



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS VINICIUS AGUIAR DA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA TÉRMICA UTILIZANDO ESCÓRIA DE AÇO**

Recife

2025

LUCAS VINICIUS AGUIAR DA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA TÉRMICA UTILIZANDO ESCÓRIA DE AÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Coorientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Lucas Vinicius Aguiar da.

Análise do desempenho de um sistema de armazenamento de energia térmica
utilizando escória de aço / Lucas Vinicius Aguiar da Silva. - Recife, 2025.

74 : il., tab.

Orientador(a): Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Coorientador(a): José Ângelo Peixoto da Costa

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -
Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. armazenamento térmico. 2. escória. 3. leito fixo. 4. Ansys. 5. HTF. 6.
Simulação. I. Guerrero, Jorge Recarte Henriquez. (Orientação). II. Costa, José
Ângelo Peixoto da. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)



**Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP**



**ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2**

Ao 14º dia do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e cinco, às 09:30 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA UTILIZANDO ESCÓRIA DE AÇO**, elaborado pelo aluno **Lucas Vinicius Aguiar da Silva**, matrícula 20190038794, sob a orientação do Prof. **Jorge Recarte Henriquez Guerrero** e coorientação do Prof. **José Ângelo Peixoto da Costa**. A banca foi composta pelos avaliadores: Prof. **Jorge Recarte Henriquez Guerrero** (orientador), Prof. **José Ângelo Peixoto da Costa** (coorientador), Prof. **José Claudino de Lira Junior** (avaliador) e Msc. **Rafael Alberto de Araujo Silva** (avaliador). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua aprovação, atribuindo-lhe a média nove vírgula zero (9,0) julgando-o apto(X) / inapto() à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador: Prof. Jorge Recarte Henriquez Guerrero Nota: 9,0

Assinatura  Documento assinado digitalmente
JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO
Data: 14/08/2025 16:11:56-0300
verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Coorientador: Prof. José Ângelo Peixoto da Costa

Assinatura  Documento assinado digitalmente
JOSE ANGELO PEIXOTO DA COSTA
Data: 14/08/2025 16:42:01-0300
verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Avaliador: Prof. José Claudino de Lira Junior Nota: 9,0
Interno

Assinatura  Documento assinado digitalmente
JOSE CLAUDINO DE LIRA JUNIOR
Data: 15/08/2025 19:56:08-0300
verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Avaliador: Msc. Rafael Alberto de Araujo Silva Nota: 9,0
Externo

Assinatura  Documento assinado digitalmente
RAFAEL ALBERTO DE ARAUJO SILVA
Data: 14/08/2025 21:20:10-0300
verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Recife, 14 de agosto de 2025.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

Dedico este trabalho a todos que contribuíram, de alguma forma, para que eu pudesse concluir mais essa importante etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão à minha família, que sempre foi uma fonte constante de apoio e incentivo ao longo de todos os meus estudos. Em especial, agradeço à minha avó, Hilda Santos da Silva, aos meus pais, Tarciana Maria Silva de Aguiar e Daniel Francisco Santos da Silva, e à minha irmã, Júlia Gabrielly Aguiar da Silva.

Agradeço também à minha namorada, Stefany Maíam Araújo de Albuquerque, pelo companheirismo e por estar ao meu lado desde os tempos do ensino médio.

Meu reconhecimento vai também para os colegas da graduação, cuja convivência tornou a caminhada universitária mais leve e enriquecedora. Em especial, ao famoso grupo dos Lucas, que esteve presente em cada trabalho.

Aos professores da UFPE, expressei minha sincera admiração pela excelência e dedicação no ensino. Agradeço de modo especial ao professor Jorge Recartes e ao professor José Ângelo, da pós-graduação, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Sou grato à Universidade Federal de Pernambuco, pelas experiências vividas ao longo da graduação, que contribuíram imensamente para minha formação pessoal e profissional. Agradeço à EIXO Consultoria, empresa júnior pela qual tive a oportunidade de participar de projetos de extensão enriquecedores, e ao grupo RANDOM, onde atuei como aluno de iniciação científica durante três anos, período de grande aprendizado e crescimento acadêmico.

“É necessário sempre acreditar que o sonho é possível.” (Racionais)

RESUMO

A crescente demanda por soluções sustentáveis em matrizes energéticas tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia, essenciais para viabilizar uma maior participação de fontes renováveis em setores industriais. Dessa forma, o armazenamento de energia térmica (TES) destaca-se como uma alternativa eficiente para mitigar a intermitência da fonte solar, promovendo estabilidade no fornecimento energético. Este trabalho analisa o processo de carregamento térmico de um leito fixo utilizando escória de aço, um subproduto da indústria siderúrgica como material de armazenamento. A metodologia adotada baseou-se em simulações numéricas realizadas pela integração do ANSYS Fluent e ANSYS Rocky, permitindo avaliar o desempenho térmico sob diferentes condições operacionais. Foram analisados os efeitos da variação do tipo de escória, do diâmetro médio das partículas, da porosidade do leito, da vazão e da temperatura do fluido de trabalho. Os resultados demonstraram que a escória tipo C apresentou um aquecimento significativamente mais rápido, enquanto a escória de Forno Elétrico a Arco (FEA) exigiu aproximadamente o dobro do tempo para atingir a temperatura do HTF. Contudo, a escória FEA destacou-se pela maior capacidade de armazenamento, acumulando cerca de 11.237 kJ a mais em relação à escória tipo C. Observou-se também que partículas de menor diâmetro favoreceram a transferência de calor devido ao aumento da área de contato entre o fluido e o material sólido, embora tenham provocado um acréscimo expressivo na perda de carga, que pode chegar a ser até duas vezes maior. Além disso, verificou-se que tanto a porosidade do leito quanto a vazão do fluido exerceram influência direta sobre o tempo de carregamento, quando foram empregadas vazões de 0,5 kg/s e 1,0 kg/s, o tempo de carregamento foi reduzido em aproximadamente 45,8% e 68%, respectivamente, em comparação à condição inicial de 0,225 kg/s. Conclui-se que a escória de aço, além de viável tecnicamente, representa uma solução sustentável ao agregar valor a um resíduo de indústrias siderúrgicas, contribuindo para a eficiência energética e a redução de impactos ambientais.

Palavras-chave: armazenamento térmico; escória; leito fixo; Ansys; HTF; Simulação.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable solutions in energy matrices has driven the development of energy storage technologies, which are essential to enable greater participation of renewable sources in industrial sectors. In this context, thermal energy storage (TES) stands out as an efficient alternative to mitigate the intermittency of solar energy, promoting stability in energy supply. This work analyzes the thermal charging process of a fixed bed using steel slag, a byproduct of the steel industry, as the storage material. The adopted methodology was based on numerical simulations carried out through the integration of ANSYS Fluent and ANSYS Rocky, allowing the evaluation of thermal performance under different operational conditions. The effects of slag type, average particle diameter, bed porosity, flow rate, and working fluid temperature were analyzed. The results showed that Type C slag presented significantly faster heating, while Electric Arc Furnace (EAF) slag required approximately twice as long to reach the HTF temperature. However, EAF slag stood out for its higher storage capacity, accumulating about 11,237 kJ more compared to Type C slag. It was also observed that smaller particle diameters enhanced heat transfer due to the increased contact area between the fluid and the solid material, although they caused a significant increase in pressure drop, which may reach up to twice as high. In addition, both bed porosity and fluid flow rate were found to have a direct influence on the charging time: when flow rates of 0.5 kg/s and 1.0 kg/s were employed, the charging time was reduced by approximately 45.8% and 68%, respectively, compared to the initial condition of 0.225 kg/s. It is concluded that steel slag, in addition to being technically feasible, represents a sustainable solution by adding value to a byproduct of the steel industry, contributing to energy efficiency and the reduction of environmental impacts.

Keywords: thermal energy storage; Escória; fixed bed; Ansys; HTF; simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lagoa solar e OTEC.	20
Figura 2 – Sistema de armazenamento de energia de leito fixo.	21
Figura 3 – Planta integrada com sistema TES e coletor PV/T.	24
Figura 4 – Diagrama esquemático de um sistema CAES com TES.	25
Figura 5 – Diagrama esquemático de recuperação de calor industrial utilizando o TES.	26
Figura 6 - Diagrama do sistema térmico de energia do leito compactado de ar.	27
Figura 7 - Representação do leito com as dimensões.	28
Figura 8 – Representação esquemática da metodologia utilizada.	36
Figura 9 - Média da temperatura para análise de diferentes malhas.	39
Figura 10 - Fenômeno visto para primeira camada (S5 no instante 700s).	40
Figura 11 - Regiões de análise no leito (S5 no instante 700s).	41
Figura 12 - Processo aquecimento escória FEA.	42
Figura 13 - Processo aquecimento escória tipo C.	43
Figura 14 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 (Escória FEA).	43
Figura 15 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S8 (Escória C).	44
Figura 16 - Temperatura média global [K] X tempo [s] para as simulações S5 e S8.	44
Figura 17 - Quantidade de calor armazenado [KJ] X tempo [s] para as simulações S5 e S8.	45
Figura 18 - Perda de carga [Pa] X tempo [s] para as simulações S5 e S8.	45
Figura 19 - Processo de aquecimento por regiões para os três diâmetros no instante de 750 s.	46
Figura 20 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S9 (Dp = 30 mm).	47
Figura 21 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 (Dp = 40 mm).	47
Figura 22 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S10 (Dp = 50 mm).	48

Figura 23 - Temperatura média global [K] X tempo [s] para as simulações S5, S9 e S10.	48
Figura 24 - Quantidade de calor armazenado [KJ] X tempo [s] para as simulações S5, S9 e S10.	49
Figura 25 - Perda de carga [Pa] X tempo [s] para as simulações S5, S9 e S10.	49
Figura 26 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S15 ($\Phi = 0,1$).	50
Figura 27 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 ($\Phi = 0,208$).	50
Figura 28 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 ($\Phi = 0,7$).	51
Figura 29 - Temperatura média global [K] X tempo [s] para as simulações S5, S14 e S15.	51
Figura 30 - Quantidade de calor armazenado [KJ] X tempo [s] para as simulações S5, S14 e S15.	52
Figura 31 - Perda de carga [Pa] X tempo [s] para as simulações S5, S14 e S15.	52
Figura 32 - Processo de aquecimento no instante 50 s para diferentes HTF com a escala do Ansys.	53
Figura 33 – Processo de aquecimento no instante 50 s para diferentes HTF.	53
Figura 34 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 ($V = 0,225 \text{ Kg/s}$).	54
Figura 35 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S3 ($V = 0,5 \text{ Kg/s}$).	54
Figura 36 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S2 ($V = 1 \text{ Kg/s}$).	55
Figura 37 - Temperatura média global [K] X tempo [s] para as simulações S2, S3 e S5.	55
Figura 38 - Quantidade de calor armazenado [KJ] X tempo [s] para as simulações S2, S3 e S5.	56
Figura 39 - Perda de carga [Pa] X tempo [s] para as simulações S2, S3 e S5.	56
Figura 40 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S11 ($T = 340 \text{ K}$).	57
Figura 41 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 ($T = 550 \text{ K}$).	57

Figura 42 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S13 (T = 700 K).....	58
Figura 43 - Temperatura média global [K] X tempo [s] para as simulações S5, S11 e S13.	58
Figura 44 - Quantidade de calor armazenado [KJ] X tempo [s] para as simulações S5, S11 e S13.	59
Figura 45 - Perda de carga [Pa] X tempo [s] para as simulações S5, S11 e S13.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os TES.....	18
Tabela 2 - Propriedades termofísicas do material de armazenamento do leite.....	29
Tabela 3 - Parametrização da simulação no Fluent.....	33
Tabela 4 - Parametrização da simulação no Rocky.....	35
Tabela 5 - Elementos de malhas utilizados como teste.	38
Tabela 6 - Configurações utilizadas nas simulações.	39

LISTA DE ABREVIACOES

CAES	Armazenamento de Energia por Ar Comprimido (Do inglês, Compressed Air Energy Storage)
CO ₂	Dióxido de Carbono
CSP	Energia solar concentrada
FEA	Forno Elétrico a Arco
HTF	Fluido de Trabalho (Do inglês, Heat Transfer Fluid)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organizao das Naoes Unidas
OTEC	Conversão de Energia Termal dos Oceanos (Do inglês, Ocean Thermal Energy Conversion)
PCM	Materiais de mudança de fase (Do inglês, Phase Change Materials)
PV	Fotovoltaico (Do inglês, Photovoltaic)
PV/T	Fotovoltaico/Térmico (Do inglês, Photovoltaic/Thermal)
TES	Armazenamento de Energia Térmica (Do inglês, Thermal Energy Storage)

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área da seção transversal do leito	m^2
a_{par}	Fator de forma partículas	m^2/m^3
a_{sol}	Fator de forma do sólido	m^2/m^3
C_{ar}	Calor específico do ar	$J/kg \cdot K$
C_{sol}	Calor específico	$J/kg \cdot K$
C_P	Calor específico do sólido	$J/kg \cdot K$
ΔP	Perda de carga	Pa
ΔT	Variação de temperatura	K
D_P	Diâmetro médio das partículas	m
E_{ar}	Energia interna por unidade de massa do fluido	J/kg
E_{sol}	Energia interna por unidade de massa do sólido	J/kg
H	Altura do leito	m
h_{sol}	Coeficiente de transferência de calor entre ar e esferas	$W/m^2 \cdot K$
J_i	Fluxo de massa difusivo de espécie i	$kg/m^2 \cdot s$
K_{ar}	Condutividade térmica do ar	$W/m \cdot K$
K_{sol}	Condutividade térmica do sólido	$W/m \cdot K$
L	Calor latente	kJ/kg
m	Massa	kg
N_e	Número total de esferas	—
p	Pressão	Pa
Q	Calor	kJ
Q_{Arm}	Calor armazenado no leito	kJ
S_f^h	Fonte de entalpia do fluido	W/m^3
S_s^h	Fonte de entalpia do sólido	W/m^3
t	Tempo	s
T	Temperatura	K
T_0	Temperatura inicial do ar	K
T_{ar}	Temperatura do fluido	K
T_{sol}	Temperatura do sólido	K
$\bar{T} \cdot U$	Termo de dissipação viscosa	W/m^3
U	Vetor velocidade	m/s
U_{Ar}	Coeficiente global de transferência de calor do ar	$W/m^2 \cdot K$

V	Volume do meio	m^3
V_e	Volume da esfera	m^3
v_∞	Velocidade intersticial do ar	m/s

SÍMBOLOS GREGOS

ε	Porosidade do leito	-
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	$kg/m \cdot s$
ρ	Massa específica	kg/m^3
ρ_{ar}	Massa específica do ar	kg/m^3
ρ_{sol}	Massa específica do sólido	kg/m^3
Θ	Temperatura do material sólido	K

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVAS	14
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	13
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	13
1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA	15
2.2 Sistemas de armazenamento de energia térmica por calor sensível.	18
2.2.1 Tanques de água	18
2.2.2 Lagoas solares	19
2.2.3 Leito Fixo	21
2.3 APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO POR CALOR SENSÍVEL TIPO LEITO FIXO	23
3 METODOLOGIA	28
3.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE ESTUDO	28
3.2 MODELAGEM EQUACIONAL DO ANSYS	30
3.3 SIMULAÇÃO NO ANSYS	31
3.3.1 <i>Modelagem no Ansys Fluent</i>	32
3.3.2 <i>Modelagem no Ansys Rocky</i>	34
3.4 PROCESSAMENTO DE DADOS	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.2 Efeito da alteração do diâmetro médio das partículas de armazenamento.	46
4.3 Impacto da porosidade das partículas	50
4.4 Influência da vazão do HTF	53
4.5 Análise da temperatura de entrada do HTF	57
5 CONCLUSÃO	60
5.1 CONCLUSÕES	60
5.2 FUTUROS TRABALHOS	61
REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a crescente demanda por práticas sustentáveis impulsionou iniciativas globais para a transição das matrizes energéticas. Desde a conferência de Estocolmo, a ONU tem liderado esforços para promover a sustentabilidade em escala mundial, incentivando os países a adotar políticas que atenuem os impactos de práticas de desenvolvimento não sustentáveis (VIEIRA & CIPRIANO, 2020). Nesse contexto, a transição de uma sociedade dependente de combustíveis fósseis desde a revolução Industrial é um dos maiores desafios contemporâneos. Economias globais buscam integrar fontes renováveis de energia, tentando equilibrar crescimento econômico e preservação ambiental (BUENO & TORRES, 2022).

Diante desse cenário, o aumento contínuo da demanda por energia tem levado a um crescimento nas pesquisas e iniciativas para buscar melhores matrizes de energia visando reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Em 2023, as energias renováveis já representavam cerca de 29% da produção global de eletricidade, destacando-se a energia hidrelétrica, eólica e solar (OXFORD ENERGY, 2024).

Neste contexto, o setor industrial que consome aproximadamente 54% da energia global (OXFORD ENERGY, 2024), enfrenta o desafio de integrar fontes renováveis, na qual tem um percentual de participação de apenas 14%. A dependência histórica de combustíveis fósseis e a complexidade dos processos industriais tornam essa transição lenta. Aumentos nos custos de energia e tensões geopolíticas que restringem o acesso a combustíveis fósseis só intensificam essa necessidade (DE OLIVEIRA, 2022; PEREIRA, 2022).

Entre os principais empecilhos para a uma integração de energias de matrizes renováveis está na sua intermitência, especialmente quando se aborda tecnologia solar, que pode ter variação de incidência solar ao longo do dia, como também em processos industriais com produção descontínua de calor residual. Dessa forma, para se dar com as variações operacionais e garantir a estabilidade do processo, soluções de armazenamento de energia térmica (TES) tornam-se essenciais.

O TES desempenha um papel estratégico no aumento da eficiência e da confiabilidade dos sistemas energéticos, pois possibilita a gestão do calor excedente e sua posterior utilização em momentos críticos. Essa tecnologia contribui para reduzir custos operacionais, emissões de gases de efeito estufa e a necessidade de expansão imediata da infraestrutura energética. Além disso, sua aplicação é versátil,

podendo atender tanto a demandas industriais quanto a sistemas baseados em fontes renováveis intermitentes, reforçando sua importância no contexto da transição energética sustentável (RONG et al, 2024; PINNANGUDI, KUYKENDAL & BHADRA, 2017). As tecnologias TES são classificadas em diferentes formas, no entanto uma das mais diversificadas é quanto à maneira de armazenamento da energia, que pode ser por calor sensível, calor latente e ao armazenamento termoquímico LAI (2022). No presente estudo foca nos sistemas de calor sensível, especificamente em armazenadores do tipo leito fixo com materiais sólidos, que vêm ganhando destaque por sua simplicidade construtiva e potencial de reaproveitamento de resíduos industriais.

A escória de aço apresenta elevada capacidade térmica, estabilidade em altas temperaturas e uma ampla disponibilidade, características que a tornam particularmente atrativa para aplicações em armazenamento de energia térmica. Além do baixo custo, por se tratar de um resíduo industrial, seu aproveitamento contribui para reduzir impactos ambientais associados ao seu descarte. Estudos recentes têm demonstrado que diferentes tipos de escória, quando aplicados em leitos fixos, podem alcançar bons desempenhos com a vantagem de promover a economia circular dentro da cadeia siderúrgica. Dessa forma, seu uso integra sustentabilidade, eficiência energética e valorização de resíduos industriais (KHATOD et al., 2022; KHAN et al., 2022, WANG & HUANG, 2023; FERBER et al., 2022).

Dessa forma, este estudo propõe analisar por meio de simulações computacionais no Ansys, o processo de troca térmica entre o fluido de trabalho (HTF) e o material de armazenamento de energia térmica em leitos. Visando investigar a influência dos parâmetros operacionais e construtivos de leitos, com o objetivo de otimizar as condições de aplicabilidade de escórias como material de armazenamento. Promovendo análises científicas e tornar um subproduto industrial em uma aplicação alternativa de valor econômico e ambiental.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Diante do crescimento global das energias renováveis torna-se cada vez mais necessária a busca por soluções eficazes para o armazenamento dessas fontes, visando minimizar a intermitência inerente às matrizes energéticas como a solar (RONG et al, 2024). O presente estudo, ao focar na exploração da escória de aço

como material de armazenamento de calor, traz um tema de grande relevância tanto ambiental quanto econômica.

A escória de aço, gerada em grandes volumes pela indústria siderúrgica tem sua destinação fortemente influenciada pelas políticas e práticas de cada país. No Brasil, por exemplo, é comumente reciclada e comercializada como agregado siderúrgico, enquanto em países como a China ainda é, em grande parte descartada em aterros, o que gera um passivo ambiental expressivo. No entanto, seu uso como material de armazenamento térmico transforma esse resíduo em um ativo valioso, ajudando a reduzir os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado (WANG & HUANG, 2023). Além disso, a combinação da escória com sistemas de energia solar oferece uma oportunidade estratégica para maximizar a eficiência energética. A energia solar, por ser uma fonte mais barata a longo prazo em relação às fontes convencionais, torna a integração desse subproduto em tecnologias de armazenamento ainda mais vantajosa.

O aproveitamento da escória de aço como meio de armazenamento de calor também está em alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 7, que promove o acesso universal à energia limpa e sustentável, e o ODS 9, que incentiva a industrialização inclusiva, a construção de infraestrutura resiliente e a inovação. A reutilização de subprodutos industriais em novas tecnologias de armazenamento térmico contribui para práticas mais limpas e eficientes, além de impulsionar a inovação no setor siderúrgico, tornando-o mais sustentável e competitivo.

O Brasil se configura como um dos maiores produtores de aço no mundo, o desafio de gerenciar as grandes quantidades de escória geradas é particularmente urgente e necessário. O uso da escória como material de armazenamento térmico não apenas proporciona condições de maiores utilização de sistemas de energia renovável, como também oferece uma solução estratégica para a indústria siderúrgica nacional. Em um mercado onde o aço importado com preços inferiores ao nacional, ganha cada vez mais espaço, a reutilização desse resíduo pode reduzir custos operacionais e ajudar a indústria brasileira a enfrentar essa concorrência, mesmo com as tarifas de importação aplicadas (BARBOSA JUNIOR, 2019).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho de um sistema de armazenamento térmico utilizando escória de aço como material para armazenar energia, visando entender como os fatores que afetam seu desempenho por meio de simulação computacional no Ansys.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o sistema de estudo, identificando as propriedades termofísicas da escória e para o HTF.
- Definir as condições de contorno operacionais e construtivas do sistema em estudo.
- Modelar o escoamento do HTF no Ansys Fluent.
- Modelar o comportamento térmico e dinâmico das partículas no Ansys Rocky.
- Realizar a integração entre o Ansys Fluent e o Ansys Rocky.
- Executar o estudo paramétrico variando as condições operacionais do sistema.

1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, trazendo o contexto global de transição energética, os desafios da integração de fontes renováveis, a relevância do armazenamento de energia térmica e a motivação para o uso da escória de aço como meio de armazenamento, além dos objetivos gerais e específicos do estudo. O segundo capítulo corresponde à revisão da literatura, abordando os fundamentos do armazenamento de energia térmica, em suas diferentes formas: calor sensível, latente e termoquímico. E um detalhamento sobre a aplicação de leitos fixos. No terceiro capítulo é descrita a metodologia, detalhando as configurações no software Ansys Fluent e Ansys Rocky, a geometria e a malha do leito, as condições de contorno, os modelos numéricos aplicados e as adaptações

realizadas. O quinto capítulo apresenta e discute os resultados das simulações, analisando o comportamento térmico e fluidodinâmico do leito em diferentes condições operacionais, considerando variáveis como vazão do HTF, temperatura de entrada e diâmetro das partículas. Por fim, o sexto capítulo expõe as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições, as limitações encontradas e sugestões para futuras pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados conceitos fundamentais, tendo por base artigos da literatura, inerentes ao processo de armazenamento de energia térmica. O enfoque recai sobre as principais formas de armazenamento de energia, com ênfase no detalhamento do armazenamento por calor sensível e aplicações de leitos fixos.

2.1 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA

O armazenamento de energia térmica trata-se do processo de acumulação de energia na forma de calor, para ser utilizada posteriormente em momentos em que há maior demanda (COSTA, 2014). Essa tecnologia desempenha um papel crucial no equilíbrio entre a oferta e a demanda de energia térmica, permitindo que o calor gerado durante períodos de baixa carga (off-peak) seja armazenado e utilizado em momentos de pico (on-peak), otimizando o uso da energia disponível (SILVA, 2020).

A utilização do TES pode ser embasada por sua capacidade de flexibilizar os sistemas energéticos, principalmente no que diz respeito ao garantir o fornecimento quando houver um descompasso em termos de tempo entre geração e a utilização da energia, temperatura necessária para aplicação e a localização de onde está sendo gerada a energia e o local de consumo C (2012).

O TES possui três etapas fundamentais de processamento, inicialmente a energia térmica é armazenada quando a demanda do processo ou da planta é baixa. Sendo assim, a energia permanece armazenada até o momento de uso e na descarga acontece a liberação da energia para atender a demanda de pico ou insuficiência de geração (DINCER & Yapicioglu, 2018).

A utilização do TES em projetos térmicos proporciona uma condição de operação mais eficiente em termos de energia, reduzindo custos operacionais e as emissões de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo em que aumenta a flexibilidade operacional dos sistemas energéticos. O TES também contribui para uma maior confiabilidade ao equilibrar a carga térmica e reduzir a necessidade de geração adicional de energia em tempo real (ASHRAE, 2012).

Nos últimos anos é crescente os estudos voltados ao desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao armazenamento de energia térmica, umas das classificações mais utilizadas nesse meio é quanto à forma de armazenamento de

calor. Segundo LAI (2022), os sistemas de armazenamento de energia térmica podem ser subdivididos em três categorias principais: calor sensível, calor latente e armazenamento de energia termoquímica.

O sistema de energia que armazena calor sensível, por apresentar custo de construção e operação mais acessíveis tem sido o foco de concentração de desenvolvimento e estudo, utilizando o ar como HTF.

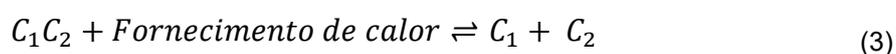
A energia sensível é a porção da energia interna que está relacionada a variações de temperatura de um material. Esse componente reflete os movimentos de translação, rotação e vibração das moléculas que constituem a matéria. Embora sua principal influência seja a temperatura, a energia sensível também pode ser afetada pela pressão, dependendo das condições do sistema (BERGMAN et al., 2014). Conforme a equação (1) a energia sensível é dependente do calor específico C_p , massa específica ρ , volume do meio de armazenamento V e da variação da temperatura ΔT . Onde o produto do calor específico pela massa específica é denominado de capacidade térmica volumétrica e indica a quantidade de energia que pode ser armazenada (SILVA, 2020).

$$Q = C_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \quad (1)$$

A energia latente está relacionada à mudança de fases entre os estados da matéria. Esse componente da energia interna decorre das forças intermoleculares que precisam ser superadas ou estabelecidas para que a substância sofra uma transição de fase, como durante a fusão, vaporização ou condensação. Em geral, os materiais utilizados nesses processos são conhecidos como materiais de mudança de fase (PCM, do inglês Phase Change Materials) DINCER & YAPICIOGLU (2018). O PCM amplamente utilizado é a água, que tem sido empregada desde os tempos antigos, especialmente como elemento em bancos de gelo. No entanto, atualmente, problemas relacionados à separação de fases, super-resfriamento, sub-resfriamento, corrosão, estabilidade a longo prazo e baixa condutividade térmica ainda não foram completamente resolvidos e continuam sendo temas de pesquisa C (2012). A equação (2) que representa a parcela da energia latente está relacionada com a massa da substância m e o calor latente da respectiva mudança de fase L (BERGMAN et al., 2014).

$$Q = m.L \quad (2)$$

A energia química representa a porção da energia interna que está armazenada nas ligações químicas entre os átomos de uma substância. Esse componente está relacionado às interações que ocorrem a nível molecular durante reações químicas, sendo liberado ou absorvido em processos de quebra ou formação de ligações químicas (BERGMAN et al., 2014). De forma geral, no contexto de materiais de conversão de energia térmica, o potencial químico dos materiais é explorado para armazenar e liberar energia térmica com perdas térmicas quase nulas (DINCER & YAPICIOGLU, 2018). Essas interações químicas reversíveis entre os componentes reativos dos materiais ou espécies químicas são fundamentais para o armazenamento e recuperação eficientes da energia térmica. Em uma reação endotérmica, o fornecimento de calor permite a dissociação das espécies químicas em seus componentes individuais, conforme mostrado na equação (3), facilitando o armazenamento da energia térmica. Posteriormente, a reação exotérmica pode ser ativada, permitindo que a energia térmica armazenada seja recuperada com perdas térmicas desprezíveis (DINCER & YAPICIOGLU, 2018). O armazenamento de energia térmica, quando realizados por meio de reações químicas reversíveis, são caracterizados por alta densidade de armazenamento, sendo mais eficientes do que os sistemas por calor sensível e calor latente (C, 2012).



No estudo de (DINCER & YAPICIOGLU, 2018) é apresentada uma análise comparativa abrangente das principais formas de armazenamento de energia, abordando tanto os fundamentos conceituais quanto os aspectos práticos de aplicação, destacando os diferentes materiais utilizados em cada tecnologia, vantagens e limitações de cada método de armazenamento, além da situação atual das pesquisas e das aplicações dessas tecnologias, conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação entre os TES

Características	Sensível	Latente	Químico
Meio de Armazenamento	Água, cascalho, pedras, solo	Orgânicos, inorgânicos	Cloretos metálicos, hidretos metálicos, metais, óxidos
Tipo	Sistema baseado em água (tanque de água, aquífero)	Armazenamento ativo	Armazenamento químico (normalmente para armazenamento de alta temperatura)
Vantagem	Material barato e ambientalmente amigável	Maior densidade de energia que o armazenamento sensível	Maior densidade de energia, material compacto, sem perdas térmicas significativas
Desvantagem	Baixa densidade de energia, grandes volumes necessários para aquecimento distrital	Falta de estabilidade térmica, problemas de cristalização	Baixa condutividade térmica, propriedade deficiente de transferência de calor e massa sob condições de alta densidade, ciclagem incerta
Status Atual	Plantas de demonstração em larga escala	Caracterização material, protótipos em escala laboratorial	Caracterização material, protótipos em escala laboratorial

Fonte: Adaptado de Dincer & Yapicioglu (2018).

2.2 Sistemas de armazenamento de energia térmica por calor sensível.

2.2.1 Tanques de água

Os tanques de armazenamento de energia, que utilizam água como fluido de trabalho acumulam energia oriundas de fontes externas, como por exemplo coletores solares. A água é amplamente utilizada por sua capacidade de performar como meio para armazenamento térmico como fluido de transferência de calor, circulando entre o sistema de geração e de armazenamento (RÊGO, 2019).

A escolha da água como material de armazenamento está intrínseca às suas diversas vantagens, como a exemplo disso, conseguir armazenar uma grande quantidade de energia com pequena variação de temperatura, por ser um fluido com

uma ampla disponibilidade e baixo custo. O que viabiliza sua aplicação em grandes projetos e viabiliza-o economicamente (RÊGO, 2019).

Uma questão crucial para a eficiência do armazenamento térmico é a estratificação térmica da água, fenômeno pelo qual as diferentes camadas de água de temperatura variada são separadas devido às suas diferentes densidades. A água quente, sendo menos densa sobe para o topo do tanque, enquanto a água mais fria e conseqüentemente mais densa, afunda para o fundo do tanque. Nesse contexto, a entrada e saída de água devem ser cuidadosamente projetadas para evitar a mistura das camadas térmicas, e a velocidade do fluxo de água deve ser mantida baixa para garantir a eficiência do processo (RÊGO, 2019; LI, 2016).

O sistema de tanque único com termoclina é uma alternativa recente. Nesse modelo, a água quente ocupa a parte superior do tanque, enquanto a água fria permanece na parte inferior, separadas pela termoclina. A espessura da termoclina é crucial para o desempenho térmico, com espessuras mais finas resultando em uma possível maior temperatura do volume de água dentro do tanque (SASSINE et al, 2017; LI, 2016).

No sistema de dois tanques, a água quente é armazenada em um tanque de alta temperatura e a água fria em um tanque de baixa temperatura. Este modelo permite maior controle sobre a transferência de calor e mantém a estratificação de forma eficiente (SASSINE et a, 2017).

Conforme destacado por LI(2016), sistemas de tanque podem ser utilizados para otimizar o uso de energia solar em residências e em pequenas instalações, permitindo maior controle sobre a gestão térmica e o consumo de energia. De forma mais ampla, esses tanques também são utilizados na indústria para a transferência de calor, aproveitando sua capacidade de estratificação e mantendo a eficiência em ambientes de alta demanda térmica.

2.2.2 Lagoas solares

As lagoas solares são reservatórios artificiais preenchidos com água salgada, estruturadas em camadas com diferentes concentrações salmouras, de forma que a salinidade aumenta progressivamente com a profundidade. Essa disposição cria um gradiente de densidade que suprime a convecção térmica natural na direção vertical,

permitindo que o calor solar absorvido na camada inferior seja eficientemente armazenado (WANJUN, 2017).

O funcionamento básico de uma lagoa solar é caracterizado pela estratificação de três zonas distintas. A camada superior apresenta baixa salinidade e temperatura, mantendo-se em equilíbrio térmico com o ambiente atmosférico. Abaixo dela, a zona não convectiva atua como um isolante térmico onde um gradiente salino impede a convecção e conseqüentemente o transporte de calor para as camadas superiores. Por fim, na camada inferior de alta salinidade, ocorre o armazenamento eficiente do calor solar, com temperaturas que podem atingir entre 70 °C e 100 °C (WANJUN, 2017).

Recentemente, estudos vêm apontando o potencial das lagoas solares como um complemento estratégico aos sistemas de conversão de energia térmica oceânica (OTEC – Ocean Thermal Energy Conversion). Uma das limitações técnicas dos sistemas OTEC é a pequena diferença de temperatura entre as camadas superiores e profundas do oceano, o que impacta diretamente a quantidade de energia sensível armazenada. Nesse contexto, a lagoa solar pode atuar como um pré-aquecedor da água do mar que alimenta o sistema OTEC aumentando a eficiência da conversão térmica e a energia disponível (FAN, 2024).

A Figura 1 ilustra um esquema de integração entre uma lagoa solar e um sistema OTEC, destacando o papel da lagoa como fonte de calor auxiliar no processo de geração de energia elétrica.

Figura 1 - Lagoa solar e OTEC.

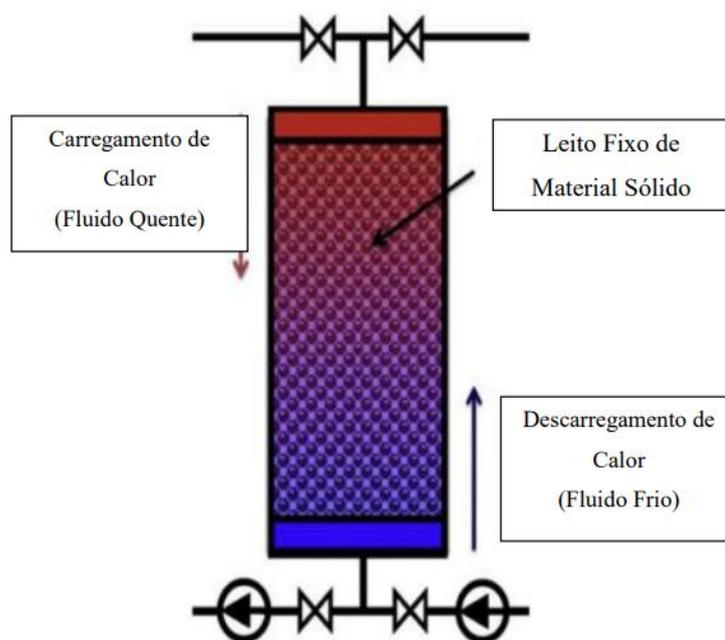


Fonte: Adaptado FAN (2024).

2.2.3 Leito Fixo

Os sistemas de armazenamento térmico em leito fixo são caracterizados por um recipiente isolado contendo um material de enchimento, que atua como o principal meio de armazenamento de calor. O fluido de transferência de calor é utilizado para carregar e descarregar o sistema por meio de transferência de calor por contato direto com o material de enchimento, eliminando a necessidade de um trocador de calor, como apontado por ALVA et al. (2018) e demonstrado na Figura 2. Esse contato direto proporciona uma maior área de superfície, o que aumenta a eficiência do sistema. Além disso, os sistemas de leito fixo apresentam um fenômeno de estratificação de temperatura ao longo do leito, o que é uma característica importante no desempenho térmico (SILVA, 2020).

Figura 2 – Sistema de armazenamento de energia de leito fixo.



Fonte: SILVA (2020).

O material de enchimento em sistemas TES de leito fixo deve possuir uma estabilidade térmica adequada para garantir o bom funcionamento dentro da faixa de temperatura de operação. Comumente, o calor é armazenado na forma de calor sensível, ou seja é armazenado com base na variação da temperatura do material de

enchimento. Materiais como rochas, cascalho, areia e outros sólidos têm sido amplamente utilizados devido à sua resistência e capacidade térmica (ALVA et al., 2018).

No entanto, um dos principais desafios operacionais desses sistemas é a rápida queda da temperatura durante a descarga, o que pode comprometer a eficiência. Outro problema é o *ratchetting* térmico, que resulta da repetição de ciclos de expansão e contração térmica entre o material de enchimento e o recipiente, como aço, resultando em deformações plásticas graduais, especialmente nas paredes inferiores do recipiente (ALVA et al., 2018; SILVA, 2020).

O modelo de Schumann é utilizado para analisar a transferência de calor entre o HTF e o material de armazenamento térmico em leitos fixos. O presente modelo se baseia em suposições simplificadoras para desenvolver a modelagem matemática. Entre as principais suposições, destacam-se: que a transferência de calor e o fluxo do fluido ocorrem predominantemente na direção axial, que a condução de calor no fluido é desprezível, que não há condução de calor entre as partículas sólidas e que as propriedades termofísicas são constantes de maneira geral (ISMAIL and STUGINSKY, 1999; RODRÍGUEZ, 2023). Essas simplificações possibilitam obter equações diferenciais parciais, para o fluido a equação (4) e para o sólido a equação (5), as quais devem ser resolvidas simultaneamente por métodos numéricos iterativos para determinar os perfis de temperatura.

$$\varepsilon \cdot \rho_{ar} \cdot C_{ar} \cdot \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + v_{\infty} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) = h_{sol} \cdot a_{sol} \cdot (\bar{\theta} - \bar{T}) - U_{par} \cdot a_{par} \cdot (\bar{T} - \bar{T}_0) \quad (4)$$

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_{sol} \cdot C_{sol} \cdot \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = h_{sol} \cdot a_{sol} \cdot (\bar{T} - \bar{\theta}) \quad (5)$$

As variáveis presentes nas equações são definidas da presente forma: T e θ representam as temperaturas do ar e do sólido. As densidades do ar e do sólido são indicadas por ρ_{ar} e ρ_{sol} . Os calores específicos do ar e do sólido são denotados por c_{ar} e c_{sol} . O coeficiente de transferência de calor entre o ar e as esferas é h_{sol} dado em. O fator de forma a_{sol} corresponde à razão entre a área superficial total das partículas sólidas por unidade de volume do recipiente que as armazena em. A velocidade intersticial do ar, que atravessa os espaços vazios entre as esferas do TES, é v_{∞}

(RODRÍGUEZ, 2023). Por fim, ε é a porosidade do meio, calculada como a relação entre o volume interno do recipiente e o volume de espaços vazios que indica o quanto do leito é constituído de material sólido. Para a resolução do sistema de equações, o método de diferença finita pode ser aplicado discretizando para o tempo e para camadas delimitadas no leito.

Diversos parâmetros influenciam o desempenho dos sistemas TES de leito fixo, como a vazão mássica do HTF, a relação entre o tamanho do cascalho e o tamanho do leito, a queda de pressão do HTF ao longo do leito, a porosidade e as dimensões do leito, além da condutividade e difusividade térmica do material de enchimento (SINGH et al., 2010). Esses fatores são cruciais para otimizar a eficiência térmica do sistema e minimizar os problemas operacionais. Aplicações típicas desses sistemas incluem aquecedores solares de ar, sistemas de armazenamento térmico sazonais em fossas subterrâneas e recuperação de calor residual de gases de exaustão (ALVA et al., 2018).

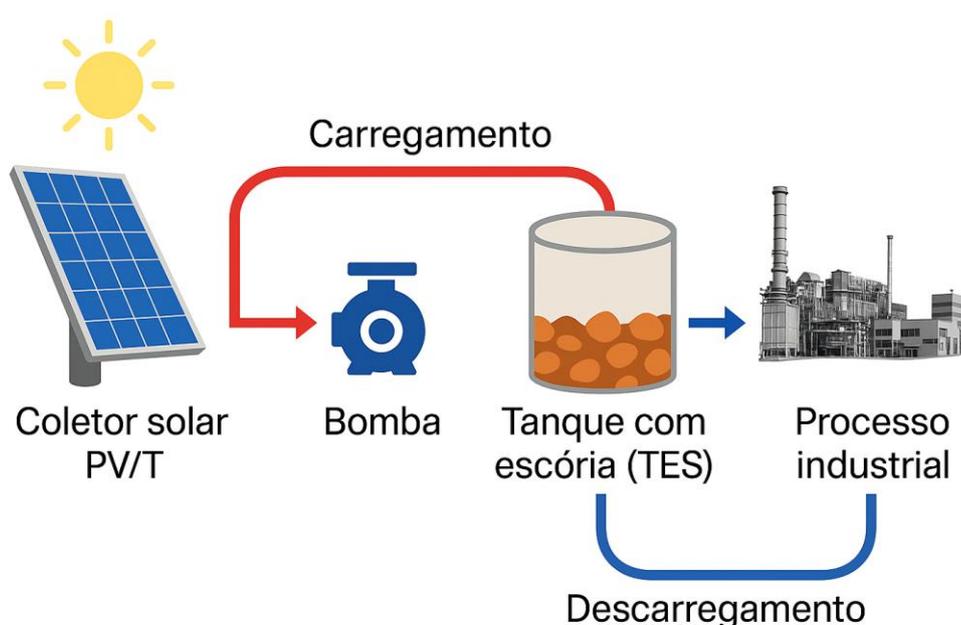
2.3 APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO POR CALOR SENSÍVEL TIPO LEITO FIXO.

No contexto de aplicação prática em projetos industriais, um exemplo de planta é ilustrado conforme mostra a Figura 3. Essa planta é constituída de um coletor PV/T, que nos últimos anos vem ganhando relevância devido a sua capacidade de gerar simultaneamente energia térmica e elétrica por meio de módulos fotovoltaicos e coletores térmicos na mesma estrutura. A radiação solar incidente sobre o módulo PV, gera a energia elétrica e no mesmo processo a placa de absorção, absorve por condução a energia oriunda das células e transferem para tubos que transportam o HTF (RÊGO, 2019).

Para complementar o sistema, a energia térmica é armazenada em um leito fixo, que funciona como um Termoacumulador. Durante o carregamento, o HTF aquecido no coletor, transfere calor para o material rochoso do leito. O descarregamento inverte esse processo, onde o HTF a temperatura ambiente absorve a energia do leito sendo posteriormente enviado para trocadores de calor, permitindo seu uso para aplicações industriais. De maneira geral, se utiliza água ou óleo como HTF (RÊGO, 2019).

Por fim, uma bomba desempenha um papel fundamental ao promover a circulação do fluido de trabalho, otimizando o fluxo de energia dentro do sistema e garantindo o suprimento contínuo de calor e eletricidade para as demandas energéticas do processo industrial. Essa integração entre os componentes, que combina geração, armazenamento e distribuição de energia é destacada por RÊGO (2019) como uma solução promissora para aplicações industriais voltadas a matrizes energéticas sustentáveis.

Figura 3 – Planta integrada com sistema TES e coletor PV/T.

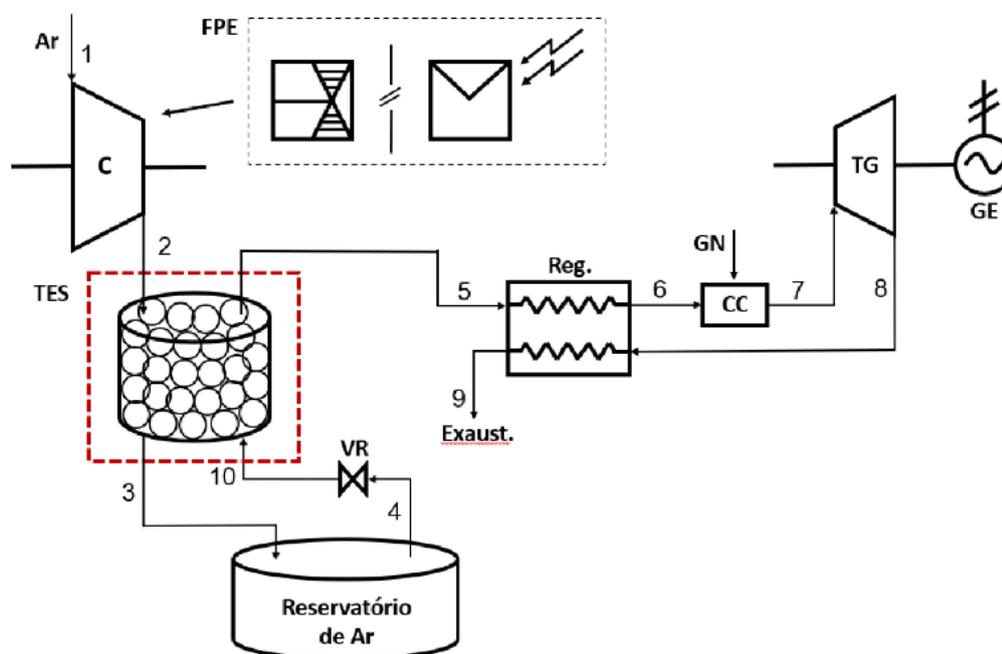


Fonte: O autor (2025).

Em sistemas de Armazenamento de Energia por Ar Comprimido (*Compressed Air Storage Energy - CAES*), ressalva uma aplicação pertinente para leitos fixos para recuperação de calor residual, nesta configuração o ar é comprimido e armazenado em um reservatório pressurizado. Durante o processo de compressão, ocorre a liberação de energia, que em sistemas convencionais geralmente é dissipada para o meio. No entanto, ao utilizar essa configuração a energia é recuperada pelo sistema TES conforme ilustra a planta destacada na

Figura 4. Dessa forma, a energia térmica armazenada pelo TES pode ser utilizada na fase posterior de expansão do ar, otimizando a eficiência do ciclo (RODRÍGUEZ et al., 2022).

Figura 4 – Diagrama esquemático de um sistema CAES com TES.

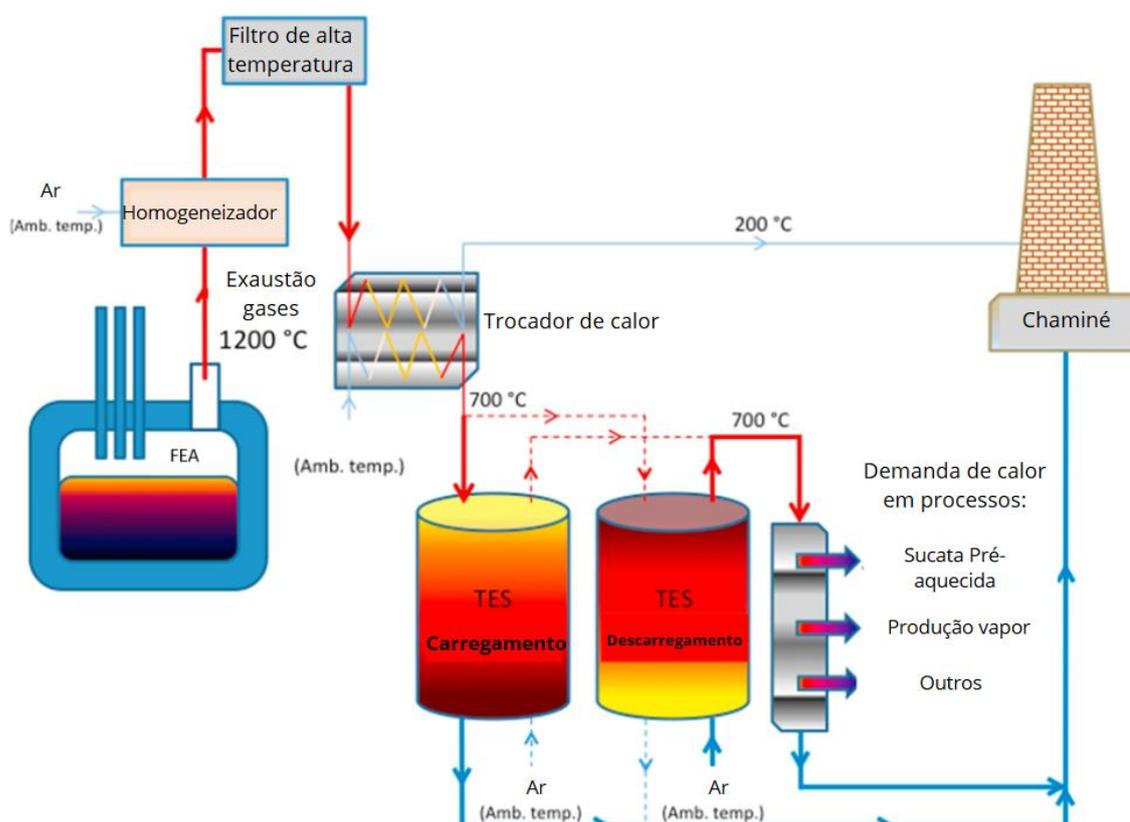


Fonte: Rodríguez et al. (2022).

Outra aplicação relevante do TES está na recuperação de calor residual proveniente dos gases de exaustão de FEA, comuns na indústria siderúrgica. Esses gases, que atingem temperaturas próximas de 1200 °C, passam inicialmente por um sistema de filtragem e depois por um trocador de calor, onde aquecem um fluxo de ar em temperatura ambiente. Esse ar aquecido, em torno de 700 °C, é direcionado para os tanques de armazenamento térmico, sendo um responsável pelo carregamento e outro pela descarga. A energia recuperada pode ser aplicada em processos industriais de alta demanda térmica, como o pré-aquecimento de sucata, a geração de vapor ou outras operações. Após a etapa de recuperação, os gases resfriados ainda são liberados pela chaminé a temperaturas inferiores, próximas de 200 °C, reduzindo perdas e diminuindo os impactos ambientais. Dessa forma, o sistema não apenas aumenta a eficiência energética da planta, mas também transforma um passivo

térmico em um recurso útil, reforçando o papel estratégico do TES na integração entre eficiência operacional e sustentabilidade ambiental. A Figura 5, ilustra a planta para aplicação dos gases de exaustão do FEA.

Figura 5 – Diagrama esquemático de recuperação de calor industrial utilizando o TES.



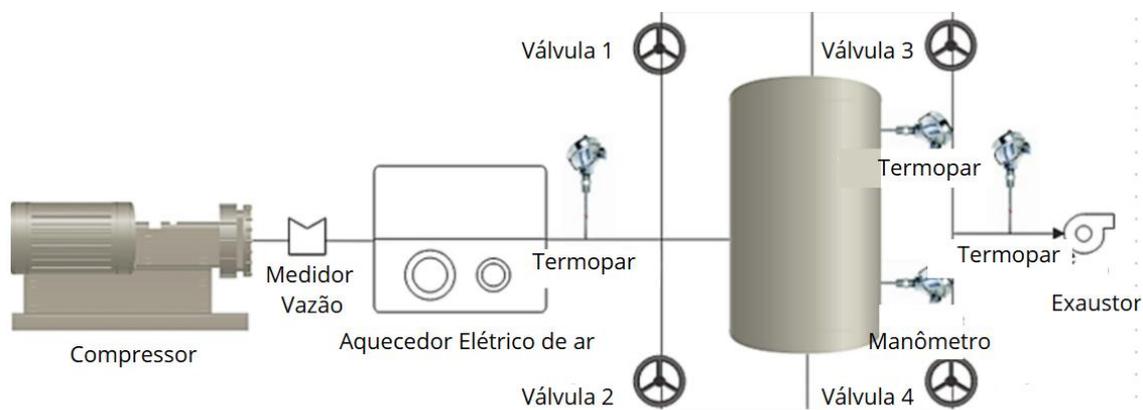
Fonte: Adaptado de Ortega-Fernández; Rodríguez (2019).

Para estudo experimental, é utilizada configuração de TES semelhante a utilizada por Rong et al (2024), conforme destacado na Figura 6. O sistema é composto por um compressor que garante a alimentação de ar, um aquecedor elétrico que aquece o ar, um leito fixo de partículas que armazena o calor e um sistema de tubulação com válvulas que controlam o fluxo de ar quente ou frio. Durante o processo de armazenamento, o ar quente entra no leito de partículas de cima para baixo, enquanto, para liberação de calor, o ar frio entra de baixo para cima. O tanque de armazenamento é feito de aço inoxidável e isolado para reduzir perdas térmicas. Termopares do tipo K são posicionados em intervalos de 100 mm ao longo da altura

axial do leito para monitorar as variações de temperatura durante o processo de armazenamento de calor.

Um desafio do sistema é a fluência cíclica, causada pela diferença de expansão térmica entre o material do tanque e as partículas, o que é mitigado pelo design curvado das bordas do tanque. Esse fenômeno ocorre pela repetida expansão e contração durante os ciclos de carga e descarga, podendo gerar tensões acumuladas que levam a deformações plásticas no recipiente. O sistema é útil para pesquisas experimentais, permitindo otimizar o armazenamento de calor, controlar condições operacionais e estudar fenômenos térmicos.

Figura 6 - Diagrama do sistema térmico de energia do leito compactado de ar.



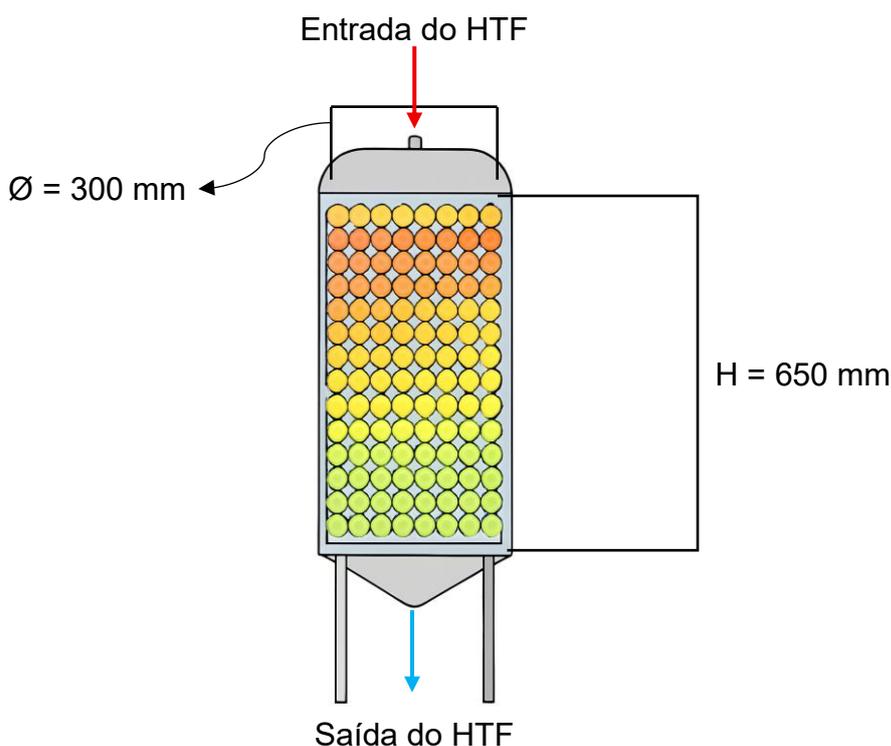
Fonte: Adaptado de Rong et al (2024).

3 METODOLOGIA

3.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE ESTUDO

Para o presente estudo, as análises se concentram na interação entre o HTF e o material da escória de aço. Dessa forma, o leito foi modelado com uma altura de 650 mm e um diâmetro de 300 mm conforme ilustrado na Figura 7, utilizando escória contendo um diâmetro médio de 40 mm. Esta configuração é semelhante ao modelo utilizado no experimento realizado por Rong et al (2024). O HTF padrão utilizado foi ar, com as propriedades obtidas tendo por base a biblioteca do *Ansys Fluent*. Inicialmente o ar entrava no leito a uma vazão de 0,225 Kg/s a uma temperatura de 550 K em um processo de aquecimento que pode durar até 1 hora. A escória utilizada no trabalho é proveniente de FEA, muito comum em indústrias siderúrgicas. Adicionalmente, outros materiais como a escória C, provenientes de processo de conversor LD, também foram analisados e conforme mostrados na Tabela 2, onde ilustra as propriedades termo físicas desses materiais.

Figura 7 - Representação do leito com as dimensões.



Fonte: Autor (2025).

Tabela 2 - Propriedades termofísicas do material de armazenamento do leito.

Material	Densidade (Kg/m ³)	Calor Específico (KJ/Kg.K)	Condutividade térmica (W/m.K)	Fonte
Default Particles	2666,67	1000	0,1	Ansys 2025
Escória FEA	3430	1,430	0,933	Ortega-Fernandez et al (2018);
Escória C	3610	0,975	1,75	Wang (2018);

Fonte: Adaptado Wang (2023).

Dessa forma, o estudo realiza simulações variando as seguintes condições de contorno: diferentes materiais de armazenamento, vazão de entrada, diâmetro médio da escória, porosidade da escória e temperatura do HTF. Com o objetivo de analisar diferentes situações de utilização do leito e como esses fatores influenciam na quantidade de calor armazenada, no processo de aquecimento, no escoamento através do leito e perda de pressão, utilizando simulações em CFD e DEM realizadas no *software* Ansys 2025 R1 versão estudante.

Para as realizações das simulações algumas hipóteses foram adotadas visando propiciar condições de simulação, a seguir indico as principais considerações:

- As simulações no Ansys analisam as interações entre o material de armazenamento térmico e do HTF.
- Paredes do leito são adiabáticas.
- Perdas para o ambiente externo não foram consideradas.
- Perdas de calor e perdas de cargas na tubulação que conecta ao leito não foram consideradas.
- As trocas térmicas se dão por condução e convecção.
- A vazão do HTF permanece constante durante todo o processo de aquecimento.
- O regime de simulação para o sistema de estudo é unicamente transiente.

3.2 MODELAGEM EQUACIONAL DO ANSYS

O Ansys trás o modelo de não equilíbrio térmico para apresentar as interações entre o fluido e o material sólido de armazenamento de energia, a abordagem do software adota é que os modelos não estão em equilíbrio térmico e não compartilham inicialmente da mesma temperatura. Dessa forma, são adotados duas formulações de equações de conversão de energia, uma para cada fase ANSYS CFD (ESSS, [s. d.]).

As equações (6) e (7) representam, respectivamente, os balanços de energia para o meio sólido e para o fluido térmico no modelo de não equilíbrio térmico. Sendo assim, os termos E_{ar} e E_{sol} correspondem à energia interna total por unidade de massa de cada fase. Na equação do fluido, destaca-se o termo U , que representa o vetor velocidade associado ao transporte convectivo de energia ao longo do leito. Os parâmetros k_{sol} e k_{ar} representam as condutividades térmicas do sólido e do fluido, respectivamente, sendo responsáveis pela condução de calor dentro de cada fase. As equações também incluem os termos fonte de entalpia S_f^h e S_s^h , que podem representar efeitos como geração interna de calor ou reações exotérmicas, conforme o tipo de sistema. A equação do fluido também inclui o termo $\bar{\tau} \cdot U$, relacionado à dissipação viscosa, e uma somatória associada à difusão de entalpia em misturas multicomponentes. No entanto, em casos de fluidos monocomponentes como no presente estudo, essa somatória pode ser desconsiderada, assim como outros termos podem ser suprimidos a depender das condições de contorno específicas do sistema analisado. Vale destacar que o conjunto de equações apresentado no modelo do ANSYS é formulado para representar um caso geral, permitindo adaptações conforme as condições de contorno da aplicação no ANSYS CFD (ESSS, [s. d.]).

$$\frac{\partial(1 - \varepsilon) \cdot \rho_{sol} \cdot E_{sol}}{\partial t} = \nabla \cdot ((1 - \varepsilon) \cdot k_{sol} \cdot \nabla T_{sol}) + S_s^h + h_{sol} \cdot a_{sol} \cdot (T_{ar} - T_{sol}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon \cdot \rho_{ar} \cdot E_{ar}}{\partial t} \nabla \cdot (U(\rho_{ar} \cdot E_{ar} + p)) = \nabla \cdot (\varepsilon \cdot k_{ar} \cdot \nabla T_{ar} - \left(\sum_i h_i \cdot J_i \right) + \bar{\tau} \cdot U) + S_f^h + h_{sol} \cdot a_{sol} \cdot (T_{sol} - T_{ar}) \quad (7)$$

Em seu estudo, ELOUALI et al. (2019) apresenta diversos modelos para o cálculo de temperaturas do fluido e do material de armazenamento térmico, como por exemplo o modelo de Schumann, modelo de fase sólida contínua e o modelo monofásico. No artigo, os autores abordam que o calor armazenado pode ser obtido conforme mostra a equação (8). No entanto, ao realizar a modelagem no Ansys Rocky é possível obter o número total de esferas de escória contidas no leito. Dessa forma, a formulação foi adaptada para que o calor armazenado, denotado por Q_{arm} fosse obtido conforme mostra a equação (9), onde A_C indica a área da seção transversal do leito, H a altura do leito, N_e o número total de esferas e V_e seu volume respectivamente.

$$Q_{arm} = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{sol} \cdot C_{sol} \cdot A_C \int_0^H (T - T_0) \cdot dz \quad (8)$$

$$Q_{arm} = N_e \cdot V_e \cdot \rho_{sol} \cdot C_{sol} \cdot (T - T_0) \quad (9)$$

A modelagem que tem por base o equacionamento de Ergun é amplamente empregada para a estimativa de perda de carga ao longo de leitos, considerando os efeitos da resistência viscosa quanto da resistência inercial. A resistência viscosa é predominante em escoamentos laminares, enquanto a resistência inercial se torna mais relevante em regimes turbulentos. A equação (10), possibilita obter a perda de carga tendo por base onde μ representa a viscosidade dinâmica do fluido, D_p é o diâmetro médio das partículas ANSYS CFD (ESSS, [s. d.]).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu(1 - \varepsilon)^2}{D_p^2 \cdot \varepsilon^3} v_\infty + \frac{1,75 \cdot \rho \cdot (1 - \varepsilon)}{D_p \cdot \varepsilon^3} v_\infty^2 \quad (10)$$

3.3 SIMULAÇÃO NO ANSYS

As simulações realizadas neste trabalho foram desenvolvidas por meio da integração entre o Ansys Fluent e o Ansys Rocky, permitindo uma representação computacional mais fiel das interações entre o fluido de trabalho e as partículas do leito. O Ansys Fluent foi empregado para simular o escoamento do ar através do meio

poroso, resolvendo as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, o que possibilitou analisar a distribuição de velocidade, pressão e temperatura no interior do leito. O Ansys Rocky teve a função de modelar o comportamento das partículas sólidas, considerando sua geometria, diâmetro, porosidade, além das interações de contato e possíveis deslocamentos. Essa integração possibilita capturar de forma mais realista a dinâmica acoplada do sistema, já que o Fluent fornece os efeitos do fluido sobre as partículas, enquanto o Rocky retorna informações sobre as forças e resistências das partículas ao escoamento.

Como base para configuração do modelo, foi considerado o exemplo de leito fluidizado disponível nos *Workshops* de treinamento do próprio Ansys, especificamente o exemplo 14 apresenta o passo a passo completo para a simulação em leitos fluidizados, recomendado as melhores práticas para esse tipo de simulação. Este exemplo trouxe considerações significativas para o desenvolvimento deste estudo e muitas considerações de *setup* foram adotadas tendo por base esse exemplo de simulação em leito fluidizado.

3.3.1 Modelagem no Ansys Fluent

A modelagem no Ansys Fluent foi conduzida tendo por base as configurações detalhadas na Tabela 3, a geometria base utilizada corresponde à cilindro tendo por dimensões o diâmetro e a altura determinada para o leito. A malha especificada apresenta elemento relativamente fino para leito visando favorecer a convergência numérica dos resultados. Para ter as simulações mais próximas de um aquecimento ao longo do tempo, como acontece na prática, foi adotado o regime transiente com a gravidade habilitada e também a equação da energia para permitir a troca térmica entre o HTF e as partículas sólidas. O modelo de escoamento selecionado foi o K- ϵ com tratamento próximo a parede com funções de parede escaláveis, sendo que a modelagem da turbulência foi baseada no diâmetro hidráulico. Essas configurações foram escolhidas baseando-se no exemplo de leito fluidizado do Ansys com as respectivas adaptações para o sistema de estudo.

Tabela 3 - Parametrização da simulação no Fluent.

Etapa	Local	Parâmetro ou ação	Configuração
Geometria	SpaceClaim	Gerar a extrusão do sólido	$D = 300 \text{ mm}$, $H = 650 \text{ mm}$
Malha	Mesh	Gerar Malha	Tamanho do elemento: 0,01 m
		Named Selections	Definição das superfícies de entrada, saída e paredes.
Configuração	General	Tempo	Transiente
		Gravidade	Habilitada
		Gravidade	$g=9,81\text{m/s}^2$ na direção do escoamento.
	Modelos	Energia	Habilitada
		Escoamento	Turbulento $k-\varepsilon$, com funções de parede escaláveis.
	Boundray Conditions	Entrada	Definição da vazão e temperatura do fluido, com parâmetros de turbulência baseados no diâmetro hidráulico.
	initialization	Inicialização	Standard Initialization para todas as zonas.
Run Calculation	Configuração dos parâmetros de cálculo	Definição do número máximo de passos, tempo por passo e número de iterações.	

Fonte: Autor (2025).

Após a finalização da configuração no Fluent, o arquivo foi salvo no formato “.cas” possibilitando a exportação dos dados de malha e parâmetros de simulação para o Ansys Rocky onde foi integrado a simulação com partículas. Para avaliação quantitativa da convergência da simulação no Fluent foram analisados os resíduos do Fluent e no Rocky foram analisados o processo de aquecimento ao longo do tempo.

3.3.2 Modelagem no Ansys Rocky

Para o desenvolvimento da simulação no Ansys Rocky, a configuração inicial consistiu na definição da física do processo, com habilitação da gravidade e direcionada no sentido de escoamento e habilitação do modo térmico para a condução de calor entre as partículas, para ajuste da condução foi adotado o modelo de Morris et al. tendo por base a área de contato e o tempo de interação entre as partículas. A geometria para o domínio foi importada do arquivo “.cas” previamente gerada no Fluent, as partículas foram criadas tendo como matéria constituinte a escória com suas propriedades termofísicas definidas no Rocky e o diâmetro médio das partículas utilizados foram os utilizados no artigo de WANG (2023). A partir disso, foi criado um volume de escória utilizando a geometria como delimitação para a inserção das partículas. Para reproduzir adequadamente o comportamento termofísico do leito sobre a ação do HTF foi habilitado o acoplamento bidirecional (2-Way) com o Fluent considerando as trocas térmicas por convecção com base na Lei de Gunn. Por fim, foram definidos os parâmetros de resolução especificando o tempo total de simulação correspondente ao fenômeno real e o passo de tempo de atualização. A Tabela 4, apresenta um resumo detalhado com todas as ações e configurações realizadas para viabilizar a simulação no Rocky.

Como critério de parada da simulação no Ansys Rocky, foi definido que o processo seria encerrado assim que todas as partículas do leito estivessem na faixa de temperatura de 549,9 K. Esse valor foi adotado como referência para representar a uniformização em torno de 550 K, temperatura máxima que o leito poderia atingir. Considerou-se também a complexidade numérica do problema, visto que o tempo computacional necessário poderia variar entre 10 a 12 horas para alcançar essa uniformidade. Cabe destacar que a adoção desse critério não apenas garante a consistência dos resultados térmicos, como também estabelece uma condição prática de comparação entre diferentes cenários de simulação. Assim, foi possível assegurar que o comportamento do leito fosse avaliado de maneira homogênea e sob condições de plena igualdade térmica.

Tabela 4 - Parametrização da simulação no Rocky.

Etapa	Local	Parâmetro ou ação	Configuração
Física	Gravity	Gravidade	$g=9,81\text{m/s}^2$ na direção do escoamento.
	Momentum	Fator de Amolecimento Numérico	0,1
	Thermal	Modelo Thermal	Habilitado
		Modelo de correção para condução	Morris et al área e tempo.
Materiais	Materials	Criar material das escórias	Parâmetros colocados de acordo com a Tabela 2
		Gravidade	Habilitada
Geometria	Geometries	Importar as paredes	Importar o arquivo ".cas" salvo no Fluent
Partículas	Create Partícula	Criar partícula da escória	-
		Materiais	Indicar material constituinte da partícula.
		Tamanho	Indicar o raio da partícula
Entradas e saídas	Create Volumetric Inlet	Criar o volume de escória	-
	Particles	Indicar as propriedades do volume de escória	Massa do leito de 75 Kg e temperatura inicial de 300 K
Acoplamento CFD	2-Way Fluent	Atribuição da simulação em CFD	Atribuição das interações entre o HTF e as partículas de escória com a convecção de calor seguindo a lei de Gunn.
Resolução	Solver	Indicar a resolução das simulações	Indicar o tempo total de simulação e o passo de tempo de atualização.

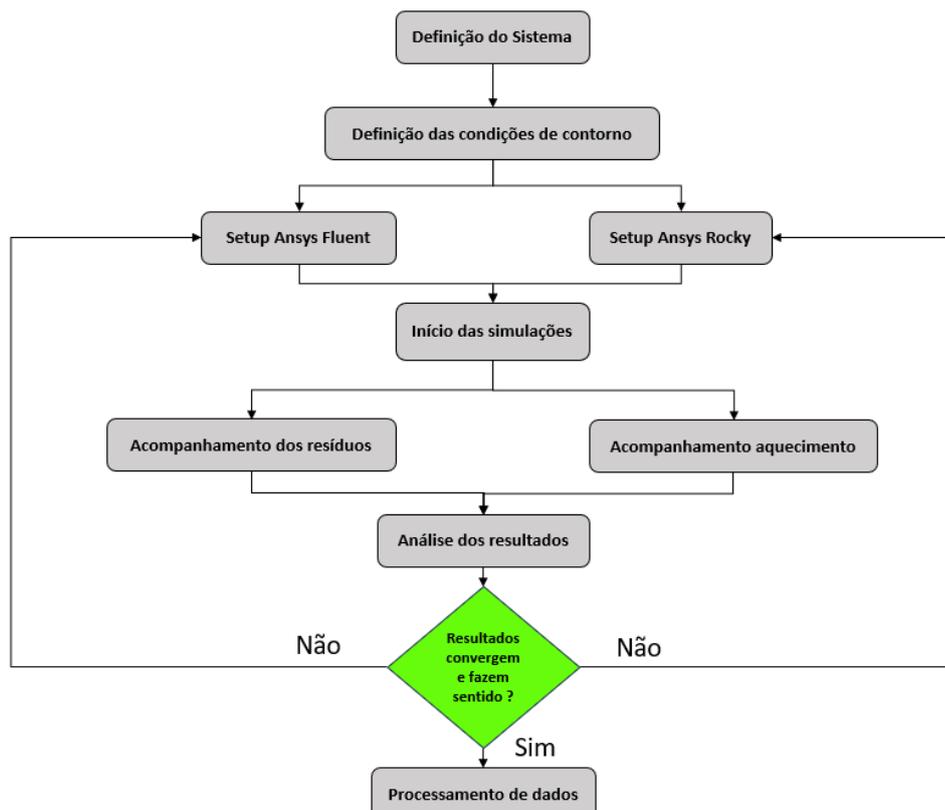
Fonte: Autor (2025).

3.4 PROCESSAMENTO DE DADOS

As etapas que compõem o processo de simulação foram organizadas conforme mostra o diagrama de fluxo indicado na Figura 8. A metodologia adotada abrange desde passos iniciais de definição do sistema em estudo, como as definições de condições de contorno e *setup* no Ansys. O acompanhamento do processo se deu pela análise de resíduos do Fluent e monitoramento do aquecimento no Rocky. Tendo por base essas observações, analisou se os resultados obtidos convergiam e apresentavam consistência física para posterior análise geral dos dados.

Antes de iniciar as simulações gerais no Ansys, foi realizado um teste preliminar modificando o tamanho do elemento de malha, conforme o Setup descrito na Tabela 5 na seção de *mesh*. Com o objetivo de obter uma malha otimizada, que representasse adequadamente o processo físico em estudo, garantindo a convergência dos resultados e que não gerasse um custo computacional elevado.

Figura 8 – Representação esquemática da metodologia utilizada.



Fonte: Autor (2025).

A análise quantitativa dos resultados foi realizada pela obtenção da temperatura média do leito ao longo do tempo, e também pela da perda de pressão média na região de entrada e saída do HTF. Os dados obtidos no Ansys Rocky foram exportados em formatos de Excel e processados e exibidos no Power BI. A análise qualitativa se deu pelas interações térmicas e dinâmicas mostradas no próprio Ansys Rocky.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, é apresentado um estudo sobre o tamanho do elemento de malha, com o objetivo de avaliar a influência nos resultados da simulação tomando por base a temperatura média ao longo do leito para assim definir a configuração mais adequada para o restante das simulações. Dessa forma, os testes são feitos conforme mostra o *setup* na Tabela 5 onde ilustra a disposição geral das malhas.

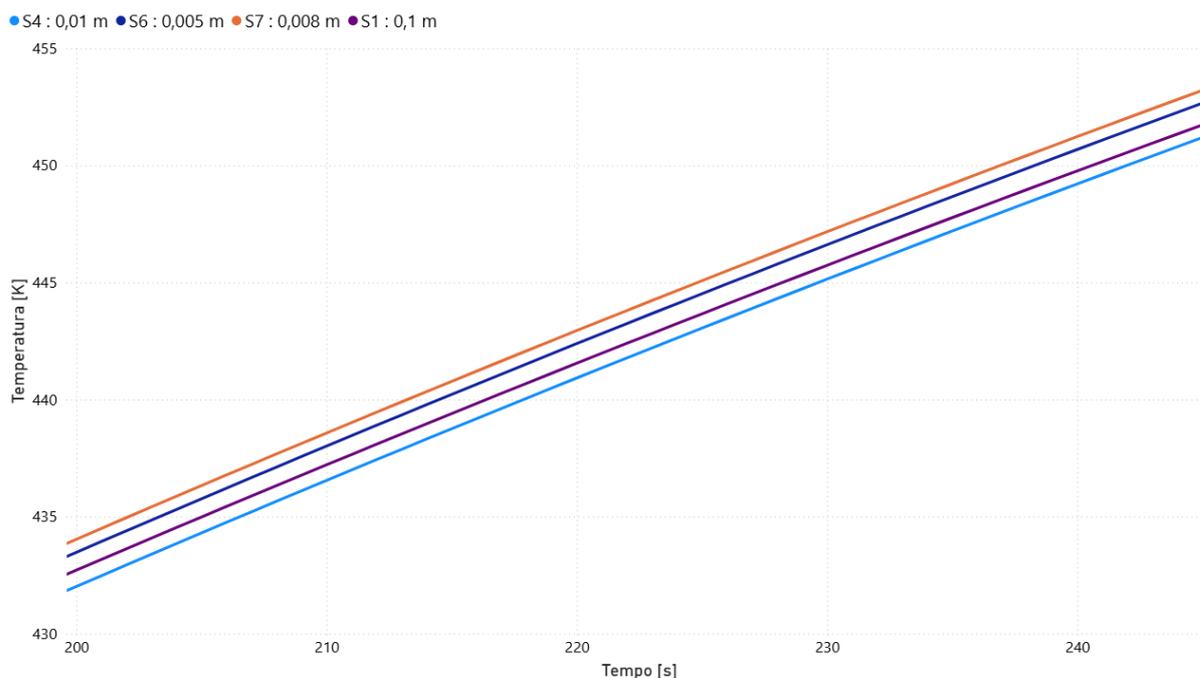
Tabela 5 - Elementos de malhas utilizados como teste.

Element Size (m)	Nodes	Elements
0,1	1065	854
0,005	669279	653770
0,008	168920	162405
0,01	97416	93210

Fonte: Autor (2025).

A Figura 9, indica os resultados obtidos para os testes de sensibilidade da malha. Dessa forma, é possível ver que a variação no tamanho dos elementos não teve influência significativa, com variações menores que 0,5% em termos de magnitude, sobre a temperatura média do leito ao decorrer do tempo. Sendo assim, optou-se por fazer as simulações com a malha de 0,01 m para as simulações subsequentes, devido a apresentar um equilíbrio nos resultados obtidos e no custo computacional. Dessa forma, todas as simulações realizadas no presente estudo estão indicadas na Tabela 6, na qual buscou-se explorar diferentes aplicações de leito fixos, como em sistemas CAES, exaustão de fornos e coletores PV/T. Foram consideradas diferentes condições de operação e construtivas, de modo a avaliar o desempenho do leito em cenários variados. É importante ressaltar que essas variações de parâmetros operacionais, construtivos e condições de contornos adotados para a simulações são baseados predominantemente nos artigos científicos presentes na seção de fundamentação teórica, no entanto, algumas condições foram superestimadas para ver o potencial do Ansys em computar esses efeitos.

Figura 9 - Média da temperatura para análise de diferentes malhas.



Fonte: Autor (2025).

Tabela 6 - Configurações utilizadas nas simulações.

Sim	Element Size (m)	Vazão (Kg/s)	Tent (K)	Material Partícula	Dp	ϕ partículas	QTD partículas	Planta
S1	0,1	0,225	550	Defaul	40 mm	0,208	652	CAES/Exaustão FEA
S2	0,01	1	550	ESCÓRIA FEA	40 mm	0,208	652	CAES/Exaustão FEA
S3	0,01	0,5	550	ESCÓRIA FEA	40 mm	0,208	652	CAES/Exaustão FEA
S4	0,01	0,225	550	Defaul	40 mm	0,208	652	CAES/Exaustão FEA
S5	0,01	0,225	550	ESCÓRIA FEA	40 mm	0,208	652	CAES/Exaustão FEA
S6	0,005	0,225	550	Defaul	40 mm	0,208	652	CAES/Exaustão FEA
S7	0,008	0,225	550	Defaul	40 mm	0,208	652	CAES/Exaustão FEA
S8	0,01	0,225	550	ESCÓRIA C	40 mm	0,208	652	CAES/Exaustão FEA
S9	0,01	0,225	550	ESCÓRIA FEA	30 mm	0,208	1615	CAES/Exaustão FEA
S10	0,01	0,225	550	ESCÓRIA FEA	50mm	0,208	306	CAES/Exaustão FEA
S11	0,01	0,225	340	ESCÓRIA FEA	40 mm	0,208	652	Coletor PV/T
S13	0,01	0,225	700	ESCÓRIA FEA	40 mm	0,208	652	Exaustão FEA
S14	0,01	0,225	550	ESCÓRIA FEA	40 mm	0,7	652	CAES/Exaustão FEA
S15	0,01	0,225	550	ESCÓRIA FEA	40 mm	0,1	652	CAES/Exaustão FEA

Fonte: Autor (2025).

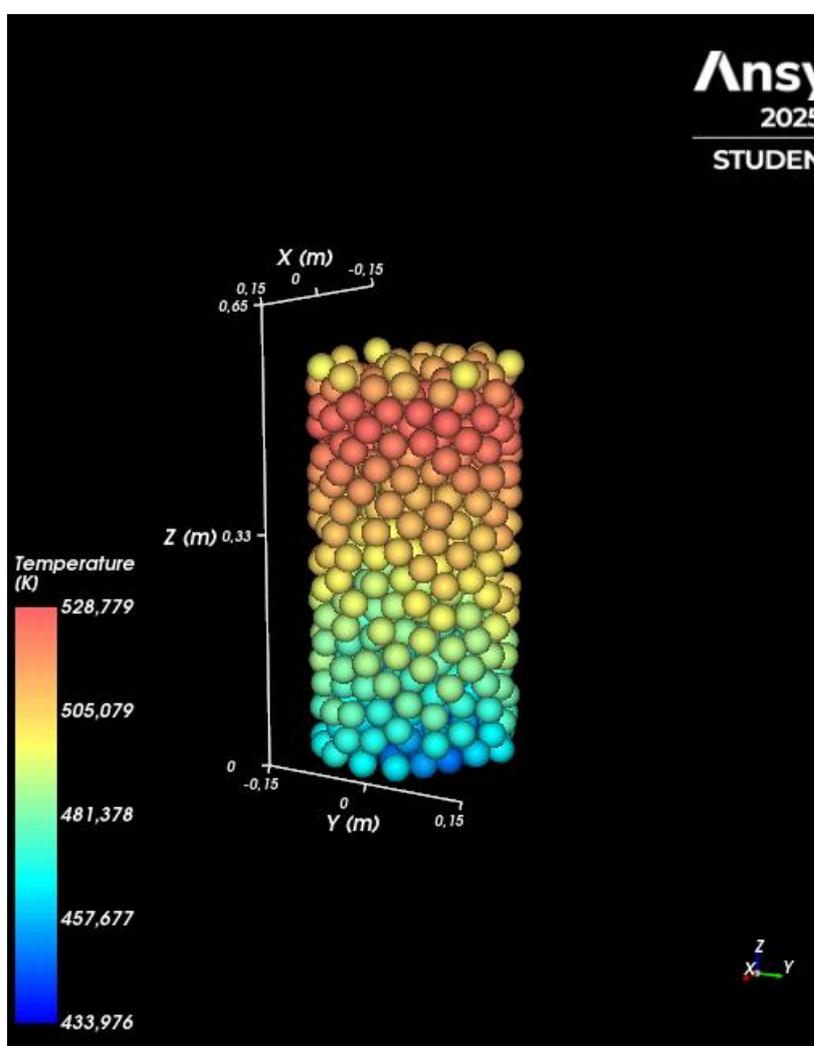
Um comportamento particularmente interessante foi identificado por meio das análises no Rocky, referente ao aquecimento da primeira camada de escória no leito

térmico. Percebe-se que embora essa camada esteja em contato direto com o HTF sua temperatura é sutilmente inferior a camada subsequente.

Esse fenômeno pode ser atribuído a alguns fatores, como por exemplo, a ocorrência de efeitos locais de turbulência, como também as camadas inferiores tendem a reter melhor o calor recebido, uma vez que estão confinadas por partículas acima o que favorece a acumulação e a conservação de energia térmica.

Tal comportamento foi observado em todas as simulações de carregamento térmico descritas na Tabela 6. A Figura 10 ilustra visualmente esse efeito, mostrando a distribuição de temperatura ao longo do leito.

Figura 10 - Fenômeno visto para primeira camada (S5 no instante 700s).

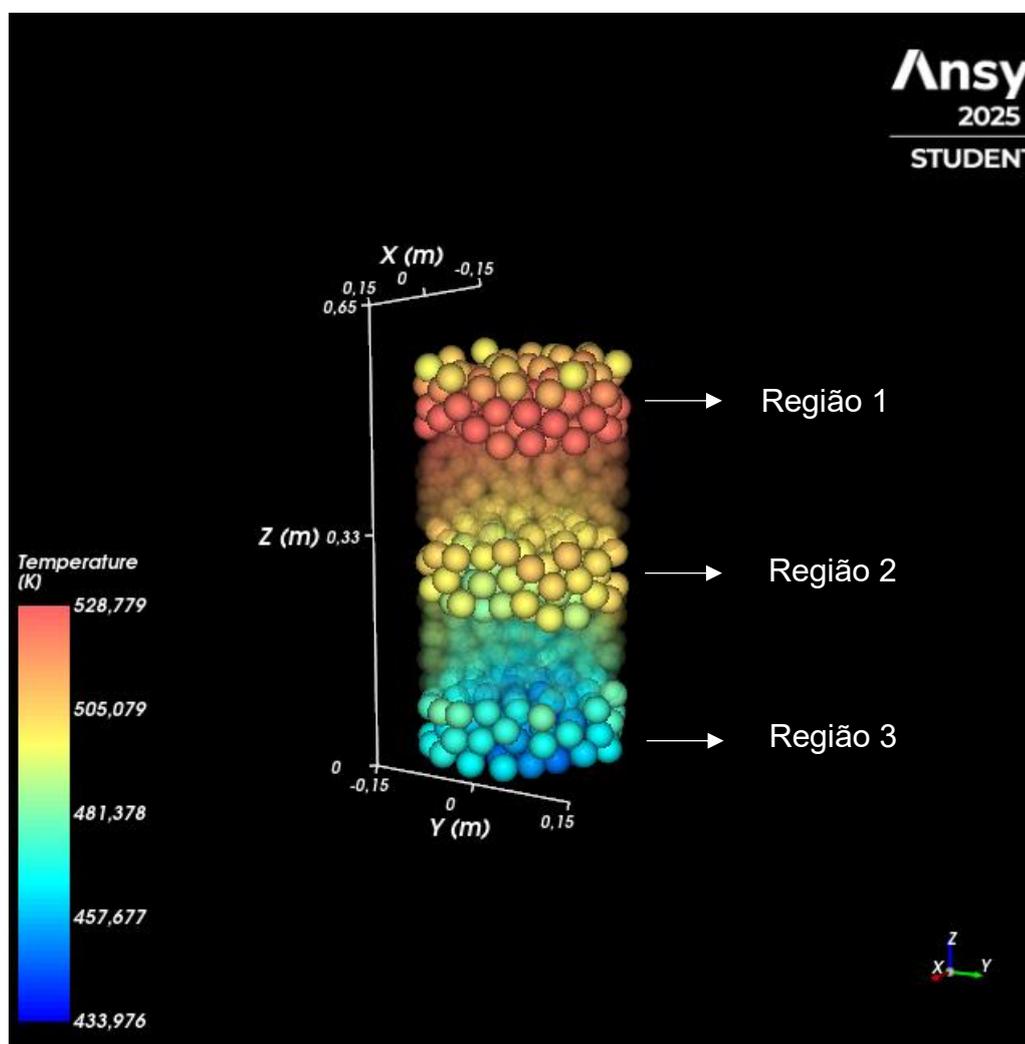


Fonte: Autor (2025).

Conforme observado em estudos sobre leitos, para a análise dos resultados os leitos são estratificados em três zonas específicas, conforme ilustrado na Figura 11. A

primeira região compreende a região de entrada do HTF em contato direto com o material de armazenamento. A segunda região representa a zona média e a terceira região corresponde a saída do HTF, após percorrer todo o leito e ter realizado trocas térmicas com o material de armazenamento.

Figura 11 - Regiões de análise no leito (S5 no instante 700s).



Fonte: Autor (2025).

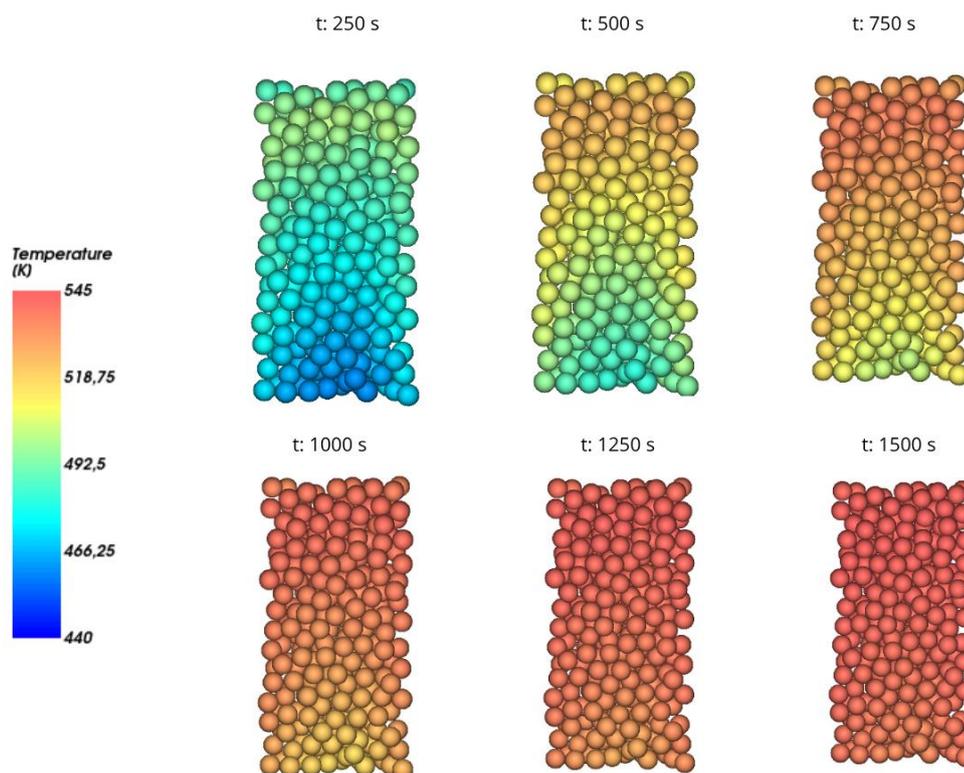
Para as próximas análises, o estudo analisa o processo de aquecimento do leito, a quantidade de calor armazenado ao longo do tempo e a perda de carga inerente ao processo de escoamento do fluido térmico. Para isso, variando os seguintes aspectos construtivos e operacionais do leito: Material constituinte da escória, diâmetro médio das partículas, porosidade da escória, vazão do HTF,

temperatura do HTF. Cada um desses aspectos é abordado nas subseções deste capítulo.

4.1 Influência do material constituinte da escória

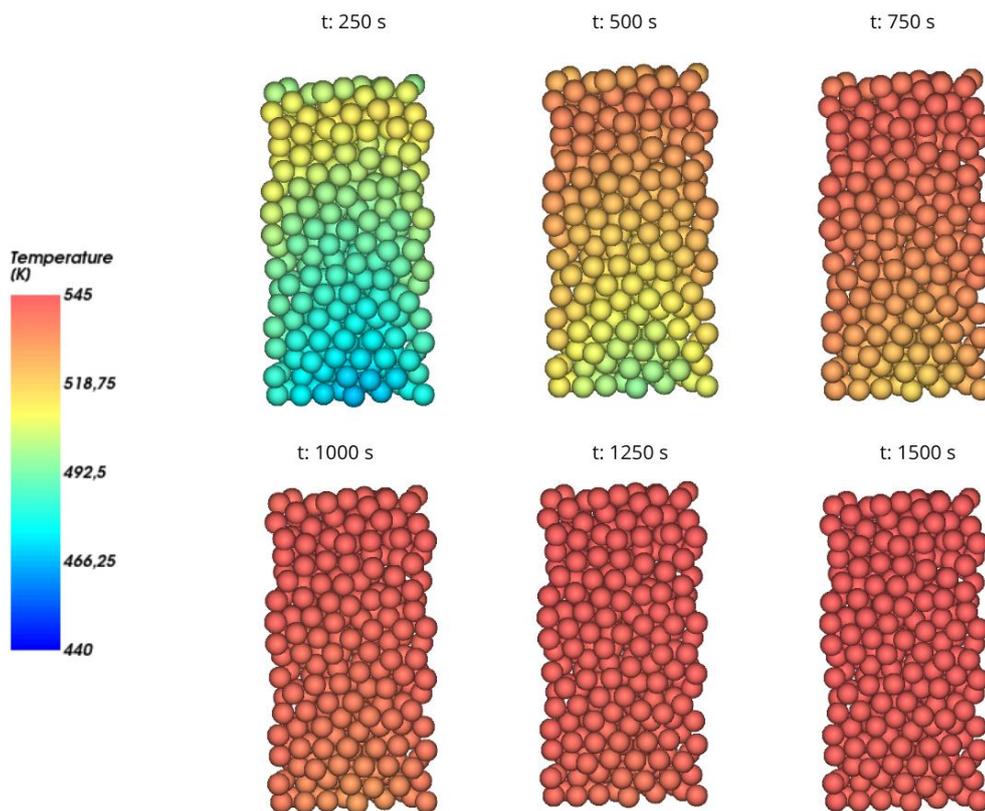
Na presente seção é realizada uma análise comparativa entre dois materiais constituintes da escória, a proveniente de FEA e tipo C, cujas propriedades termofísicas estão descritas na Tabela 2. As figuras apresentam uma análise da seção transversal dos dois materiais simulados, em diferentes instantes de tempo. A Figura 12 referente à escória FEA, mostra temperaturas mais baixas em relação à Figura 13, correspondente à escória tipo C. Essa diferença pode estar relacionada à menor condutividade térmica da escória FEA, o que dificulta a condução de calor no interior do leito. A escória tipo C apresenta uma uniformização térmica mais rápida, indicando uma maior eficiência na condução de calor ao longo do leito.

Figura 12 - Processo aquecimento escória FEA.



Fonte: Autor (2025).

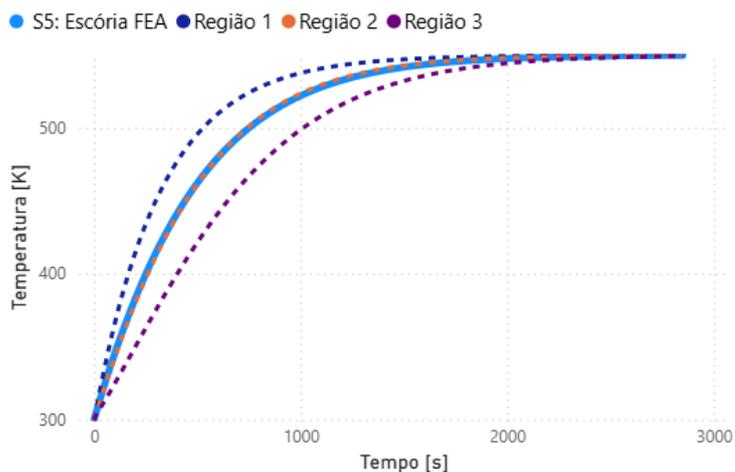
Figura 13 - Processo aquecimento escória tipo C.



Fonte: Autor (2025).

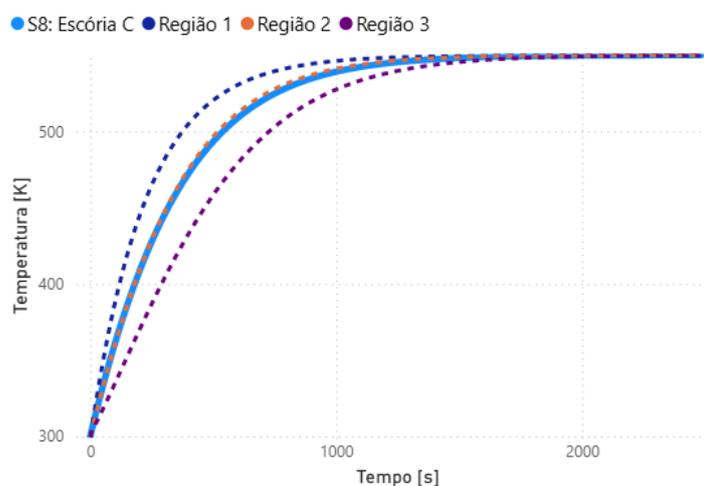
A Figura 14 e a Figura 15 mostram o processo de aquecimento ao longo das zonas, um aspecto relevante a ser observado é que a temperatura na região central se aproxima da temperatura média global obtida ao longo do leito.

Figura 14 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 (Escória FEA).



Fonte: Autor (2025).

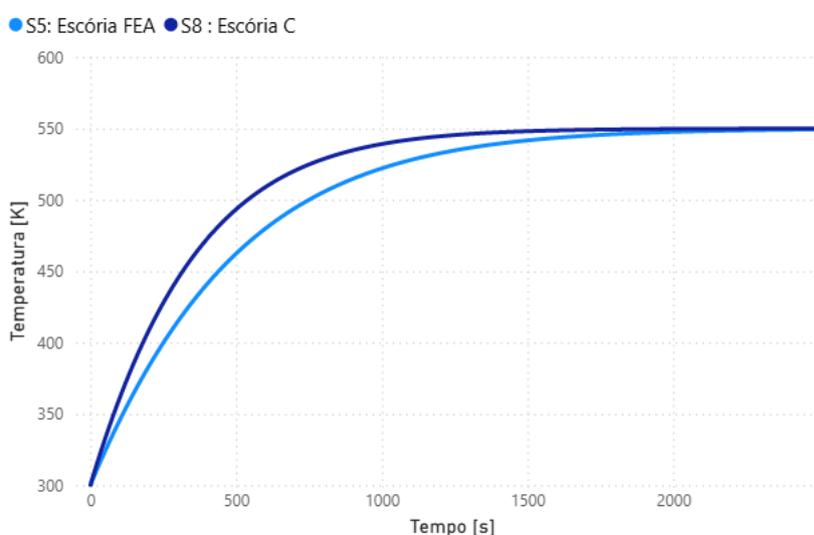
Figura 15 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S8 (Escória C).



Fonte: Autor (2025).

Ao se analisar o processo de aquecimento dos materiais, conforme ilustrado na Figura 16, observa-se que a escória tipo C apresenta um processo de elevação da temperatura mais rápido por conduzir melhor o calor comparado à escória FEA. Dessa forma, esse material tem uma melhor aplicação em leitos que demandam menor tempo de armazenamento e descarregamento.

Figura 16 - Temperatura média global [K] X tempo [s] para as simulações S5 e S8.

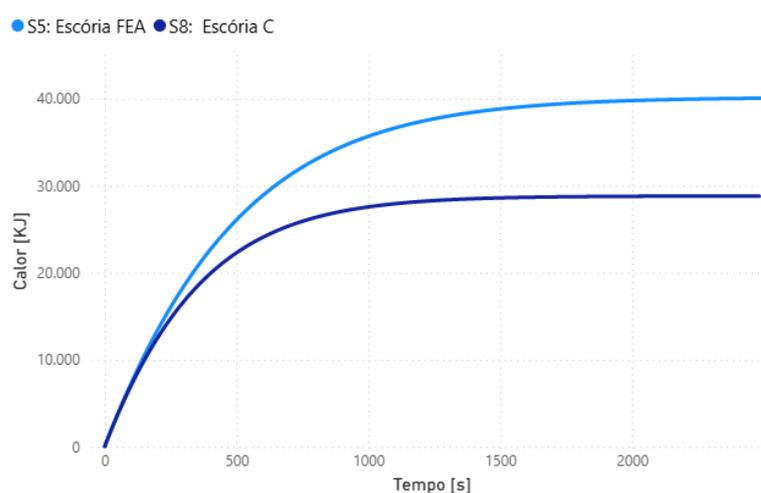


Fonte: Autor (2025).

A análise da quantidade de calor armazenado revela uma forte dependência da capacidade calorífica volumétrica. Nesse aspecto a escória FEA apresenta valor

superior comparado a escória C, o que a possibilita armazenar mais energia ao longo do tempo. Embora, nos instantes iniciais os valores de energia armazenada sejam semelhantes, devido a maior temperatura da escória C, com o avanço do tempo a escória FEA apresenta maior capacidade de acumular energia, conforme mostra a Figura 17. Sendo assim, apresentando um maior potencial para aplicação em ciclos prolongados.

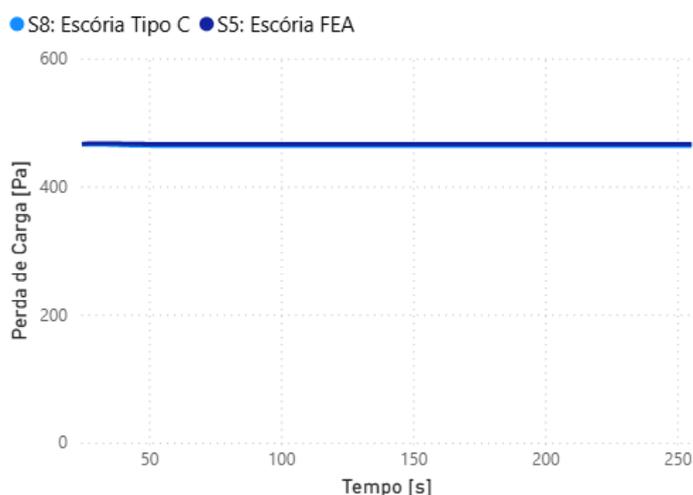
Figura 17 - Quantidade de calor armazenado [KJ] X tempo [s] para as simulações S5 e S8.



Fonte: Autor (2025).

A perda de carga não é significativamente afetada pela mudança de material de armazenamento, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 - Perda de carga [Pa] X tempo [s] para as simulações S5 e S8.

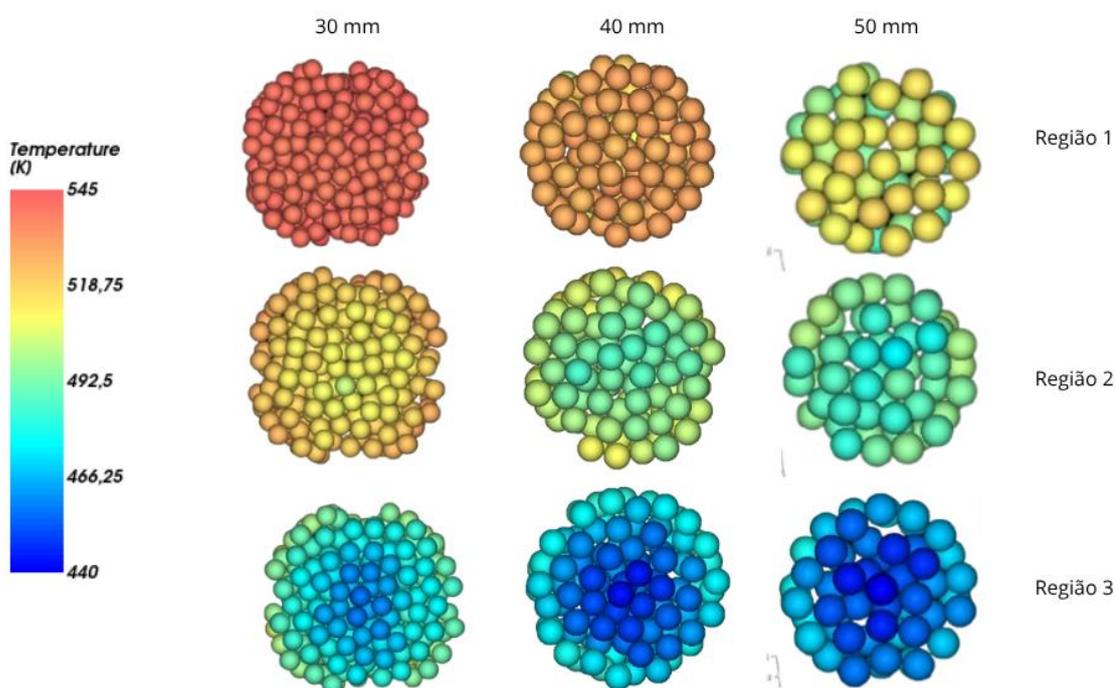


Fonte: Autor (2025).

4.2 Efeito da alteração do diâmetro médio das partículas de armazenamento.

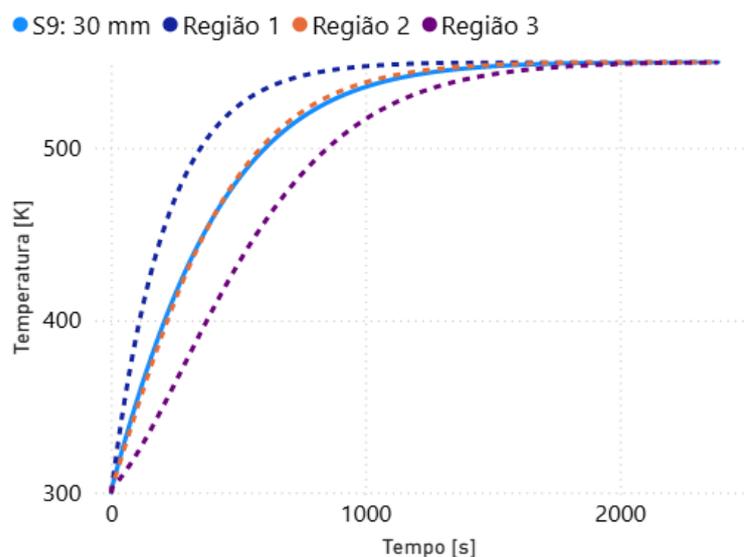
Nesta seção estuda-se o efeito do diâmetro médio das partículas do material de armazenamento térmico, é importante reassaltar que por mais que tenha a variação do diâmetro médio a massa do material armazenada no leito permanece a mesma. Dessa forma, são considerados os diâmetros de 30 mm, 40 mm e 50 mm. A Figura 19 ilustra a distribuição de temperatura na última camada para os três casos. Observa-se que o leito composto com partículas de menor diâmetro apresenta temperaturas mais elevadas em todas as regiões, evidenciando uma maior eficiência na transferência de calor. Outro aspecto relevante é o comportamento térmico das partículas nas extremidades laterais do leito, nessas regiões as temperaturas são mais altas em comparação com o centro do leito. Esse efeito pode ser atribuído a alguns fatores da simulação, o fato de que as paredes do domínio foram consideradas adiabáticas e que as partículas dessa região interagem termicamente com uma quantidade menor de partículas vizinhas em comparação com partículas das regiões centrais, que trocam calor com um número maior de partículas ao seu redor.

Figura 19 - Processo de aquecimento por regiões para os três diâmetros no instante de 750 s.



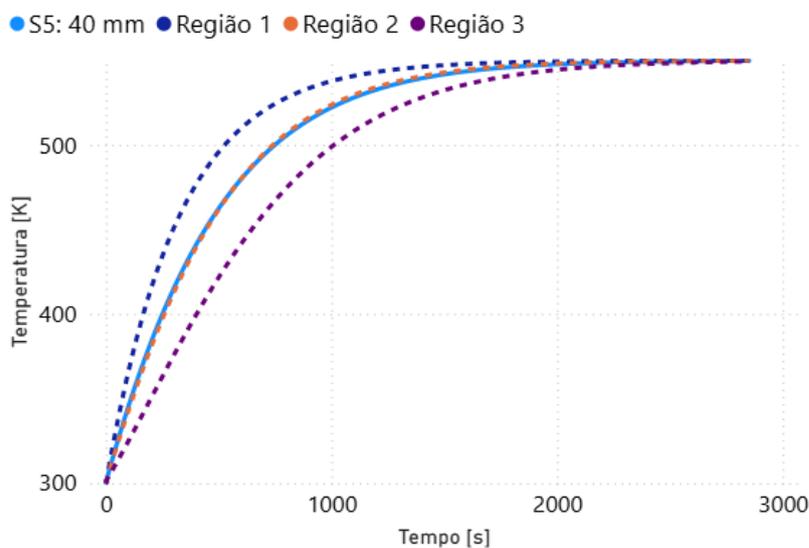
A Figura 20, Figura 21 e Figura 22 ilustram o processo de aquecimento para os três casos, nela observa-se que a medida que aumenta o diâmetro médio a diferença de temperatura entre a região superior, central e inferior diminui. Esse comportamento está relacionado a alteração do fator de forma, destacados nas as equações (6) e (7), em que um diâmetro menor implica em um maior fator de forma, o que possibilita uma maior transferência de calor.

Figura 20 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S9 ($D_p = 30$ mm).

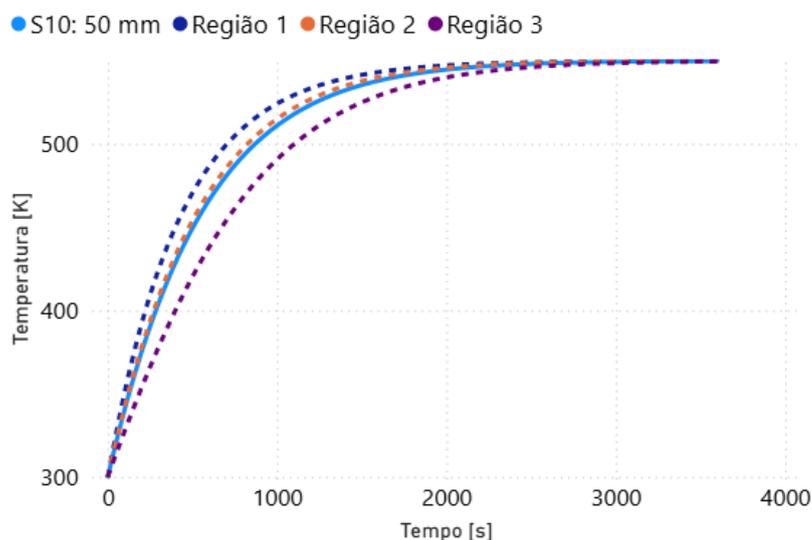


Fonte: Autor (2025).

Figura 21 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 ($D_p = 40$ mm).



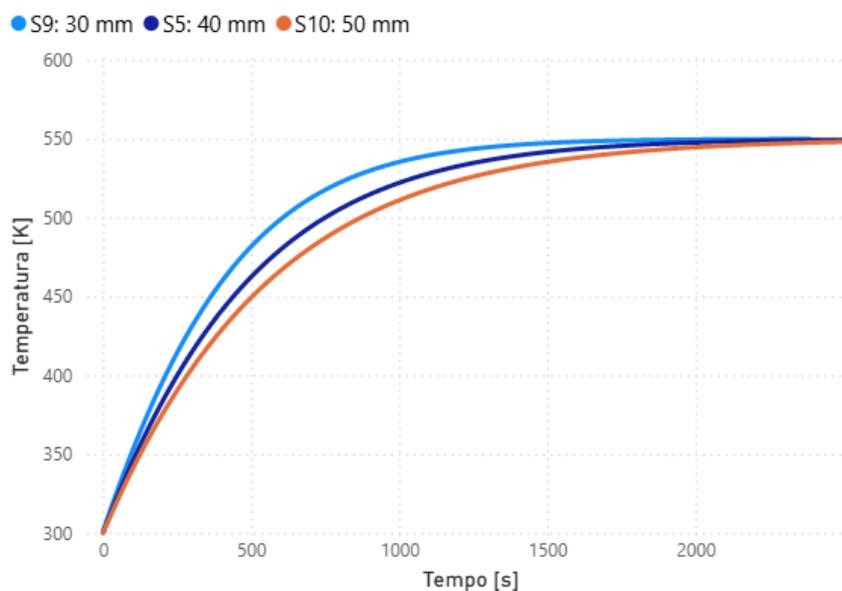
Fonte: Autor (2025).

Figura 22 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S10 ($D_p = 50$ mm).

Fonte: Autor (2025).

O processo de aquecimento, ilustrado na Figura 23, mostra que a escória com menor diâmetro médio aquece-se mais rapidamente. Esse comportamento se deve à maior área superficial por volume das partículas menores, o que favorece a transferência de calor por condução entre as mesmas e o HTF.

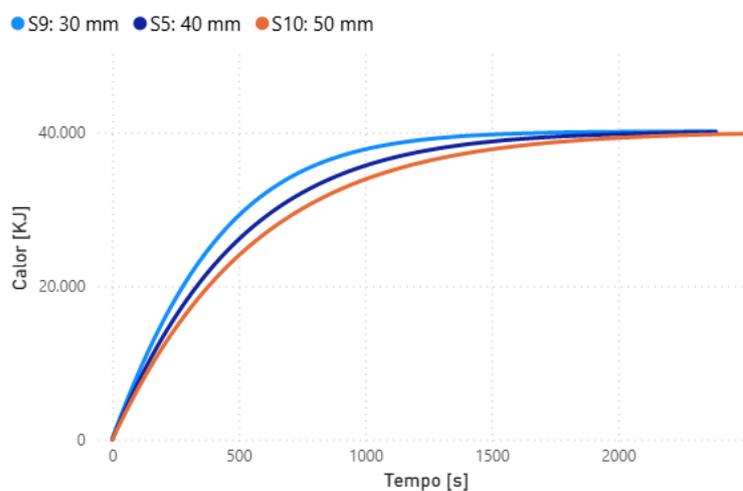
Figura 23 - Temperatura média global [K] X tempo [s] para as simulações S5, S9 e S10.



Fonte: Autor (2025).

Tratando-se do armazenamento da energia térmica, a Figura 24 apresenta o processo ao longo do tempo. Sendo assim, é possível notar que a quantidade máxima de calor armazenado é a mesma para os três diâmetros analisados, o leito que contém o menor diâmetro médio atinge essa condição mais rápido.

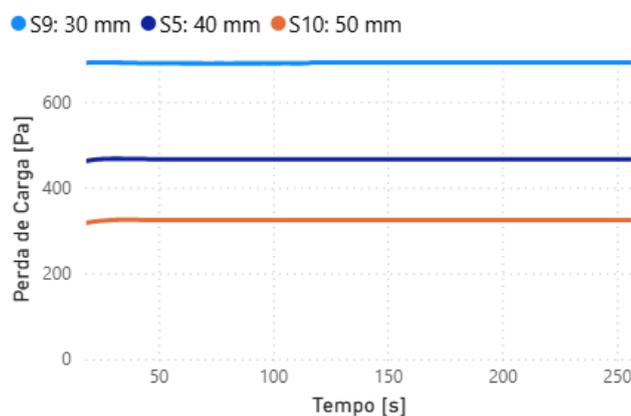
Figura 24 - Quantidade de calor armazenado [KJ] X tempo [s] para as simulações S5, S9 e S10.



Fonte: Autor (2025).

Em relação à perda de carga, o diâmetro médio exerce influências significativas. Aumentar o diâmetro médio das partículas resulta em uma diminuição da perda de carga ao longo do leito, conforme mostra a Figura 25. Em situações práticas, a utilização de diâmetro maiores para o material constituinte do leito permite a operação com bombas de menor potência.

Figura 25 - Perda de carga [Pa] X tempo [s] para as simulações S5, S9 e S10.

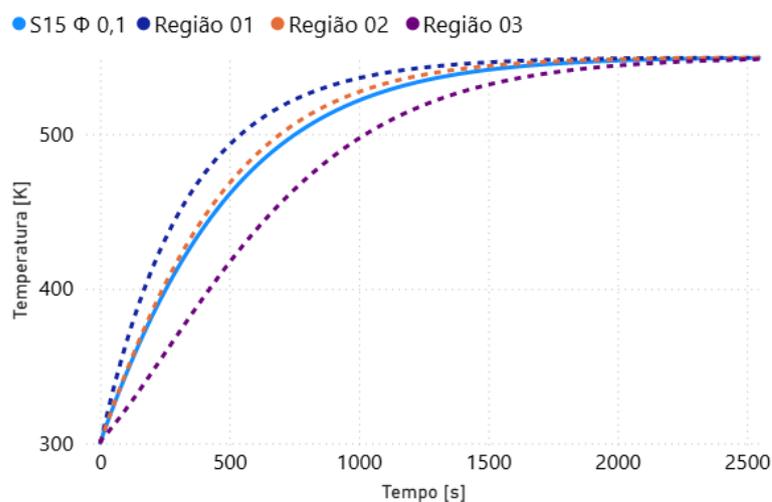


Fonte: Autor (2025).

4.3 Impacto da porosidade das partículas

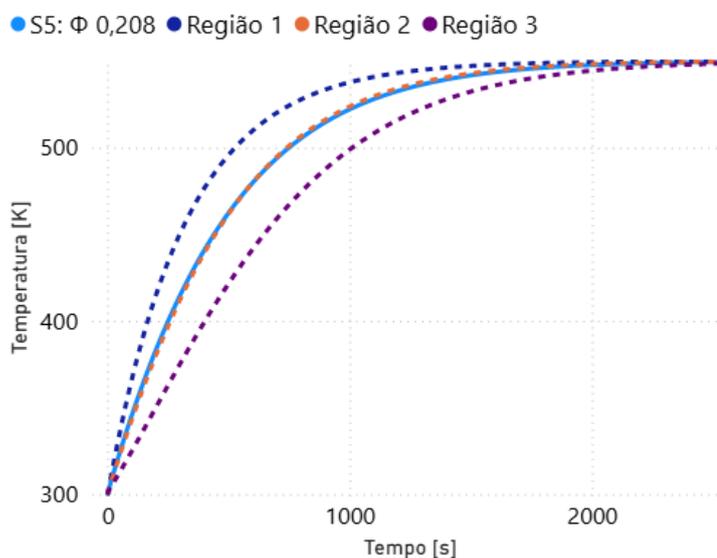
A influência da porosidade do material de armazenamento é analisada nesta seção. Sendo assim, o estudo considera três valores de porosidade, sendo eles: 0,1; 0,208 e 0,7. As Figura 26, Figura 27 e Figura 28 apresentam o processo de aquecimento para cada simulação, onde é possível perceber que à medida que a porosidade aumenta, as diferenças de temperaturas entre as regiões do estudo se tornam acentuadas devido a uma maior circulação do HTF entre as partículas.

Figura 26 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S15 ($\Phi = 0,1$).

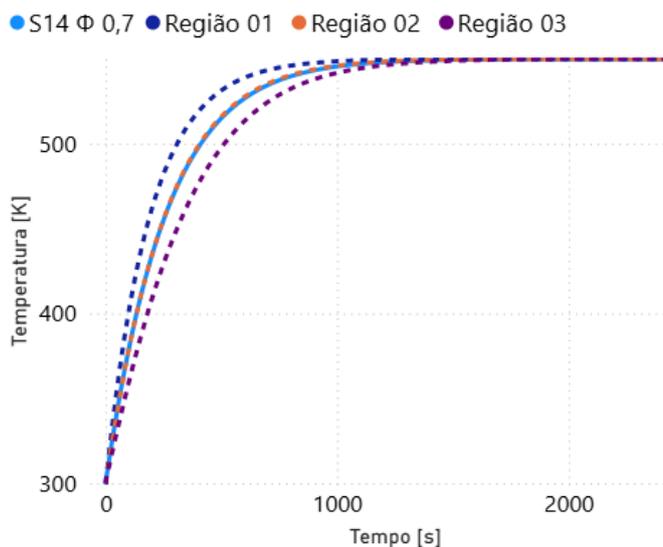


Fonte: Autor (2025).

Figura 27 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 ($\Phi = 0,208$).



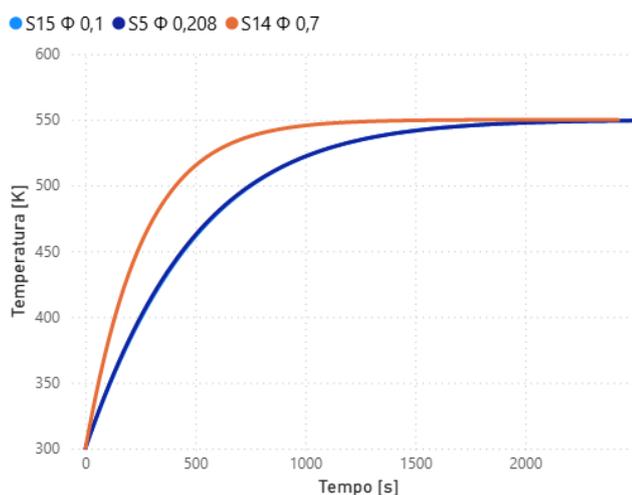
Fonte: Autor (2025).

Figura 28 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 ($\Phi = 0,7$).

Fonte: Autor (2025).

No processo de aquecimento, observa-se que a escória com maior porosidade apresenta um aquecimento mais rápido em comparação com a escória de menor porosidade. Isso ocorre porque a maior porosidade permite um fluxo mais eficiente do HTF através do material, facilitando a transferência de calor entre o fluido e a escória sólida. Esse aumento no escoamento do HTF resulta em uma troca térmica mais eficaz, o que acelera o processo de aquecimento da escória. A Figura 29 ilustra esse processo de aquecimento, demonstrando como a porosidade influencia a dinâmica térmica do sistema.

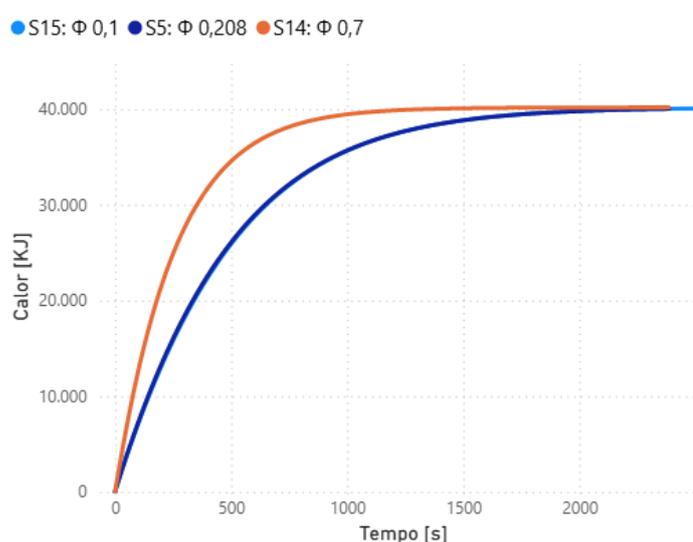
Figura 29 - Temperatura média global [K] X tempo [s] para as simulações S5, S14 e S15.



Fonte: Autor (2025).

Em relação ao calor armazenado a escória com maior porosidade atinge mais rapidamente sua capacidade máxima de armazenamento, devido a se aquecer mais rápido. No entanto, o valor total de energia armazenada permanece o mesmo entre os diferentes valores de porosidade. A Figura 30 apresenta a quantidade total de energia acumulada ao longo do tempo.

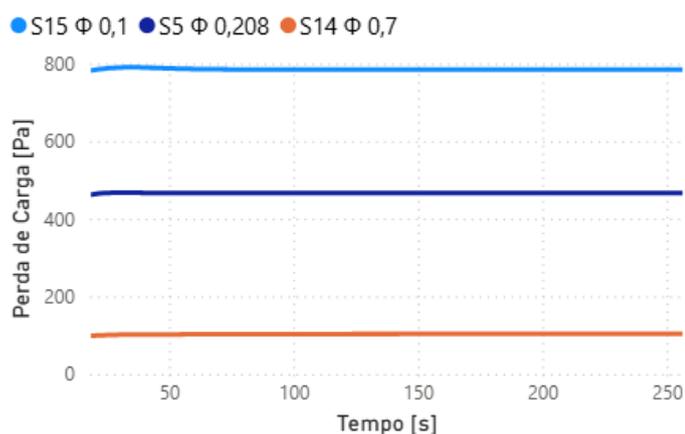
Figura 30 - Quantidade de calor armazenado [KJ] X tempo [s] para as simulações S5, S14 e S15.



Fonte: Autor (2025).

A perda de carga ao longo do leito é fortemente afetada pela porosidade do material. Escórias com menores valores de porosidade dificultam o escoamento do HTF, aumentando as resistências de fluxos. Esse comportamento é evidenciado na Figura 31.

Figura 31 - Perda de carga [Pa] X tempo [s] para as simulações S5, S14 e S15.

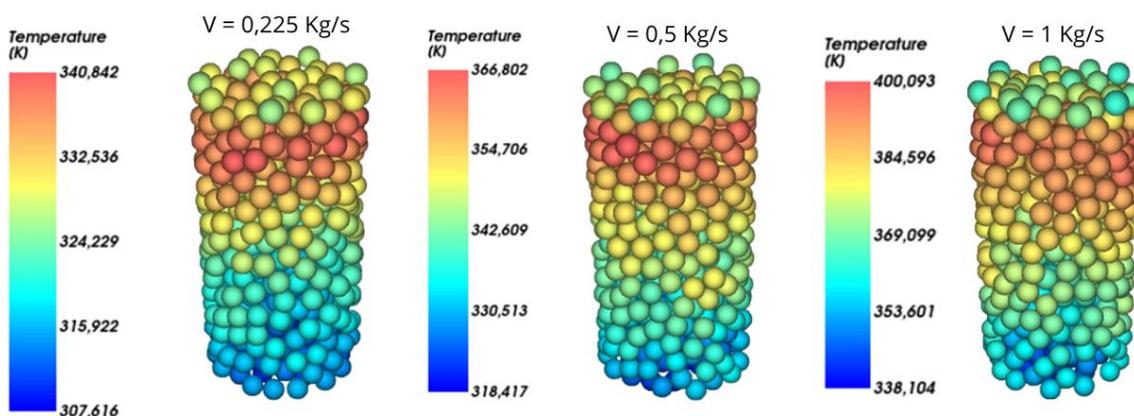


Fonte: Autor (2025).

4.4 Influência da vazão do HTF

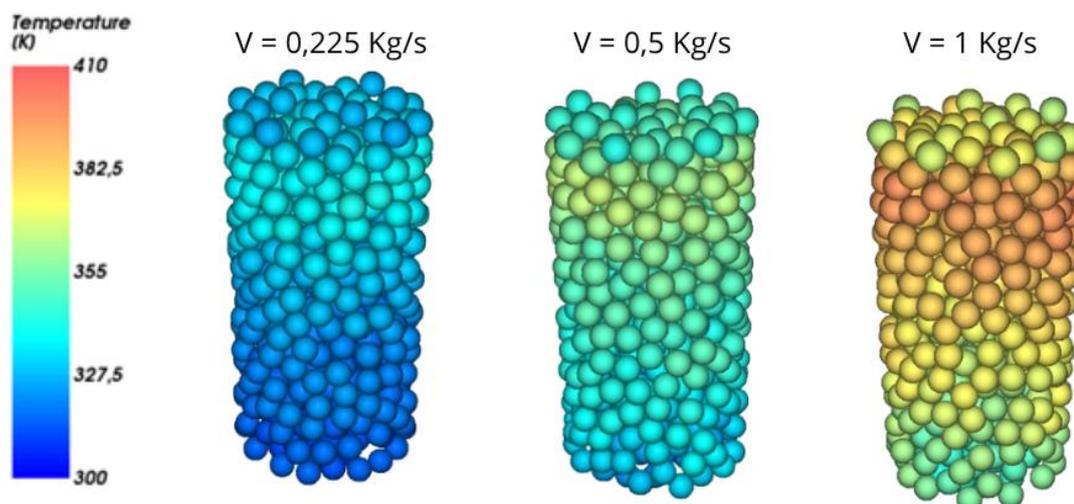
Conforme destacado no começo desta seção, o fenômeno em que a primeira camada encontra-se a uma temperatura inferior a camada subsequente, a medida em que aumenta a vazão do HTF percebe-se que a diferença de temperatura se torna mais acentuada conforme mostra a Figura 32. Outro ponto interessante a ressaltar é que a vazão do HTF interfere significativamente na temperatura ao longo do leito, como é possível perceber na Figura 33.

Figura 32 - Processo de aquecimento no instante 50 s para diferentes HTF com a escala do Ansys.



Fonte: Autor (2025).

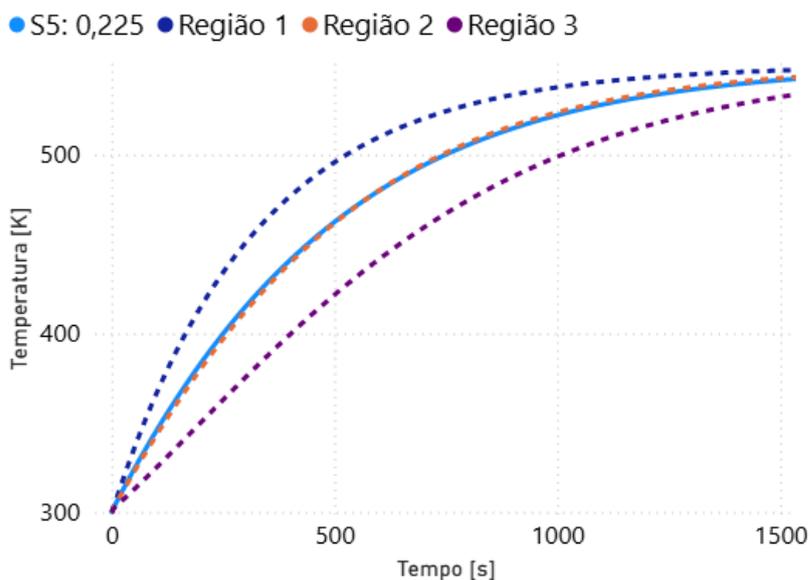
Figura 33 – Processo de aquecimento no instante 50 s para diferentes HTF.



Fonte: Autor (2025).

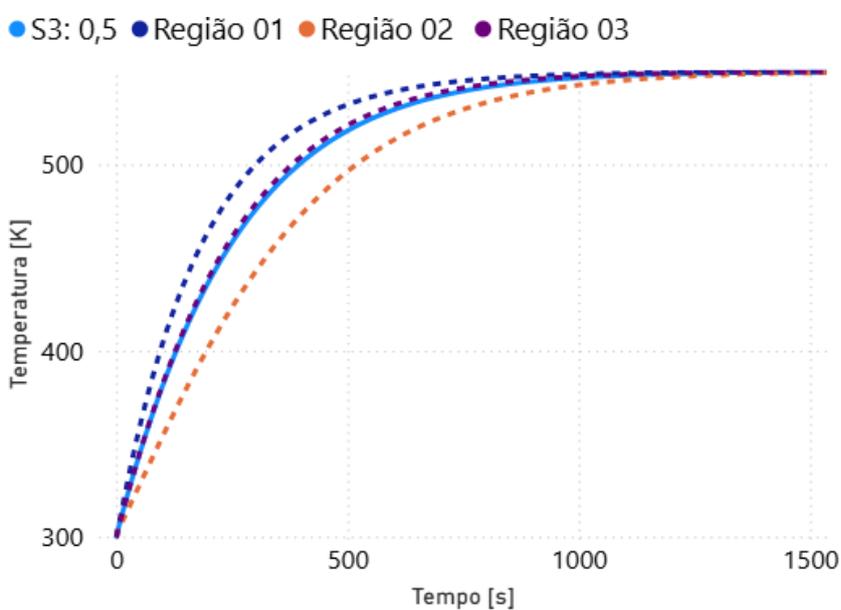
A análise do aquecimento para diferentes vazões do HTF mostra que, à medida que a vazão do fluido aumenta, ocorre uma redução nas diferenças de temperatura entre as regiões analisadas devido a ter um aquecimento mais rápido para todo o leito, conforme mostram na Figura 34, Figura 35 e Figura 36.

Figura 34 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 ($V = 0,225 \text{ Kg/s}$).

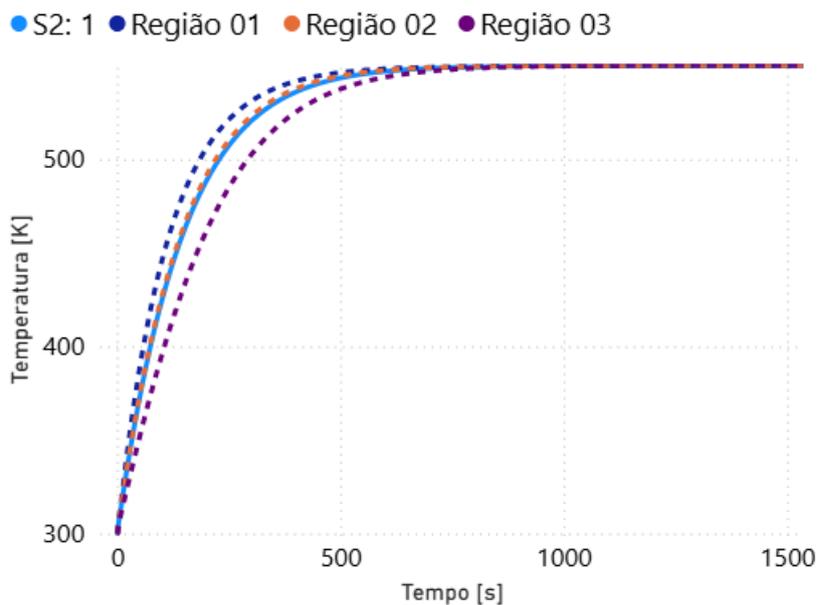


Fonte: Autor (2025).

Figura 35 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S3 ($V = 0,5 \text{ Kg/s}$).



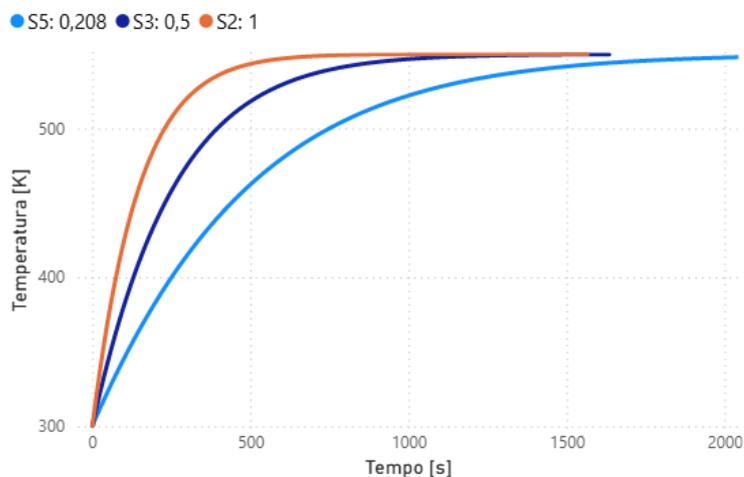
Fonte: Autor (2025).

Figura 36 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S2 ($V = 1 \text{ Kg/s}$).

Fonte: Autor (2025).

Em relação a temperatura média global, à medida que aumenta a vazão tem-se uma maior taxa de troca de calor com o material sólido, o que resulta em um aquecimento mais rápido, como ilustra a Figura 37.

Figura 37 - Temperatura média global [K] X tempo [s] para as simulações S2, S3 e S5.

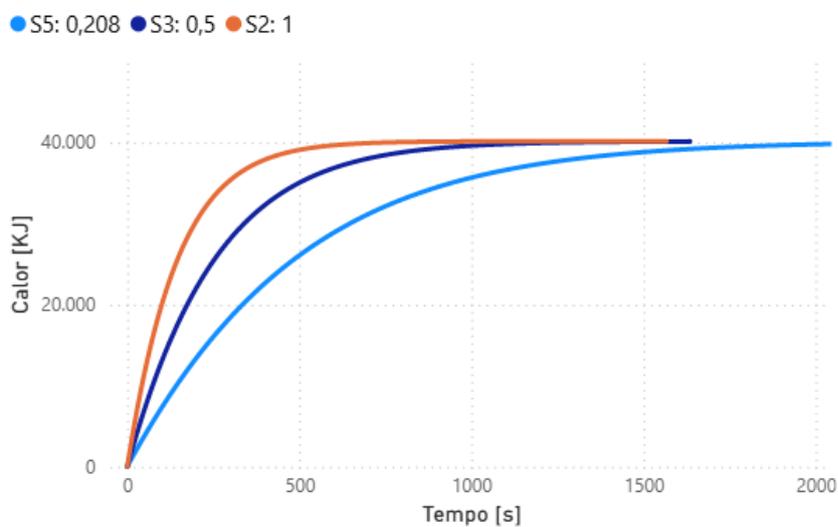


Fonte: Autor (2025).

Tratando-se do calor armazenado ao longo do tempo, observa-se que o fluido com maior vazão permite que o leito atinja mais rapidamente sua capacidade máxima de armazenamento de energia. No entanto, essa variação não interfere no valor

máximo da energia armazenada que permanece constante para as simulações em estudo. A Figura 38, destaca o processo de aquecimento.

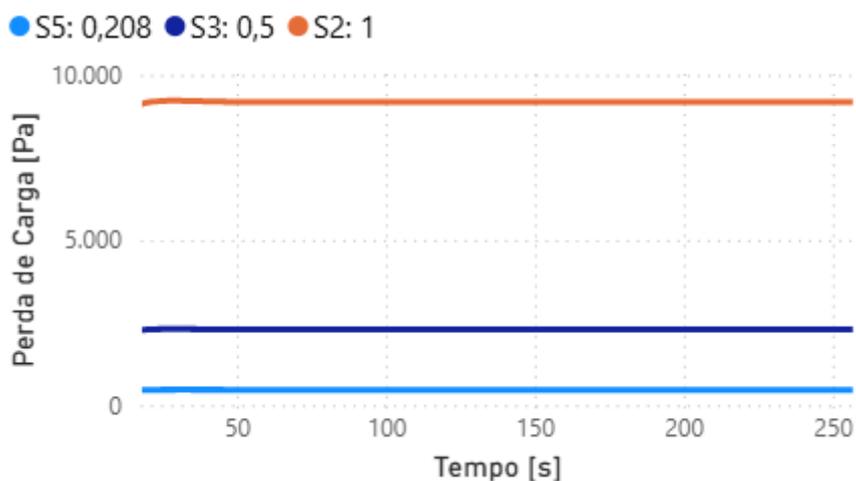
Figura 38 - Quantidade de calor armazenado [KJ] X tempo [s] para as simulações S2, S3 e S5.



Fonte: Autor (2025).

A perda de carga é fortemente afetada pela vazão do escoamento, conforme mostra a equação de Ergun, as resistências ao escoamento aumentam à medida que a velocidade do fluido se eleva. A Figura 39, ilustra o efeito mencionado acima.

Figura 39 - Perda de carga [Pa] X tempo [s] para as simulações S2, S3 e S5.

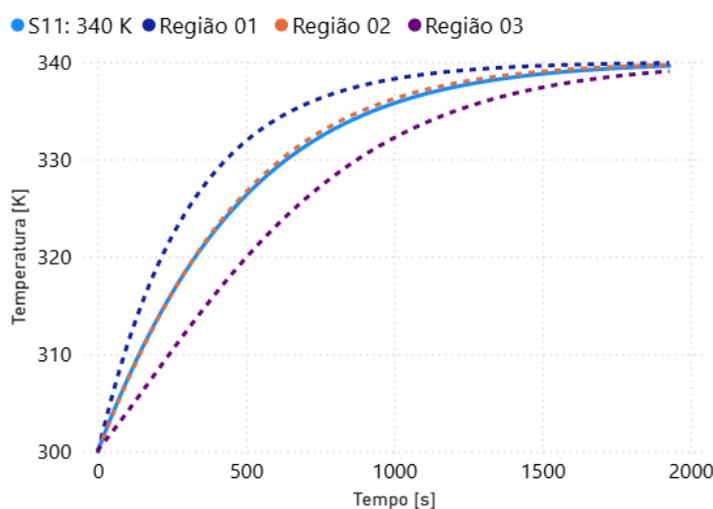


Fonte: Autor (2025).

4.5 Análise da temperatura de entrada do HTF

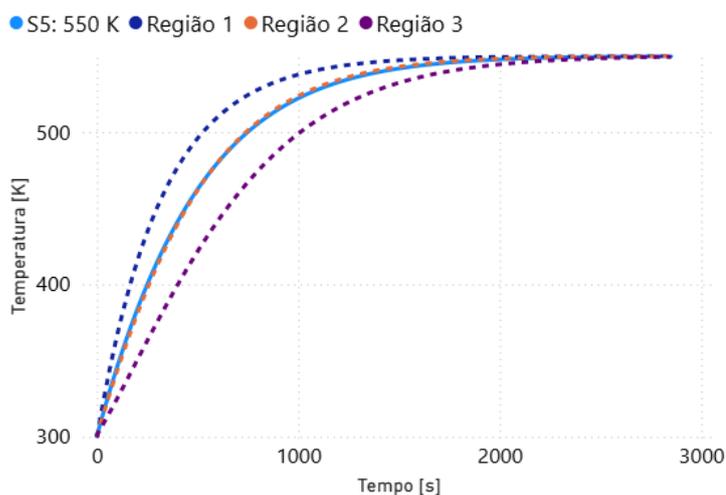
Ao se analisar o processo de aquecimento para diferentes temperaturas do HTF, é possível observar que o processo de aquecimento, embora cada simulação tenha que atingir temperaturas diferentes, apresentem o mesmo comportamento de aquecimento como mostram a Figura 40, Figura 41 e Figura 42. No entanto, quando comparamos o mesmo entre as simulações, nota-se que a medida que temperaturas mais elevadas do HTF resultam em temperaturas maiores para as devidas regiões do leito.

Figura 40 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S11 (T = 340 K).



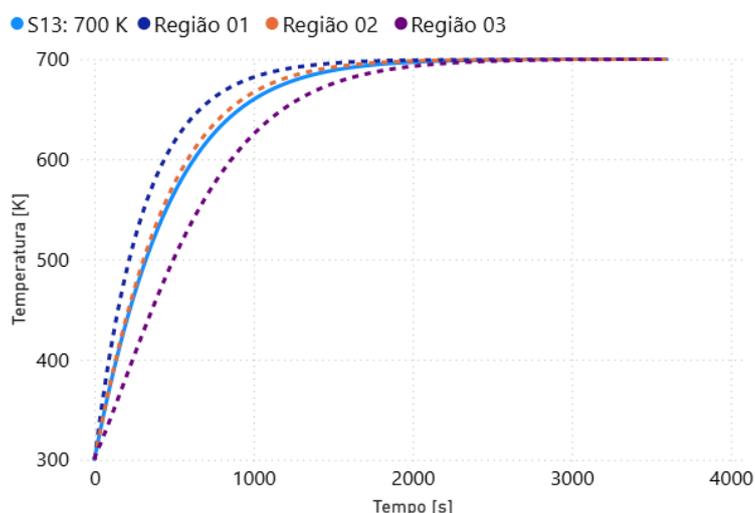
Fonte: Autor (2025).

Figura 41 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S5 (T = 550 K).



Fonte: Autor (2025).

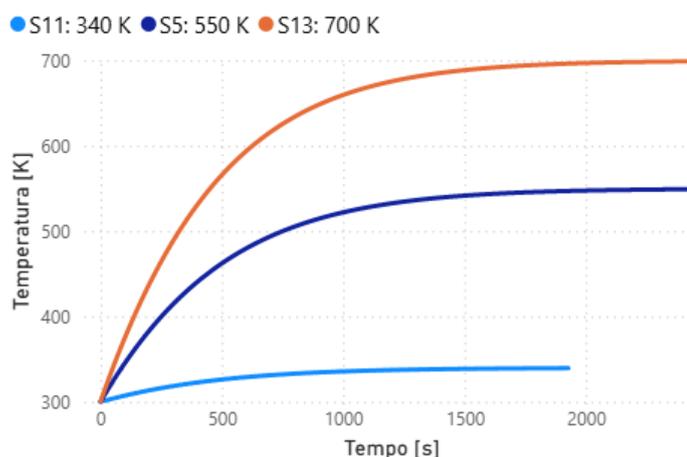
Figura 42 - Processo de aquecimento por regiões X tempo [s] para a simulação S13 (T = 700 K).



Fonte: Autor (2025).

A análise da temperatura média global do leito, reforça ainda mais as observações feitas anteriormente. A Figura 43, ilustra as evoluções das temperaturas médias globais para as diferentes regiões ao longo do tempo.

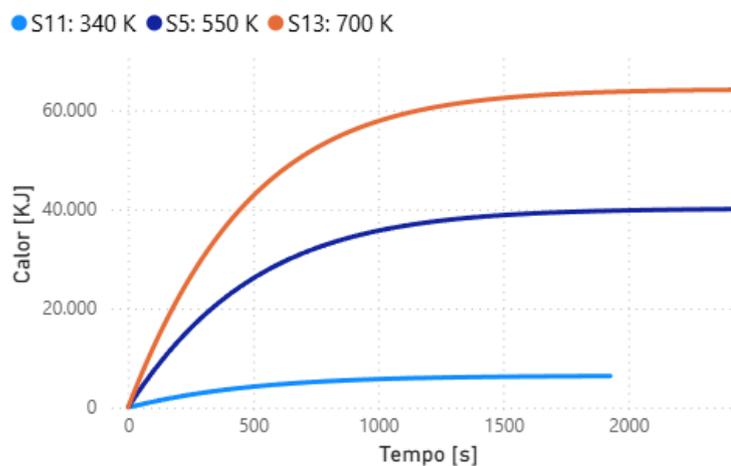
Figura 43 - Temperatura média global [K] X tempo [s] para as simulações S5, S11 e S13.



Fonte: Autor (2025).

No que diz respeito ao calor armazenado, o mesmo é fortemente influenciado pela temperatura do HTF. Tendo em vista que temperaturas mais elevadas do fluido proporcionam maior transferência de calor com o material de armazenamento térmico, tendo por resultado uma maior quantidade de energia armazenada, como é mostrado na Figura 44.

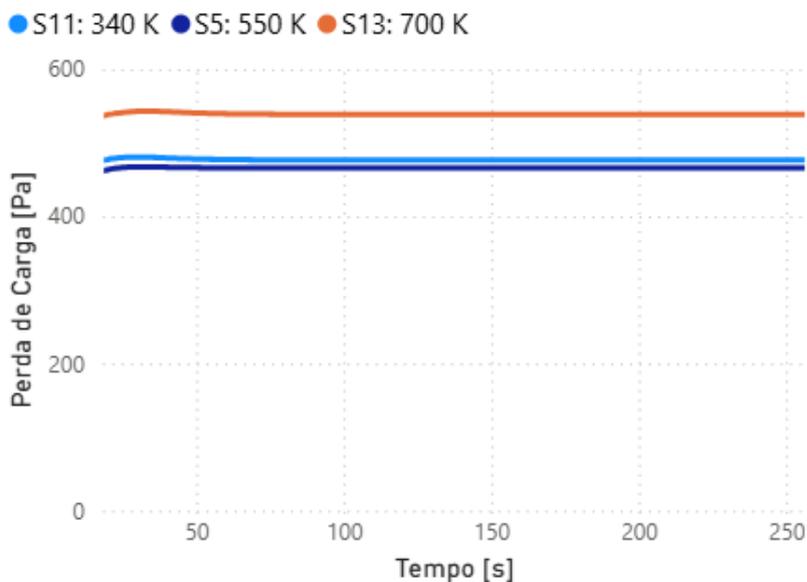
Figura 44 - Quantidade de calor armazenado [KJ] X tempo [s] para as simulações S5, S11 e S13.



Fonte: Autor (2025).

Tratando-se da perda de carga, à medida que a temperatura do HTF inicialmente houve uma redução na perda de carga para a simulação com temperatura de 340 K e um aumento significativo para a temperatura de 740 K, como é possível na Figura 45.

Figura 45 - Perda de carga [Pa] X tempo [s] para as simulações S5, S11 e S13.



Fonte: Autor (2025).

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo, são destacadas as principais conclusões obtidas a partir da análise e processamento dos resultados das simulações propostas. E também, são apresentadas sugestões de melhorias e possíveis implementações para a realização de trabalhos futuros, tendo por base as contribuições e limitações do presente estudo.

5.1 CONCLUSÕES

No presente estudo, foi uma abordagem alternativa para analisar o processo de aquecimento em leitos fixos, com o objetivo de analisar diferentes condições operacionais e de projeto, alinhadas com os estudos já desenvolvidos. A intenção é que essa metodologia contribua para ampliar a aplicabilidade dos leitos no contexto do armazenamento de energia térmica. As simulações numéricas foram realizadas por meio da integração entre os softwares Ansys Fluent e Ansys Rocky.

Dentre os materiais de armazenamento analisados, observou-se que a escória tipo C apresentou um processo de aquecimento mais rápido comparado à escória FEA, permitindo que o leito atingisse temperaturas médias mais elevadas. Esse comportamento está relacionado à maior condutividade térmica da escória tipo C. No entanto, a análise do calor total armazenado revelou que a escória FEA apresentou desempenho superior, atrelado à sua maior capacidade calorífica volumétrica. Dessa forma, a escolha do material de armazenamento se mostra uma etapa fundamental para a viabilidade do leito térmico, sendo necessário considerar tanto o tempo de carregamento e descarregamento quanto a quantidade total de energia que pode ser armazenada no sistema.

Quanto à variação do diâmetro médio das partículas, os resultados mostraram que partículas menores resultaram em maior aquecimento em todas as regiões do leito. Isso se deve ao maior número de partículas por volume, o que favorece a área de contato entre o fluido térmico e o meio armazenador. No entanto, a utilização de partículas com diâmetros menores acarreta no aumento da perda de carga para o sistema.

A porosidade das partículas também influencia no comportamento térmico e fluidodinâmico do sistema. Observou-se que materiais com maior porosidade promoveram um aquecimento mais rápido, devido à maior circulação do fluido térmico

entre os interstícios das partículas, favorecendo assim a transferência de calor. Em contrapartida, porosidades menores geraram maior perda de carga.

Quanto à vazão do HTF, observou-se que vazões maiores proporcionam um aquecimento mais rápido e uniforme ao longo do leito. Ressalta-se, que o aumento da vazão do fluido resulta em maiores perdas de carga, conforme previsto pela equação de Ergun.

Por fim, a temperatura de entrada do HTF teve impacto direto no desempenho do sistema. Fluidos com temperaturas mais elevadas promovem uma maior transferência de calor para o material sólido, resultando em maior quantidade de energia armazenada. Entretanto, o aumento da temperatura também foi acompanhado por maiores perdas de carga.

Sendo assim, a utilização do Ansys para análise de leitos térmicos mostrou-se uma ferramenta eficaz na avaliação do desempenho térmico, fornecendo resultados coerentes com estudos numéricos e experimentais disponíveis na literatura.

5.2 FUTUROS TRABALHOS

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros existem possibilidades de aprimoramento em diferentes aspectos do trabalho. Dessa forma, a seguir destaca-se as principais possibilidades.

Em relação ao leito de armazenamento térmico, pode-se incorporar mais características condizentes com as condições reais de operação, como por exemplo, a consideração de perdas térmicas para ambientes externos e interações térmicas com as paredes do sistema.

Tratando-se da planta como um todo, uma extensão pertinente seria a modelagem integrada com os componentes da planta térmica, possibilitando avaliar parâmetros como eficiência de troca térmica, perdas de cargas e desempenho energético do sistema.

Além destas, outra abordagem de grande significância para o presente estudo seria a análise econômica do sistema proposto. Tendo por base os conceitos estudados nas disciplinas de Engenharia econômica e Termodinâmica Aplicada, essa análise incorpora os custos de implementação, operação e desvalorização do projeto bem como os possíveis ganhos econômicos e ambientais advindos dessa solução utilizada para armazenamento de energia.

REFERÊNCIAS

ALVA, G.; LIN, Y. & FANG, G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, v. 144, p. 341–378, 2018.

ANSYS. *Rocky-Fluent Two-Way Coupling: Fluidized Bed*. Ansys Help, 2024.

ASHRAE. *ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment*. Atlanta, GA: ASHRAE, Inc., 2012.

PINNANGUDI, B; KUYKENDAL, M & BHADRA, S. Armazenamento de energia em rede inteligente. BW D'andrade (Ed.) , *A rede elétrica: inteligente, segura, verde, confiável* , Academic Press (2017) , pp. 93 – 135.

BARBOSA JUNIOR, S. C. Estudo do efeito da utilização de sucata de baixo teor de ferro na produção de aço em fornos elétricos a arco. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2019.

BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S.; INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BUENO, A.M.C. & TORRES, D.A.P. *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da agenda 2030 e bioeconomia: oportunidades e potencialidades para atuação da Embrapa*. Brasília: Embrapa, 2022.

BUENO, G; BURIN, E.L.K. COLETORES FRESNEL COMO ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE GÁS NATURAL NAS INDÚSTRIAS LOCALIZADAS NA CIDADE DE RECIFE–PE. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 13, n. 1, p. 47-53, 2022.

CABEZA, L.F., Thermal Energy Storage (vol. 3), Comprehensive Renewable Energy, Ali Sayigh (Editor-in-Chief), Elsevier, 2012. doi:10.1016/B978-0-08-087872-0.00307-3.

COSTA, S.P.L. Armazenamento de energia térmica através de materiais de mudança de fase. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2014.

DE OLIVEIRA, A.C. Comunidades de energia renovável como mecanismo de mitigação ambiental no setor industrial. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2022.

DINCER, I. & YAPICIOGLU, A., Solar Ponds (vol.4), Comprehensive Energy Systems, Ibrahim Dincer (Editor-in-Chief), Elsevier, 2018. doi:10.1016/B978-0-12-809597-3.00427-2

ELOUALI, A. ; KOUSKSOU, T.; EI RHAFIKI, T.; HAMD AOUI, S.; MAHDAOUI, M.; ALLOUHI, A., & ZERAOULI, Y. Physical models for packed bed: Sensible heat storage systems. *Journal of Energy Storage*, v. 23, p. 69-78, 2019.

ESSS. *Curso de modelagem computacional de meios porosos com ANSYS CFD*. ESSS Virtual, [s. d.].

FAN, C; ZHANG, C & GAO, W. Improving the ocean thermal energy conversion by solar pond. *Solar Energy*, v. 274, p. 112583, 2024.

FERBER, N. L.; AI NAIMI, K. M.; HOFFMANN, J. F.; AI-ALI, K. & CALVET, N. Development of an electric arc furnace steel Escória-based ceramic material for high temperature thermal energy storage applications. *Journal of energy storage*, v. 51, p. 104408, 2022.

HABES, M.; SALLOUM, S. A.; ALGHIZZAWI, M. & ALSHIBLY, M. S. The role of modern media technology in improving collaborative learning of students in Jordanian universities. *International Journal of Information Technology and Language Studies*, v. 2, p. 71–82, 2018.

ISMAIL, K. A. R. & STUGINSKY, R. Parametric study on possible fixed bed models for pcm and sensible heat storage. *Applied Thermal Engineering*, v. 19, n. 7, p. 757–788, 1999.

KHAN, M.I; ASFAND, F & AL-GHAMDI, S.G. Progress in research and technological advancements of thermal energy storage systems for concentrated solar power. *Journal of Energy Storage* , v. 55, p. 105860, 2022.

KHATOD, K.J. & DESHMUKH, S.S. An evaluation for the optimal sensible heat storage material for maximizing solar still productivity: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage* , v. 50, p. 104622, 2022.

LAI, Z.; ZHOU, H.; ZHOU, M.; Lv, L.; MENG, H. & CEN, K. Experimental study on storage performance of packed bed solar thermal energy storage system using sintered ore particles. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 238, p. 111654, 2022.

LI, G. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53, p. 897-923, 2016.

ORTEHGA-FERNANDEZ, I.; WANG, Y.; DURAN, M.; GARITAONANDIA, E.; UNAMINZAGA, L.; BIELSA, D. & PALOMO, E. Experimental validation of steel slag as thermal energy storage material in a 400 kWh prototype. In: *AIP conference proceedings*. AIP Publishing LLC, 2019. p. 200026.

ORTEGA-FERNÁNDEZ, I. & RODRÍGUEZ-ASEGUINOLAZA, J. Thermal energy storage for waste heat recovery in the steelworks: The case study of the REEscória project. *Applied Energy*, v. 237, p. 708-719, 2019.

OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES. 2024 key themes: global energy economy in 2024. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies, 2024.

PELAY, U.; LUO, L.; FAN, Y.; STITOU, D. & ROOD, M. Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, p. 82-100, 2017.

PEREIRA, F.J.G. As fontes renováveis na indústria como contributo de sucesso das políticas climáticas na The Navigator Company. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Instituto Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Setúbal, 2022.

RÊGO, M.M.P. *Análise energética de um sistema de armazenamento térmico por calor sensível integrado a um coletor solar híbrido*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

RODRÍGUEZ LÓPEZ, D. Metodologia integrada de diagnóstico: aspectos de análise de termoeconomia e confiabilidade aplicados a sistemas de armazenamento de energia por ar comprimido. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

RODRÍGUEZ, D; BARROS, M.B.A.; HENRÍQUEZ, J.R. & PERDOMO, M. Análise termodinâmica de sistemas CAES isocóricos considerando distinta porosidade no armazenamento de energia térmica e diversas fontes primárias de energia. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 2022, Teresina - PI. *Anais do CONEM 2022*. Teresina: ABCM, 2022.

RONG, Y; HUANG, S.Y & ZHOU, H. Experimental study on storage performance of packed bed solar thermal energy storage system using steel slag. *Journal of Energy Storage* , v. 78, p. 110042, 2024.

SASSINE, N.; Donzé, F. V.; Bruch, A. & Harthong, B. Rock-bed thermocline storage: a numerical analysis of granular bed behavior and interaction with storage tank. In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2017. p. 080023.

SINGH, H.; SAINI, R. P. & SAINI, J. S. A review on packed bed solar energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 3, p. 1059–1069, 2010.

SILVA, W. M. D. Caracterização térmica de rochas para utilização em armazenamento de energia térmica. 2020. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

VIEIRA, L.K & CIPRIANO, A.C.M. A proteção ao consumidor e o desenvolvimento sustentável: as orientações das Nações Unidas para a implementação de práticas de consumo sustentáveis. *Revista de Direito Ambiental*, v. 100, p. 583-610, 2020.

WANG, J & HUANG, Y. Exploration of steel Escória for thermal energy storage and enhancement by Na₂CO₃ modification. *Journal of Cleaner Production*, v. 395, p. 136289, 2023.

WANG, Y.Z.; WANG, Y.; LI, H.P.; ZHOU, J.H. & CEN, K.F. Thermal properties and friction behaviors of Escória as energy storage material in concentrate solar power plants. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 182, 21–29, 2018.

WANJUN, W; FUYUAN, W.; XIANGYU, L.; YONGQIANG, Z. & RUIHUA, X. Ocean Energy Comprehensive Utilization System of Water-electricity Cogeneration. *The Journal of Engineering* , v. 2017, n. 13, p. 1362-1366, 2017.