Encontro Nacional do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP – 2026

Avaliação da Transferência de Calor em MBHE Diluído via CFD usando Solução Analítica como Referência

PRH 11.1/ANP

Tipo de bolsa: Graduação

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Gestão:

Contextualização no Setor de Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Eficiência Energética e Descarbonização:

- **Processamento de Xisto Betuminoso:** Pré-aquecimento de finos de xisto com calor do material retortado (elimina gargalos operacionais);
- **Biorrefinarias e Biocombustíveis:** Secagem de biomassa e resfriamento seguro do biochar gerado na pirólise.



Figura 1 – *Fragmento de amostra de xisto betuminoso exibindo sua estrutura laminada, folhada e escura característica, rica em matéria orgânica (querogênio).*

Fonte: *Mundo Ecologia (2020).*

Vantagens Operacionais dos Leitos Móveis:

- **Escoamento Gravitacional:** Operação contínua por gravidade sem consumo de energia para fluidização;
- **Operação Limpa e Indireta:** Sem risco de contaminação cruzada, sem arraste de sólidos e sem dispersão de poeira.

COMO funciona o xisto betuminoso: qual sua composição? **Mundo Ecologia**, *2020. Disponível em: https://www.mundoecologia.com.br/natureza/como-funciona-o-xisto-betuminoso-qual-sua-composicao/. Acesso em: 6 out. 2026.*

Modelagem Matemática (Balanço de Energia)

$$-\frac{d\theta_f}{d\tau} = \alpha\theta_f - \alpha_p\theta_p - \alpha_f$$

$$-\frac{d\theta_p}{d\tau} = Bi_p\theta_p - Bi_p\theta_f$$

condições de contorno para $\tau = 0$:

$$\theta_f(0) = F;\ \theta_p(0) = P$$

Fonte: *Adaptado de BERTOLI et al. (2024).*

Solução Analítica (Nosso Benchmark)

$$\theta_f(\tau) = \sum_{j=1}^{2} N_j^2(1 + F\gamma R_j + P\beta\gamma S_j)R_j e^{-\lambda_j\tau}$$

$$\theta_p(\tau) = \sum_{j=1}^{2} N_j^2(1 + F\gamma R_j + P\beta\gamma S_j)S_j e^{-\lambda_j\tau}$$

os autovalores λ_1, λ_2 são as raízes da equação característica quadrática

$$\widetilde{\mathscr{P}}_2(\tilde{\lambda}) \equiv \tilde{\lambda}^2 + \tilde{b}_1\tilde{\lambda} + \tilde{b}_0 = 0$$

Fonte: *Adaptado de BERTOLI et al. (2024).*

Problematização e Objetivo do Estudo

- ➔ **Limitação matemática** diante de sistemas complexos de EDOs e condições reais;
- ➔ **Avaliar modelos de CFD** na predição do comportamento térmico do leito;
- ➔ **Simular cenários industriais** avançados com total segurança e acurácia.

BERTOLI, S. L. et al. Limit solutions for a lumped parameter model of heat transfer in a diluted and indirectly heated co-current/counter-current moving bed heat exchanger with heat loss to surroundings. **Applied Thermal Engineering**, *v. 236, art. 121348, 2024.*

Abordagens em CFD Desenvolvidas

Modelo Euler-Euler (Euleriano):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k C_{p,k} T_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{u_k} \mathbf{C_{p,k}} \mathbf{T_k}) = \nabla \cdot (\alpha_k k_k \nabla T_k) \pm h_{fp} a_{fp} (T_p - T_f)$$

- ➔ Fluido e sólido são tratados como meios contínuos interpenetrantes;
- ➔ Método do meio poroso/teoria cinética de granulares – **KTGF**;
- ➔ Correlação usada para viscosidade do pseudo-sólido – **Tchen**;
- ➔ Troca térmica ocorre por taxa volumétrica entre o fluido e o leito contínuo de sólidos.

Modelo Euler-DEM (Euleriano-Lagrangiano):

$$m_i C_{p,p} \frac{dT_i}{dt} = q_{conv,i} + \sum_j q_{cond,ij} + q_{rad}$$

- ➔ O fluido é contínuo, enquanto cada partícula é rastreada individualmente pelas **Leis de Movimento de Newton**;
- ➔ Convecção: Correlação de **Kato (1983)**;
- ➔ Interação: Contato partícula-partícula e partícula-parede (**Hertz-Mindlin**).

Explicando a Metodologia Numérica Empregada em CFD

Setup Numérico:

- ➔ *Simcenter STAR-CCM+;*
- ➔ Trocador com geometria cilíndrica;
- ➔ Modelo multifásico 2D axissimétrico;
- ➔ Parede isotérmica a 200 °C;
- ➔ Ambas fases entram a 32 °C;
- ➔ Velocidades iniciais distintas das fases: $v_f = 5,73\ m/s,\ \ v_p = 2,76\ m/s$

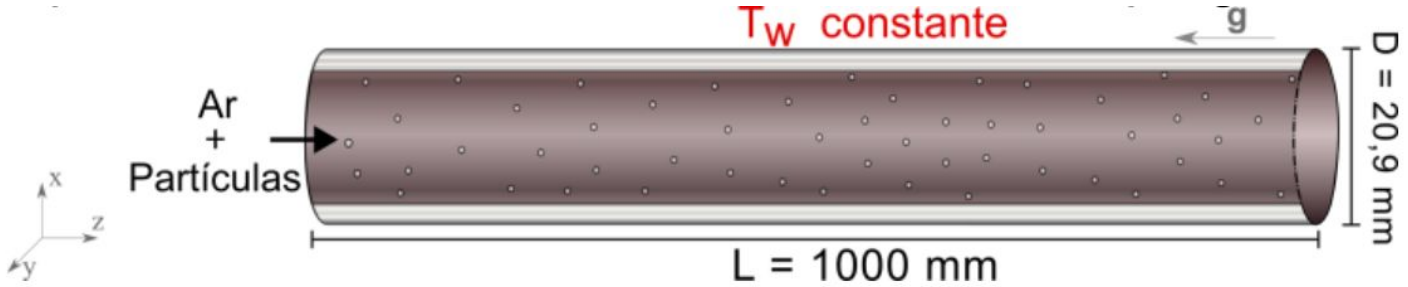


Figura 2 – *Esquema do leito de arraste e dimensões empregadas na simulação*

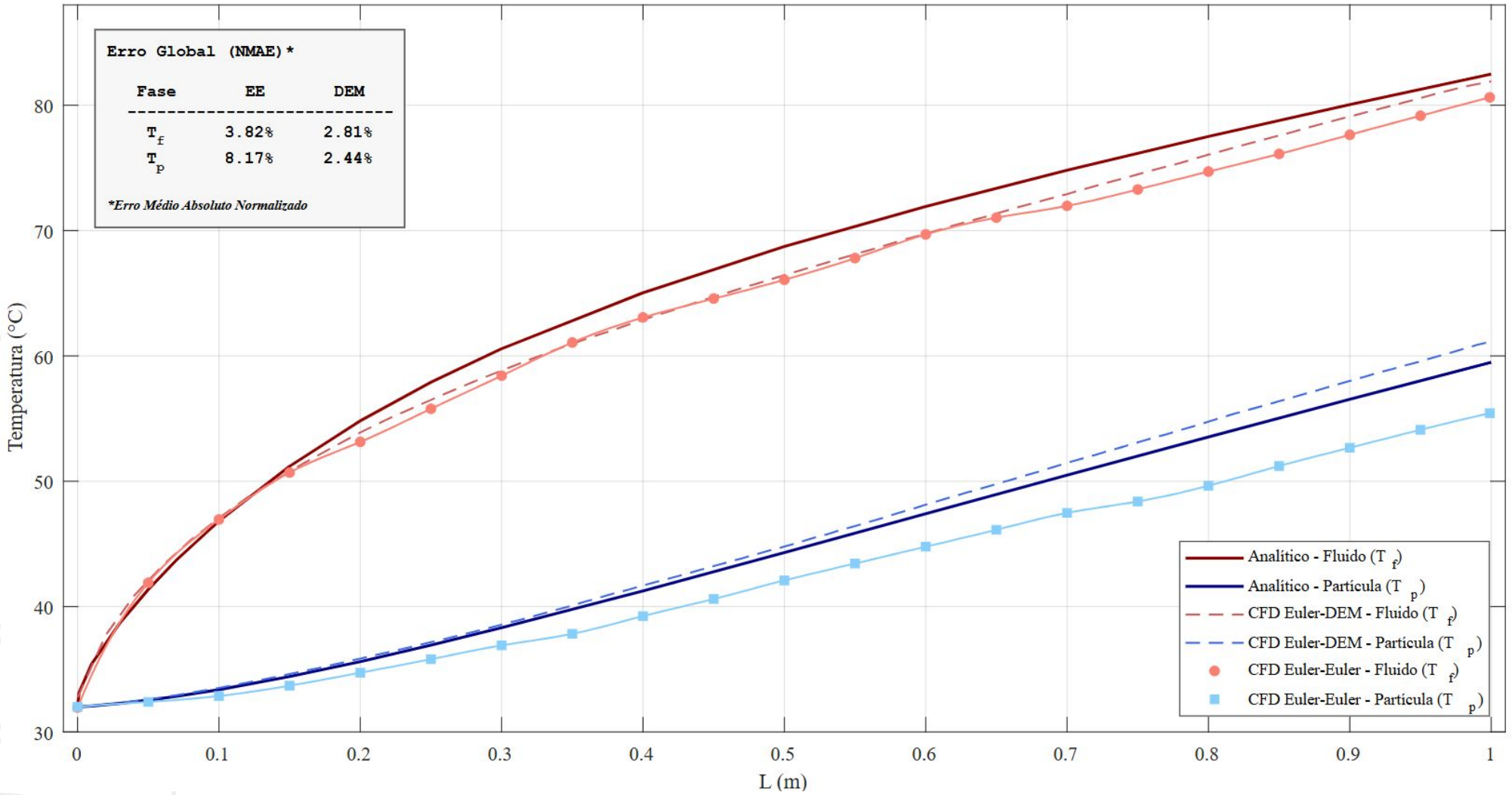
Fonte: *Silveira et al. (2026).*

Sistema Avaliado:

- ➔ **Escoamento diluído** de ar e partículas de xisto (com porosidade inicial do leito **ε = 0,9971**);
- ➔ Hipóteses simplificadoras estabelecidas por *Bertoli et al. (2024)* para o modelo analítico.

SILVEIRA, Matheus Fagundes da; MEIRELLES, Mateus Yunes de; APOLINAR-HERNÁNDEZ, Jesus Efraín; BERTOLI, Sávio Leandro; SOARES, Cíntia; PADOIN, Natan. Integração entre as abordagens CFD-DEM e analítica na transferência de calor em leito de arrasto diluído. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CBCFD)***, 5., 2026, Florianópolis. Anais... Florianópolis: UFSC, 2026. p. 1-4.*

Análise Gráfica Comparativa entre os Modelos a partir dos Resultados Obtidos



Fonte: *Dos autores (2026).*

Conclusões e Aplicação Industrial

➔ **Aderência do Perfil Térmico:** Ambas as abordagens numéricas (Euler-Euler e Euler-DEM) reproduzem com elevada fidelidade a solução analítica ao longo de todo o trocador.

Erro Pontual vs. Global:

➔ **O Euler-DEM é mais preciso na condição pontual de saída** (*L = 1,0 m*), fruto do rastreamento individualizado das partículas;

➔ **O Euler-Euler apresenta desvios globais (*NMAE*) baixíssimos em todo o domínio,** demonstrando excelente consistência fenomenológica ao longo de todo o perfil térmico.

➔ **Viabilidade Industrial:** O modelo Euler-Euler entrega precisão global equivalente com custo computacional significativamente menor, consolidando-se como a abordagem ideal para o dimensionamento e simulação em escala industrial.

Próximos Passos e Evolução da Pesquisa

Refinamento do Modelo

- ➔ Calibrar as correlações de arrasto e de troca térmica interfacial;
- ➔ Calibrar parâmetro de constante de dispersão turbulenta;
- ➔ Propriedades variáveis com a temperatura.

Expansão Física

- ➔ Testes de sensibilidade;
- ➔ Paredes não-isotérmicas;
- ➔ Radiação térmica;
- ➔ Cinética de pirólise.





labMAC

Laboratório de Materiais e Computação Científica
Laboratory of Materials and Scientific Computing





UFSC

Gestão:





prh anp 11/UFSC

Leonardo de Souza Santos

Graduação em Engenharia Química