Gestão:

Reunião de Acompanhamento e Avaliação - RAA 2026

SOLUÇÕES ANALÍTICAS E SEMI-ANALÍTICAS NA ANÁLISE NUMÉRICA DE SISTEMAS TERMOFLUIDODINÂMICOS

Apolinar-Hernández, J. E.[1]; Bertoli, L. S. [2]; Soares, C. [2]; Padoin, N. [2];

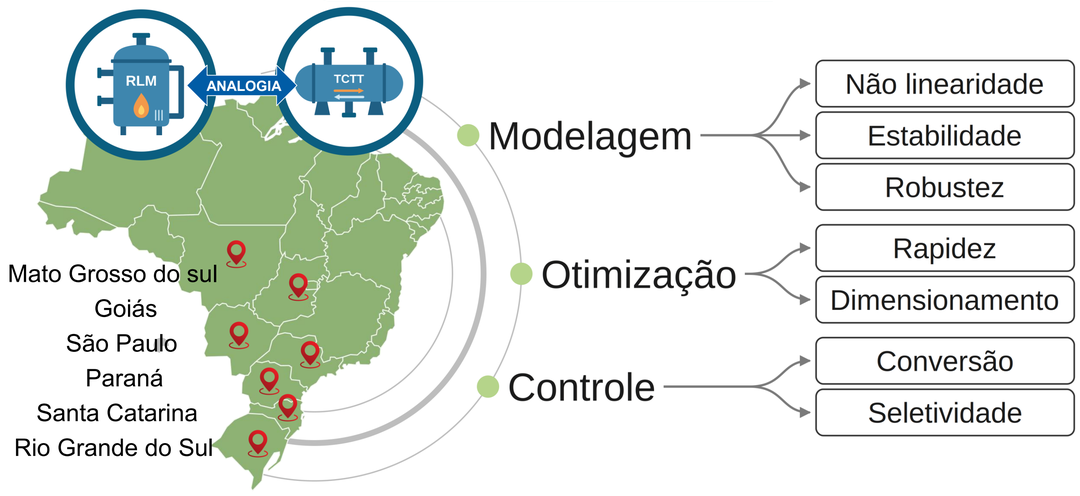
[1]Bolsista DSc do PRH 11.1/UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Químcia, Florianópolis – SC.

[2]Docente do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC.

E-mail: jesus.hernandez@posgrad.ufsc.br | natan.padoin@ufsc.br

prh anp 11/UFSC

MOTIVAÇÃO



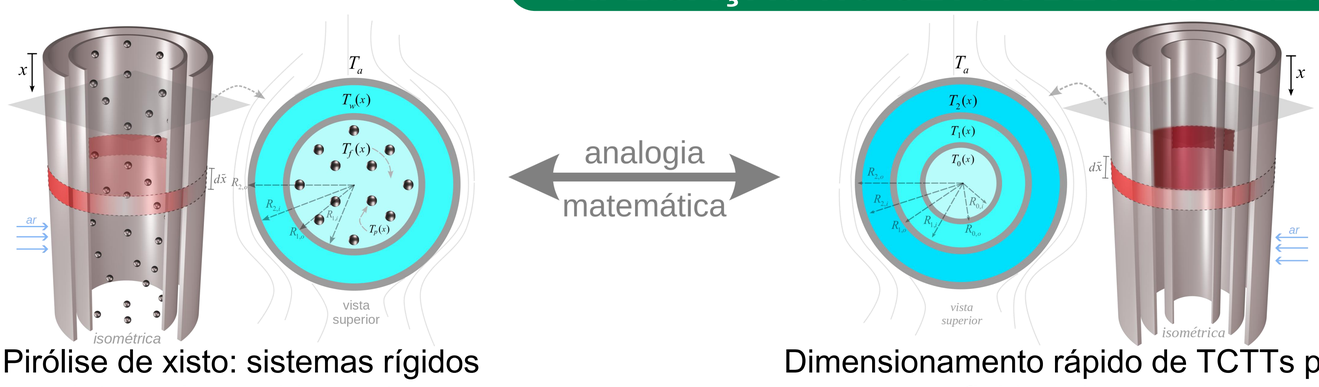
OBJETIVOS

Desenvolver soluções analíticas e semi-analíticas compactas, estáveis e robustas para a transferência de calor em Reatores de Leito Móvel (RLMs) e Trocadores de Calor de Tubo Triplo (TCTTs) com superfície externa não adiabática.

Objetivos específicos

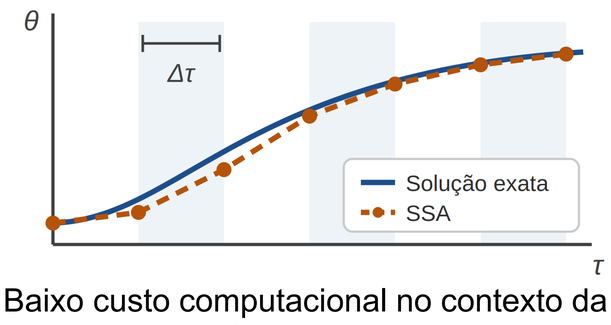
- Estabelecer uma metodologia para a verificação e a análise numérica das soluções desenvolvidas;
- Delimitar o domínio de validade dos modelos estudados;
- Identificar e corrigir inconsistências em soluções analíticas para TCTTs disponíveis na literatura;
- Interpretar fisicamente os parâmetros adimensionais dos modelos por meio de análise de escalas.

APLICAÇÃO NO SETOR DE PETRÓLEO E ENERGIA



Pirólise de xisto: sistemas rígidos integrados rapidamente

Dimensionamento rápido de TCTTs para fluidos viscosos



Baixo custo computacional no contexto da transformação digital

RESULTADOS

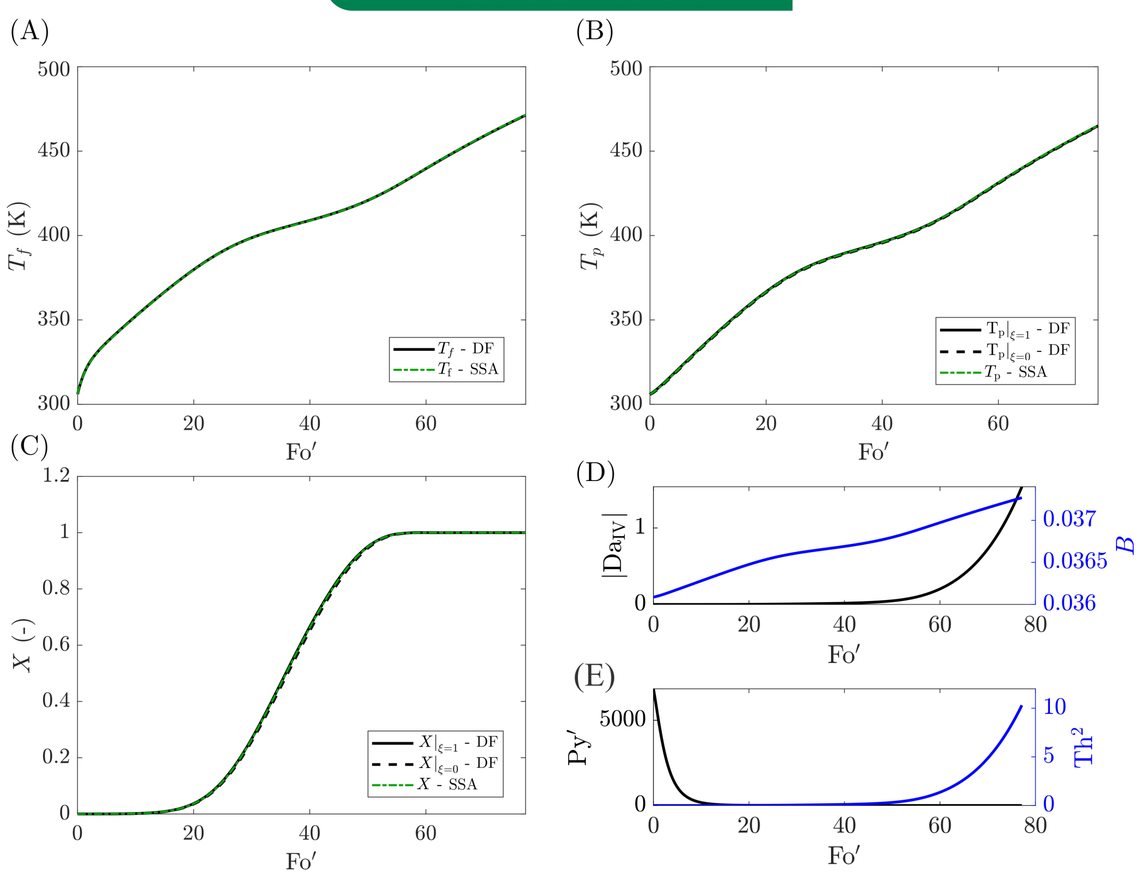


Figura 1. Comparação entre DF e SSA: (A) temperatura do fluido; (B–C) temperatura das partículas e conversão; (D-E) $|Da_{IV}|$, B, Py' e Th^2 em função de Fo'.

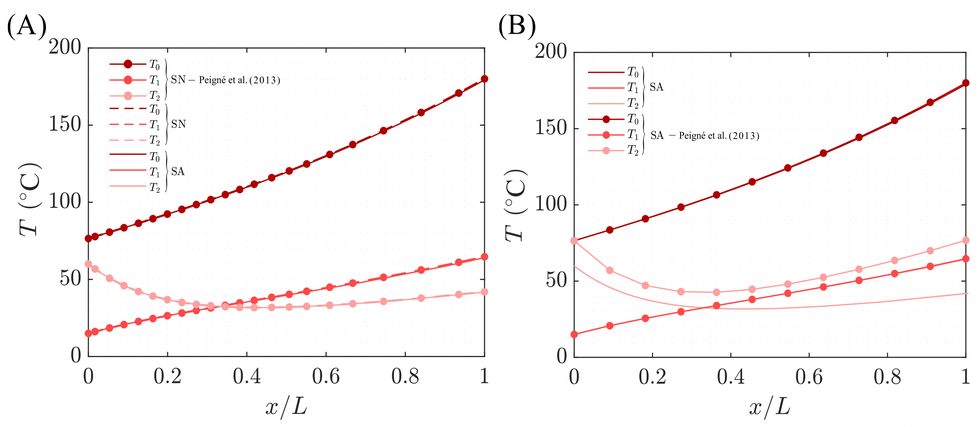


Figura 2. Perfis de temperatura ao longo do TCTT do estudo de caso 1: (A) SN de Peigné et al. (2013) e SN do presente trabalho; (B) SA de Peigné et al. (2013) e SA do presente trabalho.

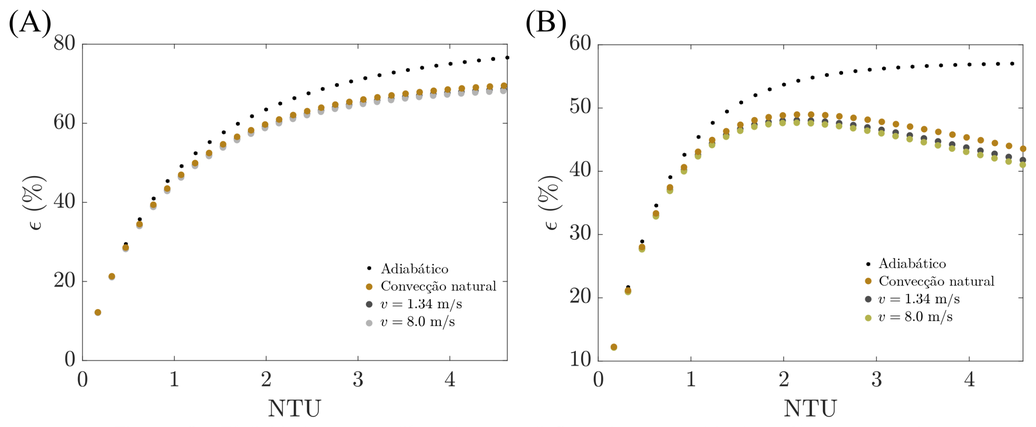


Figura 3. Efetividade para diferentes condições do ar ambiente: (A) escoamento em contracorrente; (B) escoamento hipotético em corrente paralela (estudo de caso 1).

RLM Solução semianalítica (SSA)

$$\theta_{f,k} = \theta_{f,k-1} + \sum_{l=1}^{3} b'_{l,k-1}\left(e^{r_{l,k-1}\Delta\tau} - 1\right)$$

$\theta_{f,k}$	Temperatura adimensional do fluido
$r_{l,k-1}$	Raízes locais (< 0)
$b'_{l,k-1}$	Coeficientes
$\Delta\tau$	Passo de tempo

$\hat{\theta}_n$	Temperatura adimensional da corrente *n*
$\hat{\lambda}_j$	Raízes características
G_{nj}	Acoplamento das correntes
Y_j	Condições de contorno

TCTT Solução analítica (SA)

$$\hat{\theta}_n(\hat{\tau}) = \sum_{j=0}^{2} G_{nj}\, Y_j\, e^{-\hat{\lambda}_j \hat{\tau}}, \qquad n = 0, 1, 2$$

CONCLUSÕES

- A SSA para RLMs é incondicionalmente estável e convergente, com desvio máximo de 0,01 % em relação ao Runge-Kutta.
- Integra sistemas com razões espectrais de até 10^{305}; para 10^{33}, é cerca de 120 vezes mais rápida que o ODE15s.
- A solução analítica compacta do TCTT prevê as temperaturas das três correntes e fornece expressões para efetividade e pontos característicos.
- O baixo custo computacional pode viabilizar o uso em rotinas de otimização e controle.

REFERÊNCIAS

BERTOLI, S. L., et al. A fast and accurate semi-analytical solution for lumped models of co-current moving bed reactors. Chemical Engineering Science v. 320, 2026.

BERTOLI, S. L., et al. An analytical solution for triple-tube heat exchanger with non-adiabatic outer wall based on analogy with moving bed heat exchanger. International Communications in Heat and Mass Transfer v.172 110-358, 2026.

PEIGNÉ, P., et al. Ventilation heat recovery from wood-burning domestic flues. A Theoretical Analysis Based on a Triple Concentric Tube Heat Exchanger. Energies, v. 6, n. 1, p. 351-373, 2013.

AGRADECIMENTOS