Gestão:

Reunião de Acompanhamento
e Avaliação - RAA 2026

Desenvolvimento e Simulação de um Sistema de Armazenamento Térmico Sensível em Leito Empacotado com Material Local

Rebouças, H. V. N. [1]; Lago, T. G. S. [2]; .[1]Bolsista do PRH 35/UFPB, curso de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa – PB. E-mail: hilary.reboucas@estudante.cear.ufpb.br
[2]Docente do curso de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa – PB. E-mail: taynara@cear.ufpb.br

Introdução

A crescente participação das fontes solar e eólica na matriz energética amplia a necessidade de tecnologias de armazenamento capazes de mitigar os descompassos temporais entre oferta e demanda e aproveitar excedentes de geração, reduzindo o curtailment. Esse excedente representa uma oportunidade para o desenvolvimento de estratégias de aproveitamento da energia que, de outra forma, não seria utilizada.

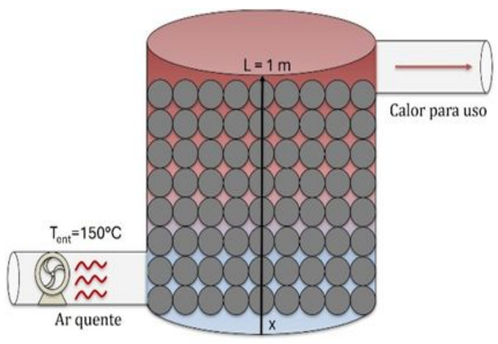
Nesse contexto, o conceito de Power-to-Heat (P2H) possibilita converter o excedente de energia elétrica em energia térmica, por exemplo, por meio de resistências elétricas, permitindo seu armazenamento e posterior utilização. O armazenamento de energia térmica (Thermal Energy Storage – TES) por calor sensível em leitos empacotados destaca-se pela simplicidade construtiva, robustez operacional e possibilidade de utilização de materiais de baixo custo.

A brita paraibana apresenta potencial como meio de armazenamento térmico para aplicações de média temperatura, associando disponibilidade local de recursos ao desenvolvimento de soluções para integração de fontes renováveis.

Metodologia

A metodologia consiste no desenvolvimento de um modelo numérico unidimensional e transiente para representar os processos de carga e descarga de um sistema de armazenamento térmico sensível em leito empacotado. O sistema é constituído por um leito cilíndrico preenchido com brita paraibana, utilizando ar como fluido de transferência de calor.

Figura 1 - Diagrama de um sistema de armazenamento térmico de leito empacotado.



O modelo considera o comportamento térmico das fases sólida e fluida por meio de equações de energia acopladas, incluindo a transferência de calor por convecção entre as fases, a condução axial no sólido e as perdas térmicas para o ambiente.

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \left[-u \cdot \left(\frac{\partial T_f}{\partial x}\right)\right] + \left[\left(\frac{h \cdot a_s}{\varepsilon \cdot \rho_f \cdot c_{p,f}}\right) \cdot (T_s - T_f)\right]$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \left[\alpha_{eff} \cdot \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}\right)\right] + \left[\left(\frac{h \cdot a_s}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_{p,s}}\right) \cdot (T_s - T_f)\right] - q_{parede}$$

A discretização das equações é realizada pelo Método das Diferenças Finitas em esquema explícito, com implementação em Python. As propriedades termofísicas da brita são obtidas da literatura, e as simulações são utilizadas para avaliar a distribuição de temperatura, a evolução da frente térmica, os tempos de carga e descarga e o desempenho energético do sistema.

Resultados e Discussão

A simulação permitiu analisar o comportamento térmico do leito empacotado durante os processos de carga e descarga, evidenciando a propagação da frente térmica ao longo do sistema. Os resultados indicam que parte significativa da energia fornecida durante o carregamento permanece armazenada no leito e pode ser posteriormente recuperada durante a descarga. Os principais indicadores de desempenho obtidos são apresentados na Tabela 1, enquanto os Figuras 2, 3 e 4 permitem visualizar a evolução das temperaturas e da frente térmica ao longo do processo.

Tabela 1 - Parâmetros de desempenho global do sistema simulado.

Parâmetro	Resultado
Energia armazenada	5,29 MJ
Energia recuperada	5,14 MJ
Eficiência do ciclo	37,18%
Coeficiente convectivo	11,81 W/m²·K
Tempo de carga	90,5 min
Tempo de descarga	109,6 min

Figura 2 - Carregamento e descarregamento.

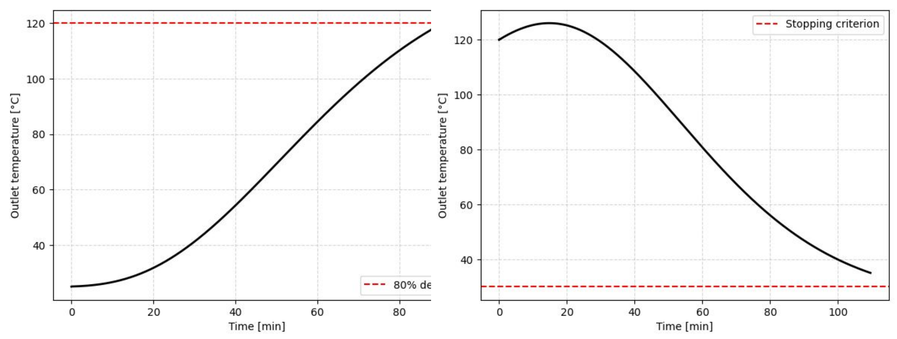


Figura 3 - Mapa térmico da área de armazenamento (carga e descarga).

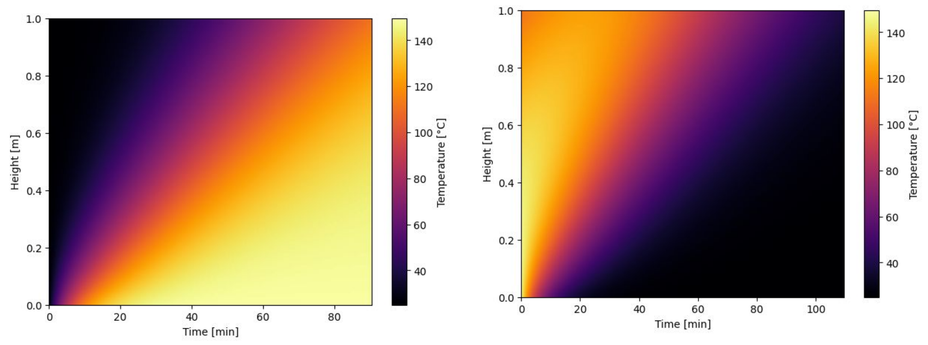
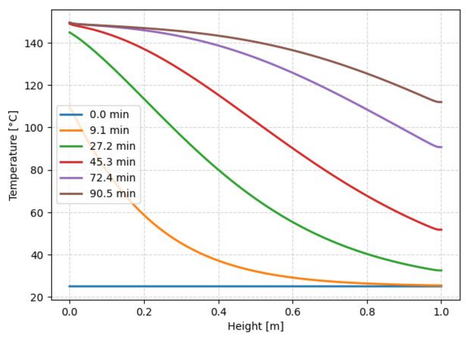


Figura 4 - Evolução da frente térmica no leito empacotado.



Conclusão

O modelo numérico desenvolvido permitiu representar o comportamento térmico de um sistema de armazenamento em leito empacotado, possibilitando a análise dos processos de carga e descarga e da evolução da frente térmica. A utilização da brita paraibana como material armazenador apresenta potencial para sistemas de armazenamento térmico sensível, contribuindo para o aproveitamento de materiais locais. Além disso, a implementação do modelo em Python, por ser uma linguagem de código aberto e de ampla aplicação científica, favorece a reprodutibilidade, flexibilidade e realização de análises paramétricas com baixo custo computacional. Dessa forma, a abordagem proposta pode contribuir para estudos futuros de dimensionamento e otimização de sistemas de armazenamento térmico integrados ao aproveitamento de excedentes de energia renovável.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao LABSIMER, ao CEAR da UFPB e ao apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio de bolsa de graduação (2025/19524-7). Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do PRH-ANP 35/UFPB – Transição Energética (Processo no 2025/03815-2), contribuindo para a formação de recursos humanos qualificados para o setor energético no contexto da transição energética e da transformação ecológica.