ]
Pr=(c_p_ft*mi_ft)/kft ;%Número de Prantl [ ]
Nu=(3.22*(Re^(1/3))*(Pr^(1/3)))+(0.117*(Re^(0.8))*(Pr^(0.8))) ;%#Nusselt [ ]
h_c =(kft*Nu)/(2*Raio_ext) ;%Coeficiente de Convecção Térmica [W/m²K]
Res_cap =((1/Raio_int)-(1/Raio_ext))*(1/(4*pi*kcap)) ;%Resis. Térm. Cáp
[K/W]
Res_conv =1/((4*pi*h_c*(Raio_ext^2))) ;%Resis. Térmica de Convecção [K/W]
Res_total =Res_cap+Res_conv ;%Resistência Térmica de Convecção [K/W]

```

```

Lc=Vol_ext/Area_esf_ex ;%Comprimento característico [ ]
Bi_l=(h_c*Lc)/kMMF_l ;%Número de Biot [ ]
ri=Delta_r:Delta_r:Raio_int ;
rii=0:Delta_r:(Raio_int-Delta_r) ;
Vol_ri=(4/3)*pi*(ri.^3) ;
Vol_rii=(4/3)*pi*(rii.^3);
Delta_Vol_r= Vol_ri-Vol_rii;
A_ft =(2*Delta_t*Vft)/(Rho_ft*Volcamada*epsilon) ;
B_ft =2/(Rho_ft*c_p_ft*Volcamada*epsilon) ;
E_MMF_l=(-kMMF_l*Area_esf_in*Res_total)/Delta_r ;
E_MMF_s=(-kMMF_s*Area_esf_in*Res_total)/Delta_r ;
F_MMF_l=(2*Alpha_MMF_l*Delta_t)/Delta_r ;%Fator F Difusividade Térmica
do MMF Líquido [ ]
F_MMF_s=(2*Alpha_MMF_s*Delta_t)/Delta_r ;%Fator F Difusividade Térmica
do MMF Sólido [ ]
G_MMF_l=Alpha_MMF_l*(Delta_t/Delta_r.^2) ;%Fator G Difusividade
Térmica do MMF Líquido [ ]
G_MMF_s=Alpha_MMF_s*(Delta_t/Delta_r.^2) ;%Fator G Difusividade
Térmica do MMF Sólido [ ]
tt=1 ;
T_out(tt,1)=Tin ;
T_ftx(tt,N_r+3)=(Tft(tt,1)+T_out(tt,1))/2 ;%Dist. de Temp. Inic. na Cápsula [ ]
T_ext(tt,N_r+2)=Tin ;
T_int(tt,N_r+1)=Tin ;
Tn(tt,N_r:-1:1)=Tin ;
Tl(tt,1)=Tin ;
Q(tt,1)=((T_int(tt,N_r+1)-T_ftx(tt,N_r+3))/Res_total) ;
while Tn(tt,N_r/2)>0 ;
tt=tt+1 ;
N=N_r-1;
T_ftx(tt,N_r+3)=(Tft(tt-1,1)+T_out(tt-1,1))/2 ;% Temp. méd. do FT [°C ]
T_int(tt,N_r+1)=((E_MMF_l*Tn(tt-1,N_r))-T_ftx(tt-1,N_r+3))/(E_MMF_l-1);
%[°C]
T_ext(tt,N_r+2)=(T_int(tt,N_r+1)-(Q(tt-1,1)*Res_cap)) ;% [°C]

```

```

Tn(tt,N_r)=((Tn(tt-1,N_r)-Tn(tt-
1,N_r).*F_MMF_1.*((1/(N_r.*Delta_r)))+T_int(tt,N_r+1).*G_MMF_1 ))+(Tn(tt-
1,N_r)*G_MMF_1))/(1+F_MMF_1.*(1/(N_r.*Delta_r))+2*G_MMF_1 ) ;
TV(tt,N_r)= (Tn(tt,N_r)*Delta_Vol_r(1,N_r)) ;
while N>1 ;
Tn(tt,N)=((Tn(tt-1,N)-
Tn(tt,N).*F_MMF_1.*((1/(N.*Delta_r)))+Tn(tt,N+1).*G_MMF_1)+(Tn(tt-1,N)*
G_MMF_1))/(1+F_MMF_1.*(1/(N.*Delta_r))+2*G_MMF_1 ) ;%Distribuição
de Temperatura Inicial na Cápsula [ ]
TV(tt,N)=Tn(tt,N)*Delta_Vol_r(1,N);
N=N-1 ;
end;
Tn(tt,1)=((Tn(tt-1,1)-
Tn(tt,1).*F_MMF_1.*((1/(1.*Delta_r)))+Tn(tt,2).*G_MMF_1)+(Tn(tt-1,1)*
G_MMF_1))/(1+F_MMF_1.*(1/(1.*Delta_r))+2*G_MMF_1 ) ;
TV(tt,1)=Tn(tt,1)*Delta_Vol_r(1,1) ;
T1(tt,1)=(T1((tt-1),1)+24*G_MMF_1.*Tn(tt,1))/(1+24*G_MMF_1) ;
T=[T1,Tn,T_int(1:tt,N_r+1),T_ext(1:tt,N_r+2),T_ftx(1:tt,N_r+3)] ;
Tmed=sum(TV,2)/Vol_int;
Tmed(1,1)=Tin;
Tn(tt,1:N_r)= Tmed(tt,1);
Q(tt,1)=((T_int(tt,N_r+1)-T_ftx(tt,N_r+3))/Res_total ) ;
T_out(tt,1)=A_ft*(Tft(tt-1)-T_out(tt-1,1))+(B_ft*N_esferas*Q(tt,1))- Tft(tt-1,1)+
T_out(tt-1,1)+Tft(tt,1) ;
end;
Raio_MMF(1,1)=Raio_int;
T_ftx_mf(1,1)=T_ftx(tt,N_r+3) ;% Temp. média do fluido de trabalho [ ]
Q_MMF_mf(1,1)=Q(tt,1) ;
T_ext_mf(1,1)=T_ext(tt,N_r+2) ;
T_int_mf(1,1)=T_int(tt,N_r+1) ;
Vol_MMF_s(1,1)=0 ;
jj=1 ;
aa=tt ;
T_out_mf(jj,1)=T_out(tt,1) ;

```

```

Res_MMF(jj,1)=0;
while Raio_MMF>0.05*Raio_int;
jj=jj+1 ;
aa=aa+1;
ga(jj,1)=tt;
T_ftx_mf(jj,1)=(Tft(aa-1)+T_out_mf(jj-1,1))/2 ;%Temp. média do FT [°C]
Q_MMF_mf(jj,1)=(T_ftx_mf(jj,1)-T_int_mf(1,1)) /(Res_total +Res_MMF(jj-
1,1)) ;
T_ext_mf(jj,1)=T_ftx_mf(jj,1)-(Q_MMF_mf(jj,1)*Res_conv) ;
T_int_mf(jj,1)=(T_ext_mf(jj,1)-(Q_MMF_mf(jj,1)*Res_cap)) ;
Vol_MMF_s(jj,1)=(-Q_MMF_mf(jj,1)/(L*Rho_MMF_s))+Vol_MMF_s(jj-1,1) ;
Vol_MMF_l(jj,1)=Vol_int-Vol_MMF_s(jj,1) ;
Raio_MMF(jj,1)=((3/(4*pi))*Vol_MMF_l(jj,1)).^(1/3);
Res_MMF(jj,1)=1/((4*pi*kMMF_s))*(1/Raio_MMF(jj,1)-(1/Raio_int)) ;%Resist.
Térmica do MMF [K/w]
T_out_mf(jj,1)=A_ft*(Tft(aa-1)-T_out_mf(jj-1,1))-
(B_ft*N_esferas*Q_MMF_mf(jj,1))+(Tft(aa-1,1)+T_out_mf(jj-1,1)-Tft(aa,1)) ;
end ;
vv=((((Raio_MMF.^2)/(2*kMMF_s))-(Raio_MMF.^3/(3*kMMF_s*Raio_int))
+(Raio_MMF.^3/(3*kcap*Raio_int))-(Raio_MMF.^3/(3*kcap*Raio_ext)))+
(Raio_MMF.^3/(3*Raio_ext.^2*h_c))-(((Raio_int.^2)/(2*kMMF_s))-
(Raio_int.^3/(3*kMMF_s*Raio_int)))+(Raio_int.^3/(3*kcap*Raio_int))-
(Raio_int.^3/(3*kcap*Raio_ext)))+(Raio_int.^3/(3*Raio_ext.^2*h_c))))
*L*Rho_MMF_s ;
kk=1 ;
bb=jj+tt ;
T_out_s(kk,1)=T_out_mf(jj,1) ;
T_ftx_s(kk,N_r+3)= (Tft(bb,1)+T_out_s(kk,1))/2 ;%Distribuição de Temp. Inic.
Cápsula [°C ]
T_ext_s(kk,N_r+2)=T_ext_mf(jj,1) ; %[°C]
T_int_s(kk,N_r+1)= T_int_mf(jj,1) ; %[°C]
Tn_s(kk,N_r:-1:1)= T_int_mf(jj,1) ; %[°C]
Tl_s(kk,1)=Tmf ; %[°C]
Q_s(kk,1)=Q_MMF_mf(jj,1);

```

```

while T_out_s(kk,1)>Tfti ;
kk=kk+1;
bb=bb+1;
N_s=N_r-1;
T_ftx_s(kk,N_r+3)= (Tft(aa-1)+T_out_s(kk-1,1))/2 ;%Temp. méd. do FT [°C]
T_int_s(kk,N_r+1)= ((E_MMF_s*Tn_s(kk-1,N_r))-T_ftx_s(kk-1,N_r+3))
/(E_MMF_s-1);
T_ext_s(kk,N_r+2)= T_int_s(kk,N_r+1)-(Q_s(kk-1,1)*Res_cap) ;
Tn_s(kk,N_r)=((Tn_s(kk-1,N_r)-Tn_s(kk-
1,N_r).*F_MMF_s.*((1/(N_r.*Delta_r))) +T_int_s(kk,N_r+1).*G_MMF_s
)+(Tn_s(kk-1,N_r)*G_MMF_s))/
(1+F_MMF_s.*(1/(N_r.*Delta_r))+2*G_MMF_s ) ;
TV_s(kk,N_r)=(Tn_s(kk,N_r)*Delta_Vol_r(1,N_r));
while N_s>1 ;
Tn_s(kk,N_s)=((Tn_s(kk-1,N_s)-
Tn_s(kk,N_s).*F_MMF_s.*((1/(N_s.*Delta_r)))+Tn_s(kk,N_s+1).*G_MMF_s
)+(Tn_s(kk-
1,N_s)*G_MMF_s))/(1+F_MMF_s.*(1/(N_s.*Delta_r))+2*G_MMF_s
);%Distribuição de Temperatura Inicial na Cápsula [ ]
TV_s(kk,N_s)=Tn_s(kk,N_s)*Delta_Vol_r(1,N_s) ;
N_s= N_s-1 ;
end;
Tn_s(kk,1)= ((Tn_s(kk-1,1)-
Tn_s(kk,1).*F_MMF_s.*((1/(1.*Delta_r)))+Tn_s(kk,2).*G_MMF_s )+(Tn_s(kk-
1,1)*G_MMF_s))/(1+F_MMF_s.*(1/(1.*Delta_r))+2*G_MMF_s ) ;
T1_s(kk,1)= (T1_s(kk-1,1)+24*G_MMF_s.*Tn_s(kk,1))/(1+24*G_MMF_s) ;
T_s=[T1_s,Tn_s,T_int_s(1:kk,N_r+1),T_ext_s(1:kk,N_r+2),T_ftx_s(1:kk,N_r+3);
Q_s(kk,1) = (((T_int_s(kk,N_r+1)-T_ftx_s(kk,N_r+3))/Res_total )) ;
T_out_s(kk,1)=A_ft*(Tft(bb-1)-T_out_s(kk-1,1))+(-B_ft*N_esferas*Q_s(kk,1))+
(Tft(bb-1,1)+T_out_s(kk-1,1)-Tft(bb,1)) ;
end;
tempo=tt+jj+kk
tempo=0:tempo;
tempo=tempo';

```

```
Tft(1:100000,1)=[T_out;T_out_mf;T_out_s;Tft((tt+jj+kk+1):100000,1)] ;  
tadm= (tempo*v_ent_ft/Altq);
```