Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 12, n. 1, 2026.

Trabalho apresentado no XLIV CNMAC, Fundação Getulio Vargas - Rio de Janeiro - RJ, 2025.

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Modelagem Computacional da Difusão de Nêutrons em Meios Não Multiplicativos para Cálculos de Blindagem

Gustavo S. Sardinha[1] Ricardo C. Barros[2]
IME/UERJ, Rio de Janeiro, RJ

A COP 22 (The twenty-second session of the Conference of the Parties) ocorreu em Marrakech, Marrocos, em 2016 e teve como principal objetivo avançar na implementação do Acordo de Paris, firmado na COP 21. Essa conferência representou um marco na agenda climática global, focando na operacionalização dos compromissos assumidos pelos países para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Um dos temas centrais da COP 22 foi a transição para fontes de energia limpa e sustentável, fundamentais para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e limitar o aquecimento global [4].

Diante deste exposto, é inegável a relevância do emprego da energia nuclear, uma vez que esta configura-se como uma fonte energética sustentável, caracterizada por baixas emissões de gases que contribuem para a elevação da temperatura da Terra e por altos índices de segurança operacional [3]. Em virtude dessas características favoráveis, ao longo dos anos têm sido desenvolvidos modelos matemáticos e computacionais para projetar e analisar o funcionamento dos reatores nucleares, contribuindo para o aprimoramento dos sistemas de geração de energia elétrica e para a segurança operacional das instalações. Em particular, destaca-se o modelo de difusão de partículas neutras [1], cuja equação aparece como

$$-\frac{d}{dx}\left(D(x)\frac{d\phi(x)}{dx}\right) + \Sigma_a(x)\phi(x) = Q(x), \tag{1}$$

onde:

- $\phi(x)$ representa o fluxo de partículas neutras (como nêutrons ou fótons monoenergéticos);
- $D(x)$ é o coeficiente de difusão que descreve a propagação das partículas no meio;
- $\Sigma_a(x)$ é a seção de choque macroscópica de absorção;
- $Q(x)$ é a fonte interior de partículas neutras;
- x é a posição espacial no domínio.

Neste trabalho a equação da difusão é considerada na formulação monoenergética unidimensional e estacionária. Aplica-se o método convencional de Diferenças Finitas [5] à equação (1), resultando em uma modelagem computacional que integra três tipos distintos de células de discretização espacial. Em consequência, são formuladas as equações de diferença para interfaces interiores, para a primeira e para a última células de contorno na grade de discretização. A partir disso, obtém-se um sistema de equações discretizado que permite determinar uma solução numérica para o fluxo de partículas neutras em cada ponto da malha de discretização. Ademais, a solução

[1]gustavosardinha643@gmail.com
[2]dickbarros.apple@gmail.com

do sistema é realizada de forma otimizada, uma vez que a matriz de coeficientes do sistema de equações algébricas e lineares é simétrica e tridiagonal. Essa característica permite a aplicação do método de eliminação de Gauss simplificado (algoritmo de Thomas) [2], o que reduz a complexidade computacional. Adicionalmente, foram oferecidas cinco possibilidades de condições de contorno [1] na solução do sistema. Estas são: Reflexiva; Fluxo escalar nulo; Fluxo direcional incidente; Corrente parcial incidente; Fluxo angular S_2 incidente.

Com base na modelagem proposta, desenvolveu-se um algoritmo computacional integrado a um software com interface voltada ao usuário, que gera saídas em gráficos e tabelas e exibe avisos de erro para garantir a inserção correta dos dados. Assim, está em desenvolvimento uma aplicação mobile em React Native, escolhida pela flexibilidade multiplataforma. Para ilustrar a eficiência do método, considere o problema-teste de difusão de nêutrons em meio não-multiplicativo unidimensional, estacionário e monoenergético num domínio de 5 cm. Neste domínio foi utilizada uma grade de discretização espacial composta de 1000 células ($\Delta x = 0{,}005\,\text{cm}$), com $D = 0{,}5\,\text{cm}$, $\Sigma_a = 0{,}5\,\text{cm}^{-1}$, $Q = 1$ e condições de contorno de fluxo escalar nulo em $x = 0$ e $x = 5\,\text{cm}$. O resultado com precisão satisfatória é:

$$
\begin{aligned}
\text{Resultado Numérico: } & \phi(0) = 9{,}86614 \times 10^{-21}, \quad \phi(1) = 1{,}23278 \times 10^{0}, \\
& \phi(2{,}5) = 1{,}67386 \times 10^{0}, \quad \phi(4) = 1{,}23278 \times 10^{0}, \quad \phi(5) = 9{,}86614 \times 10^{-21}. \\
\text{Resultado Analítico: } & \phi(0) = 0, \quad \phi(1) = 1{,}23278 \times 10^{0}, \\
& \phi(2{,}5) = 1{,}67386 \times 10^{0}, \quad \phi(4) = 1{,}23278 \times 10^{0}, \quad \phi(5) = 0.
\end{aligned}
$$

Em continuidade deste trabalho, propõe-se a introdução de um parâmetro nas equações de diferença para cada região do domínio, de tal forma a preservar cada solução geral analítica local, produzindo um método numérico completamente livre de erros de truncamento espacial. Em trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de uma versão web da aplicação, utilizando a tecnologia React, a fim de viabilizar a execução em outras plataformas e a construção de um método numérico para problemas em meios multiplicativos para cálculos globais de reatores nucleares.

Agradecimentos

Expressamos nossos agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Reatores Nucleares Modulares e Inovadores.

Referências

[1] J. J. Duderstadt e L. J. Hamilton. **Nuclear Reactor Analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1976. ISBN: 978-0471223634.

[2] G. H. Golub e C. F. Van Loan. **Matrix Computations**. Baltimore: JHU Press, 2013. ISBN: 978-1421407944.

[3] J. R. Lovering e H. E. Herfindal. "The Role of Nuclear Energy in a Clean Energy Future". Em: **Energy Policy** 138 (2020), p. 111258. DOI: `10.1016/j.enpol.2019.111258`.

[4] United Nations. **Global Climate Action**. Online. Acessado em 11/03/2025, `https://unfccc.int/climate-action`.

[5] G. D. Smith. **Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods**. Oxford: Oxford University Press, 1985. ISBN: 978-0198596509.

