

ANÁLISE DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA COM CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO EM UM LEITO EMPACOTADO DE PARTÍCULAS AGLOMERADAS



Ademir Ferreira da Rocha
Jornandes Dias da Silva



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Ademir Ferreira da Rocha
Jornandes Dias da Silva

Análise do Armazenamento de Energia Térmica com Carregamento e Descarregamento em um Leito
Empacotado de Partículas Aglomeradas

1ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

1ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Rocha, Ademir Ferreira da
R672A Análise do Armazenamento de Energia Térmica com Carregamento e Descarregamento
em um Leito Empacotado de Partículas Aglomeradas
/ Ademir Ferreira da Rocha. Jornandes Dias da Silva. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2024

62 f.: il

DOI: 10.37423/2024.edcl1040

ISBN: 978-65-5367-568-1

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. leito-empacotado 2. ,energia-térmica 3. ,armazenamento I. Rocha, Ademir Ferreira da II. Silva,
Jornandes Dias da III. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2024.edcl1040>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

MSc Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

MSc Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

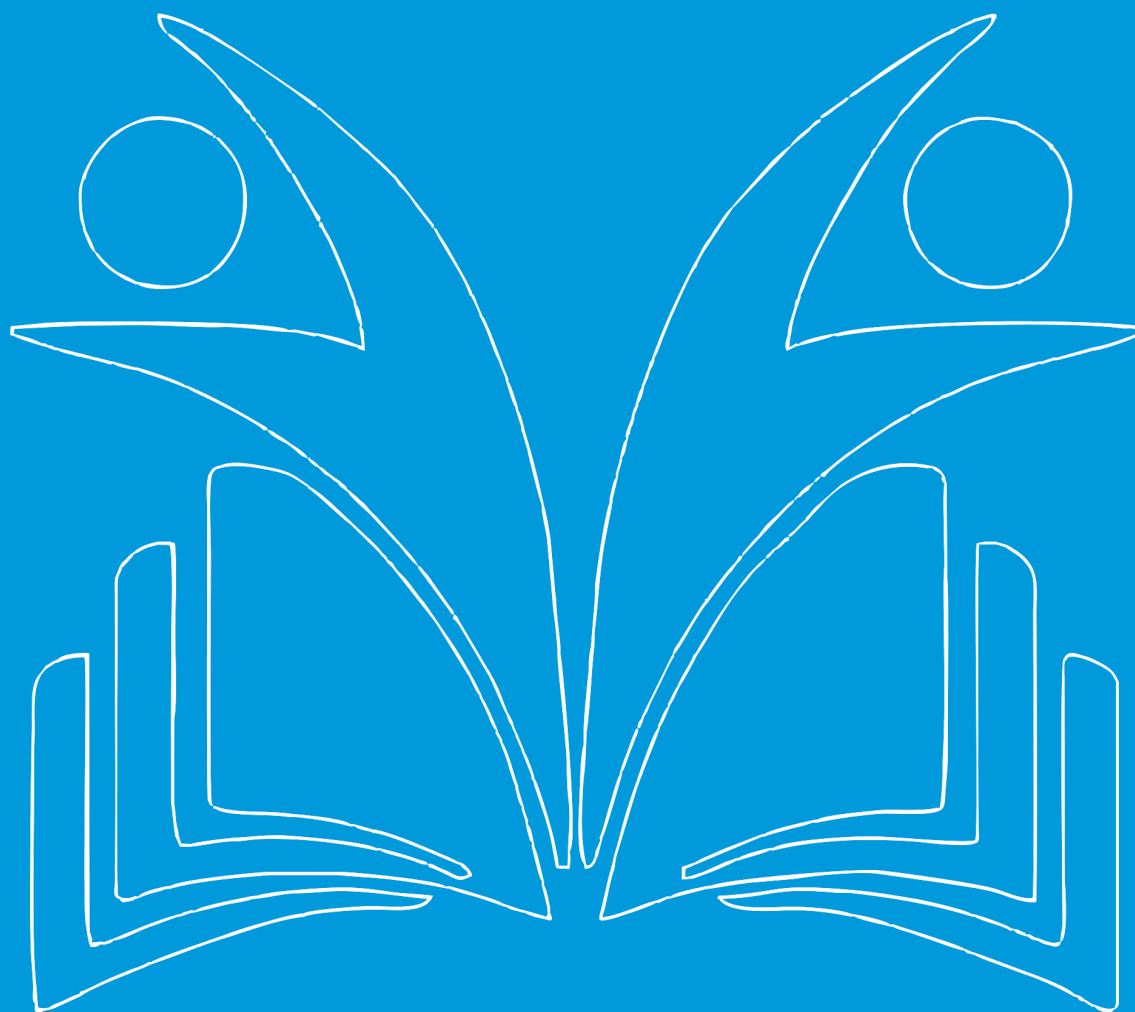
Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos



10.37423/2024.edcl1040



PREFÁCIO

A segurança energética e a mitigação das alterações climáticas são dois desafios críticos para um futuro sustentável. A procura de energia global está a crescer rapidamente e a maioria ainda depende dos combustíveis fósseis. Os sistemas de armazenamento de energia térmica (TES) têm uma importância potencial no que diz respeito à taxa de consumo de energia no mundo. O desempenho térmico do sal fundido (MS) em espuma de células abertas inclui TES e pode ser dividido em três áreas, como materiais de calor sensível (sólido e água), calor latente (materiais de mudança de fase (PCMs)) e termoquímico (reações químicas reversíveis endotérmicas). O conceito de armazenamento de energia pode ser usado para investigar as características de transferência de calor entre as partículas MS e a fase fluida com base no modelo de fase sólida contínua. Estas características de transferência de calor estão focadas no TES dentro das partículas de MS e na fase fluida. A modelagem matemática para a região de aquecimento do sistema de leito empacotado de partículas concentradas deste trabalho é desenvolvida com base no modelo de duas fases, ou seja, em nosso trabalho modelamos uma equação governante para as partículas MS (sólidos) que se comportam como um meio contínuo e equação governante para a fase fluida. As equações governantes do modelo bifásico deste trabalho são acopladas através do fluxo de transferência de calor sólido-fluido. Foram desenvolvidos trabalhos para avaliar os resultados dos perfis de carga e descarga, bem como o tempo de carga e descarga do armazenamento térmico no leito aglomerado. Além disso, o uso de alguns parâmetros físicos como a condutividade térmica efetiva e o coeficiente de transferência de calor fluido-sólido tem sido utilizado para verificar o impacto na carga e descarga do armazenamento térmico. Uma discussão dos resultados do presente trabalho será feita com os resultados de outros autores. Assim, é possível validar os resultados simulados do presente trabalho utilizando dados experimentais da literatura.

Ademir Ferreira da Rocha

afr@poli.br

Jornandes Dias da Silva

jornandesdias@poli.br

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{p_s}	Capacidade térmica do sólido
C_{p_f}	Capacidade térmica do fluído
V_f	Velocidade do fluído
V_s	Velocidade do sólido
P_s	Densidade do sólido
P_f	Densidade do fluído
λ_s	Condutividade térmica do sólido
λ_f	Condutividade térmica do fluído
λ_{feff}	Condutividade térmica efetiva
$T_{s,0}$	Temperatura inicial do estado sólido
$T_{f,0}$	Temperatura inicial do estado fluido
$T_{s,\infty}$	Temperatura ambiente do estado sólido
EDO	Equação diferencial ordinária
EDP	Equação diferencial parcial
EDO_s	Equação diferencial ordinária do estado sólido
EDO_f	Equação diferencial ordinária do estado fluido
$T_{f,\infty}$	Temperatura ambiente do estado fluido
u_D	Velocidade no leito empacotado
TMS	Temperatura média do sólido
TMF	Temperatura média do fluido
A_1	Temperatura inicial do sólido para o método de Euler
A_2	Temperatura inicial do fluido para o método de Euler
IT	Número de iterações
Z	Espaço em metros

L	Comprimento em metros
Q_{ACS}	Armazenamento de calor sensível
C_p	Capacidade calorífica
M_f	Massa do fluido
U_f	Volume do fluido
ΔT	Variação de temperatura de entrada e saída
C_p	Calor específico volumétrico

LETRAS GREGAS

M	Viscosidade do Fluido
λ	Condutividade térmica
ρ	Densidade
Φ	Porosidade
∞	Infinito

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de Armazenamento de Energia Térmica.....	15
Figura 2. Curva teórica de calor latente para transição sólido/líquido.....	16
Figura 3. Princípio de funcionamento dos materiais de mudança de fase.....	19
Figura 4. Ciclo de um material de mudança de fase sólido/líquido.....	20
Figura 5. Classificação dos materiais de armazenamento de calor latente.....	21
Figura 6. Carregamento de energia e descarregamento de energia.....	23
Figura 7. Transferência de calor por condução.....	23
Figura 8. Transferência de calor por convecção.....	24
Figura 9. Matriz rochosa e espaço poroso.....	26
Figura 10. Modelo físico um sistema de leito empacotado de partículas aglomeradas.....	27
Figura 11. Diagrama de fluxo de dados do sistema.....	31
Figura 12. Tela do simulador de processo de armazenamento térmico.....	33
Figura 13 Perfil de carregamento da temperatura da fase sólida e Fluída.....	33
Figura 14. Perfil de carregamento (a) e descarregamento (b) da temperatura da fase sólida e Fluída.....	34
Figura 15. Perfil de Temperatura da fase sólida utilizando a variação da condutividade térmica do fluído.....	36
Figura 16. Perfil de Temperatura da fase sólida utilizando a variação do diâmetro da partícula do sólido	
Figura 17. Perfil de Temperatura da fase sólida utilizando a variação da capacidade térmica do sólido.....	38
Figura 18. Perfil de Temperatura da fase fluida utilizando a variação da capacidade térmica do fluido.....	39
Figura 19. Perfil de Temperatura da fase sólida utilizando a variação da velocidade do fluido.....	39
Figura 20. Perfil de Temperatura da fase fluida utilizando a variação da velocidade do fluido.....	40

Figura 21. Comparação da temperatura da fase fluida deste trabalho versus o trabalho de Yang et al.....	41
Figura 22. Perfis de Temperatura das fases sólida e fluida como função do espaço utilizando 20 iterações.....	42
Figura 23. Perfis de Temperatura das fases sólida e fluida como função do espaço utilizando 30 iterações.....	43
Figura 24. Perfis de Temperatura das fases sólida e fluida como função do espaço utilizando 35 iterações.....	43
Figura 25. Perfis de Temperatura das fases sólida e fluida como função do espaço utilizando 45 iterações.....	44
Figura 26. Perfis de Temperatura das fases sólida e fluida como função do espaço utilizando 50 iterações.....	44

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Meios de armazenamento para sistemas de calor sensível e latente.....	17
Tabela 2. Calores específicos a 20 °C de alguns materiais.....	18
Tabela 3. Comparação entre materiais orgânicos e inorgânicos.....	22
Tabela 4. Condutividade térmica de materiais à temperatura ambiente.....	25
Tabela 5. Parâmetros utilizados para realizar as simulações.....	32
Tabela 6. Estimativa do Erro Médio Relativo (EMR) do experimental versus o erro do modelo desenvolvido.....	41

Sumário

CAPÍTULO 1.....	12
1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÕES.....	12
CAPÍTULO 2.....	14
2. ESTADO DA ARTE	14
2.1. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA.....	15
2.1.1. ARMAZENAMENTO DE CALOR SENSÍVEL	17
2.1.2. ARMAZENAMENTO DE CALOR LATENTE.....	18
2.2. MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE	19
2.3. FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR	23
2.3.1. CONDUÇÃO	23
2.3.2. CONVECÇÃO.....	24
2.4. PARÂMETROS TERMOFÍSICOS DO ARMAZENAMENTO TÉRMICO	24
2.4.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA	24
2.4.2. CAPACIDADE TÉRMICA.....	25
2.4.3. VISCOSIDADE	25
2.4.4. POROSIDADE.....	26
CAPÍTULO 3.....	27
3. PROBLEMA DIRETO	27
3.1. MODELO MATEMÁTICO DE TRABALHO.....	28
3.2.1. EQUAÇÕES TRANSFORMADAS	29
3.2.2. MÉTODO DE EULER	30
3.2.3. APROXIMAÇÃO DA SOLUÇÃO COMPLETA	30
3.3. MODELO COMPUTACIONAL	30
CAPÍTULO 4.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1. PARÂMETROS PARA ALIMENTAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL	32
4.2. SIMULADOR DO MODELO MATEMÁTICO	32

4.2.1. PERFIL CARREGAMENTO DAS FASES SÓLIDA E FLUÍDA	33
4.2.2. PERFIL DE CARREGAMENTO (A) E DESCARREGAMENTO (B) DA TEMPERATURA DA FASE SÓLIDA	34
4.3. ANALISES DE SENSIBILIDADE	35
4.3.1. ANALISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO ΔF_{EFF} PARA T_S	35
4.3.2. ANALISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO DP PARA T_S	36
4.3.3. ANALISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO CPS PARA T_S	37
4.3.4. ANALISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO CPF PARA T_F	38
4.3.5. ANALISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO UF PARA T_S	39
4.3.6. ANALISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO UF PARA T_F	40
4.4. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	40
4.5. AVALIAÇÃO PERIÓDICAS DOS PERFIS DE TEMPERATURAS DAS FASES GASOSA E SÓLIDA PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DO LEITO EMPACOTADO	41
CAPÍTULO 5	45
5. CONCLUSÕES	45
APÊNDICE A: APROXIMAÇÃO DE HERMITE	47
REFERÊNCIAS	55

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÕES

O aquecimento global e a grave poluição ambiental causada pela utilização de combustíveis fósseis estão se tornando problemas cruciais que restringem o desenvolvimento sustentável da sociedade humana. Estes problemas são cada vez mais agravados e atingem o setor energético, mudança climática e outras questões ambientais, especialistas e autoridades concordam que o desenvolvimento da utilização de novas fontes energias renováveis tornaram-se vital o desenvolvimento sustentável humano [1-3]. O armazenamento de energia térmica é considerado um subsistema importante para usinas solares térmicas devido às flutuações da luz do sol ao longo do tempo. Recentemente, a tecnologia de armazenamento de energia térmica tem atraído interesse em todo o mundo devido ao seu potencial de contribuir com os problemas ambientais.

O armazenamento de energia térmica é um componente indispensável quando se trata de questões de gerenciamento de energia considerando a descontinuidade da oferta e demanda de energia [4]. O armazenamento pode ser realizado na forma de calor sensível sobre materiais sólidos ou líquidos, armazenamento de calor latente sobre materiais específicos de mudança de fase e também armazenamento termoquímico através de conversão dos processos químicos [5, 6]. As misturas binárias de sal de nitrato têm um importante papel no armazenamento de energia térmica devido a suas propriedades termofísicas. O armazenamento de energia térmica desempenha um papel importante em algumas aplicações industriais, tais como armazenamento térmico solar e sistema de recuperação de calor residual.

Vários métodos de armazenamento de energia térmica podem ser encontrados na literatura internacional. Atualmente, o leito empacotado de partículas aglomeradas tem sido um método de inovação para o armazenamento de energia térmica, uma grande quantidade de área de superfície de transferência de calor pode estar contida em um pequeno volume e o fluxo calor irregular que existe nos vazios do leito empacotado aumenta o transporte por meio de mistura turbulenta [7, 8]. Os efeitos de vários parâmetros incluindo o tamanho das partículas de enchimento, densidade, porosidade, capacidade, condutividade térmica, bem como as propriedades termofísicas da fase fluída, podem afetar o fluxo de calor entre as fases sólida e fluída no leito empacotado. A novidade deste trabalho está focada em um novo modelo matemático desenvolvido com base em uma nova configuração de um sistema de leito empacotado com partículas aglomeradas e resultados periódico para a

temperatura na fase sólida e fluída em função do espaço no sistema de armazenamento de leito empacotado. A formulação matemática inclui os balanços simultâneos de energia levando em consideração a temperatura na fase sólida e a temperatura na fase fluida.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DA ARTE

A Energia é necessária na sociedade pelas mais diversas razões, entre essas, algumas primárias e óbvias e outras não tão prioritárias e evidentes. O preparo de alimentos e disponibilização de calor para aquecer e tornar confortável, ou pelo menos sustentável, o dia a dia do ser humano são duas das que se podem considerar fundamentais. A indústria surge imediatamente, com papel essencial no desenvolvimento do país, e sendo o setor predominante num país, é o que mais procura energia. Consequente e posteriormente surgiu uma larga gama de tecnologias que utilizam energia e tornou a sua necessidade um assunto fundamental, a televisão, as telecomunicações, e os sistemas informáticos, são alguns exemplos dessa realidade, que criaram novas necessidades aos seres humanos, que são totalmente dependentes do consumo energético [10].

A forma mais acessível de ter acesso à energia é pela combustão de madeira ou combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo bruto, sendo que estas fontes desde sempre foram as que apresentaram a maior percentagem de utilização. O gás natural e as fontes renováveis de energia também surgiam com taxas significativas de utilização, embora menores do que as anteriores.

No entanto, os combustíveis fósseis não são inesgotáveis na natureza, como se constata no progressivo esgotamento destes, com o consequente aumento de preço, que tem vindo a ocorrer ao longo do tempo e à medida que as fontes vão diminuindo. O escassear das reservas existentes determinou o reforçar na utilização de fontes até então menos exploradas em termos globais [10]. A instabilidade e sazonalidade das energias alternativas evidenciou uma necessidade crescente do armazenamento de energia [10].

Os sistemas de armazenamento de energia térmica têm uma importância potencial em relação à taxa de consumo de energia do mundo [11]. O desempenho térmico do Sal Fundido inclui o armazenamento de energia térmica e pode ser dividido em três áreas, tais como materiais de calor sensível, calor latente (Materiais de Mudança de Fase) e termoquímico (reações reversíveis químicas endotérmicas). O calor sensível é armazenado dentro de um material monofásico com o aumento ou redução da temperatura, já o calor latente é armazenado empregando propriedades de mudança de fase do material, como mudança de fase sólido-líquido por fusão ou solidificação [12, 13]. O conceito de armazenamento de energia pode ser usado para investigar as características de transferência de calor entre as partículas de Sal Fundido e a fase fluida. Essas características de transferência de calor

estão focadas no armazenamento de energia térmica dentro do sistema de partículas de Sal Fundido a fase fluida.

Os sistemas de armazenamento de energia podem contribuir significativamente para minimizar este problema, e satisfazer as necessidades da sociedade com maior eficiência, assim como podem reduzir os problemas de picos de consumo de energia, melhorar a estabilidade elétrica e até eliminar as perturbações que surgem na qualidade da energia, além disso, diminuir o consumo de combustíveis fósseis que contribuem diretamente para o aquecimento global, trazendo assim maiores benefícios ao meio ambiente.

2.1. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA

O armazenamento de energia térmica pode ser na forma de calor sensível, calor latente, energia termoquímica ou uma combinação desta. A energia armazenada em forma de calor sensível é verificada quando a adição de calor em um determinado corpo resulta em um aumento proporcional da temperatura deste corpo. A quantidade de calor armazenado depende do calor específico médio, da quantidade de material utilizado e da diferença de temperatura. Já a energia armazenada em forma de calor latente é verificada quando a adição de calor em um corpo resulta em uma mudança de fase sólido líquido ou líquido vapor Figura 1. Nesta situação, não há aumento da temperatura do corpo, e toda adição de calor é utilizada para promover a mudança de fase do material [14].

Figura 1 - Tipos de Armazenamento de Energia Térmica



Fonte: [15]

O processo de armazenamento de energia térmica pode ser por aquecimento ou arrefecimento de uma substância ou por mudança de fase da mesma, fusão, solidificação ou vaporização são os estados da matéria que participam do processo de armazenamento térmico. O gráfico da Figura 2 é a curva teórica de calor latente/calor sensível no processo de armazenamento térmico de um corpo qualquer.

Figura 2: Curva teórica de calor latente para transição sólido/líquido



Fonte: [16]

Também pode-se diferenciar os sistemas de armazenamento de energia térmica quanto a duração do armazenamento: curta, média ou longa. Este fator é importante para a escolha do sistema que melhor se adapta a cada aplicação.

O armazenamento de curto período de tempo é utilizado para resolver cargas de potência de pico desde durações de umas horas até ao máximo de um dia, com vista à redução da dimensão dos sistemas e ao proveito da estrutura diária das tarifas de energia. Armazenamento de curto prazo é frequentemente denominado armazenamento diurno [14].

O armazenamento de médio ou longo período de tempo é recomendado quando há a possibilidade do calor residual e das cargas sazonais de energia serem transferidos com atraso desde algumas semanas até vários meses. Armazenamentos de longo prazo que tiram partido das variações climáticas sazonais são usualmente referidos como armazenamentos anuais ou sazonais [14]. Os diferentes

meios de armazenamento disponíveis para sistemas de armazenamento de energia térmica, de calor sensível e de calor latente, e a sua respectiva duração, de longo ou curto prazo são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Meios de armazenamento para sistemas de calor sensível e latente

Armazenamento de calor sensível		Armazenamento de calor latente
Curto prazo	Longo prazo	Curto prazo
Leito de rochas	Leito de rochas	Materiais orgânicos
Tanques de água	Leito de terra	Materiais inorgânicos
	Tanques de água extensos	Materiais eutéticos
	Aquíferos	
	Logoas solares	

Fonte: [17]

2.1.1. ARMAZENAMENTO DE CALOR SENSÍVEL

O armazenamento de calor sensível envolve uma mudança na temperatura do meio, que pode ser aumentada ou reduzida. O calor é retirado do armazenamento sempre que necessário para atender a uma carga, como aquecimento de ambiente ou água quente doméstica [14]. A remoção de calor do armazenamento reduz a temperatura do armazenamento. Embora existam muitas variantes, um meio de armazenamento de calor sensível sempre compreende componentes como material de armazenamento de calor e métodos para adicionar e retirar calor.

A quantidade de energia armazenada em um sistema de armazenagem de calor sensível é proporcional à diferença entre as temperaturas de entrada e saída do meio de armazenamento, massa e capacidade de calorífica. A equação fundamental usada para determinar a quantidade de calor armazenado em sistemas de armazenamento de calor sensível é dada na Equação 1.

$$Q_{ACS} = m_f c_p \Delta T = \rho_f V_f C_p \tag{1}$$

Onde QACS é o armazenamento de calor sensível, m_f é a massa do fluido, C_p é capacidade calorífica, ΔT é a variação de temperatura de entrada e saída, ρ_f é a densidade do fluido e V_f é o volume do fluido.

A capacidade de armazenar calor sensível depende em grande medida do valor da quantidade ρc_p - calor específico volumétrico [14]. Na Tabela 2 estão apresentados alguns materiais utilizados e as suas propriedades.

O calor específico volumétrico de um material descreve a capacidade de um determinado volume de uma substância armazenar energia enquanto sofre alteração de temperatura, sem mudança de fase [14].

Tabela 2 - Calores específicos a 20 °C de alguns materiais

Material	Massa volumétrica (J/m ³ K)	Calor específico (kg/m ³)	Calor específico volumétrico 10 ⁶ (J/kg K)
Barro	1458	879	1,28
Tijolo	1800	837	1,51
Arenito	2200	712	1,57
Madeira	700	2390	1,67
Betão	2000	880	1,76
Vidro	2710	837	2,27
Alumínio	2710	896	2,43
Ferro	7900	452	3,57
Aço	7840	465	3,68
Terra Saibrosa	2050	1840	3,77
Magnetite	5177	752	3,89
Água	988	4182	4,17

Fonte: [17]

2.1.2. ARMAZENAMENTO DE CALOR LATENTE

A transferência de calor que ocorre quando uma substância muda de fase tem por definição calor latente. A troca de calor latente é usualmente muito maior do que a troca de calor sensível entre os meios de armazenamento, fato diretamente relacionado com o calor específico deste, e a gama de temperaturas de operação é menor no armazenamento de calor latente pelo fato da interação de calor nestes sistemas ocorrer a temperatura constante [14].

A alta densidade de armazenamento de energia diretamente relacionada com o alto calor latente por unidade de volume possibilita que mais calor seja armazenado com menos material, ocupando menos espaço, e a elevada condutividade térmica acelera a transferência de calor, auxiliando na carga e descarga. Além disso, na medida em que as temperaturas de fusão dos materiais de mudança de fase são diferentes, deve ser tido em conta isso na escolha do material, para que a sua temperatura de fusão seja relativa à temperatura de utilização e da fonte de calor de cada sistema [14].

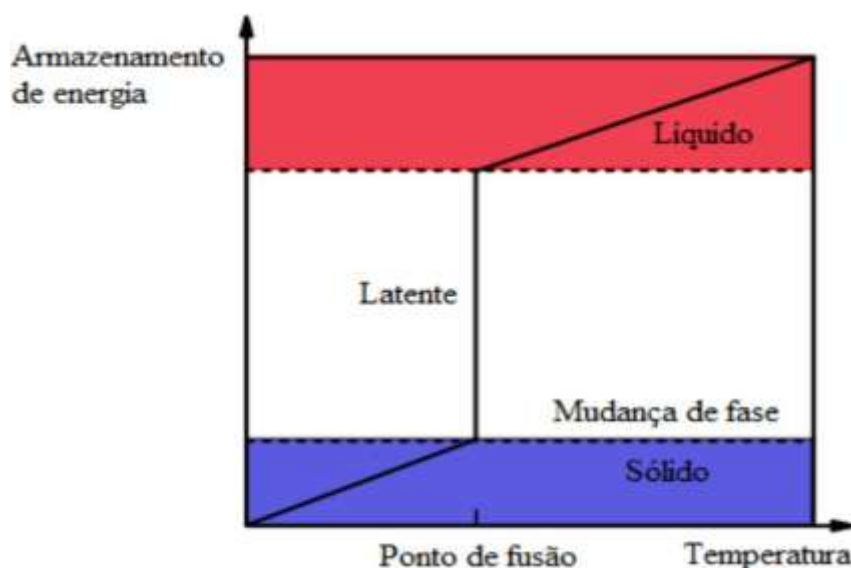
A estabilidade de fase durante a solidificação ou fusão contribui para a acumulação de calor e a alta densidade permite um menor tamanho do recipiente de armazenamento. Já a baixa variação de volume na fase de transformação e a baixa pressão de vapor à temperatura de operação reduzem os problemas de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

Baixo custo e grande disponibilidade são duas características muito importantes, por tornarem os sistemas mais atrativos para os proprietários e possibilitarem a obtenção da substância quando da instalação inicial e sempre que for necessária a sua substituição, respectivamente. Outra particularidade relevante requerida aos materiais de mudança de fase é uma vida útil longa, pois apresentam pouca ou nenhuma degradação após um grande número de ciclos de fusão [14].

2.2. MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Os materiais de mudança de fase são agentes que intervêm como meios de armazenamento de calor no armazenamento de calor latente. O seu princípio de funcionamento está representado na Figura 3.

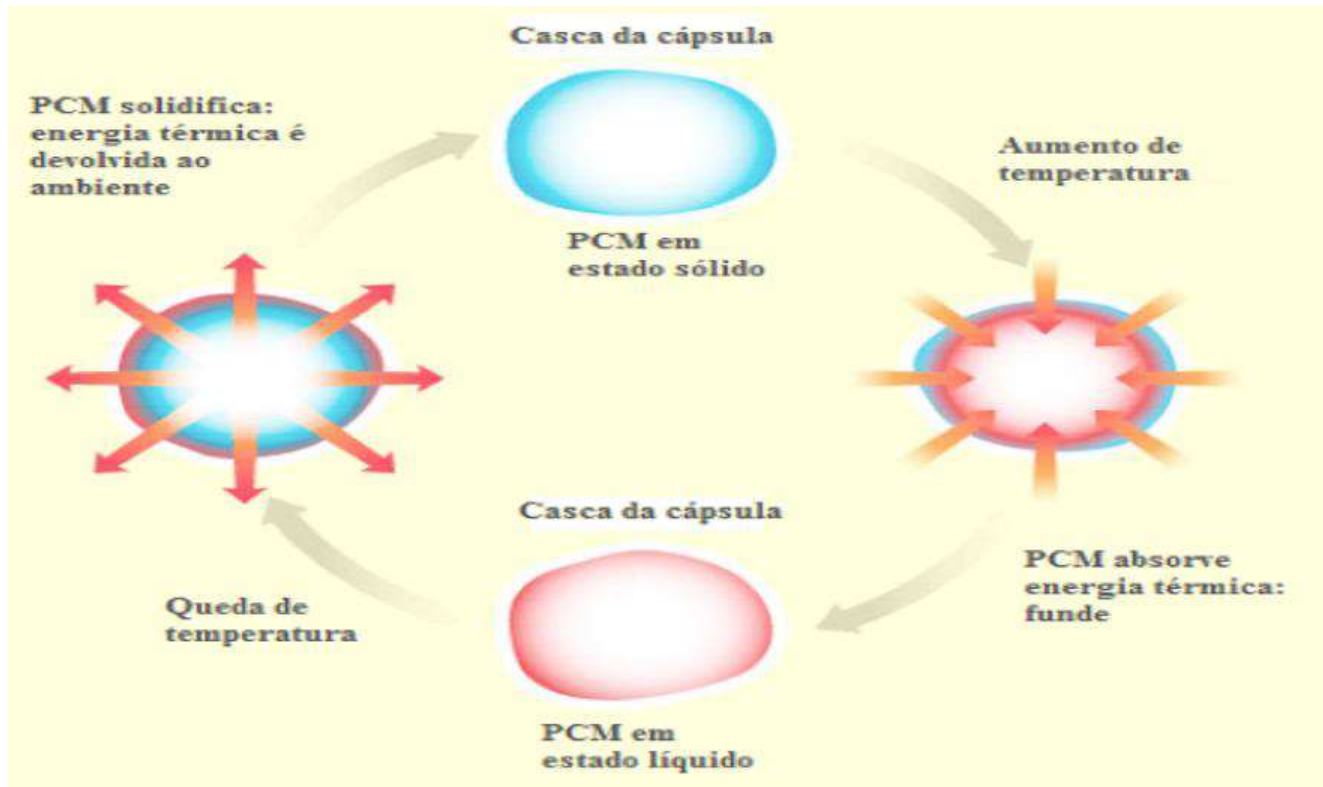
Figura 3. Princípio de funcionamento dos materiais de mudança de fase



Fonte: [18]

Quando um material funde ou vaporiza, absorve calor, e por outro lado, quando solidifica ou condensa, liberta calor, estas mudanças de fase são aproveitadas para a acumulação de calor em PCMs e normalmente as temperaturas de solidificação e de fusão diferem uma da outra, este fenômeno é conhecido como histerese do material e causa uma oscilação de temperatura na carga e na descarga da energia térmica Figura 4.

Figura 4. Ciclo de um material de mudança de fase sólido líquido



Fonte: [19]

Nas transições sólido, o calor é acumulado enquanto o material é transformado de um cristalino noutro. Em geral, estas transições têm baixo calor latente e variações de volume mais pequenas do que as sólido líquido. Os materiais de mudança de fase sólido têm a vantagem de serem menos rigorosos nos requerimentos do recipiente e o desenho do modelo ser flexível. A inserção destes materiais em paredes pode providenciar uma melhor performance. A transição líquido gás tem maior calor latente na fase de transição, mas os grandes incrementos de volume nesta fase estão associados a problemas de controle o que exclui o seu potencial para utilização em sistemas de armazenamento térmico. Por apresentarem enormes variações de volume tornam os sistemas complexos e impraticáveis.

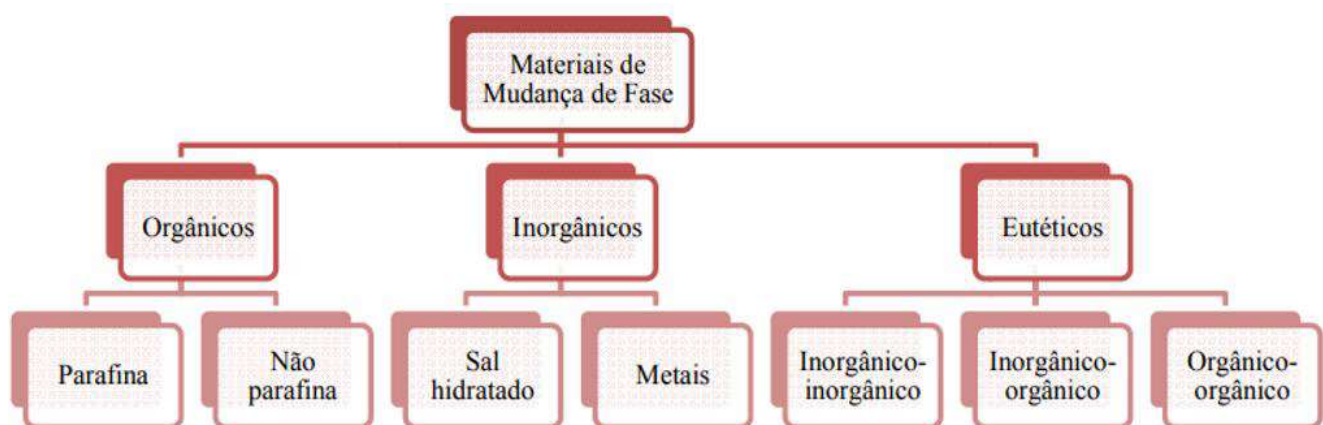
Dado que o PCM teve uma mudança de fase, o calor Q absorvido ou liberado considerando a temperatura constante, é calculado pela Equação 2.

$$Q = mL \quad (2)$$

Sendo m a massa do fluido e L o calor latente. O calor latente de uma substância é a quantidade de calor necessária para a mudança de uma fase para outra, de um quilograma dessa substância. Cada substância tem um valor de calor específico para cada mudança de fase e o calor latente é único para essa mesma substância.

Os materiais de mudança de fase (PCM'S) podem ser classificados como orgânico, inorgânicos e eutéticos e suas subdivisões de acordo com a Figura 5. Os materiais orgânicos são compostos do grupo das parafinas e não parafinas, os inorgânico-orgânico e orgânico - orgânico na Tabela 5 uma breve comparação entre vantagens e desvantagens para cada um dos PCM'S.

Figura 5. Classificação dos materiais de armazenamento de calor latente



Fonte:

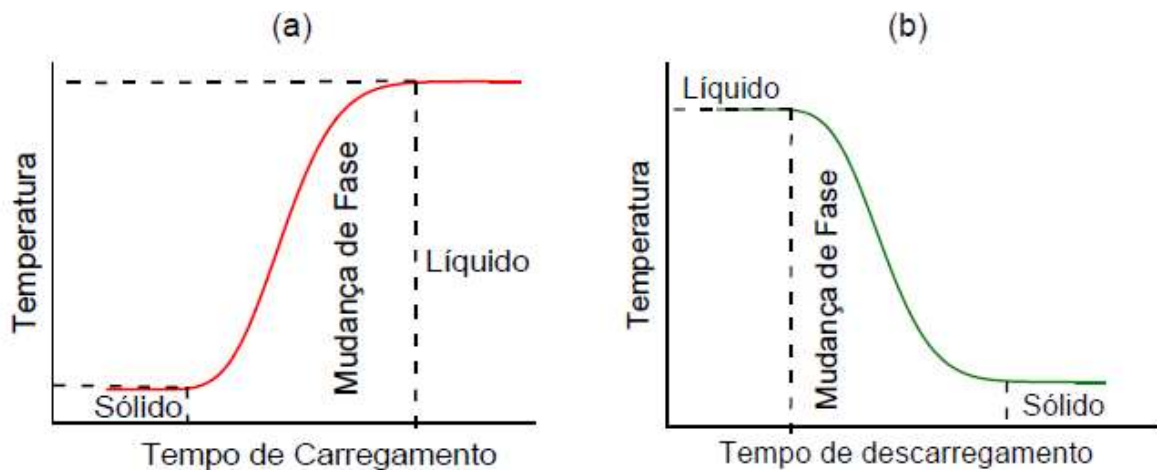
Tabela 3. Comparação entre materiais orgânicos e inorgânicos

Orgânicos	Inorgânicos	Eutéticos
Vantagens	Vantagens	Vantagens
Não são corrosivos	Entalpia de mudança de fase elevada	Gama de ponto de fusão estreita
Não sofrem sobre arrefecimento	Não inflamáveis	Baixa densidade de armazenamento
Estabilidade térmica e química grande taxa de cristalização	Pequena variação de volume	
Pequena variação de volume	Custos moderados	
Disponíveis em ampla gama de temperaturas	Alta condutividade térmica	
Desvantagens	Desvantagens	Desvantagens
Baixa condutividade térmica	Sobre arrefecimento	Disponibilidade limitada
Entalpia de mudança de fase baixa	Corrosão	
Inflamáveis	Separação de fases falta de estabilidade térmica	

Fonte: [18, 21-23].

A alta densidade de armazenamento de energia diretamente relacionada com o alto calor latente por unidade de volume possibilita que mais calor seja armazenado com menos material ocupando e a elevada condutividade térmica que acelera a transferência de calor auxiliando no carregamento e descarregamento de energia conforme a Figura 6 abaixo.

Figura 6. (a) Carregamento de energia; (b) descarregamento de energia



Fonte: Autor

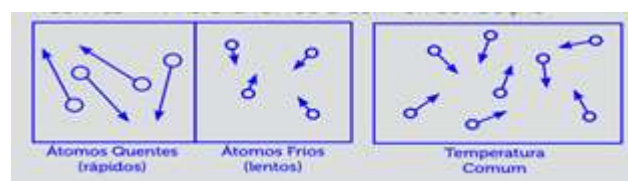
Um grande número de materiais de armazenamento de calor latente foi relatado na literatura para aplicações de armazenamento térmico em faixas de temperatura adequadas para aquecimento e resfriamento [27-29]. Alguns dos materiais de mudança de fase podem ser classificados nas seguintes categorias principais: compostos inorgânicos, compostos orgânicos compostos inorgânicos / orgânicos.

2.3. FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.3.1. CONDUÇÃO

Quando a transferência de energia ocorrer em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, em virtude de um gradiente de temperatura, usa o termo transferência de calor por condução. O fluxo de calor por condução ocorre via as colisões entre átomos e moléculas de uma substância e a subsequente transferência de energia cinética. Vamos considerar duas substâncias a diferentes temperaturas separadas por uma barreira que é removida subitamente, como mostra a Figura 7 a seguir [30].

Figura 7. Transferência de calor por condução



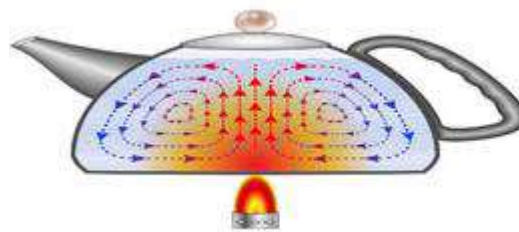
Fonte:[31]

Quando a barreira é removida, os átomos “quentes” colidem com os átomos “frios”. Em tais colisões, os átomos rápidos perdem alguma velocidade e os mais lentos ganham velocidade. Logo, os mais rápidos transferem alguma de sua energia para os mais lentos. Esta transferência de energia do lado quente para o lado frio é chamada de fluxo de calor por condução [30].

2.3.2. CONVECÇÃO

Quando a transferência de energia acontece entre uma superfície e um fluido em movimento devido à diferença de temperatura entre eles, empregamos o termo transferência de calor por convecção Figura 8.

Figura 8. Transferência de calor por convecção.



Fonte: [32].

2.4. PARÂMETROS TERMOFÍSICOS DO ARMAZENAMENTO TÉRMICO

2.4.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Condutividade térmica é uma propriedade física dos materiais que descreve a habilidade dessa de conduzir calor. E equivale a quantidade de calor Q transmitida através de uma espessura L , numa direção normal a superfície de área A , devido ao gradiente de temperatura ΔT , sob condições de estado fixo e quando a transferência de calor é dependente apenas do gradiente de temperatura Equação 3 [33].

$$\frac{Q}{\Delta T} = K A \frac{\Delta T}{L} \quad (3)$$

Onde $(Q/\Delta T)$ é a energia transferida como calor por segundo (J/s), K condutividade térmica (W/m K), A é a área (m^2), ΔT definida como a diferença de temperaturas (K), L espessura (m) do material pelo qual o calor é transferido. A constante de condutividade térmica k é maior para materiais bons em

transferir calor (como metais e pedras), e k é pequeno para materiais que não são bons em transferir calor (como o ar e a madeira) Tabela 4 [33-35].

Tabela 4. Condutividade térmica de materiais à temperatura ambiente

Material	W/m K
Diamante	2300
Prata	429
Cobre	401
Ouro	317
Alumínio	237
Ferro	80,2
Mercúrio	8,54
Vidro	0,78
Tijolo	0,72
Pele humana	0,37
Madeira	0,17
Hélio	0,152
Borracha macia	0,13
Fibra de vidro	0,043
Ar	0,026

Fonte: [33]

2.4.2. CAPACIDADE TÉRMICA

Quando um sistema absorve calor, pode haver um aumento em sua temperatura, dependendo do processo termodinâmico envolvido. Define-se capacidade térmica C de um sistema como sendo a razão entre a quantidade de calor Q que ele recebe e a consequente variação de temperatura ΔT Equação 4 [36].

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (4)$$

2.4.3. VISCOSIDADE

É a propriedade associada à resistência que o fluido oferece à deformação por cisalhamento. Em outras palavras, podemos dizer que a viscosidade corresponde ao atrito interno nos fluidos devido às interações intermoleculares, normalmente em função da temperatura [30]. A viscosidade é a

propriedade do fluido que determina a velocidade com que os líquidos se moldam aos recipientes que os contêm. A água se molda rapidamente a um recipiente, enquanto que a glicerina possui um processo mais lento. A viscosidade da glicerina é muito menor que a da água, ou seja, a glicerina oferece uma resistência maior à deformação por cisalhamento. A viscosidade cinemática ν do fluido, dada pela seguinte Equação 5 [30].

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$$

Onde μ é a viscosidade absoluta ou dinâmica, Pa.s

ρ é a massa específica, kg/m³

ν é a viscosidade, m²/s

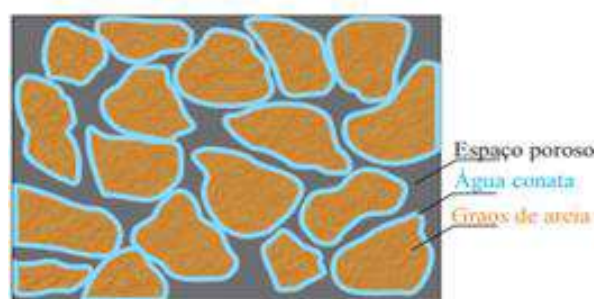
2.4.4. POROSIDADE

Porosidade quer dizer que a matéria é descontínua, ou seja, existem espaços (poros) Figura 9 no meio das partículas que dão forma a qualquer tipo de matéria.

Esses poros, ou espaços, podem variar de tamanho, tornando a matéria menos ou mais densa. Exemplo: a cortiça possui poros maiores do que os poros do ferro, então a densidade da cortiça é muito menor do que a densidade do ferro [37]. A porosidade ϕ é o parâmetro físico que mede a relação entre o volume poroso V_p e o volume total V_t de um corpo sólido Equação 6 [38].

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (6)$$

Figura 9. Matriz rochosa e espaço poroso



Fonte: [38].

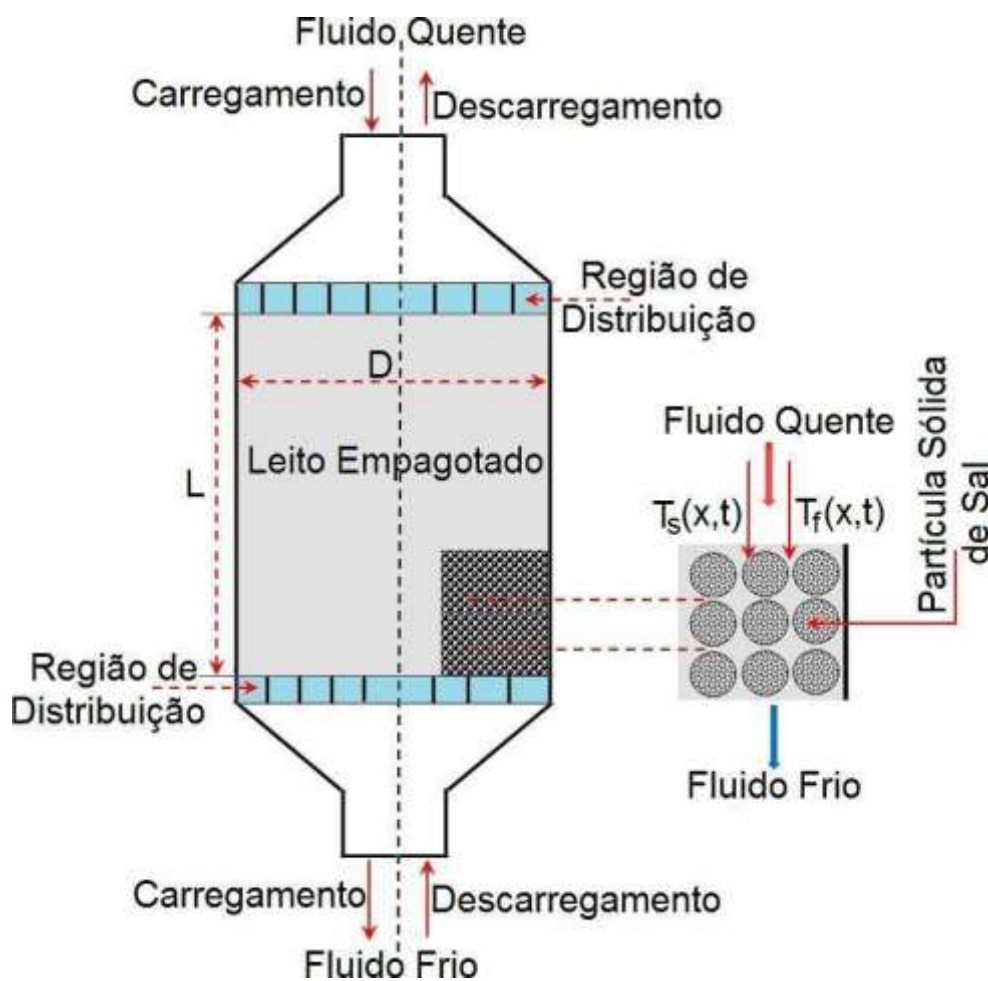
Outros parâmetros também foram trabalhados neste projeto de pesquisa como: a densidade, a velocidade da fase sólida e fluída, tempo, espaço e o diâmetro das partículas do sal.

CAPÍTULO 3

3. PROBLEMA DIRETO

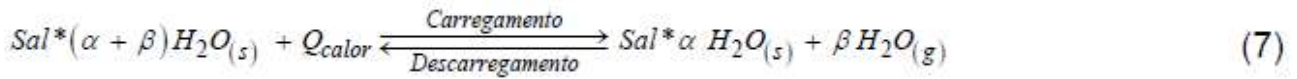
Um modelo físico representa uma construção física cujos fenômenos físicos deste modelo físico podem ser modelados aplicando modelo matemático. A modelagem matemática é uma ferramenta estabelecida em ciências para estudar previsão de fenômenos complexos dos modelos físicos. Diferentes aspectos dos modelos matemáticos são considerados como questões desafiadoras para solução de tais modelos matemáticos para interpretar os resultados e prever as respostas do modelo físico. Uma configuração física simplificada do modelo físico foi usada para desenvolver o modelo matemático e pode ser vista na Figura 10 abaixo.

Figura 10. Modelo físico de trabalho para um sistema de leito empacotado de partículas aglomeradas



Fonte: Autor

Alcançar soluções para os problemas ambientais que enfrentamos hoje em dia requer ações potenciais. Neste sentido, o armazenamento de energias térmicas apresenta-se como uma das opções mais eficientes e eficazes. O armazenamento de energia termoquímica oferece uma perspectiva atraente graças à sua alta densidade de armazenamento e baixas perdas de calor. A Equação (7) mostra um esquema reacional com carregamento e descarregamento de calor.



3.1. MODELO MATEMÁTICO DE TRABALHO

A modelagem matemática da transferência de calor fluido-sólido em um sistema de leito empacotado de partículas aglomeradas (ver Figura 2) é uma questão complicada onde uma fase fluida e uma fase sólida (partículas de sal) são consideradas. Para este estudo, foi adotado o modelo de fase sólida contínua. Neste modelo, assume-se que as partículas de sal se comportam como um meio contínuo.

Para desenvolver o modelo matemático, algumas hipóteses foram adotadas como segue: (7) A variação de temperatura ao longo da direção axial é considerada para as fases gasosa e sólida, (8) A variação de temperatura ao longo da direção radial é considerada desprezível, (9) A propriedade do sal é constante e pode ser estimada a uma temperatura média, (10) A transferência de calor por radiação é desprezível, (11)

A geração interna de calor não é considerada, (12) a mudança de volume do fluido e partícula de sal causada com base na mudança de temperatura é ignorada, (13) o sistema de leito empacotado de partículas aglomeradas é composto por partículas de sal idênticas e (14) a porosidade ao longo foi considerada uniforme. Com base nas suposições acima, um modelo matemático de fase sólida contínua transiente é desenvolvido com base nas fases gasosa e sólida (partículas de sal). Como a temperatura indica o armazenamento de energia térmica em uma substância, portanto, equações de balanço de energia no sistema de leito empacotado de partículas aglomeradas são desenvolvidas com base na temperatura da fase gasosa e temperatura das partículas de sal do seguinte modo [9, 39-43].

- Balanço de energia para a fase sólida;

$$(1 - \varphi) \rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \varphi) \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + h_{sf} a_{sf} (T_f - T_s) \quad (8)$$

- As condições iniciais e de contorno para a Equação (6) são definidas como:

$$T_s|_{t=0} = T_{s,0} \quad (9)$$

$$T_s|_{x=0^+} = T_{s,ent.} \quad (10)$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=L} = h_{sg,eff} (T_{s,\infty} - T_s|_{z=L}) \quad (11)$$

– Balanço de energia para a fase gasosa;

$$\rho_f C_{p,f} \left(\varphi \frac{\partial T_f}{\partial t} + u_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = \lambda_{f,eff} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + h_{sf} a_{sf} (T_f - T_s) \quad (12)$$

– As condições iniciais e de contorno para a Equação (12) são definidas como:

$$T_f|_{t=0} = T_{f,0} \quad (13)$$

$$\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \Big|_{x=0^+} = \rho_f C_{p,f} u_f (T_f|_{x=0^+} - T_{f,ent.}) \quad (14)$$

$$\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \Big|_{z=L} = h_{fs,eff} (T_{f,said.} - T_f|_{z=L}) \quad (15)$$

3.2.1. EQUAÇÕES TRANSFORMADAS

É possível transformar o sistema de EDPs em um sistema de EDOs Usando as condições de contornos de cada EDPs. A Equação (8) foi transformada em uma EDO usando as condições de contornos (10) e (11) conforme apêndice 1 e a EDO pode ser escrita como segue.

$$\frac{d\bar{T}_s(t)}{dt} = \frac{B_2 B_4}{B_1} \left\{ [T_{s,\infty} - T_s(L,t)] - B_2 V_s T_s(0,t) + B_3 [\bar{T}_f(t) - \bar{T}_s(t)] \right\} \quad (16)$$

A Equação (12) foi transformada em uma EDO usando as condições de contornos (14) e (15) conforme a EDO que segue.

$$\frac{d\bar{T}_f(t)}{dt} = \frac{w_2}{w_1} \left\{ [T_f(0,t) - T_f(L,t)] + \lambda_{f,eff} B_3 [T_{f,\infty} - \bar{T}_f(L,t)] - \lambda_{f,eff} V_f T_f(0,t) + B_3 [\bar{T}_s(t) - \bar{T}_f(t)] \right\} \quad (17)$$

Os coeficientes das Equações (16) e (17) são mostrados no Apende A.

3.2.2. MÉTODO DE EULER

O método de Euler foi utilizado para encontra a temperatura média das fases sólida e fluida em relação ao tempo dentro do leito empacotado. O algoritmo do método de Euler pode ser escrito como segue.

$$\bar{T}_i^{(k+1)} = \bar{T}_i^{(k)} + \Delta t \left(\frac{dT_i}{dt} \right); i=s, f \text{ e } k=0,1,2,...,N-1 \quad (18)$$

3.2.3. APROXIMAÇÃO DA SOLUÇÃO COMPLETA

A fim de resolver as equações governantes dos problemas de engenharia, vários métodos numéricos foram desenvolvidos para resolver EDPs. A escolha do método depende da precisão desejada, bem como de preocupações com a estabilidade e robustez do sistema, mantendo a eficiência computacional. Com relação às equações transformadas, as Equações (16) e (17), elas foram resolvidas pelo método Euler (Equação (18)). Por outro lado, a solução completa é aproximada usando as Equações (19) e (20) como segue

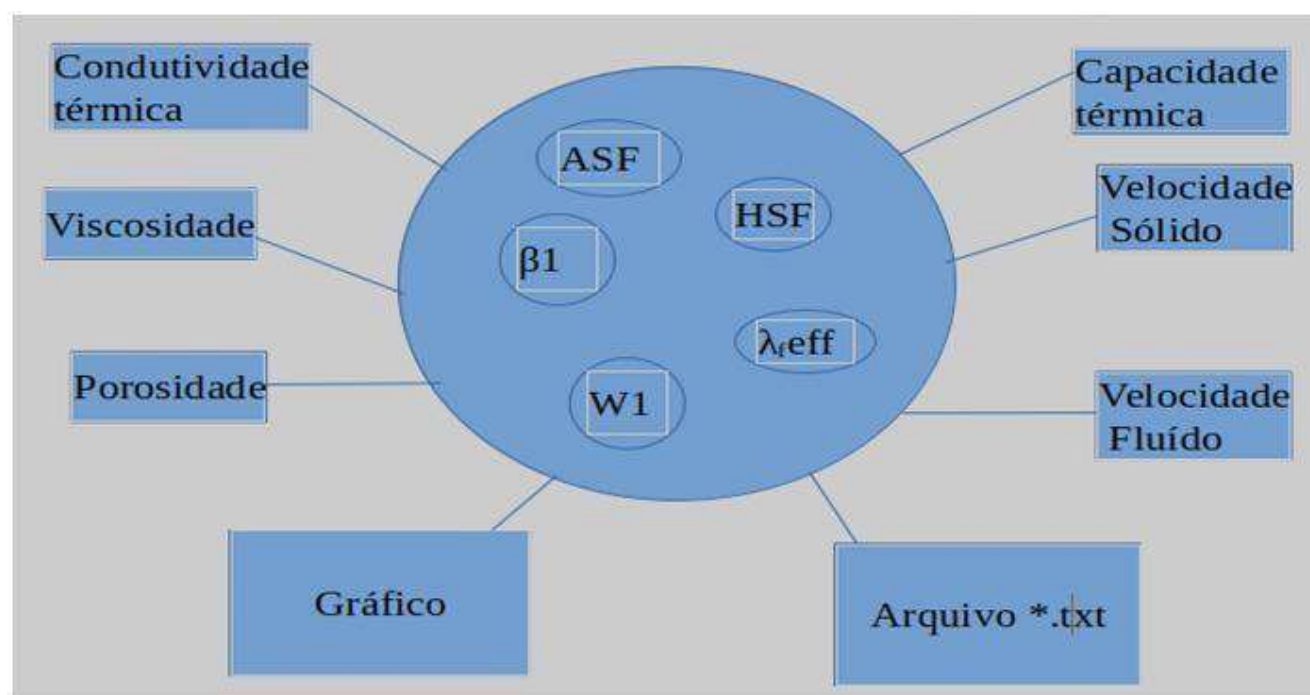
$$T_s(x,t) = T_s(0,t) + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{T}_s(t) \text{sen}\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \quad (19)$$

$$T_f(x,t) = T_f(0,t) + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{T}_f(t) \text{sen}\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \quad (20)$$

3.3. MODELO COMPUTACIONAL

Um código simulador foi desenvolvido na linguagem de programação Python e o banco de dados SQLite tem sido utilizado. O programa simulador tem como característica fundamental a implementação de uma interface gráfica para simulação e análise através de gráficos, analisar os resultados da variação dos parâmetros físicos para o armazenamento térmico. Na Figura 11, mostra-se um fluxograma simplificado dos dados do programa.

Figura 11: Diagrama de fluxo de dados para sistema computacional



Fonte: Autor

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. PARÂMETROS PARA ALIMENTAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL

Os resultados das previsões são obtidos a partir de um conjunto de parâmetros de entrada para alimentar o algoritmo computacional desenvolvido para este trabalho. Os valores dos parâmetros de entrada são necessários para o cálculo das curvas de previsão e esses valores são mostrados na Tabela 5. Os parâmetros da Tabela 5 são considerados os parâmetros iniciais para alimentar o código do computador.

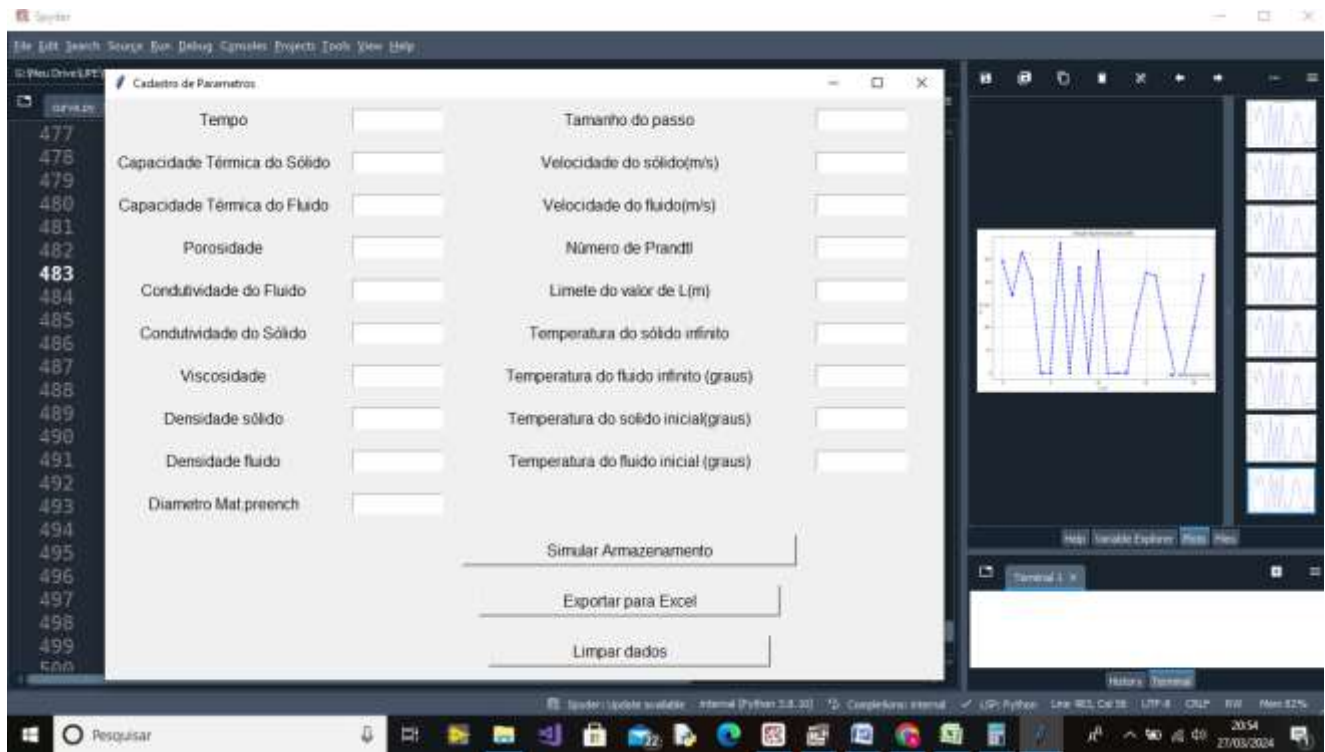
Tabela 5: Parâmetros utilizados para realizar as simulações

Parâmetros	Símbolos	Variações	Refs.
Condutividade térmica do sólido (W/m K)	λ_s	1,1-7,0	[43]
Condutividade térmica do fluido (W/m K)	λ_f	1,5-6,0	[33]
Capacidade térmica do sólido (kJ/kg K)	c_{ps}	0,8-7,7	[42]
Capacidade térmica do fluido (kJ/kg K)	c_{pf}	0,4-7,4	[36]
Viscosidade (Pa s)	M	0,001	[41]
Porosidade (-)	Φ	0,5	[42]
Velocidade do fluido (m/s)	u_f	0,04-2,4	[42]
Diâmetro da partícula (mm)	D_p	2,0	[42]
Densidade do sólido (kg/m ³)	ρ_s	2750	[42]
Densidade do fluido (kg/m ³)	ρ_f	1000	[44]
Condutividade térmica efetiva (W/m K)	λ_{feff}	0,2	[42]
Temperatura do solido no infinito	$T_{s,\infty}$	27	(-)
Temperatura do fluido no infinito	$T_{f\infty}$	30	(-)
Temperatura inicial do sólido (K)	$T_{s,0}$	298	[42]
Temperatura inicial do fluido (K)	$T_{f,0}$	298	[42]

4.2. SIMULADOR DO MODELO MATEMÁTICO

Um simulador de processo foi construído a partir do modelo matemático e tela deste simulador pode vista na Figura 12 abaixo.

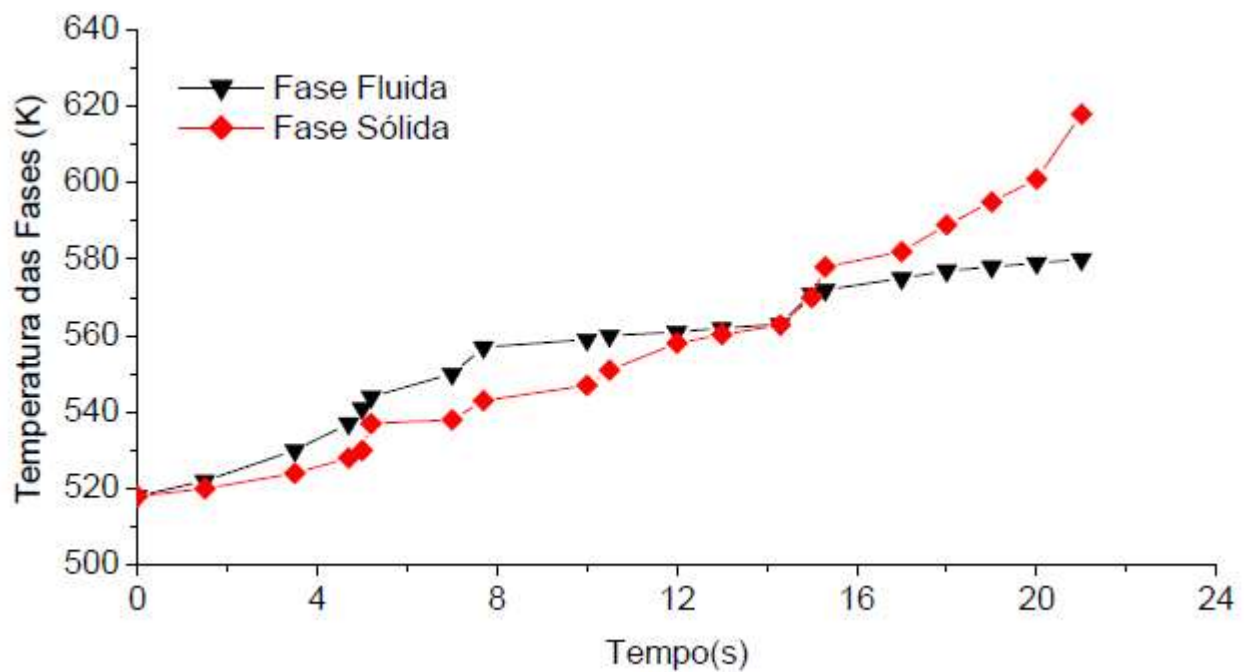
Figura 12: Tela do simulador de processo de armazenamento térmico



Fonte: Autor

4.2.1. PERFIL CARREGAMENTO DAS FASES SÓLIDA E FLUÍDA

Figura 13: Perfil de carregamento da temperatura da fase sólida e Fluída.

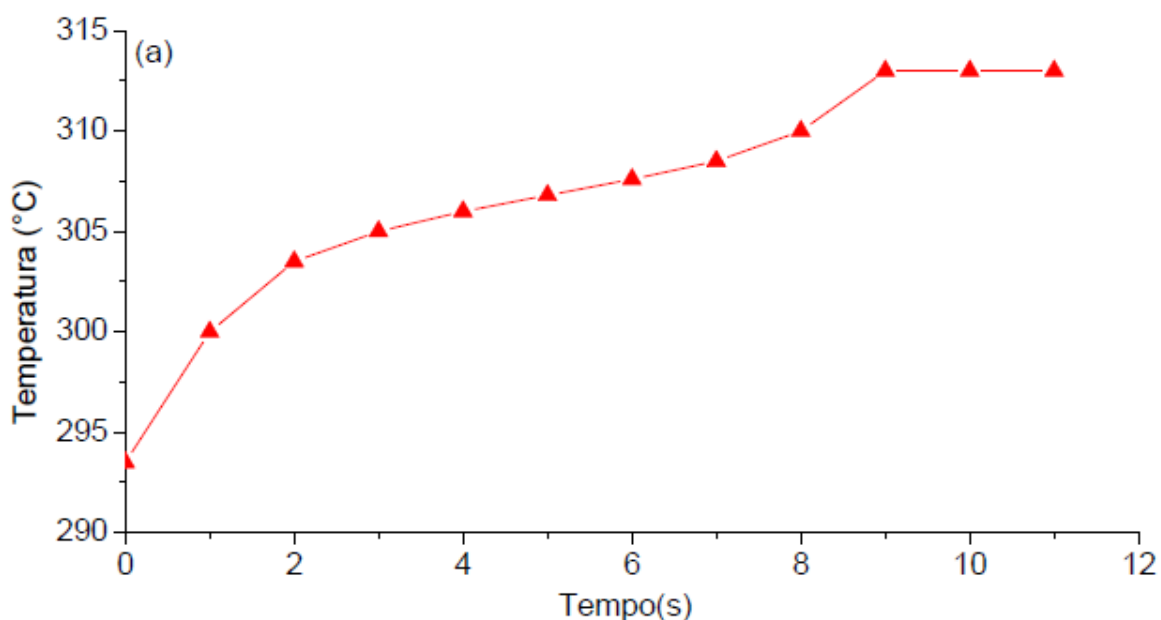


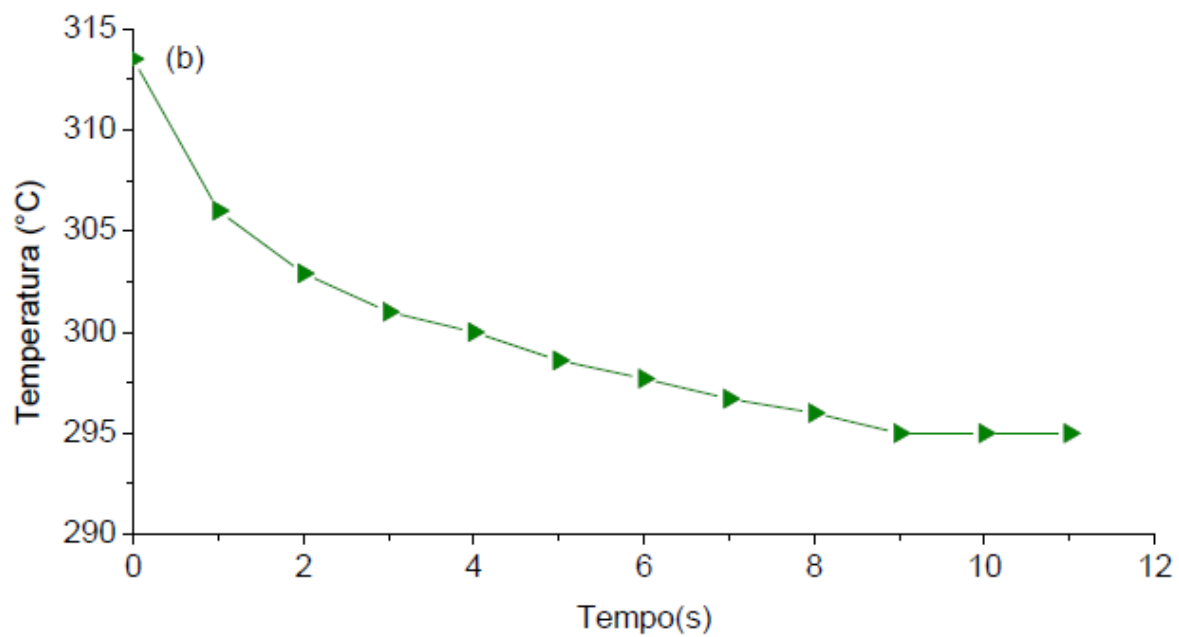
A Figura 13 mostra um perfil de carregamento da temperatura da fase sólida e fluída como função do tempo de carregamento em um sistema armazenamento de leito empacotado, simulado através do software desenvolvido para este projeto de pesquisa acadêmica. A curva em vermelho, estado sólido, simula o comportamento das partículas de sal na mistura dentro do leito empacotado. Nota-se que, a temperatura no carregamento do estado sólido alcançou 615K devido a influência dos parâmetros térmicos mencionados no estado da arte. A curva em vermelho, simula o comportamento do fluído no leito empacotado, também sofrendo a influência dos parâmetros térmicos ultrapassa a temperatura de 570K no carregamento do fluído.

Nota-se que o sólido apresenta uma maior temperatura em relação ao fluído, e ambos são influenciados na mistura em relação a sua temperatura final. O estado sólido conseguiu absorver mais energia térmica em relação ao fluído conforme o gráfico acima, já o fluído atingindo 575,5K apresentando uma tendência de estabilidade no tempo final de 22s.

4.2.2. PERFIL DE CARREGAMENTO (A) E DESCARREGAMENTO (B) DA TEMPERATURA DA FASE SÓLIDA

Figura 14: Perfil de carregamento (a) e descarregamento (b) da temperatura da fase sólida e Fluída.



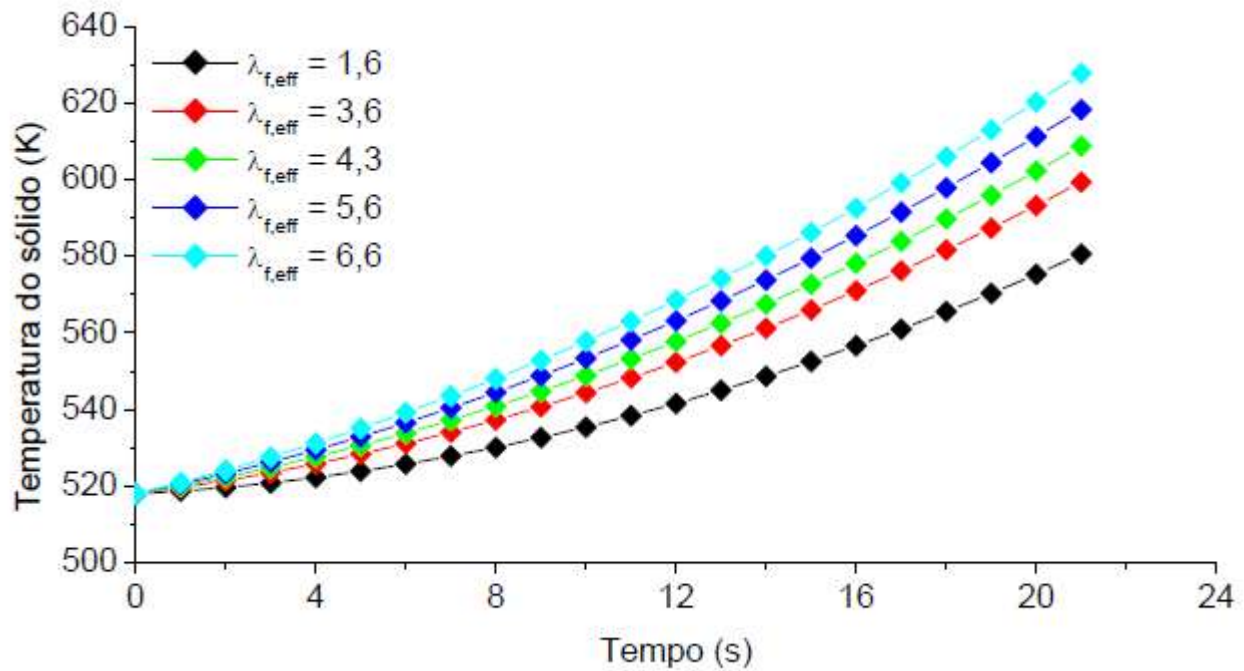


A Figura 14 mostra o perfil de carregamento (a) e descarregamento (b) da temperatura da fase sólida como função do tempo. Observa-se no gráfico (a), o processo de carregamento do leito empacotado, a temperatura aumenta com o tempo e alcançar a estabilidade da temperatura em 313 °C, enquanto no gráfico (b) a ocorrência da estabilidade da temperatura é registrada à 295 °C no processo de descarregamento do leito empacotado.

4.3. ANALISES DE SENSIBILIDADE

4.3.1. ANALISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO ΔF_{EFF} PARA TS

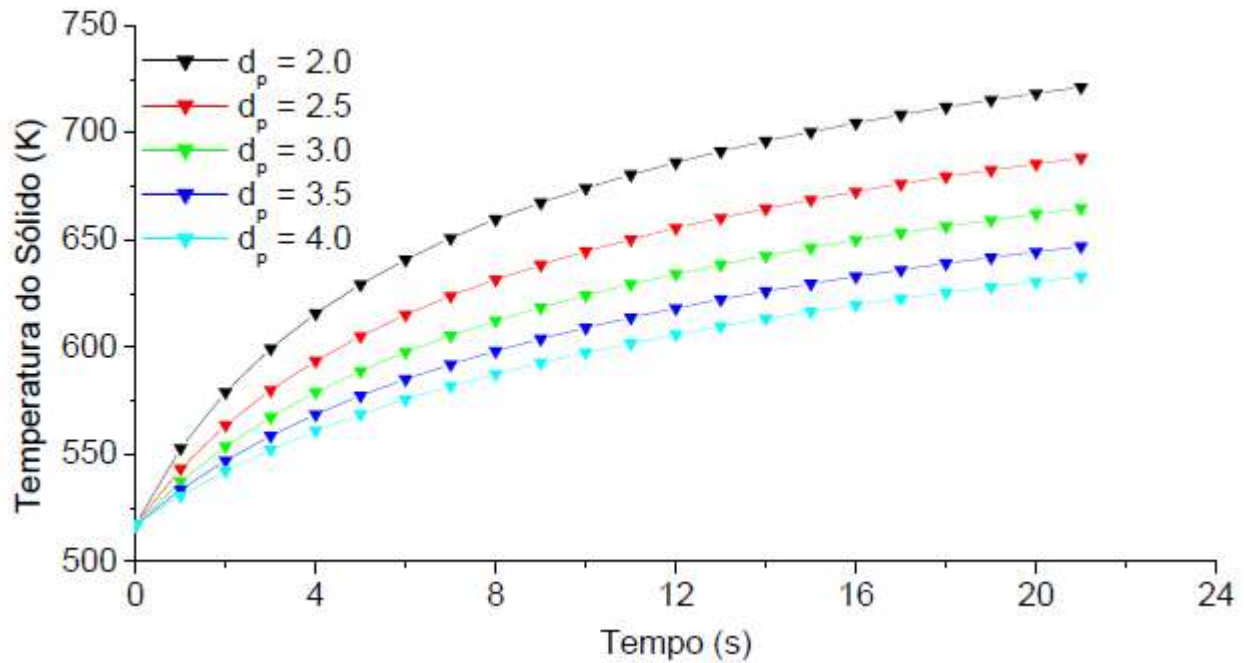
Figura 15: Perfil de Temperatura da fase sólida utilizando a variação da condutividade



A Figura 15 mostra os perfis de carregamento da temperatura da fase sólida em função do tempo. Nota-se que, a condutividade térmica efetiva do fluido tem um efeito relevante sobre a temperatura de carregamento do sólido. Esta variou-se em um intervalo de 1,6 à 6,6 ou seja, a temperatura no carregamento alcançou um valor acima de 620K. Observa-se que ao passo que a condutividade térmica efetiva do fluido aumenta, a temperatura de carregamento da fase sólida também aumenta, ocasionado pela maior condutividade térmica efetiva entre as moléculas da fase sólida e fluida, tornando estes parâmetros relevante para modelo físico desenvolvido.

4.3.2. ANALISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO DP PARA TS

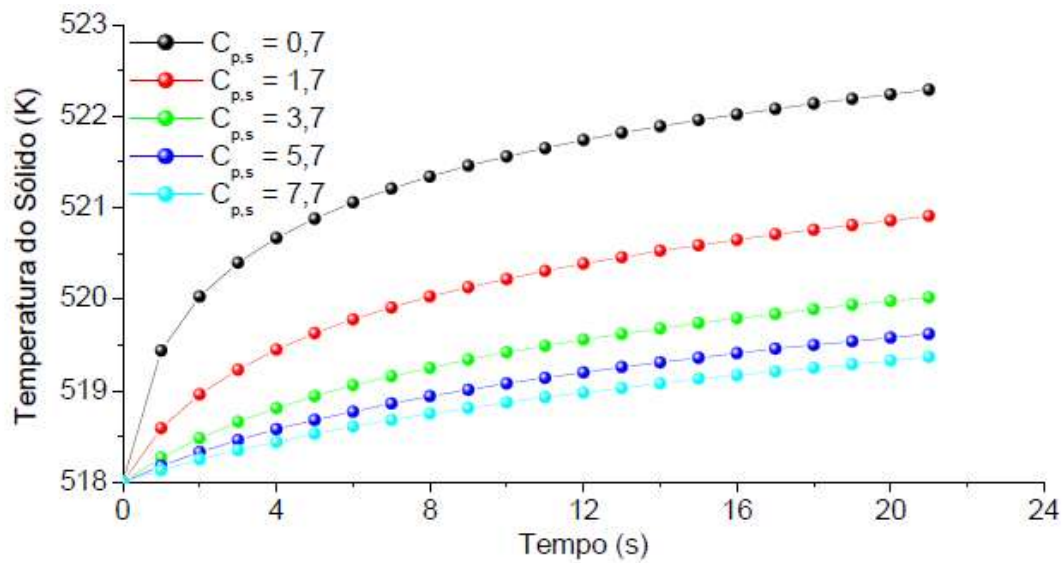
Figura 16: Perfil de Temperatura da fase sólida utilizando a variação do diâmetro da partícula do sólido



A Figura 16 mostra os perfis de carregamento da temperatura da fase sólida em função do tempo. Nota-se que, o diâmetro da partícula do sólido não é relevante na temperatura de carregamento do estado sólido, esta variou-se em um intervalo de 2.0 à 4.0, observa-se uma queda na temperatura do sólido. A variação do diâmetro é bem expressiva na análise de sensibilidade, mas devido a pouca absorção de energia térmica pelas partículas de sal produz o resultado da Figura 16.

4.3.3. ANALISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO CPS PARA TS

Figura 17: Perfil de Temperatura da fase sólida utilizando a variação da capacidade térmica do sólido

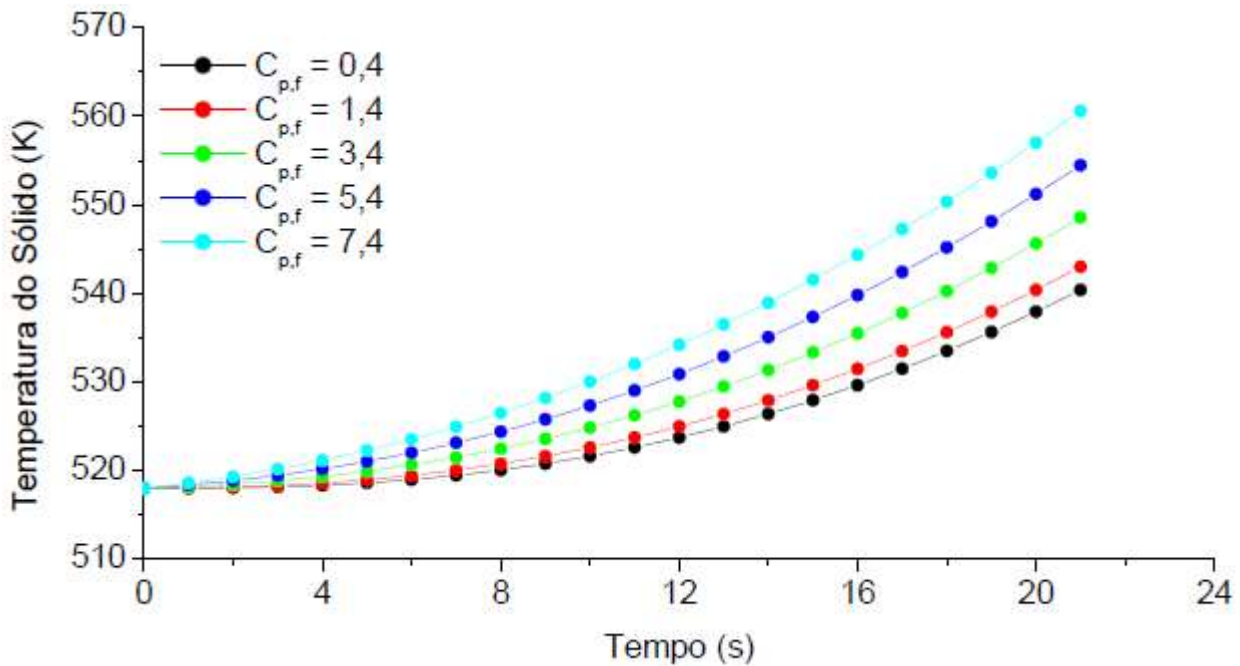


A Figura 17 mostra os perfis de carregamento da temperatura da fase sólida em função do tempo de carregamento. Observa-se que a capacidade térmica do sólido tem um pequeno impacto sobre a temperatura de carregamento do sólido, esta variou-se em um intervalo de 0,7 à 7,7, a temperatura alcançou um valor acima de 522,7K. Verifica-se que com o aumento da capacidade térmica do sólido, a temperatura de carga do sólido tem uma pequena queda de temperatura.

4.3.4. ANALISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO CPF PARA TF

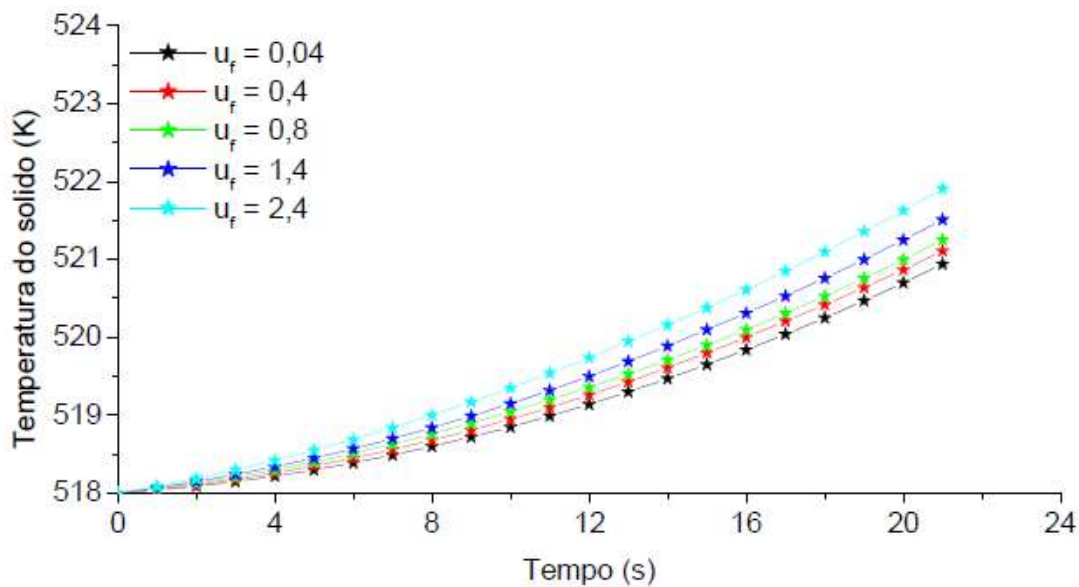
A Figura 18 mostra os perfis de carregamento da temperatura da fase fluida em função do tempo de carregamento. Nota-se que, a capacidade térmica do fluido tem um efeito relevante, pois a temperatura de carga alcançou um valor acima de 555K. A capacidade térmica variou-se em um intervalo de 0,4 à 7,4. Nota-se na análise de sensibilidade para cpf relacionada a T_f , é expressiva tornando as curvas de perfis distanciadas devido ao efeito do parâmetro na temperatura de carga do fluido no leito empacotado.

Figura 18: Perfil de Temperatura da fase fluida utilizando a variação da capacidade térmica do fluido



4.3.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO U_f PARA T_s

Figura 19: Perfil de Temperatura da fase sólida utilizando a variação da velocidade do fluido

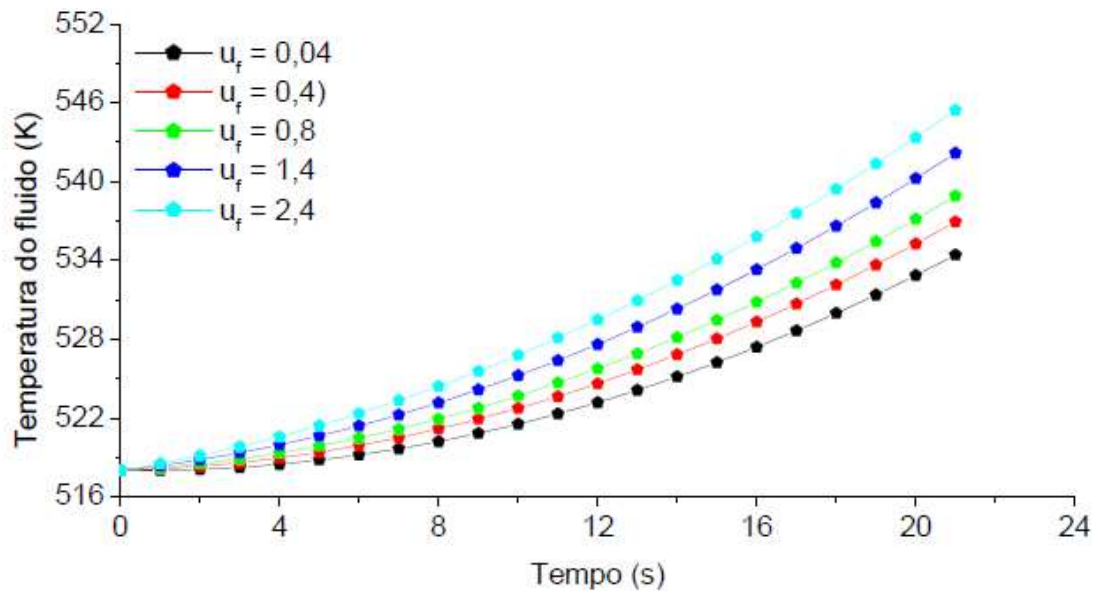


A Figura 19 mostra os perfis de carregamento da temperatura da fase sólida em função do tempo de carga. Nota-se que, a velocidade do fluido não tem um efeito importante sobre a temperatura do sólido. A velocidade do fluido variou-se em um intervalo de 0,04 à 2,4, ou seja, conseguir-se alcança um valor de temperatura de carregamento acima de 521,5K. Na análise de sensibilidade desse

parâmetro constata-se uma diminuição se relacionado ao parâmetro u_f , portanto os gráficos de perfis de temperatura tornaram-se menos distanciados uns dos outros tornando a análise menos expressiva.

4.3.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE VARIANDO u_f PARA T_f

Figura 20: Perfil de Temperatura da fase fluida utilizando a variação da velocidade do fluido

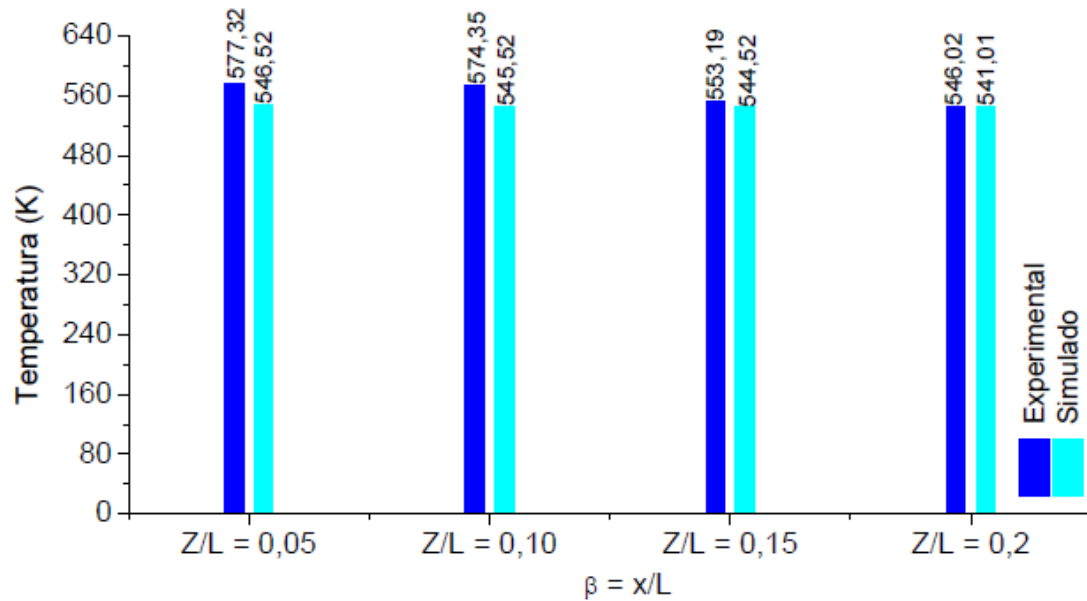


A Figura 20 mostra os perfis de carregamento da temperatura da fase fluída em função do tempo de carregamento. Ver-se que, a velocidade do fluido tem um efeito importante na temperatura final de carga do fluido, pois sua temperatura aumentou de 518K para 545K a uma velocidade final do sólido de 3,4 m/s. A velocidade foi simulada no intervalo 0,04 à 2,4. A análise de sensibilidade do parâmetro v_f em relação a T_f verificou-se uma boa influência, pois as curvas de perfis de temperatura tiveram valores significativos para cada caso quando simuladas.

4.4. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados produzidos através do simulador foram comparados com as médias de temperaturas dada por Yang et al. [42] conforme a Figura 21 abaixo.

Figura 21: Comparação da temperatura da fase fluida deste trabalho versus o trabalho de Yang et al. [42].



Na Tabela 6, foi mostrado o Erro Médio Relativo (EMR) que relata uma incerteza entre os resultados experimentais obtidos por Yang et al. [42] e os resultados simulados.

Tabela 6: Estimativa do Erro Médio Relativo (EMR) do experimental versus o erro do modelo desenvolvido.

Comprimento do Leito	x/L = 0,05	x/L = 0,10	x/L = 0,15	x/L = 0,20
Erro Médio Relativo	5,34%	5,02%	1,95%	0,92%

4.5. AVALIAÇÃO PERIÓDICAS DOS PERFIS DE TEMPERATURAS DAS FASES GASOSA E SÓLIDA PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DO LEITO EMPACOTADO

Além da análise feita acima considerando as temperaturas iniciais das fases sólida e gasosa constantes, foi também feita uma avaliação periódica considerando as condições de contornos na entrada do sistema térmico como funções periódicas para as temperaturas das fases sólida e gasosa como segue.

$$T_s(0,t) = T_{s,0} \left[1 + A \cos(\omega t) \right]; \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (21)$$

$$T_f(0,t) = T_{f,0} \left[1 + A \cos(\omega t) \right]; \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (22)$$

As Figuras 22-26 mostram os perfis periódicos de carregamento e descarregamento das temperaturas das fases fluída e sólida em função do comprimento do leito de carregamento. A solução periódica

relata o impacto do carregamento e descarregamento de energia térmica armazenada ao longo do comprimento do sistema de leito empacotado. Nota-se que, o carregamento e descarregamento não é constante ao longo do leito e, portanto, há seções de alta energia e baixa energia.

Depois de iniciar o regime de utilização perturbações periódicas na entrada, o sistema precisa de um a dois períodos para atingir um estado cíclico em curso. Um padrão espacial é causado pela carga e descarga alternadas do armazenamento de calor resultante do aquecimento do processo. A ideia chave é melhorar o desempenho do leito empacotado com uma estimulação periódica a partir das entradas periódicas ao sistema.

Como resultados, As Figuras 22, 23 e 26 apresentaram uma maior alternância de estado ciclo mais constante, enquanto as Figuras 24 e 25 a alternância de estado ciclo é menos constante. A alternância de estado ciclo permite obter uma quantidade de energia mais homogênea ao longo do sistema energético.

Figura 22: Perfis de Temperatura das fases sólida e fluida como função do espaço utilizando 20 iterações.

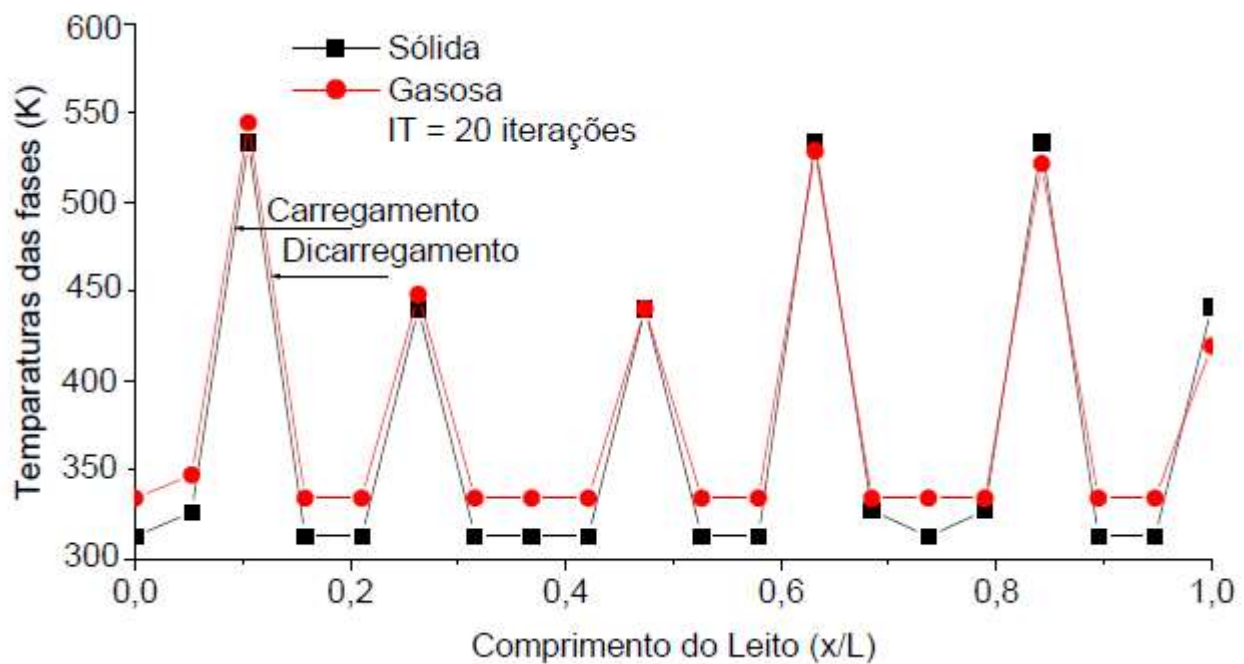


Figura 23: Perfis de Temperatura das fases sólida e fluida como função do espaço utilizando 30 iterações.

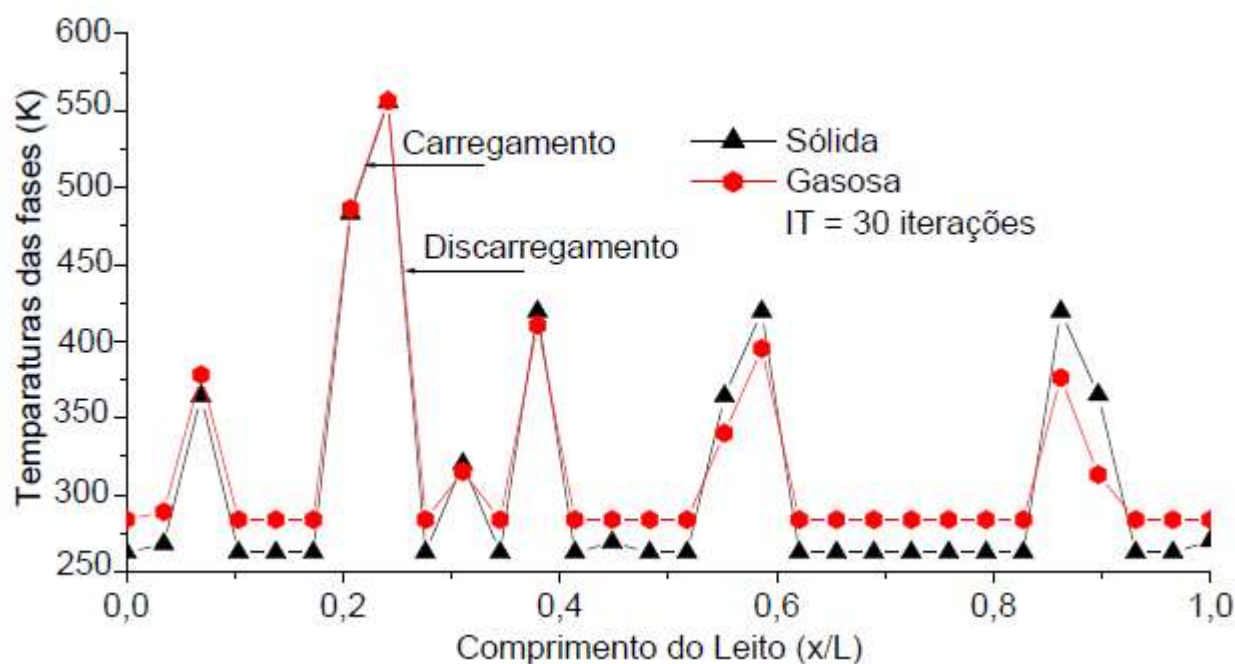


Figura 24: Perfis de Temperatura das fases sólida e fluida como função do espaço utilizando 35 iterações.

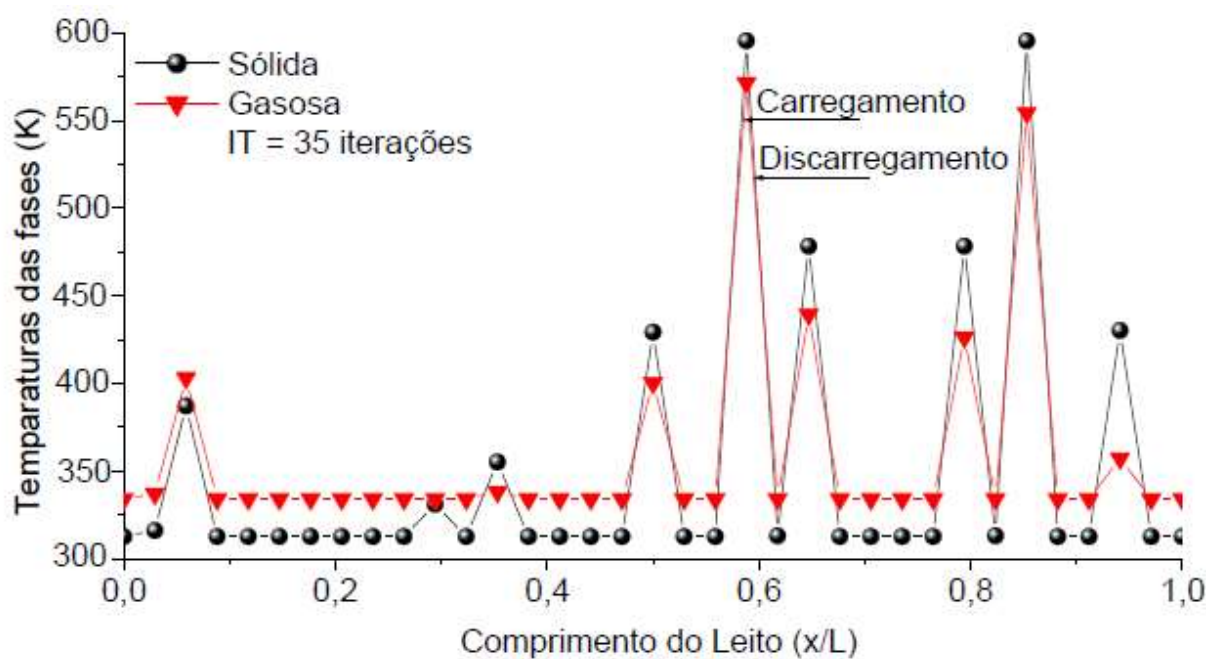


Figura 25: Perfis de Temperatura das fases sólida e fluida como função do espaço utilizando 45 iterações.

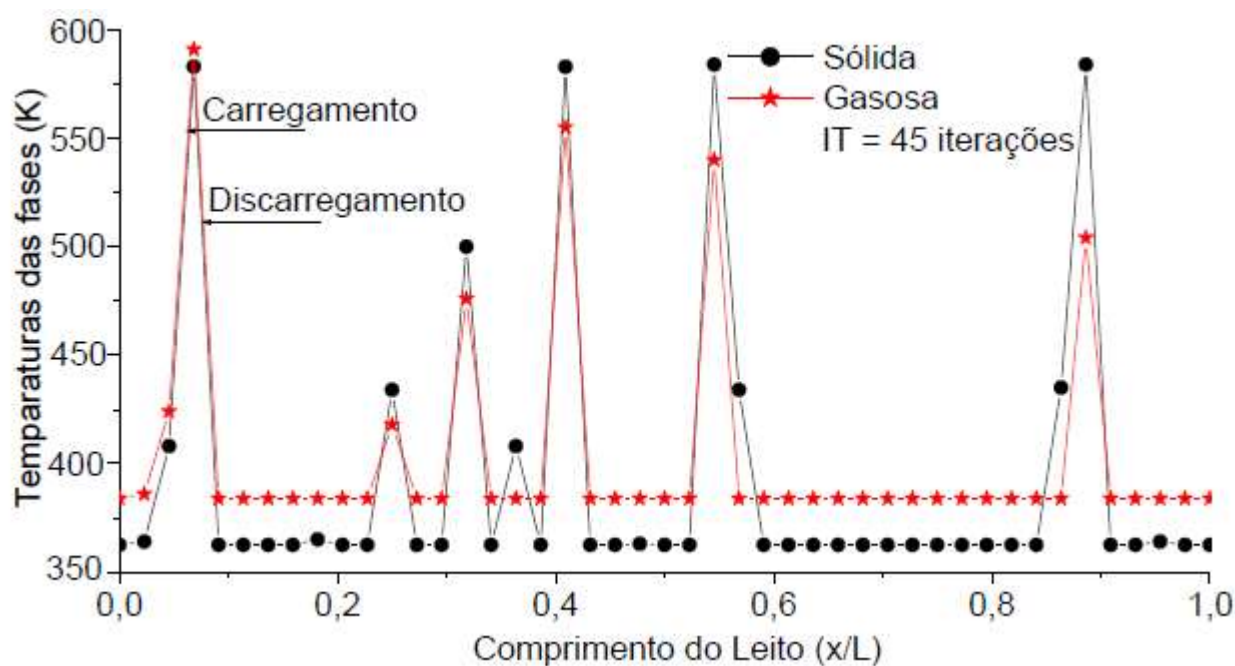
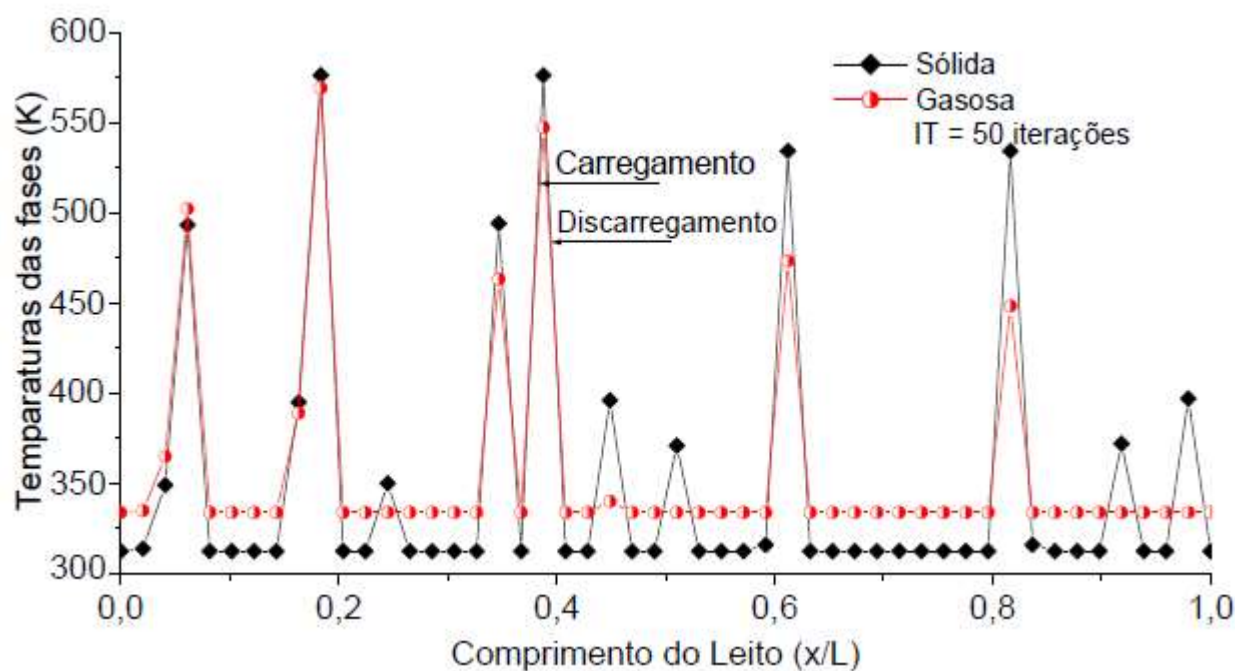


Figura 26: Perfis de Temperatura das fases sólida e fluida como função do espaço utilizando 50 iterações.



CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES

Conduzida no contexto da energia térmica, esta pesquisa recorreu à metodologia de armazenamento de energia usando modelos matemáticos. A metodologia de armazenamento permite o carregamento e o descarregamento de energia térmica em um sistema de leito empacotado de partículas aglomeradas. A partir do carregamento e o descarregamento de energia é possível conhecer o deslocamento do equilíbrio termodinâmico. Neste contexto, é possível conduzir as seguintes conclusões: O Aproveitamento da energia térmica é fundamental para conduzir vários processos, o processo de aproveitamento da energia térmica é considerado um processo potencial para o meio ambiente.

O projeto de pesquisa conseguiu obter bons resultados através da modelagem computacional, métrica dos parâmetros de entrada do programa simulador, bem como a sua calibração para obter os resultados desse projeto de pesquisa acadêmica. A pesquisa dividiu-se em duas linhas: a primeira chamada de degrau com gráficos de curvas de temperatura em função do tempo, e uma segunda linha chamada de periódica com gráficos de temperatura em função do espaço, cuja a característica principal é a utilização de uma função cosseno para obter os gráficos periódicos de temperatura em função do espaço.

Os resultados produzidos pelo simulador são satisfatórios e quando comparados com os dados da literatura produzem erros e médias que estão dentro dos padrões científicos, tendo obtido valores de erro médio relativo (EMR) entre 0,92% a 5,34%. Nota-se que os parâmetros como a capacidade térmica, condutividade térmica, velocidade do sólido, porosidade, tempo e espaço de carregamento tem grande influência no armazenamento térmico do leito empacotado de partículas aglomeradas. Outros parâmetros também foram simulados e analisados neste projeto de pesquisa tais como: a densidade do sólido e fluído, porosidade do sólido e viscosidade da fase fluída e diâmetros das partículas de sal. Os resultados obtidos mostram que o parâmetro densidade foi pouco relevante para a temperatura de armazenamento no leito empacotado, além disso a capacidade térmica do sólido não se apresenta relevante para a temperatura de carregamento do estado sólido, já a viscosidade e diâmetros das partículas do sal influenciam na temperatura do armazenamento dentro do leito empacotado. Os resultados produzidos pelo simulador na etapa periódica trouxeram resultados mais estáveis e sensíveis a variação dos parâmetros termofísicos em relação a etapa degrau, além disso,

outras funções trigonométricas podem ser testadas e verificadas, sendo ainda este tópico de uma possível projeto futuro.

APÊNDICE A: APROXIMAÇÃO DE HERMITE

A solução aproximada das equações integrais acopladas (CIEA) são definidas através da aproximação de Hermite para resolver o sistema de EDPs deste trabalho, estamos aplicando a metodologia CIEA conforme abordagem abaixo. Esta metodologia é usada para transformar EDPs em EDOs levando em consideração as condições de contorno de cada EDP. Aqui, foram utilizadas as expressões abaixo para transformar EDP em EDOs juntamente com as condições de contorno.

Calculando os valores das funções $T_s(0, t)$ e $T_s(L, t)$ para transforma a EDP (equação diferencial parcial) em EDO (equação diferencial ordinária) para o estado sólido.

$$\bar{T}_j(t) \cong \frac{1}{L} \int_0^L T_j(x, t) dx; j = s \text{ e } f \quad (\text{A.1})$$

$$T_j(L, t) - T_j(0, t) \cong \frac{L}{2} \left[\frac{\partial T_j(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} - \frac{\partial T_j(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} \right] \quad (\text{A.2})$$

$$\bar{T}_j(t) \cong \frac{L}{2} [T_s(0, t) + T_s(L, t)] + \frac{L^2}{12} \left[\frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} - \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} \right] \quad (\text{A.3})$$

Passo 1: A partir das funções $T_s(0, t)$ e $T_s(L, t)$ aplicado na Equação (A.2) para obter a primeira equação do sistema de equações.

$$T_s(L, t) - T_s(0, t) \cong \frac{L}{2} \left[\frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} - \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} \right] \quad (\text{A.4})$$

$$T_s(L, t) - T_s(0, t) = \frac{L}{2} \{ [v_s T_s(0, t)] - v_s T_s(x, 0) \} + [B_4 T_{s,\infty} - [B_4 T_s(L, t)]] \quad (\text{A.5})$$

Abrindo a Equação (A.5), obtem-se:

$$T_s(L, t) - T_s(0, t) = \frac{L}{2} v_s T_s(0, t) - \frac{L}{2} v_s T_s(x, 0) + \frac{L}{2} B_4 T_{s,\infty} - \frac{L}{2} B_4 T_s(L, t) \quad (\text{A.6})$$

Organizando a Equação (A.6) obtem-se:

$$T_s(L, t) + \frac{L}{2} B_4 T_s(L, t) - T_s(0, t) - \frac{L}{2} v_s T_s(0, t) = -\frac{L}{2} v_s T_s(x, 0) + \frac{L}{2} B_4 T_{s,\infty} \quad (\text{A.7})$$

$$T_s(L, t) \left[1 + \frac{L}{2} B_4 \right] - T_s(0, t) \left[1 + \frac{L}{2} v_s \right] = -\frac{L}{2} v_s T_s(x, 0) + \frac{L}{2} B_4 T_{s,\infty} \quad (\text{A.8})$$

Assim, obtem-se:

$$A_{11}^{(0)} = 1 + \frac{L}{2} B_4 \quad (\text{A.9})$$

$$A_{12}^{(0)} = 1 + \frac{L}{2} v_s \quad (\text{A.10})$$

$$B_1^{(0)} = -\frac{L}{2} v_s T_s(x, 0) + \frac{L}{2} B_4 T_{s,\infty} \quad (\text{A.11})$$

$$A_{11}^{(0)} T_s(L, t) - A_{12}^{(0)} T_s(0, t) = B_1^{(0)} \quad (\text{A.12})$$

Passo 2: Obter a segunda da fase sólida equação considerando as seguintes funções a abaixo:

$$\bar{T}_s(t) \cong \frac{L}{2} [T_s(0, t) + T_s(L, t)] + \frac{L^2}{12} \left[\frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} - \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} \right] \quad (\text{A.13})$$

$$\bar{T}_s(t) \cong \frac{L}{2} [T_s(0, t) + T_s(L, t)] + \frac{L^2}{12} \{ [v_s T_s(0, t) - v_s T_s(x, 0)] - [B_4 T_{s,\infty} - B_4 T_s(L, t)] \} \quad (\text{A.14})$$

Abrindo a Equação (A.14), obtem-se:

$$\bar{T}_s(t) \cong \frac{L}{2} T_s(0, t) + \frac{L}{2} T_s(L, t) + \frac{L^2}{12} v_s T_s(0, t) - \frac{L^2}{12} v_s T_s(x, 0) - \frac{L^2}{12} B_4 T_{s,\infty} + \frac{L^2}{12} B_4 T_s(L, t) \quad (\text{A.15})$$

Organizando a Equação (A.15) obtem-se:

$$(6L + L^2 B_4) T_s(L, t) + (6L + L^2 v_s) T_s(0, t) = 12 \bar{T}_s(t) + L^2 v_s T_s(x, 0) + L^2 B_4 T_{s,\infty} \quad (\text{A.16})$$

$$A_{21}^{(0)} = (6L + L^2 B_4) \quad (\text{A.17})$$

$$A_{22}^{(0)} = (6L + L^2 v_s) \quad (\text{A.18})$$

$$B_2^{(0)} = 12 \bar{T}_s(t) + L^2 v_s T_s(x, 0) + L^2 B_4 T_{s,\infty} \quad (\text{A.19})$$

$$A_{21}^{(0)} T_s(L, t) + A_{22}^{(0)} T_s(0, t) = B_2^{(0)} \quad (\text{A.20})$$

$$\begin{cases} A_{21}^{(0)} T_s(L, t) + A_{22}^{(0)} T_s(0, t) = B_2^{(0)} \\ A_{41}^{(0)} T_s(L, t) - A_{42}^{(0)} T_s(0, t) = B_1^{(0)} \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

Passo 3: Procedimento eliminação de Guass para resolver sistema de equações lineares (A.21) acima

1. Matriz dos coeficientes da etapa (0):

$$A^{(0)} = \begin{pmatrix} A_{11}^{(0)} & A_{12}^{(0)} & | B_1^{(0)} \\ A_{21}^{(0)} & A_{22}^{(0)} & | B_2^{(0)} \end{pmatrix} \quad (B.1)$$

2. Cálculo do multiplicador da linha.

$$M_{21}^{(1)} = \frac{A_{21}^{(0)}}{A_{11}^{(0)}}; L_2^{(1)} = L_2^{(0)} - M_{21}^{(1)} L_1^{(0)} \quad (B.2)$$

$$A_{21}^{(1)} = A_{21}^{(0)} - M_{21}^{(1)} A_{11}^{(0)} \rightarrow A_{21}^{(1)} = 0 \quad (B.3)$$

$$A_{22}^{(1)} = A_{22}^{(0)} - M_{21}^{(1)} A_{12}^{(0)} \rightarrow A_{22}^{(1)} = 6L + L^2 v_s - \frac{(6L + L^2 B_4)}{\left(1 + \frac{L}{2} B_4\right)} \left(1 + \frac{L}{2} v_s\right) \quad (B.4)$$

$$B_2^{(1)} = B_2^{(0)} - M_{21}^{(1)} B_1^{(0)} \rightarrow B_2^{(1)} = 12\bar{T}_s(t) + L^2 v_s T_s(x, 0) + L^2 B_4 T_{s,\infty} - \frac{(6L + L^2 B_4)}{\left(1 + \frac{L}{2} B_4\right)} \quad (B.5)$$

$$\left(-\frac{L}{2} v_s T_s(x, 0) + \frac{L}{2} B_4 T_{s,\infty} \right)$$

$$A^{(1)} = \begin{pmatrix} A_{11}^{(0)} & A_{12}^{(0)} & | B_1^{(0)} \\ 0 & A_{22}^{(0)} & | B_2^{(0)} \end{pmatrix} \quad (B.6)$$

3. Matriz dos coeficientes da etapa (1):

$$\begin{cases} A_{11}^{(0)} T_s(L, t) - A_{12}^{(0)} T_s(0, t) = B_1^{(0)} \\ A_{22}^{(1)} T_s(0, t) = B_2^{(1)} \end{cases} \quad (B.7)$$

Isolando os termos de $T_s(0, t)$ e $T_s(L, t)$ obtém-se:

$$T_s(0,t) = \frac{B_2^{(1)}}{A_{22}^{(1)}} \quad (\text{B.8})$$

$$T_s(0,t) = \frac{12\bar{T}_s(t) + L^2 v_s T_s(x,0) + L^2 B_4 T_{s,\infty} - \frac{(6L + L^2 B_4)}{\left(1 + \frac{L}{2} B_4\right)} \left(-\frac{L}{2} v_s T_s(x,0) + \frac{L}{2} B_4 T_{s,\infty}\right)}{6L + L^2 v_s - \frac{(6L + L^2 B_4)}{\left(1 + \frac{L}{2} B_4\right)} \left(1 + \frac{L}{2} v_s\right)} \quad (\text{B.9})$$

$$T_s(L,t) = \frac{B_1^{(0)} + A_{12}^{(0)}}{A_{11}^{(0)}} \quad (\text{B.10})$$

$$T_s(L,t) = \frac{\left(-\frac{L}{2} v_s T_s(x,0) + \frac{L}{2} B_4 T_{s,\infty}\right) + \left(1 + \frac{L}{2} v_s\right)}{\left(1 + \frac{L}{2} B_4\right)} \quad (\text{B.11})$$

Passo 4: Transformação da EDP da fase sólida para EDO:

Os coeficientes B1, B2 e B3 da Equação (8) são descritos como segue:

$$B_1 = (1 - \varphi) \rho_s c_{p,s} \quad (\text{C.1})$$

$$B_2 = (1 - \varphi) \lambda_s \quad (\text{C.2})$$

$$B_3 = h_{sf} a_{sf} \quad (\text{C.3})$$

$$B_4 = \frac{hsf}{\lambda_s} \quad (\text{C.4})$$

$$\left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=L} = B_4 T_{s,\infty} - B_4 T_s(L,t) \quad (\text{C.5})$$

$$\left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=0} = v_s T_s(0,t) - v_s T_s(x,0) \quad (\text{C.6})$$

$$B \frac{\partial T_s}{\partial t} = B_2 \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + B_3 (T_f - T_s) \quad (\text{C.7})$$

Passo 5: Integrando a Equação (C.7) obtem-se:

$$B_1 \frac{1}{L} \frac{d}{dt} \int_0^L T_s(x,t) dx = B_2 \frac{1}{L} \int_0^L \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} dx + B_3 \left[\frac{1}{L} \int_0^L T_f(x,t) dx - \frac{1}{L} \int_0^L T_s(x,t) dx \right] \quad (C.8)$$

Resolvendo, tem-se:

$$B_1 \frac{d\bar{T}_s(t)}{dt} = \beta_2 \left(\left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=L} - \left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=0} \right) + \beta_3 \left[\bar{T}_f(t) - \bar{T}_s(t) \right] \quad (C.9)$$

Passo 6: Substituindo as Equações (C.5) e (C.6) na Equação (C.8). Então, encontra-se.

$$B_1 \frac{d\bar{T}_s(t)}{dt} = \beta_2 \left\{ \left[B_4 T_{s,\infty} - B_4 T_s(L,t) \right] - \left[v_s T_s(0,t) - v_s T_s(x,0) \right] \right\} + \beta_3 \left[\bar{T}_f(t) - \bar{T}_s(t) \right] \quad (C.10)$$

Passo 7: Obter $T_f(0, t)$ e $T_f(L, t)$ para equação do fluido:

$$T_f(L,t) - T_f(0,t) \cong \frac{L}{2} \left[\left. \frac{\partial T_f(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} - \left. \frac{\partial T_f(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L} \right] \quad (D.1)$$

$$T_f(L,t) - T_s(0,t) = \frac{L}{2} \left\{ \left[v_s T_s(0,t) \right] - v_s T_s(x,0) \right\} + \left[B_4 T_{s,\infty} - B_4 T_s(L,t) \right] \quad (D.2)$$

Abrindo a Equação (D.2) obtem-se:

$$T_f(L,t) - T_f(0,t) = \frac{L}{2} v_f T_f(0,t) - \frac{L}{2} v_f T_f(x,0) + \frac{L}{2} B_4 T_{f,\infty} - \frac{L}{2} B_4 T_f(L,t) \quad (D.3)$$

Organizando a Equação (D.3) obtem-se:

$$T_f(L,t) \left[1 + \frac{L}{2} B_4 \right] - T_f(0,t) \left[1 + \frac{L}{2} v_f \right] = -\frac{L}{2} v_f T_f(x,0) + \frac{L}{2} B_4 T_{f,\infty} \quad (D.4)$$

Assim, obtem-se:

$$A_{11}^{(0)} = 1 + \frac{L}{2} B_4 \quad (D.5)$$

$$A_{12}^{(0)} = 1 + \frac{L}{2} v_f \quad (D.6)$$

$$B_1^{(0)} = -\frac{L}{2} v_f T_f(x,0) + \frac{L}{2} B_4 T_{f,\infty} \quad (D.7)$$

$$A_{11}^{(0)} T_f(L,t) - A_{12}^{(0)} T_f(0,t) = B_1^{(0)} \quad (D.8)$$

Passo 8: Obter a segunda da fase fluida equação considerando as seguintes funções a abaixo:

$$\bar{T}_f(t) \equiv \frac{L}{2} [T_f(0,t) + T_f(L,t)] + \frac{L^2}{12} \left[\frac{\partial T_f(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} - \frac{\partial T_f(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=L} \right] \quad (D.9)$$

$$\bar{T}_f(t) \equiv \frac{L}{2} [T_f(0,t) + T_f(L,t)] + \frac{L^2}{12} \left\{ [v_f T_f(0,t) - v_f T_f(x,0)] - [B_4 T_{f,\infty} - B_4 T_f(L,t)] \right\} \quad (D.10)$$

Abrindo a Equação (D.10), obtem-se:

$$\bar{T}_f(t) \equiv \frac{L}{2} T_f(0,t) + \frac{L}{2} T_f(L,t) + \frac{L^2}{12} v_f T_f(0,t) - \frac{L^2}{12} v_f T_f(x,0) - \frac{L^2}{12} B_4 T_{f,\infty} + \frac{L^2}{12} B_4 T_f(L,t) \quad (D.11)$$

Organizando a Equação (D.11), obtem-se:

$$(6L + L^2 B_4) T_f(L,t) + (6L + L^2 v_f) T_f(0,t) = 12 \bar{T}_f(t) + L^2 v_f T_f(x,0) + L^2 B_4 T_{f,\infty} \quad (D.12)$$

Assim, tem-se:

$$A_{21}^{(0)} = (6L + L^2 B_4) \quad (D.13)$$

$$A_{22}^{(0)} = (6L + L^2 v_f) \quad (D.14)$$

$$B_2^{(0)} = 12 \bar{T}_f(t) + L^2 v_f T_f(x,0) + L^2 B_4 T_{f,\infty} \quad (D.15)$$

$$A_{21}^{(0)} T_f(L,t) + A_{22}^{(0)} T_f(0,t) = B_2^{(0)} \quad (D.16)$$

$$\begin{cases} A_{21}^{(0)} T_f(L,t) + A_{22}^{(0)} T_f(0,t) = B_2^{(0)} \\ A_{11}^{(0)} T_f(L,t) - A_{12}^{(0)} T_f(0,t) = B_1^{(0)} \end{cases} \quad (D.17)$$

Passo 9: Procedimento eliminação de Guass para resolver sistema de equações lineares (D.17) acima.

1. Matriz dos coeficientes da etapa (0):

$$A^{(0)} = \left(\begin{array}{cc|c} A_{11}^{(0)} & A_{12}^{(0)} & B_1^{(0)} \\ A_{21}^{(0)} & A_{22}^{(0)} & B_2^{(0)} \end{array} \right) \quad (D.18)$$

Cálculo do multiplicador e da linha.

$$M_{21}^{(1)} = \frac{A_{21}^{(0)}}{A_{11}^{(0)}}; L_2^{(1)} = L_2^{(0)} - M_{21}^{(1)} L_1^{(0)} \quad (D.19)$$

Cálculo dos elementos da linha L_2 :

$$A_{21}^{(1)} = A_{21}^{(0)} - M_{21}^{(1)} A_{11}^{(0)} \rightarrow A_{21}^{(1)} = 0 \quad (D.20)$$

$$A_{22}^{(1)} = A_{22}^{(0)} - M_{21}^{(1)} A_{12}^{(0)} \rightarrow A_{22}^{(1)} = 6L + L^2 v_f - \frac{(6L + L^2 B_4)}{\left(1 + \frac{L}{2} B_4\right)} \left(1 + \frac{L}{2} v_f\right) \quad (D.21)$$

$$B_2^{(1)} = B_2^{(0)} - M_{21}^{(1)} B_1^{(0)} \rightarrow B_2^{(1)} = 12\bar{T}_f(t) + L^2 v_f T_f(x, 0) + L^2 B_4 T_{f\infty} - \frac{(6L + L^2 B_4)}{\left(1 + \frac{L}{2} B_4\right)} \left[-\frac{L}{2} v_f T_f(x, 0) + \frac{L}{2} B_4 T_{f\infty}\right] \quad (D.22)$$

Logo, a matriz $A^{(1)}$ é expressada como:

$$A^{(1)} = \begin{pmatrix} A_{11}^{(0)} & A_{12}^{(0)} & | & B_1^{(0)} \\ 0 & A_{22}^{(0)} & | & B_2^{(0)} \end{pmatrix} \quad (D.23)$$

A partir da matriz (D.23) é possível encontrar o seguinte sistema linear:

$$\begin{cases} A_{11}^{(0)} T_f(L, t) - A_{12}^{(0)} T_f(0, t) = B_1^{(0)} \\ A_{22}^{(1)} T_f(0, t) = B_2^{(1)} \end{cases} \quad (D.24)$$

A partir da matriz (D.24) é possível encontrar o seguinte $T_f(0, t)$ e $T_f(L, t)$ como segue.

$$T_f(0, t) = \frac{B_2^{(1)}}{A_{22}^{(1)}} \quad (D.25)$$

Substituindo $B_2^{(1)}$ e $A_{22}^{(1)}$ na Equação (D.25), obtem-se:

$$T_f(0, t) = \frac{12\bar{T}_f(t) + L^2 v_f T_f(x, 0) + L^2 B_4 T_{f\infty} - \frac{(6L + L^2 B_4)}{\left(1 + \frac{L}{2} B_4\right)} \left(-\frac{L}{2} v_f T_f(x, 0) + \frac{L}{2} B_4 T_{f\infty}\right)}{6L + L^2 v_f - \frac{(6L + L^2 B_4)}{\left(1 + \frac{L}{2} B_4\right)} \left(1 + \frac{L}{2} v_f\right)} \quad (D.26)$$

Passo 10: Transformação da EDP da fase fluida para EDO:

Os coeficientes W1, W2, W3 e B3 da Equação (12) são descritos como segue

$$w_1 = \varphi \rho_f c_{p,f} \quad (D.27)$$

$$w_2 = \rho_f c_{p,f} u_D \quad (D.28)$$

$$w_3 = h_f a_{cf} \quad (D.29)$$

$$B_3 = \frac{h_f}{\lambda_{feff}} \quad (D.30)$$

$$\left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=0} = v_f T_f(0, t) - v_f T_f(x, 0) \quad (D.31)$$

$$\left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=L} = B_3 T_{f,\infty} - B_3 T_f(L, t) \quad (D.32)$$

$$w_1 \frac{\partial T_f}{\partial t} + w_2 \frac{\partial T_f}{\partial x} = \lambda_{feff} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} w_3 (\bar{T}_s - \bar{T}_f) \quad (D.33)$$

Passo 5: Integrando a Equação (D.33) obtem-se:

$$w_1 \frac{1}{L} \frac{d}{dt} \int_0^L T_f(x, t) dx + w_2 \frac{1}{L} \int_0^L \frac{\partial T_f}{\partial x} dx = \lambda_{feff} \frac{1}{L} \int_0^L \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} dx + w_3 \left[\frac{1}{L} \int_0^L T_s(x, t) dx - \frac{1}{L} \int_0^L T_f(x, t) dx \right] \quad (D.34)$$

Resolvendo a Equação (D.34), obtem-se:

$$\begin{aligned} w_1 \frac{d\bar{T}_f}{dt} = & -w_2 T_f(L, t) + w_2 T_f(0, t) + \lambda_{feff} B_3 T_{f,\infty} - \lambda_{feff} B_3 T_f(L, t) - \lambda_{feff} v_f T_f(0, t) + \lambda_{feff} v_f T_f(x, 0) \\ & + w_3 \bar{T}_s(t) + w_3 \bar{T}_f(t) \end{aligned} \quad (D.35)$$

REFERÊNCIAS

1. Yang, L.; Gao, X.; Li, Z.; Jia, D. Quantitative effects of air pollution on regional daily global and diffuse solar radiation under clear sky conditions, *Energy Reports* 8: 1935-1948, 2022.
2. El Mghouchi, Y. On the prediction of daily global solar radiation using temperature as input. An application of hybrid machine learners to the six climatic Moroccan zones, *Energy Conversion and Management: X13*, 100157, 2022.
3. Ji, Y.; Song, J.; Shen, P. A review of studies and modelling of solar radiation on human thermal comfort in outdoor environment, *Building Environment* 214: 108891, 2022.
4. Wang, H.; An, C.; Duana, M.; Su, J. Transient thermal analysis of multilayer pipeline with phase change material, *Appl. Ther. Eng.* 165, 114512, 2020.
5. Gupta, M.; Bhatnagar, A.; Dubey, A. K.; Kumar, V.; Mehta, D. S. Dual Fresnel lens and segmented mirrors based efficient solar concentration system without tracking sun for solar thermal energy generation, *Energy Sustainable Development* 66: 201-208, 2022.
6. Kratschmann, M.; Dütschke, E. Selling the sun: A critical review of the sustainability of solar energy marketing and advertising in Germany, *Energy Research Social Science* 73: 101919, 2021.
7. Xu, C.; Wang, Z.; He, Y.; Li, X.; Bai, F. Sensitivity analysis of the numerical study on the thermal performance of a packed-bed molten salt thermocline thermal storage system, *Applied Energy* 92: 65-75, 2012
8. Arkar, C.; Medved, S. Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres, *Thermoch Acta* 438: 192-201, 2005.
9. Dias, V. F., Silva, J. D. Mathematical modelling of the solar - driven steam reforming of methanol for a solar thermochemical micro - fluidized bed reformer: thermal performance and thermochemical conversion, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42: 447, 2020.
10. Faistauer, F. Estudo numérico do processo de mudança de fase de PCM em cavidades esféricas, 2016. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica)-UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2016.
11. Dai, Y.; Bai, Y.; Keller, T. Thermal and mechanical performances of GFRP sandwich structures with integrated amorphous silicon photovoltaic cells, *Composite Structures* 290: 115524, 2022.
12. Aghakhani, S.; Ghaffarkhah, A.; Arjmand, M.; Karimi, N.; Afrand, M. Phase change materials: Agents towards energy performance improvement in inclined, vertical, and horizontal walls of residential buildings, *J. Building Engineering* 56: 104656, 2022.
13. Aron, N. S. M.; Khoo, K. S.; Chew, K. W.; Show, P. L.; Chen, W.H.; Nguyen, T. H. P. Sustainability of the four generations of biofuels - A review, *Inter J. Energy Research* 44 (12): 9266-9282, 2020.
14. Costa, L. P. S. Armazenamento de energia térmica através de materiais de mudança de fase. 2014. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica)-FEUP, Porto, Portugal, 2014.

15. Zondag, P. D. H. A. Seasonal and daily heat storage for heating & cooling of buildings, Petten, 2012.
16. Magill, M. C. PCMS for solar thermal energy storage. 2011. Disponível em:
www.puretemp.com. Acesso em: 28 jan. 2024.
17. Dinçer, I.; Rosen, M. A. Thermal Energy Storage Systems and Applications, Chichester, Reino Unido, 2nd ed. 2011.
18. Gao, D.; Deng, T. Energy storage: Preparations and physicochemical properties of solid-liquid Phase change materials for thermal energy storage, Falta local de publicação, 2013.
19. Ticsay, C. Incorporating Phase Change Materials Into Textiles. 2014. Disponível em:
<http://illuminate.usc.edu/printer/2/get-that-34just-right34-feel-incorporating-phase-change-materials-into-textiles/>. Acesso em: 28 jan. 2024.
20. Yahya, S. Phase transformation of phase change materials (PCM). 2012. Disponível em:
<http://epg.eng.ox.ac.uk/>. Acesso em: 28 jan. 2024.
21. Mendes, J. F.; Joyce, A.; Giestas, M. C.; Horta, P.; Brites, M. J. Armazenamento de Energia Solar Térmica. 2010. Disponível em:
https://www.researchgate.net/profile/MargaridaGiestas/publication/374738941_ARMazenamento_DE_ENERGIA_SOLAR_TERMICA/links/652c16be1a05311a2304ba28/ARMazenamento-DE-ENERGIA-SOLAR-TERMICA.pdf. Acesso em: 29 jan. 2024.
22. Chiu, J. N. Heat transfer aspects of using phase change material in thermal energy storage applications, Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, p. xiv, 59, 2011.
23. Lingayat, A. B.; Suple, Y. R. Review On Phase Change Material As Thermal Energy Storage Medium: Materials, Application, International Journal of Engineering Research and Application no. 3 (4):916-921, 2013.
24. Awad, A.; Navarro, H.; Ding, Y.; Wen, D. Thermal-physical properties of nanoparticle- seeded nitrate molten salts. Renewable Energy 2018; 120: 275-288.
25. Çam, N. Y.; Alptekin, E.; Bilir, L.; Ezan, M. A. Thermal behavior of a solar-assisted latent heat thermal energy storage unit on the heating season under variable weather conditions. J. Energy Storage 2022; 52: 104934.
26. Colella, F.; Sciacovelli, A.; Verda, V. Numerical analysis of a medium scale latent energy storage unit for district heating systems. Energy 2022; 45: 397-406.
27. Eisapour, A. H. et. al. A new design to enhance the conductive and convective heat transfer of latent heat thermal energy storage units. Appl Ther Eng 2022.
28. Peng, H.; Dong, H.; Ling, X. Thermal investigation of PCM-based high temperature thermal energy storage in packed bed. Energy Conv Manag 2014; 81: 420-427.

29. Wu, M.; Xu, C.; He, Y. Cyclic behaviors of the molten-salt packed-bed thermal storage system filled with cascaded phase change material capsules. Appl Ther Eng 2016; 93: 1061-1073.
30. LANGE, C. R.; DOLZAN, N. Fenômenos de transporte. Disponível em: <https://www.uniasselvi.com.br/extranet/layout/request/trilha/materiais/livro/livro.php?codigo=14472>. Acesso em: 07 mar. 2023.
31. UFRJ, Transferência de calor por condução. Disponível em: <http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/calor/conducao.html>. Acesso em: 07 mar. 2023.
32. HELERBROCK, R. Transferência de calor por convecção. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-conveccao.htm>. Acesso em: 6 fev. 2023.
33. PROTOLAB, Condutividade térmica. Disponível em: http://www.protolab.com.br/Condutividade_Termica.htm. Acesso em: 21 jan. 2023.
34. KHAN ACADEMY, Condutividade térmica. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics/specific-heat-and-heat-transfer/a/what-is-thermal-conductivity>. Acesso em: 21 jan. 2023.
35. USP, Condutividade térmica de materiais à temperatura ambiente Disponível em: https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5022779/LOM3213/AULA%201-2%20-%20FT_B%20-%20INTRODUCAO%20+%20MEC%20FUND%20TC.pdf. Acesso em: 21 jan. 2023.
36. UFMG, Determinação da capacidade térmica de um calorímetro. Disponível em: https://www.fisica.ufmg.br/ciclo-basico/wp-content/uploads/sites/4/2020/06/Cap_Termica_de_um_Calorimetro_V2015a.pdf. Acesso em: 21 jan. 2023.
37. Ferramental, Conceito de porosidade. Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/dicionario/porosidade/#:~:text=Porosidade%20quer%20dizer%20que%20a,m%C3%A1teria%20menos%20ou%20mais%20densa>. Acesso em: 22 fev. 2023.
38. MAXWELL, Porosidade, conceitos fundamentais. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/10663/10663_3.PDF. Acesso em: 21 jan. 2023.
39. Yang, F. et. al Heat transfer analyses of porous media receiver with multi-dish collector by coupling MCRT and FVM method. Solar Energy 2013; 93: 158-168.
40. Yang, F. et. al Thermal performance analysis of porous medium solar receiver with quartz window to minimize heat flux gradient. Solar Energy 2014; 108: 348-359.
41. Modest, M. Radiative Heat Transfer, Academic Press, San Diego, 2nd ed. 2003.

42. Yang, X.; Cai, Z.; Zuo, Y. Heat transfer performance of a storage system of molten-salt thermocline-packed bed. *Journal Renewable Sustainable Energy* 12, 054102 (2020).
43. Liu, W. et al Heat transfer enhancement of latent heat thermal energy storage in solar heating system: A state-of-the-art review. *J. Energy Storage* 46 (2022) 103727.
44. Houghalen, R.J.;Hwang, N. H.C.;Akan, A.O. *Engenharia Hidráulica*, Pearson, 4nd ed. 2012.

ANÁLISE DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA COM CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO EM UM LEITO EMPACOTADO DE PARTÍCULAS AGLOMERADAS



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)

Ademir Ferreira da Rocha
Jornandes Dias da Silva



EDITORA CONHECIMENTO EM AÇÃO