



Id.: EN30

APPLICATION OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR SBU CONFIGURATION WITH PLATE-TYPE FUEL AND ROD-TYPE BLANKET WITH MIXED THORIUM-URANIUM FUEL

Arthur L. de Albuquerque¹, Diego Manoel E. Gonçalves¹, Marcelo V. Silva¹, Giovanni L. de Stefani¹, Roberto Schirru¹

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

Palavras-Chave: SBU, PSO, SMR

RESUMO

Este estudo propõe um elemento combustível baseado no conceito de unidade seed-blanket proposto por Radkowsky, com duas regiões distintas: em seu centro um conjunto de placas supercrítico composto de UZr e outra no entorno subcrítica composta por varetas de (U, Th)O₂, desenvolvendo assim um novo tipo de reator multi-geométrico. O objetivo principal dessa configuração é maximizar a produção de U-233 e mitigar a geração de rejeitos. A configuração foi obtida utilizando um código de otimização de geometria, por inteligência artificial de enxame de partículas com a parte neutrônica calculada utilizando o código SERPENT. Espera-se obter um elemento combustível capaz de alcançar alta taxa de conversão de isótopos com elevada produção de U-233, além de manter a criticidade durante todo o ciclo de operação. Portanto, o resultado poderá indicar uma geometria mais flexível e sustentável para a geração de energia nuclear.

ABSTRACT

This study proposes a fuel assembly based on the seed-blanket unit concept proposed by Radkowsky, with two distinct regions: in its center a set of supercritical plates composed of UZr and another in the subcritical surrounding composed of rods of (U, Th)O₂, thus developing a new type of multi-geometric reactor. The main objective of this configuration is to maximize the production of U-233 and mitigate the generation of waste. The configuration was obtained using a geometry optimization code, by particle examination artificial intelligence with the neutronic part calculated using the SERPENT code. It is expected to obtain a fuel assembly capable of achieving high isotope conversion rates with high production of U-233, in addition to maintaining criticality throughout the entire operating cycle. Therefore, the result may indicate a more flexible and sustainable geometry for nuclear energy generation.

1. INTRODUÇÃO

O uso do elemento combustível de Rakowsky de unidade seed-blanket utilizando placas urânio, e zircônio (UZr) no seed e blanket em varetas composto por óxido misto de tório e urânio, (Th-U)O₂. A região do seed opera em regime supercrítico e a região do blanket em regime subcrítico, absorvendo os nêutrons que não causam reações no seed [1]. O uso de tório proposto por Radkowsky reduz o custo do ciclo do combustível, reduz o uso de urânio natural, reduz ainda a toxicidade, radioatividade e emissão de calor dos resíduos radioativos, além de gerar baixa quantidade de plutônio, impossibilitando a fabricação de armas nucleares e, através da captura radiativa, produz urânio 233 [2].

A utilização de tório combinado com urânio torna a energia nuclear viável por muito mais tempo, uma vez que a reserva de tório é aproximadamente 3 vezes maior que a de urânio [3]. E

ainda, o Brasil abriga a segunda maior reserva de tório e a oitava maior reserva de urânio do mundo [4] [5].

A utilização de ligas metálicas com urânio em elementos combustíveis do tipo placa possui benefícios apontados por Andrzejewski [6], como a relação entre a maior área superficial das placas e a otimização da taxa de transferência de calor, o que favorece o espalhamento, resulta na moderação de nêutrons e como consequência, em uma maior densidade de potência, fazendo com que a temperatura da operação seja reduzida. Outra consideração é o melhor aproveitamento do volume do núcleo do reator, possibilitando a utilização em SMRs.

O estudo emprega a resolução de um problema de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*). A escolha desse método se justifica por sua simplicidade de implementação e robustez. Através da simulação de milhares novos elementos combustíveis, foi possível identificar soluções eficazes para os diferentes arranjos propostos.

A proposta desta pesquisa é utilizar a otimização por enxame de partículas para criar e avaliar um modelo de unidade seed-blanket baseado no conceito proposto por Radkowsky. Nesse modelo, o seed é composto por placas de urânio, enquanto o blanket é formado por varetas com pastilhas de combustível misto de tório e urânio. Esse conceito será aplicado em um pequeno reator modular, com o objetivo de gerar energia de maneira eficiente e sustentável.

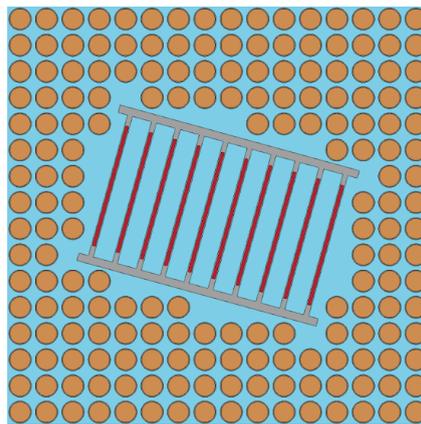


Fig. 1. Exemplo de elemento combustível gerado.

2. METODOLOGIA

A presente pesquisa de cunho empírico e exploratório foi realizada por meio da criação de roteiros na linguagem de programação Python. Um dos roteiros serve para modelar o elemento combustível e após a criação do arquivo de input, o código Serpent é iniciado, realizando a simulação.

Foi criado um elemento combustível baseado no conceito unidade seed-blanket proposto por Alvin Radkowsky. O seed é composto por placas de ligas metálicas de UZr revestidos por zircaloy-4, com urânio enriquecido em 20%. Na região do blanket foram testados os arranjos 15x15, 16x16, 17x17, 18x18 e 19x19. Além disso, o combustível utilizado na pastilha do blanket é misto de dióxido com a proporção de 90% tório e 10% urânio, enriquecido em 19%, também revestido por zircaloy-4. O gás presente no gap é o hélio.

Para inicialização da otimização, foi necessário definir os parâmetros do PSO e cada variável recebeu um valor aleatório da faixa de valores previamente estipulada, esses valores foram inseridos no roteiro do input. Após cada simulação, a otimização por enxame de partículas avaliou os resultados de acordo com a função de aptidão, atribuindo então um valor de acordo com as saídas de interesse.

2.1. Otimização por enxame de partículas



No ano de 1995, James Kennedy e Russell Eberhart publicaram o primeiro artigo sobre Otimização por Enxame de Partículas ao estudar o fenômeno natural do comportamento de bando de pássaros e cardume de peixes através da evolução e adaptação tal qual ocorre na natureza, conhecido também como seleção natural, termo cunhado pelo naturalista Charles Darwin em sua obra “A origem das espécies por meio da seleção natural” publicada no ano de 1859 [7].

Com base na posição de cada animal é possível notar qual está mais seguro ou mais próximo da comida, sempre buscando a melhor solução. Desse modo, durante todo o processo, os animais mais afastados da melhor solução buscam se aproximar do qual está melhor posicionado para aquela situação. Sendo bioinspirado há a necessidade de tratar esses animais como partículas para elaborar melhor o algoritmo e cada partícula apresenta uma possível solução [8].

O algoritmo PSO é inicializado com um enxame de partículas, cada partícula com uma velocidade e posição aleatórias no espaço de busca. A aptidão de cada partícula é avaliada de acordo com a função de aptidão. Na primeira iteração, a melhor posição individual (pbest) de cada partícula corresponde à sua posição inicial. A melhor posição global (gbest) é determinada entre todas as partículas. Em cada iteração subsequente, a velocidade e posição de cada partícula são atualizadas de acordo com as equações (1) e (2), respectivamente, sendo influenciadas tanto pelo seu pbest quanto pelo gbest. Após a atualização, a aptidão da nova posição é avaliada e o pbest e gbest são atualizados, se necessário. O processo iterativo continua até que um critério de parada seja atingido, como a convergência ou o número máximo de iterações [9].

Tab. 1. Parâmetros do PSO.

Parâmetro	Valor
Número de Partículas	80
Número de Iterações	100
Peso de Inércia	0,729
Peso Cognitivo	2,0
Peso Social	1,8
Velocidade Máxima	2,0

Fórmula para atualização da velocidade:

$$v(t + 1) = w \cdot v(t) + c1 \cdot r1(t) \cdot (pbest(t) - x(t)) + c2 \cdot r2(t) \cdot (gbest(t) - x(t)) \quad (1)$$

Sendo:

- $v(t+1)$: velocidade futura;
- w : peso de inércia;
- v : velocidade da partícula no instante t ;
- $c1$: constante cognitiva;
- $c2$: constante social;
- $r1(t)$ e $r2(t)$: função aleatória de distribuição uniforme entre $[0,1]$;
- $pbest$: melhor posição já obtida pela partícula;
- $gbest$: melhor posição encontrada pela na vizinhança da partícula;
- $x(t)$: posição atual.



Fórmula para atualização da posição:

$$x(t + 1) = x(t) + v(t + 1) \quad (2)$$

x(t+1): posição futura

Tab. 2. Faixa de valores para cada variável.

Entrada	Mínimo	Máximo
Espessura do Cerne	0,05 cm	0,2 cm
Largura do Cerne	3 cm	11 cm
Ângulo do Seed	0°	180°
Número de Placas	5	25

Tab. 3. Faixa de valores para o raio da pastilha em cada arranjo.

Arranjo	Mínimo (cm)	Máximo (cm)
15x15	0,15	0,64000
16x16	0,15	0,59537
17x17	0,15	0,55600
18x18	0,15	0,52100
19x19	0,15	0,48968

Função de aptidão:

$$f = 10^3 * CR + taxa_uranio / 10^{-3} + e^{3*K_inf} \quad (3)$$

Maximizar o CR, taxa de produção de urânio 233 e k_inf. De acordo com os pesos a ordem de prioridade foi CR, k_inf, taxa_produção.

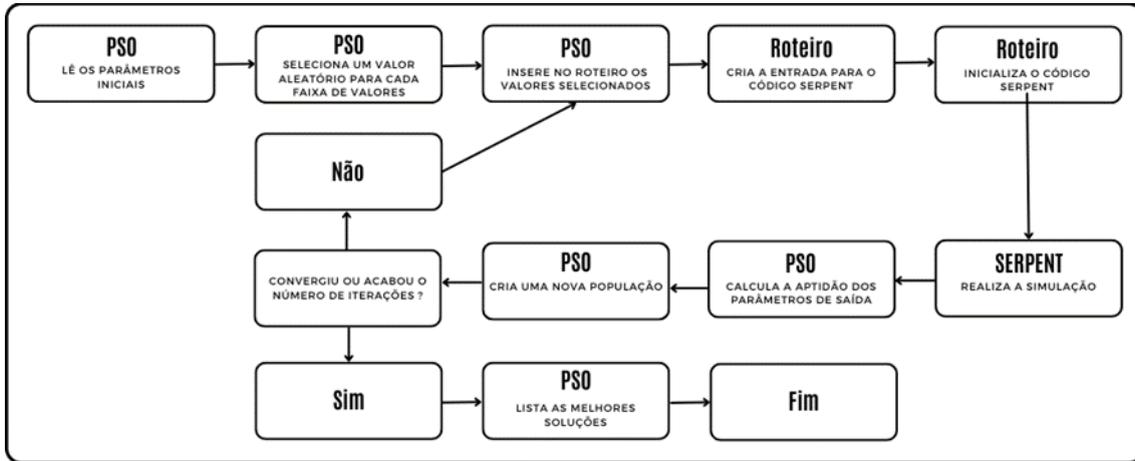


Fig. 2. Fluxograma da metodologia.

2.2 Volume do moderador e volume do combustível

Cálculo do volume do moderador e do combustível no seed:

$$V1 = (\text{Pitch das varetas})^2 * \text{Altura da vareta} \quad (4)$$

$$\text{Volume do combustível} = \pi * \text{Raio}^2 * \text{Altura da vareta} \quad (5)$$

$$\text{Volume do moderador} = V1 - \text{Volume do combustível} \quad (6)$$

Cálculo do volume do moderador e do combustível no blanket:

$$V2 = \text{Pitch das placas} * \text{Largura da placa} * \text{Altura da placa} \quad (7)$$

$$\text{Volume do combustível} = \text{Espessura da placa} * \text{Largura da placa} * \text{Altura da placa} \quad (8)$$

$$\text{Volume do moderador} = V2 - \text{Volume do combustível} \quad (9)$$

3. RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta os valores de entrada para os melhores arranjos, variando de 15x15 a 19x19, em termos de parâmetros geométricos e estruturais, como raio, espessura e largura do cerne, ângulo de inclinação das placas, e o número de placas. Observa-se uma variação significativa no raio e na espessura do cerne entre os diferentes arranjos. Especificamente, o raio do cerne diminui de 0,58210 cm no arranjo 15x15 para 0,45455 cm no arranjo 19x19, indicando uma tendência de compactação do cerne conforme o número de placas aumenta. A largura do cerne também apresenta variações, com a menor largura de 6,37496 cm no arranjo 16x16 e a maior de 7,74773 cm no arranjo 19x19.



O ângulo das placas, que influencia diretamente a distribuição do combustível e a homogeneidade da reação nuclear, varia consideravelmente entre os arranjos. No arranjo 16x16, o ângulo é de $101,91277^\circ$, enquanto no 17x17 atinge $153,20627^\circ$, refletindo uma possível otimização da geometria das placas para maximizar a eficiência do reator. O número de placas aumenta de 7 para 9 ao passar do arranjo 15x15 para 16x16, permanecendo constante nos arranjos subsequentes, sugerindo que uma configuração com mais placas pode favorecer a performance do reator em certas condições.

Tab. 4. Valores de entrada para os melhores soluções em cada arranjo.

Arranjo	Raio (cm)	Espessura do Cerne (cm)	Largura do Cerne (cm)	Ângulo ($^\circ$)	Número de Placas
15x15	0,58210	0,18213	7,21999	143,76079	7
16x16	0,50915	0,19927	6,37496	101,91277	9
17x17	0,48264	0,17683	6,66674	153,20627	9
18x18	0,47735	0,16227	7,44302	20,77079	9
19x19	0,45455	0,16790	7,74773	29,40675	7

A Tabela 5 apresenta os valores de saída, que incluem a razão de conversão (CR), a taxa de urânio, o fator de multiplicação infinito (K_{inf}), e a aptidão para os diferentes arranjos. A razão de conversão (CR) se mantém relativamente constante, com pequenas variações ao longo dos arranjos, indicando uma eficiência consistente na conversão de combustível em produtos de fissão. O arranjo 15x15 apresenta a maior aptidão, com 680,25044, destacando-se como a configuração mais eficiente.

A taxa de urânio diminui progressivamente de 0,00237 no arranjo 15x15 para 0,00146 no arranjo 19x19, o que pode indicar uma utilização mais eficiente do urânio nos arranjos maiores, resultando em uma menor necessidade de material. O fator de multiplicação (K_{inf}) permanece muito próximo de 1,170 em todos os arranjos, sugerindo uma boa reatividade e estabilidade nas condições operacionais.

Tab. 5. Valores de saída para as melhores soluções em cada arranjo.

Arranjo	CR	Taxa_urânio	K_{inf}	Aptidão
15x15	0,64678	0,00237	1,17013	680,25044
16x16	0,64568	0,00213	1,17023	679,16641
17x17	0,64673	0,00188	1,17005	680,19713
18x18	0,64661	0,00165	1,17011	680,08583
19x19	0,64658	0,00146	1,17000	680,04354

A Tabela 6 compara o volume dos combustíveis (V_f) em uma placa do seed e em uma vareta do blanket para os diferentes arranjos, além de apresentar a razão entre o volume do material



moderador e o volume do combustível (V_m/V_f) tanto para o seed quanto para o blanket. Os volumes dos combustíveis variam consideravelmente entre os arranjos, com o volume do seed diminuindo de 262,98986 cm³ no arranjo 15x15 para 235,78224 cm³ no arranjo 17x17. No entanto, o volume do blanket diminui significativamente mais, de 212,89763 cm³ para 129,82006 cm³ ao passar do arranjo 15x15 para 19x19. Essa redução pode ser explicada pela necessidade de acomodar mais placas e utilizá-las para maior eficiência energética. A razão V_m/V_c no seed é mais alta no arranjo 19x19 (9,71221), o que pode indicar uma maior presença de material moderador em relação ao combustível, favorecendo a moderação dos nêutrons e potencialmente aumentando a eficiência do reator. No blanket, a razão V_m/V_c é mais elevada no arranjo 16x16 (1,20066), sugerindo que essa configuração específica pode otimizar a moderação e a reação em cadeia dentro do blanket.

Tab. 6. Volume dos combustíveis em uma placa do seed e uma vareta do blanket.

Arranjo	V_c do Seed (cm ³)	V_c do Blanket (cm ³)	V_M / V_C (Seed)	V_M / V_C (Blanket)
15x15	262,98986	212,89763	8,87542	0,91565
16x16	254,06907	162,88293	6,02002	1,20066
17x17	235,78224	146,36463	6,91071	1,16938
18x18	241,56042	143,17376	7,62058	0,97816
19x19	260,16739	129,82006	9,71221	0,95803

4. CONCLUSÃO

Os resultados indicam que os arranjos geométricos têm um impacto significativo na eficiência do elemento combustível, influenciando parâmetros críticos como a razão de conversão, a taxa de urânio e a aptidão global na geometria do elemento gerado pela IA por enxame de partículas. As variações nas dimensões geométricas, como o raio e a largura do cerne, bem como o ângulo das placas, mostram que otimizações específicas são necessárias para alcançar o melhor desempenho em cada configuração de arranjo. Além disso, a análise dos volumes de combustível e as razões V_m/V_f destacam a importância de uma distribuição adequada do material moderador para maximizar a reatividade e a eficiência do reator.

Recomenda-se para trabalhos futuros a incorporação de novos parâmetros ao PSO assim como faixas de valores mais amplas e o teste de outros elementos nas composições.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da FAPERJ e do CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. GALPERIN, P. REICHERT, A. RADKOWSKY, Thorium fuel for light water reactors—reducing proliferation potential of nuclear power fuel cycle, *Science & Global Security*, v. 6, n. 3, pp. 265–290, 1997.
- [2] A. RADKOWSKY, A. GALPERIN, The nonproliferative light water thorium reactor: a new approach to light water reactor core technology, *Nuclear Technology*, v. 124, n. 3, pp. 215–222, 1998.



- [3] <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium> acessado em 16/05/2024.
- [4] <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium> acessado em: 16/05/2024.
- [5] <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1877web.pdf> acessado 01/06/2024.
- [6] C. D. S. ANDRZEJEWSKI, J. M. L. MOREIRA, Avaliação de alternativas de combustível tipo placa para reatores de pequeno porte, Dissertação, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil (2005).
- [7] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942-1948 vol.4, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [8]
- [9] V. C. LEITE, R. SCHIRRU, M. M. NETO, Particle swarm optimization applied to the nuclear fuel bundle spacer grid spring design, Nuclear Technology, v. 205, n. 5, pp. 637–645, 2019