



CONVERTIBILIDADE DO PEQUENO REATOR MODULAR NUSCALE PARA O USO DE TÓRIO

Diego Manoel E. Gonçalves¹, Marcelo V. da Silva¹, Caio Július C. M. R. da Cunha², Lucile Daniel Moreira¹, Anderson P. Resende e Giovanni L. de Stefani¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro (Av. Horácio Macedo 2030, Bloco G sala 206. Rio de Janeiro, RJ, Brazil)

²Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE/CNEN) (Av. Prof. Luís Freire, nº200 – Curado, Recife – PE, 50740-437, Brazil)

diegomanoelgoncalves@gmail.com
mvilela@coppe.ufrj.br
cjcmrcunha@gmail.com
lucile.ifrj@yahoo.com.br
andersonresende@poli.ufrj.br
giovanni.laranja@coppe.ufrj.br

keywords: Reactor Core; Fuel Cycle; NuScale, SMR
Area: Nuclear Engineering
Sub-area: Nuclear fuel cycles; Neutronic analysis of nuclear

RESUMO

Este artigo explora um o conceito de elemento combustível, proposto por Radkwosky, que apresenta uma composição heterogênea com duas regiões distintas: uma região fértil no exterior e uma região físsil no interior. O conceito foi analisado comparando dados do núcleo tradicional modelado com o código SERPENT. Os resultados de uma otimização por Enxame de Partículas de um elemento combustível obtidos foram utilizados para projetar um núcleo completo, com o objetivo de avaliar o desempenho, segurança e compará-lo com o núcleo original do Pequeno Reator Modular (PRM) da NuScale, atualmente em fase final de licenciamento. A análise da queima de combustíveis é fundamental para garantir um equilíbrio na queima dentro do núcleo, ajustar o coeficiente de reatividade, e gerenciar a queima de boro e outros venenos queimáveis, elementos cruciais para a segurança nuclear e a redução de resíduos de combustível. Espera-se demonstrar que é possível integrar esse novo conceito ao núcleo do PRM sem comprometer significativamente a segurança do reator. O estudo inclui diversas simulações computacionais, neutrônicas e termo hidráulicas, fundamentais para validar a viabilidade técnica deste novo conceito de combustível, oferecendo uma opção mais flexível e segura para a produção de energia nuclear em grande escala.

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções energéticas sustentáveis e eficientes têm impulsionado a busca global na mitigação dos impactos ambientais causados pelos métodos tradicionais de geração de energia. No entanto, a expansão da energia nuclear enfrenta desafios significativos, incluindo questões econômicas, proliferação, segurança e gestão de resíduos. Nesse contexto, os pequenos reatores modulares (SMRs - Small Modular Reactors) surgem como uma alternativa promissora (Rosner & S, 2011) a esses desafios. Esses reatores compactos, projetados para gerar entre 50MW até 300 MW de energia térmica, são construídos em série e oferecem diversas vantagens em relação aos reatores convencionais, como construção modular, escalabilidade, ciclos de combustível estendidos, sistemas de segurança passiva e custos reduzidos (Black, et al., 2021).



O presente trabalho objetiva a conversão de um SMR da NuScale para o uso de combustível à base de tório (U, Th)O₂. Devido às suas características operacionais e de projeto, essa conversão promete reduzir o risco de proliferação de armas nucleares e proporcionar melhor gerenciamento de resíduos e diminuir os custos totais de construção e armazenamento, em comparação a um reator utilizando UO₂ em ciclo aberto. O conceito Seed-Blanket (SBU), proposto por (Radkowsky, 1985) (Stefani, et al., 2023) (Silva, et al., 2024) e (Gonçalves, et al., 2024) são uma solução eficaz para otimizar o ciclo do combustível nuclear em reatores LWRs. Ao dividir o núcleo em duas regiões — uma contendo elementos físséis (seed) de UO₂ e outra com elementos férteis com uma mistura de (U, Th)O₂ (blanket) — é possível modificar o espectro de nêutrons de forma a maximizar a produção de U-233 na região fértil e minimizar a produção de Pu-239 na região físsil.

2 METODOLOGIA.

O procedimento a fim de converter o pequeno reator modular NuScale para o uso de uma mistura de óxidos de urânio e tório (U-Th), visando a maior produção de U-233 e a maior utilização de recursos. Para alcançar esse objetivo principal, foram realizados os seguintes objetivos secundários: modelar um reator de referência NuScale para garantir a confiabilidade do modelo; realizar um estudo otimização por enxame de partículas (PSO) de um único elemento combustível para definir o melhor volume de seed e blanket, de modo a maximizar a conversão e garantir a reação autossustentada; e utilizar os parâmetros dimensionais obtidos nesse estudo, para definir um núcleo completo e comparar os resultados com um núcleo padrão.

Na primeira fase do estudo, foi necessário reconstruir o núcleo de referência do SMR-NuScale no programa SERPENT, que utiliza o Método de Monte Carlo (MMC) para resolver a equação de transporte. Para garantir a precisão dos resultados, o supercomputador Lobo Carneiro, do NACAD/UFRJ, foi utilizado devido à alta capacidade de processamento requerida. Foram empregados os mesmos parâmetros de projeto descritos por (Valtavirta, 2023), incluindo uma população de 100.000 nêutrons, com 1000 ciclos ativos e 100 ciclos inativos.

Paralelamente, um algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO), conforme (Kennedy, 1995) (AlRashidi, 2009) (Tong, et al., 2023) (Xu, 2021), foi implementado em Python para operar de forma sequencial. O PSO otimiza uma função de fitness ajustando iterativamente as posições e velocidades das partículas com base nas melhores soluções individuais e coletivas, com funcionalidades para inicialização das partículas e avaliação sequencial da função de fitness. Como etapa seguinte, a configuração do elemento combustível foi obtida por PSO (Silva, et al., 2024) e também de forma paramétrica (Gonçalves, et al., 2024), variando apenas a razão do volume do moderador sobre o combustível, mantendo a configuração de 13x13 para a região seed e 19x19 para a região blanket.

Os resultados das gerações são registrados em um arquivo, e recuperado o estado do processo de otimização, o que facilita a reinicialização ou o monitoramento do progresso. Essa abordagem sequencial foi escolhida para automatizar o algoritmo, permitindo a redução da carga de trabalho, o processamento foi realizado em um cluster no Laboratório de Monitoramento e Processos (LMP).

2.1.1 Parâmetros Nêutronicos e coeficiente de reatividade

Nesta seção, analisou-se e comparou-se os núcleos de dois reatores nucleares em termos de parâmetros críticos: Coeficiente de Temperatura do Moderador (MTC), Coeficiente de Temperatura Doppler (DTC) e Concentração de Boro (BWC). A análise foi conduzida com o auxílio do Serpent-Tools (Andrew Johnson, 2020) e focou na comparação entre um núcleo padrão NuScale e outro tipo Seed-Blanket, otimizado com PSO. O coeficiente de multiplicação efetivo (k_{eff}) foi calculado para ambos os modelos



no estado de Potência Total Quente (HFP), a partir dos resultados de queima simulados no SERPENT. Para o cálculo dos coeficientes de reatividade, foram utilizados vários modelos com diferentes temperaturas e densidades da água, conforme propriedades definidas pela IAPWS (2008). O MTC e o DTC foram calculados com códigos Python, considerando variações na temperatura do moderador e combustível, enquanto o BWC foi determinado a partir de 9 modelos com diferentes concentrações de boro.

2.1.2 Densidade de Potência

Foi desenvolvido um código em Python, com base em (Luka Snoj, 2006), para processar dados simulados no SERPENT e calcular a densidade de potência linear ao longo de diferentes eixos do núcleo. O código extrai dados de detectores, calcula volumes e áreas das células, e gera visualizações tridimensionais da distribuição de potência, salvando os resultados em arquivos CSV. A análise utilizou uma malha tridimensional (80x80x100) de detectores, fornecendo uma visão detalhada do comportamento da potência no reator.

2.2 Análise termo-hidráulica.

Adaptamos a metodologia de canal único aquecido em CFD, originalmente desenvolvida por (Cunha, et al., 2024) para o núcleo do reator AP1000 e o conceito AP-Th1000, para a análise de um subcanal interno dos núcleos NuScale e SBU. A abordagem do subcanal com célula centrada na vareta de combustível, conforme apresentada em, foi modificada para a configuração da célula centrada no fluido refrigerante, visando otimizar a etapa de criação da malha computacional. Essa adaptação permite uma análise mais eficiente e robusta das condições térmicas e de fluxo de fluido no interior do subcanal.

Utilizamos o Ansys SpaceClaim para criar um modelo 3D da região do subcanal do núcleo padrão NuScale e do SBU. Para o modelo NuScale, seguimos as dimensões e condições operacionais especificadas no relatório final de segurança submetido à NRC (NuScale Power, 2020), garantindo aderência ao projeto original. A geometria foi ajustada para acomodar o núcleo SBU, explorando simetrias para otimizar a modelagem de ambos os núcleos, aumentando a eficiência da análise térmica e hidráulica. A discretização foi feita com o Ansys Meshing, gerando uma malha com 9,21 milhões de nós e 8,45 milhões de elementos, principalmente hexaédricos. Os materiais seguiram as especificações de (Cunha, et al., 2024), com ajustes no enriquecimento do dióxido de urânio e substituição do Zircaloy-4 pelo M5 é uma variante da liga de Zr com 1%Nb com microestrutura recristalizada, no revestimento de combustível fabricada pela AREVA, conforme os projetos AP1000 e NuScale (Westinghouse, 2011) (NuScale Power, 2020). As propriedades termofísicas do M5 foram baseadas em (Kecek, et al., 2016).

O modelo de turbulência k-omega SST foi utilizado para capturar a transferência de calor entre a vareta de combustível e o fluido refrigerante. As condições de fronteira incluíram fluxo mássico na entrada, pressão na saída e simetria nas faces laterais. O fluxo mássico do núcleo padrão NuScale é de 587,15 kg/s, com temperatura de entrada de 531,48 K e pressão de 12,755 MPa (NuScale Power, 2020). Utilizamos uma abordagem sinusoidal, conforme (Todreas & Kazimi, 2011), para a distribuição axial da densidade de potência, aplicada como geração de energia volumétrica no Ansys CFX. A potência linear máxima foi obtida com o código SERPENT, garantindo precisão nas condições operacionais de ambos os núcleos.

2.3 Modelagem dos núcleos.

Para ambos os modelos de núcleo esses parâmetros de projeto são as mesmas dimensões críticas, como a altura efetiva do núcleo, o espaçamento entre os revestimentos de combustível e a espessura de

diversos componentes. A precisão dessas medidas é crucial para assegurar a validação do núcleo. Para o núcleo SBU, os enriquecimentos foram ajustados e interpolados de forma paramétrica, garantindo que os valores de (k_{eff}) e (CR) obtidos estejam em conformidade com os resultados obtidos pelo algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO).

A Figura 1, compara dois tipos de reatores NuScale Padrão e SBU. O reator NuScale padrão utiliza combustível com U-235 enriquecido entre 1,50% e 4,55%. Para os elementos de maior enriquecimento, são usadas 16 barras contendo Gd_2O_3 a 16% em peso. O SBU combina urânio e tório, com UO_2 enriquecido de 17% a 20% e cobertas de $(U,Th)O_2$ entre 81% e 96%. Essa configuração mantém a mesma quantidade de varetas de Gd e o mesmo enriquecimento, visando maior eficiência e a produção de U-233 para uma operação mais sustentável. O vaso do reator é de SSA508 e os refletores de aço inox SS304 e SS304L. A Figura 2 compara grades de combustível: uma 17x17 de UO_2 com gadolínio e outra 19x19 com $(U,Th)O_2$ na periferia e UO_2 no centro, ambas com gadolínio para controle de reatividade.

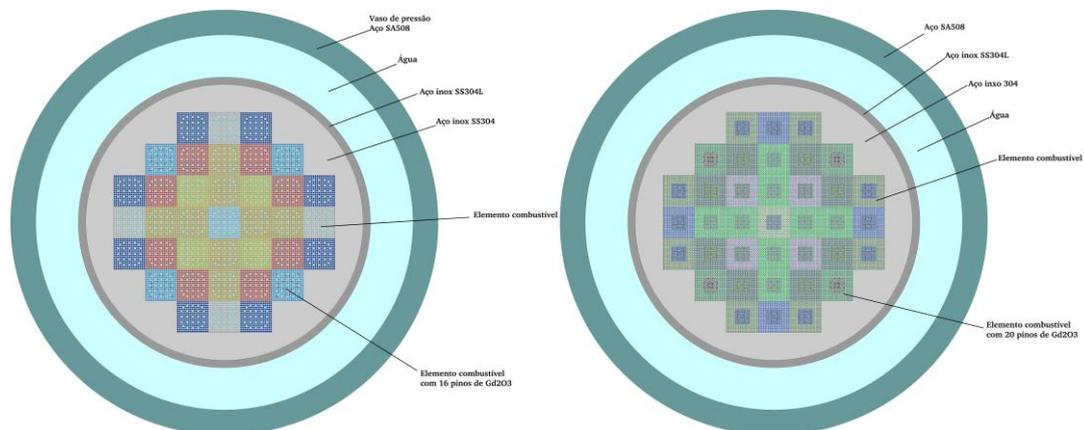


Fig. 1: Modelagem dos núcleos original à esquerda, direita o núcleo proposto.

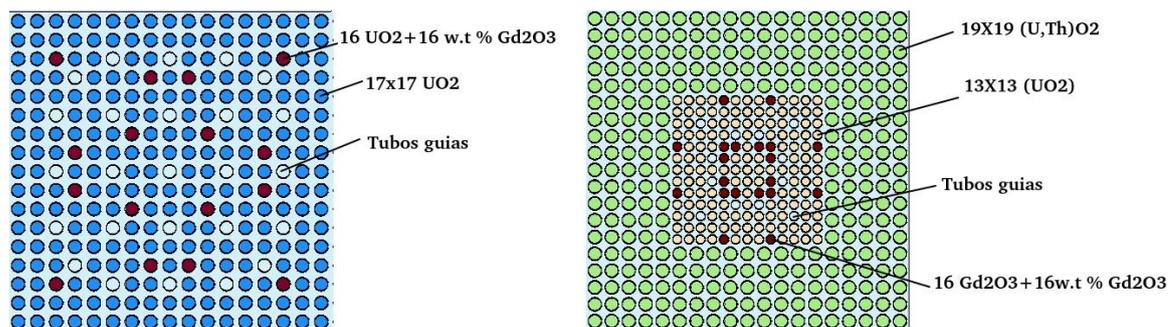


Fig. 2: Elementos combustível padrão, e comparação do elemento combustível SBU.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Nesta seção, os dados do SERPENT foram analisados para comparar o desempenho do modelo proposto com o núcleo padrão. A Figura 3 mostra a variação do fator de multiplicação efetivo (k_{eff}) ao longo de 800 dias de queima nos reatores NuScale (azul) e SBU (laranja). Ambos começam supercríticos, com k_{eff} inicial de 1,14447 (NuScale) e 1,08138 (SBU). Com o avanço da queima, a produção de nêutrons diminui até o equilíbrio. O SBU, com menor produção de Xe-135 e uma taxa de



conversão 15,48% maior, favorece operações mais longas e gera menos resíduos. Ambos os sistemas se estabilizam de forma semelhante, com estratégias de controle comparáveis.

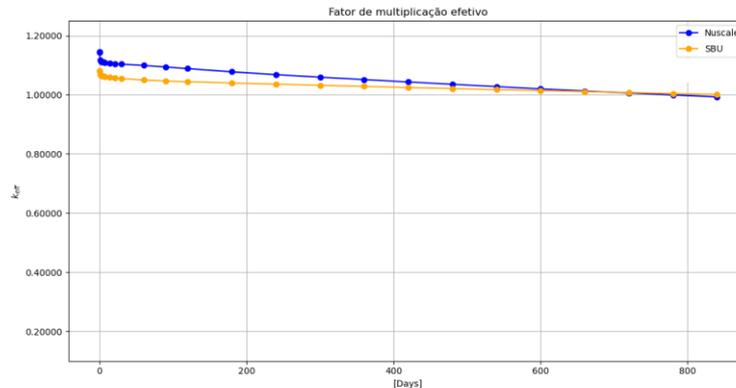


Fig. 3: Comparação do fator de multiplicação efetivo.

A Figura 4, evidência a comparação dos Coeficientes de Reatividade de Boro (BWC) em pcm/ppm entre os núcleos. O gráfico mostra que o NuScale (azul) mantém um BWC estável com o aumento da concentração de boro, indicando maior eficácia na absorção de nêutrons. No entanto, o SBU (laranja) apresenta um BWC que se torna menos negativo com o aumento da concentração de boro, mostrando menor estabilidade e maior sensibilidade em relação ao NuScale.

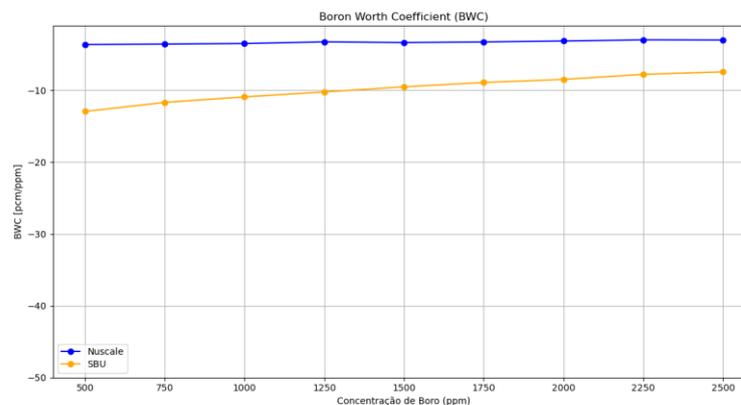


Fig. 4: Comparação do valor do coeficiente de Boro (BWC).

De igual modo, a Figura 5 mostra o Coeficiente de Temperatura do Moderador (MTC) em pcm/K em função da temperatura do moderador. Ambos os núcleos apresentam MTC negativo, indicando que o aumento da temperatura reduz a reatividade, garantindo operação segura. O NuScale (azul) mantém o MTC quase constante até 525 K, com uma leve queda depois, mostrando maior estabilidade térmica. Já o SBU (laranja) tem um MTC mais negativo e com mais variações, sugerindo maior sensibilidade a mudanças de temperatura, exigindo um controle mais rigoroso. Em resumo, o NuScale é mais estável, enquanto o SBU é mais sensível.

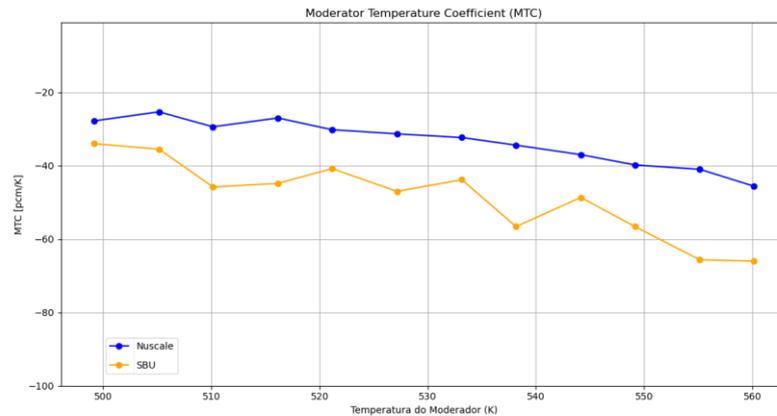


Fig. 5: Comparação do coeficiente de reatividade do Moderador (MTC).

Alinda mais, o gráfico da Figura 6 mostra o Coeficiente de Temperatura Doppler (DTC) para os reatores NuScale e SBU. Ambos têm DTC negativo, o que indica que a reatividade diminui com o aumento da temperatura do combustível. O convencional tem um DTC menos negativo, mostrando menor sensibilidade à temperatura. O SBU, com um DTC mais negativo, indica maior variação de reatividade, o que pode aumentar a estabilidade térmica e segurança, mas precisa ser analisado junto a outros parâmetros operacionais.

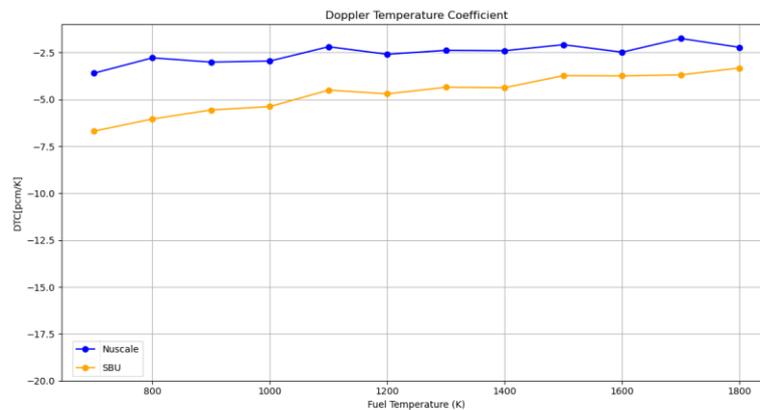


Fig. 6: Comparação do coeficiente de temperatura do combustível (DTC).

Então, a figura 7, os gráficos tridimensionais mostram a densidade de potência linear (W/cm) em função das malhas X, Y NuScale tem uma distribuição mais uniforme de 138,7 W/cm, com um pico central e menor risco de ebulição nucleada, indicando operação mais estável. O SBU, com densidade de 225,6 W/cm e maiores variações, pode causar superaquecimento e requer controle mais rigoroso. O padrão tem densidade média de potência 18,47 kW/l, menor que o valor de 46,5 kW/l da (International Atomic Energy Agency, 2024), enquanto o SBU oferece 63% mais densidade, mas exige maior cuidado operacional.

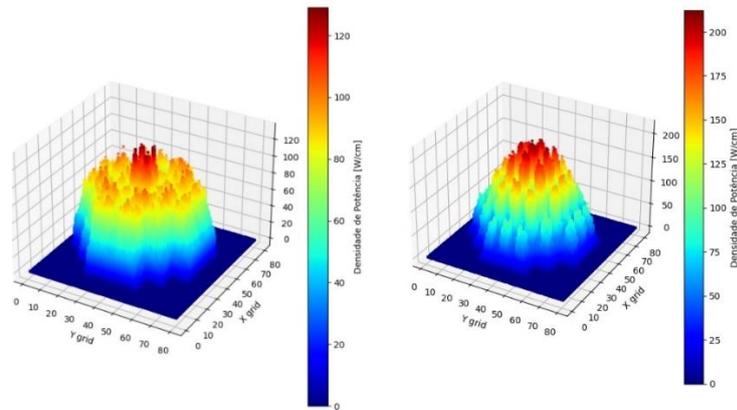


Fig. 7: Comparação da densidade de potência linear[W/cm].

O modelo de Fluidodinâmica Computacional indicou temperaturas máximas de 1104,25 K e 1569,49 K na pastilha de combustível, e de 648,37 K e 648,73 K no revestimento para o núcleo padrão NuScale e o modelo SBU, respectivamente. Esses valores garantem que o combustível e o núcleo permaneçam abaixo das temperaturas críticas de fusão. Embora o material M5 no revestimento tenha menor capacidade de transferência de calor em comparação ao Zircaloy-4, conforme expõe (Kecek, et al., 2016), ambos os projetos mantiveram as temperaturas dentro dos limites de segurança. A Figura 9 mostra a distribuição axial de temperatura no canal aquecido, destacando o comportamento térmico da configuração.

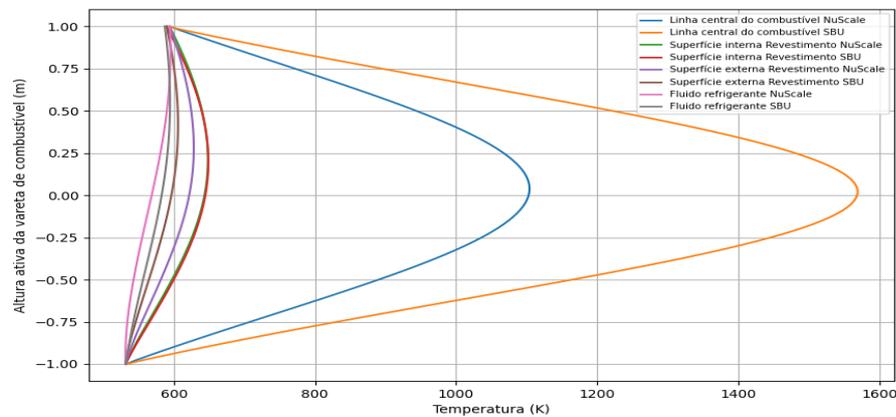


Fig. 8: Perfis axiais de temperatura dos núcleos NuScale e SBU.

O canal de escoamento do fluido refrigerante é essencial para a segurança do reator, pois remove o calor das barras de combustível. Considerando apenas perdas por atrito e gravidade, as quedas de pressão foram de 0,15492 bar e 0,06943 bar para os dois núcleos. O modelo CFD mostrou temperaturas médias de saída de 589,64 K para o NuScale padrão e 587,4 K para o SBU. O relatório de segurança da (NuScale Power, 2020) registrou uma temperatura de 587,04 K, indicando que o modelo simplificado deste estudo está próximo dos resultados originais.

4 CONCLUSÃO

Desse modo, a comparação entre os núcleos SBU e NuScale revela diferenças no controle de reatividade e desempenho. O NuScale possui um Coeficiente de Reatividade de Boro (BWC) mais estável e maior controle nas variações térmicas, enquanto o SBU tem maior sensibilidade, mas com um Coeficiente de



Temperatura Doppler (DTC) mais negativo, o que melhora a segurança. O NuScale apresenta uma densidade de potência mais uniforme e estável, favorecendo uma operação segura. Já o SBU, apesar de melhor conversão de combustível e controle em altas temperaturas, tem variações maiores e exige mais rigor no controle. Ambos os projetos mantêm a segurança térmica, mas o SBU pode requerer uma análise termohidráulica mais aprofundada. A escolha depende das necessidades operacionais: o NuScale é mais estável e seguro, enquanto o SBU oferece maior eficiência, mas com maior sensibilidade.

O estudo termohidráulico através do modelo de Fluidodinâmica Computacional (CFD) apontou que, tanto para o projeto padrão do NuScale quanto para a proposta SBU, as temperaturas máximas nas regiões da pastilha de combustível e do revestimento permaneceram dentro dos limites de segurança estabelecidos para os materiais empregados. Embora o material M5, utilizado no revestimento, apresente uma capacidade de transferência de calor inferior ao Zircaloy-4, ambos os projetos demonstraram segurança térmica adequada. É importante ressaltar que a proposta SBU ainda se encontra dentro dos limites de segurança estabelecidos, contudo, uma investigação termo-hidráulica mais detalhada se faz necessária. O núcleo SBU tem melhor conversão de combustível e controle em altas temperaturas, mas exige mais controle. O NuScale é mais estável e seguro. A escolha depende das necessidades operacionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento e o apoio das agências de pesquisa brasileiras: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio de Janeiro (FAPERJ), e ao INCT de Reatores Inovadores.

REFERÊNCIAS

1. AIRashidi, M. R. a. E.-H. M. E., 2009. A Survey of Particle Swarm Optimization Applications in Electric Power Systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, pp. 913-918.
2. Andrew Johnson, D. K. S. T. a. G. R., 2020. serpentTools: A Python Package for Expediting Analysis with Serpent,. *Nuclear Science Engineering*.
3. Barthel, F. a. T. H., 2019. Thorium: Geology, Occurrence, Deposits and Resources.
4. Black, G., Shropshire, D. & Araújo, K., 2021. *Small modular reactor (SMR) adoption: Opportunities and challenges for emerging markets*. s.l.:Woodhead Publishing Series in Energy.
5. C.A.Lobo, M. & Stefani, G. L. d., 2024. Thorium as nuclear fuel in Brazil: 1951 to 2023. *Nuclear Engineering Design*.
6. Carelli, M. D. e. a., 2010. Economic Features of Integral, Modular, Small-to-Medium Size Reactors. *Nuclear Engineering and Design*, pp. 3267-3276.
7. Cunha, C. J. C. M. R. d. et al., 2024. Single heated channel analysis of the AP-Th 1000 concept. *Nuclear Engineering and Design*, Volume 420.
8. Ghimire, L. a. W. E., 2023. Small Modular Reactors: Opportunities and Challenges as Emerging Nuclear Technologies for Power Production. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, p. 044501.
9. Gonçalves, D. M. E., Silva, M. V. d., Cunha, C. J. M. d. & Daniel Artur Pal, a., 2024. Feasibility of Converting NuScale SMRs from UO₂ to Mixed (Pu,Th)O₂ and (U,Th)O₂ Cores: A Parametric Study of the Seed-Blanket Fuel Assembly. *Nuclear Engineering and Design*, Volume 424.
10. Hussein, E. M., 2020. Emerging small modular nuclear power reactors: A critical review. *Physics Open*, p. 100038.



11. IAPWS, 2008. IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. *International Steam Tables: Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97*, pp. 7-150.
12. Ingersoll, D., 2014. Deliberately small reactors and the second nuclear era. *Progress in Nuclear Energy*, pp. 128-135.
13. Ingersoll, M. D. C. & D. T., 2021. *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors*. s.l.:Woodhead Publishing Series.
14. International Atomic Energy Agency, 2024. *Advanced reactors information system (ARIS)*. [Online]
Available at: <https://aris.iaea.org/sites/power.html>
15. Kecek, A., Tucek, K., Holmstrom, S. & Uffelen, P. V., 2016. Development of M5 Cladding Material Correlations in the TRANSURANUS code. *JRC Technical Reports*, Issue 1, pp. 1-53.
16. Kennedy, J. & E. R., 1995. Particle swarm optimization.. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948.
17. Locatelli, G., Bingham, C. & Mancini, M., 2014. Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. *Progress in Nuclear Energy*, pp. 75-85.
18. Luka Snoj, M. R., 2006. Calculation of Power Density with MCNP in TRIGA reactor. *Nuclear Energy for New Europe* .
19. NuScale Power, 2020. *Part 2 - Final Safety Analysis Report (Rev.5)- Part 02 -Tier 02 - Chapter 04 - Reactor - Sections 04.01*, s.l.: NuScale.
20. Radkowsky, A., 1985. The Seed-Blanket Core Concept.. *Nuclear Science and Engineering*, pp. 381-387.
21. Rosner, R. & S, G., 2011. Small Modular Reactors–Key to Future Nuclear Power Generation in the US. *Energy policy institute at chicago*.
22. Silva, M. V. et al., 2024. Optimized modular nuclear reactor project utilizing artificial intelligence: Seed-blanket concept. *Nuclear Engineering and Design*.
23. Stefani, G. L. d. et al., 2023. Feasibility to convert the NuScale SMR from UO₂ to a mixed (U,Th)O₂ core: Parametric study of fuel element - Seed-blanket concept. *World Journal of Nuclear Science and Technology*.
24. Todreas, N. E. & Kazimi, M., 2011. *Nuclear Systems I -Thermalhydraulic fundamentals*. s.l.:Taylor & Francis.
25. Tong, G., Zhang, S., Wang, W. & Yang, G., 2023. A particle swarm optimization routing scheme for wireless sensor networks. *Transactions on Pervasive Computing and Interaction*.
26. Valtavirta, E. F. a. Y. B. a. V., 2023. Definition of the neutronics benchmark of the NuScale-like core. *Nuclear Engineering and Technology*, pp. 3639-3647.
27. Westinghouse, 2011. *AP1000 Design Control Document Rev. 19. , ML11171A500, 2011*, s.l.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
28. Xu, Y. J. S. W. G. & L. Z., 2021. Nonlinear dissipative particle swarm optimization algorithm for nuclear reactor core design. *Annals of Nuclear Energy*, p. 108124.