

# Aplicação de uma Metodologia Numérica para o Processamento e Avaliação da Circulação Natural em Reatores Nucleares

Laira L. Silva,<sup>1</sup> Leandro T. da Silva<sup>2</sup>

CEFET - Petrópolis, RJ

José L. H. Faccini<sup>3</sup>

IEN/CNEN - Rio de Janeiro, RJ

Este trabalho visa a contribuição na linha de pesquisa da termo-hidráulica computacional e experimental de fenômenos de transporte em reatores nucleares. Especificamente, focamos na análise da transferência de calor por convecção natural em circuitos de circulação natural e em reatores de pesquisa do tipo piscina. Para isso, utilizamos técnicas numéricas para simular circuitos de circulação natural em reatores de pesquisa tipo piscina, visando entender o comportamento do sistema.

No âmbito deste trabalho, concentramo-nos na simulação do circuito de circulação natural em reatores do tipo piscina, utilizando o método lagrangiano conhecido como *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH). A escolha desse método se baseia, em parte, em sua independência da malha subjacente para a discretização das equações do fluido [4]. Além disso, há um interesse crescente na aplicação da circulação natural em reatores nucleares, devido à sua capacidade de dispensar dispositivos ativos para movimentar o fluido. Essa característica torna o fenômeno da circulação natural particularmente interessante do ponto de vista da segurança intrínseca na refrigeração do núcleo de um reator nuclear, especialmente quando se considera que a vazão do fluido refrigerante aumenta proporcionalmente à potência fornecida pelo núcleo [3].

O método Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) tem sido amplamente aplicado com sucesso na engenharia, abrangendo desde simulações de fluidos até estudos de explosões e fenômenos de transporte, além de encontrar aplicação na computação gráfica [2] [2]. Sua crescente popularidade na literatura é atribuída ao seu grande potencial como ferramenta para prever o comportamento dinâmico de escoamentos de fluidos complexos, presentes nos projetos de reatores nucleares.

Para a realização da simulação computacional, foi utilizada a linguagem de programação C++ com o Algoritmo Tradicional do SPH. O modelo matemático utilizado nas simulações emprega as equações da continuidade, conservação da quantidade de movimento e energia na forma lagrangiana [1, 5]:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho C_p} \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \quad (3)$$

<sup>1</sup>laira.silva@aluno.cefet-rj.br

<sup>2</sup>leandro.silva@cefet-rj.br

<sup>3</sup>jlfaccini@yahoo.com.br

onde  $\frac{dT}{dt}$  é a derivada em relação ao tempo,  $\rho$  é a densidade,  $\mathbf{v}$  é o vetor de velocidade do fluido,  $p$  é a pressão,  $\nu$  é o coeficiente de viscosidade cinemática,  $T$  é a temperatura,  $Cp$  é o calor específico a pressão constante e o  $\kappa$  é a condutividade térmica. Além disso, usando a aproximação de Boussinesq, temos que a força  $\mathbf{F}$  na equação (2) pode ser escrita como sendo:

$$\mathbf{F} = -\beta(T - Tr)\mathbf{g} \quad (4)$$

sendo  $\mathbf{g}$  a aceleração gravitacional,  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica, e  $Tr$  é uma temperatura de referência. Estas equações são discretizadas pelo método SPH e apresentam a representação a seguir [1, 5].

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_{b=1}^n m_b \mathbf{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (5)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = -\sum_{b=1}^n m_b \left( \frac{p_a + p_b}{\rho_a \rho_b} \right) \nabla_a W_{ab} + 2\nu \sum_{b=1}^n m_b \frac{\mathbf{v}_{ab} \mathbf{x}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{\hat{\rho}_{ab} |\mathbf{x}_{ab}|^2 + \epsilon^2} + \mathbf{F} \quad (6)$$

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{2k}{\rho_a Cp} \sum_{b=1}^n \frac{m_b T_{ab} \mathbf{x}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{\rho_b |\mathbf{x}_{ab}|^2 + \epsilon^2} \quad (7)$$

Passada a fase de implementação e validação da simulação, a próxima etapa consiste em realizar a análise dos dados obtidos. Além disso, em trabalhos futuros, poderemos realizar comparações entre os dados obtidos por nossa simulação, os dados experimentais provenientes do LTE/IEN e aqueles já disponíveis na literatura, com a intenção de encontrar concordância entre eles.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Termo-hidráulica Experimental (LTE) do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

## Referências

- [1] F. Aragon, J. E. V. Guzmán, C. E. Alvarado-Rodríguez, L. Di G. Sigalotti, I. Carvajal-Mariscal, J. Klapp e A. R. Uribe-Ramírez. “Smoothed particle hydrodynamics modeling of natural convection around a heated horizontal cylinder: A comparison with experiments”. Em: **Journal of Heat Transfer** 143.4 (2021), p. 042601.
- [2] R. J. P. Borseti, L. T. da Silva e G. A. Giraldo. “Fluid flow summarization using dynamic multi-vector feature spaces”. Em: **XXXVIII Iberian-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering** (2017). DOI: 10.20906/CPS/CILAMCE2017-0353.
- [3] L. S. Frenzel. “Experimentos no circuito de circulação natural e simulação numérica com o código RELAP5/MOD3. 3”. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, 2023.
- [4] R. A. Gingold e J. J. Monaghan. “Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars”. Em: **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society** 181.3 (1977), pp. 375–389.
- [5] J. J. Monaghan. “Smoothed particle hydrodynamics”. Em: **Annual Review of Astronomy and Astrophysics** 30.1 (1992), pp. 543–574.