



OTIMIZAÇÃO DO NÚCLEO DO REATOR IEA-R1 UTILIZANDO O MÉTODO DE ENXAME DE PARTÍCULAS

Thiago A.dos Santos¹, Frederico A. Genezini², Giovanni L. de Stefani³, Marcelo V. Silva³, Lucile D. Moreira³, Anderson P. Resende³, Daniel A.P. Palma⁴

¹Universidade Federal da Grande Dourados (Rodovia Dourados/Itahum, Km12, Cidade Universitária, Dourados, MS, Brasil)

²Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Av. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil)

³Universidade Federal do Rio de Janeiro (Av. Horácio Macedo 2030, Bloco G sala 206. Rio de Janeiro, RJ, Brasil)

⁴Instituto de Engenharia Nuclear (Rua Helio de Almeida, 75, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil)

thia.santos@hotmail.com

Palavras-Chave: Otimização, Inteligência de enxames, Reatores de pesquisa

RESUMO

Este trabalho visa o desenvolvimento de um código em FORTRAN 90, para resolver o Problema de Otimização de Recarga (POR), no reator de pesquisa IEA-R1, no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP), em São Paulo, Brasil. O código utiliza o método de Otimização de Enxame de Partículas (PSO), de maneira a se integrar com a metodologia de cálculo do reator atual. A função objetivo busca maximizar o fator de multiplicação efetivo (k_{eff}), minimizar o fator de potência de pico (PPF) e atingir a distribuição de fluxo de nêutrons mais uniforme possível. É feita uma comparação com os parâmetros da configuração atual do reator (configuração 260) e uma nova configuração obtida através do código, e este encontra com sucesso soluções que atendem aos requisitos do problema padrão. A nova configuração aumenta a potência de pico (6,93%) e a variância (9,62%), aumenta ligeiramente o fluxo de nêutrons (0,48%), mas reduz marginalmente o k_{eff} (0,45%). Entretanto, mesmo com a pequena perda do k_{eff} , os ganhos nas demais grandezas são significativos a ponto de mostrar a eficácia do código. Além disso, diminuí a temperatura máxima do revestimento de combustível (0,7%), contribuindo para a segurança do reator

1. INTRODUÇÃO

Em um reator nuclear, projetar um núcleo para atender às necessidades operacionais é um dos maiores desafios da física de reatores. Este problema se torna mais complexo durante a operação de recarga, quando novos combustíveis são inseridos no núcleo junto com outros já usados. A busca por uma configuração ótima do núcleo em questão é conhecida como Problema de Otimização de Recarga (POR).

No entanto, este é um problema de otimização combinatória NP-difícil, e resolvê-lo por meio de força bruta se torna inviável [1]. Mesmo reatores de potência com núcleos simétricos possuem uma ampla quantidade de configurações possíveis (na ordem de $n!$, onde n é o número de posições do núcleo do reator estudado), tornando as soluções de força bruta impraticáveis.

Para reatores de pesquisa, como o IEA-R1 no IPEN/CNEN, a assimetria do núcleo expande o espaço da solução, o que torna ainda mais impraticável o uso da força bruta para a solução do problema. No caso do núcleo do IEA-R1, bem menor se comparado ao de reatores de potência como os da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, com 20 elementos de combustível, resulta em aproximadamente $2,4 \times 10^{18}$ configurações potenciais.

As condições usuais para resolver o problema são a maximização do tempo do ciclo de queima de combustível, a intensidade do fluxo de nêutrons produzido, o achatamento da



distribuição de potência e a minimização do pico de potência. Os critérios comuns de otimização incluem maximizar a duração do ciclo de combustível, intensidade do fluxo de nêutrons, uniformidade da distribuição de energia e minimizar picos de energia.

As Meta-heurísticas têm se mostrado eficientes para a resolução do POR. Vários trabalhos utilizam os mais variados métodos, como o Recozimento Simulado (*Simulated Annealing* - SA) [2], Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Networks* - ANN) [3], algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms* - GA) [4], algoritmo de Colônia Artificial de Abelhas (*Artificial Bee Colony* - ABC) [5].

O presente trabalho trata da resolução do POR para o reator de pesquisa IEA-R1, situado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP) utilizando a meta-heurística da Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) [6] em um código feito na linguagem FORTRAN 90 que é integrado aos demais códigos responsáveis pelos cálculos dos parâmetros neutrônicos e termo-hidráulicos do núcleo do reator. Isso é feito a partir da determinação de uma função de aptidão que maximize o keff e o fluxo de nêutrons, bem como minimize o PPF e garantindo que este seja o mais uniforme possível.

2. METODOLOGIA

O IEA-R1 é um reator de pesquisa de piscina aberta resfriado e moderado por água. Atende a múltiplos propósitos, como produção de radioisótopos para saúde e indústria, bem como pesquisa com fontes ativadas e feixes de nêutrons. Sua versatilidade o estabelece como uma pedra angular da pesquisa e aplicação nuclear no Brasil [7].

Seu núcleo opera com uma potência nominal máxima de 5 MW e tem o formato de um paralelepípedo em um arranjo 5x5, consistindo de elementos de combustível (EC), cercados por dispositivos de elementos de irradiação e refletores. É montado em uma placa de grade, que é suspensa por uma estrutura de alumínio acoplada a uma ponte móvel. A Fig. 1 mostra uma representação de uma configuração de núcleo de reator. Pode-se notar que na posição central do conjunto de elementos de combustível, em preto, há dois canais para irradiação de alto fluxo de nêutrons; em vermelho as barras de controle e segurança.



minimiza simultaneamente o PPF e a variância do fluxo (Var). Essa otimização busca atingir a distribuição de fluxo de nêutrons mais uniforme, conforme definido na equação 1.

$$f = \frac{k_{EFF} \cdot \phi}{Var. PFF} 10^{-13} \quad (1)$$

A equação 1 foi definida empiricamente de acordo com os parâmetros de análise, que se justifica através da necessidade de aumentar o fluxo de nêutrons, maximizando assim o keff e o fluxo. No entanto, é essencial que essa distribuição permaneça o mais estável possível. Portanto, a minimização simultânea do PPF e da variância garante uma discrepância menor entre os valores máximo, mínimo e, mais importante, médio do fluxo de nêutrons. A análise do keff é conduzida avaliando a reatividade (ρ).

O código de otimização utilizando o PSO é integrado com os códigos neutrônicos e termo-hidráulicos empregados para avaliar o desempenho e a segurança do IEA-R1 durante cada ciclo de recarga de combustível. Especificamente, esses códigos são compostos por 2DB [8], CITATION [9] e COBRA [10], sendo utilizada como base a configuração 260 do reator [11].

No PSO, metaheurística utilizada para a otimização neste trabalho, o bando de pássaros em que as partículas são equivalentes é representado em um ambiente bidimensional. Para garantir a existência de uma certa “personalidade” individual das partículas, cada uma delas é dotada de um comportamento distinto e aleatório em que a ponderação dessas duas informações é desenhada ao longo do processo, assumindo assim um valor diferente para cada uma das partículas e variando esse valor ao longo do processo iterativo. Consequentemente, à medida que uma partícula se move dentro desse espaço, sua posição é caracterizada por suas coordenadas. Um estudo mais aprofundado sobre as características básicas do PSO pode ser encontrado na literatura [6], [11], [12].

Assim, cada partícula terá sua posição ajustada de acordo com a influência de outra partícula melhor posicionada, tendo um valor que mostra o quão próximo do resultado ideal ela está. A Fig. 2 descreve como o algoritmo de otimização funciona de forma integrada com os códigos já utilizados no IEA-R1.

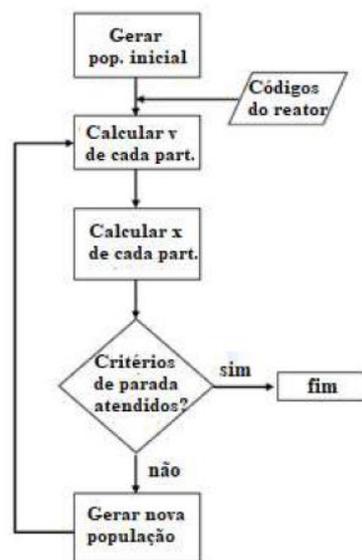


Fig. 2. Diagrama do fluxo do código de otimização por PSO



A entrada é constituída pelos arquivos de saída dos demais códigos que compõem a já citada metodologia de cálculo do núcleo. Tais códigos funcionarão como sub-rotinas do programa, gerando os parâmetros neutrônicos e termohidráulicos para as soluções fornecidas pelo código de otimização. Assim, o espaço de soluções será gerado e buscará a melhor solução dentro do número de partículas e interações definidas pelo usuário. Tais soluções correspondem a novas configurações do núcleo do IEA-R1 e a melhor delas é exibida no arquivo de saída.

Além das partes que compõem o código, o mesmo possui algumas condições de contorno que devem ser consideradas para garantir uma maior eficácia do mesmo. São elas:

- O fluxo de nêutrons deve ter uma magnitude mínima desejável nos pontos de irradiação;
- Não há alteração nas posições 229, 230, 242, 243 (marcadas em vermelho na Fig 1.) e no elemento de irradiação central (denominado por EIBe);

3. RESULTADOS

Valores ótimos para a função objetivo foram identificados nos casos em que $p = 30$; $t = 1500$ e $p = 50$; $t = 1500$. A Tabela 1 fornece uma comparação abrangente de cada parâmetro analisado via código de otimização para os casos envolvendo 30 e 50 partículas, bem como para a configuração 260, que é a configuração utilizada no IEA-R1 calculada por sua equipe técnica. Assim, a configuração 260 serviu como benchmark para a configuração obtida via o código de otimização. Esta configuração não é apenas uma das mais recentes, mas também envolve menos etapas de queima, resultando em economia de tempo nos cálculos.

Tab. 1. Comparação entre os parâmetros de f para casos de $p = 30$ e $p = 50$ partículas e a configuração 260 do reator IEA-R1

	Config. 260	Otimização	
		30 partículas	50 partículas
ρ (início de vida)	5916,89	6161,44	5465,15
PFF	1,429	1,539	1,33
Flux (10^{14})	1,1558	1,1594	1,1691
Var	0,0343	0,033	0,031

Embora seja verdade que para os valores de partículas e iterações $p = 30$; $t = 1500$ produza um valor ligeiramente maior da função objetivo em comparação com $p = 50$; $t = 1500$, a última configuração se mostra com mais vantagens na maioria dos parâmetros. Essa diferença é particularmente pronunciada ao examinar os gráficos de área apresentados a seguir, na Fig. 3(a) e (b), que comparam as soluções obtidas do código de otimização com a configuração 260.

É evidente que a área ocupada pela configuração calculada é significativamente maior do que a da configuração 260, confirmando-a como a solução superior, embora tenha um valor de função objetivo ligeiramente menor do que o caso $p = 30$, $t = 1500$. Consequentemente, a configuração com 50 partículas surge como o melhor resultado obtido.

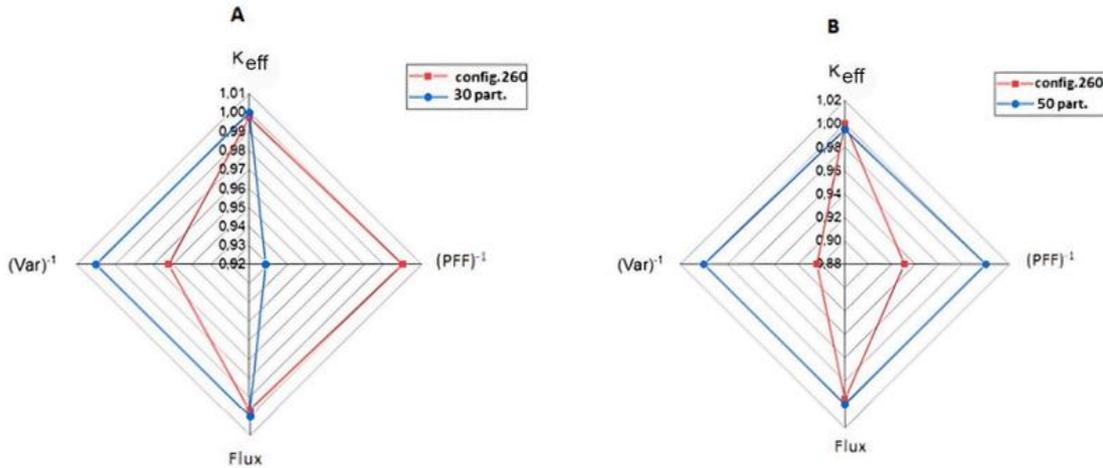


Fig. 3 Comparação entre a) $p = 30$; $t = 1500$ e a config. 260 e b) $p = 50$; $t = 1500$ e a config 260.

Assim, o código de otimização encontrou uma nova configuração para o núcleo do IEA-R1, utilizando então o caso de $p = 50$ e $t = 1500$, cujos valores obtidos nos códigos integrados ao otimizador, i.e., CITATION, COBRA e 2DB, foram devidamente comparados a configuração 260. A Fig 4 mostra a comparação da distribuição dos EC entre a configuração 260 (original do reator), que foi do IEA-R1 e a configuração obtida pelo código de otimização.

	3	4	5	6	7
4	EC-218 12,870/14,06	EC-224 9,664/10,59	EC-216 27,126/29,31	EC-234 3,829 /4,21	EC-231 6,285/6,90
5	EC-214 25,713/27,81	ECC-229 24,572/26,60	EC-215 29,661/31,09	ECC-242 2,630/2,90	EC-217 23,537/25,50
6	EC-235 0,0/0,0	EC-207 40,281/43,13	EIBE	EC-206 35,420/38,05	EC-213 28,088/30,33
7	EC-223 11,572/12,66	ECC-245 0,0/0,0	EC-210 31,270/33,69	ECC-230 23,655/25,63	EC-225 15,767/17,19
8	EC-227 5,548/6,10	204 - MR 39,815/42,65	EC-232 7,646/8,39	EC-233 3,328/4,32	EC-226 8,343/9,15

	3	4	5	6	7
4	EC-227 5,548/6,10	EC-225 15,767/17,19	EC-210 31,270/33,69	EC-223 11,572/12,66	EC-213 28,088/30,33
5	EC-206 35,420/38,05	ECC-229 24,572/26,60	EC-207 40,281/43,13	ECC-242 2,630/2,90	EC-235 0,0/0,0
6	EC-217 23,537/25,50	EC-215 29,661/31,99	EIBE	EC-214 25,713/27,81	EC-216 27,126/29,31
7	EC-218 12,870/14,06	ECC-243 0,0/0,0	EC-234 3,829 /4,21	ECC-230 23,655/25,63	EC-233 3,928/4,32
8	204 - MR 39,815/42,65	EC-232 7,646/8,39	EC-224 9,664/10,59	EC-231 6,285/6,90	EC-226 8,343/9,15

Fig. 4. Comparação entre a disposição dos EC da configuração 260 (à esquerda do leitor) e a configuração obtida pelo código de otimização no caso $p = 30$ e $t = 1500$

O ganho de reatividade entre a configuração determinada pelo grupo de cálculo (configuração 260) e a configuração derivada do código de otimização usando $p = 50$ e $t = 1500$ equivale a $-451,73$ pcm. Melhorias substanciais também são observadas nos ganhos de PFF (6,93%) e variância (9,62%). O fluxo de nêutrons calculado mantém uma pequena vantagem sobre a configuração original (0,45%).

As distribuições de densidade de potência das duas configurações são visualizadas em 2D e 3D na Fig. 5. É importante notar que o arranjo das configurações exibe algumas diferenças, com os picos na configuração 260 sendo mais isolados, enquanto aqueles na configuração calculada aglutinam-se nas regiões centrais, formando uma espécie de “platô”. Além disso, concentrar a potência nas regiões centrais é uma característica das configurações do IEA-R1 e ainda está presente nas configurações calculadas pelo código de otimização, resulta em redução do vazamento de nêutrons e, conseqüentemente, menor consumo de combustível.

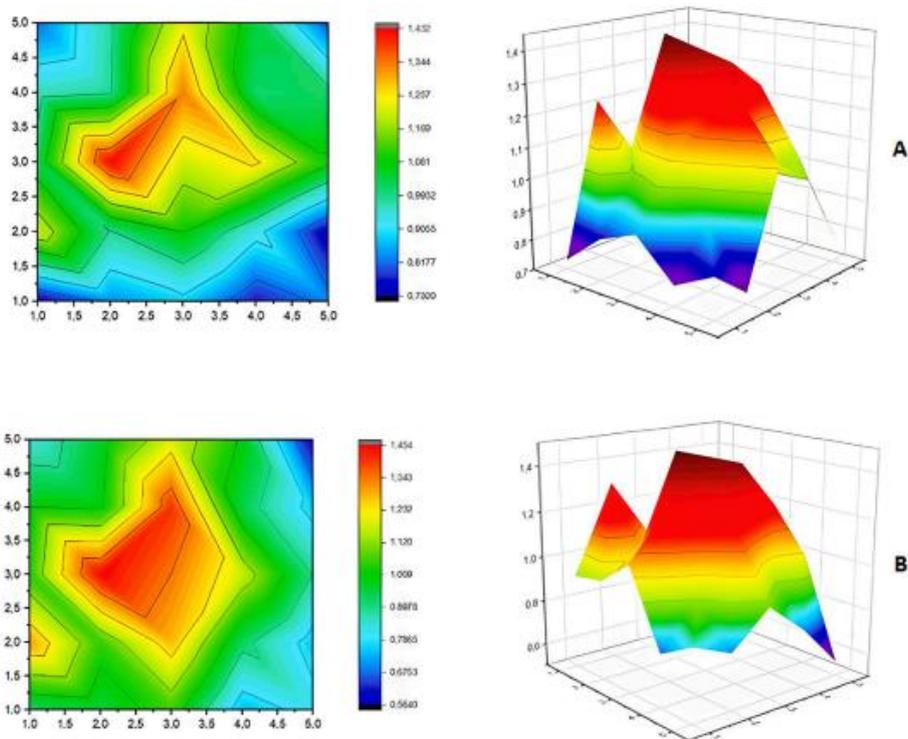


Fig. 5 Distribuição da densidade de potência em 2D e 3D para a) config. 260 (calculado convencional); b) $p = 50$, $t = 1500$ (otimização)

Em relação ao limite operacional térmico do elemento combustível, definido como 95°C , a configuração analisada não apenas adere a esses valores, mas também atinge temperaturas mais baixas em comparação à configuração 260, como mostrado na Fig. 6. A temperatura máxima obtida para a nova configuração, determinada através do código de otimização foi de $88,3^{\circ}\text{C}$, o que significa uma redução de $6,7^{\circ}\text{C}$ em comparação aos dados fornecidos pela configuração de benchmark. Isso indica que a configuração otimizada mantém condições térmicas seguras dentro dos limites desejados.

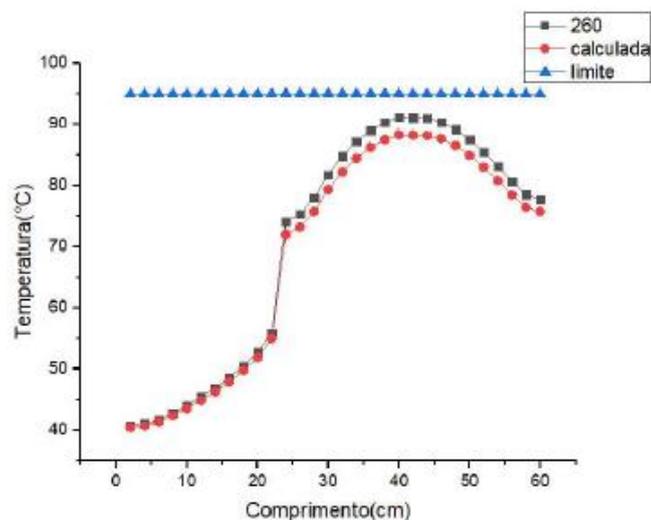




Fig. 6 Comparação entre as distribuições de temperatura no EC de maior densidade de potência nas config. 260 e $p = 50$ $t = e$ 1500 e a temperatura limite

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, foi possível observar que:

- O código de otimização resolve efetivamente o POR para IEA-R1, produzindo configurações que oferecem vantagens sobre a configuração original.
- embora melhorias tenham sido alcançadas, é importante considerar a importância relativa de diferentes parâmetros na avaliação de aptidão. Os dados sugerem que keff desempenha um papel mais significativo na aptidão do que outros fatores. É por isso que a configuração $p = 50$, $t = 1500$, apesar de ter um valor de função objetivo ligeiramente menor, tem melhor desempenho em relação a outros parâmetros.
- O desenvolvimento deste código estabelece um benchmark inicial para resolver este tipo de problema no contexto do IEA-R1. Há potencial para otimização adicional usando diferentes funções objetivas que atribuem pesos a vários parâmetros e empregando metaheurísticas alternativas ou abordagens híbridas.

Em resumo, o código de otimização representa uma ferramenta valiosa para melhorar a configuração do IEA-R1, oferecendo melhorias em termos de desempenho do reator, mantendo os padrões de segurança. Refinamentos adicionais e exploração de diferentes abordagens de otimização podem levar a resultados ainda mais favoráveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Akbari *et al.*, A novel multi-objective optimization method, imperialist competitive algorithm, for fuel loading pattern of nuclear reactors. *Prog. Nucl. Energy*, Vol.108, pp. 391-397 (2018).
- [2] D. Kropaczek e P.J. Turinsky, In-core nuclear fuel management optimization for pressurized water reactors utilizing simulated annealing. *Nucl. Technol.*, Vol. 95, pp. 9-32 (1991).
- [3] H. Mazrou e M. Hamadouche, Development of a supporting tool for an optimal fuel management in research reactors using artificial neural networks. *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 236, pp. 255-266 (2006).
- [4] E.Tanker e A.Tanker, Application of genetic algorithm to core reload pattern optimization. *Proceedings of the Internacional conference in reactor physics on reactor computations*, Tel Aviv, 23 January (1994).
- [5] I. Oliveira e R. Schirru, Swarm intelligence of artificial bees applied to in-core fuel management optimization. *Ann. Nucl. Energy*. Vol. 38, pp. 1039-1045 (2011).
- [6] R. Eberhart e J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the Sixth International Symposium on MHS' 95*, Nagoya, 04-06 October (1995).
- [7] I. Rodrigues *et al.*, Study and project of the new rack with Boron for storage of fuel elements burned in The IEA-R1 research reactor. In: International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2017, Belo Horizonte – MG, Brasil. Nuclear Energy for National Projects (2017).
- [8] W. Little, R.W. Hardie Jr., 2DB User's manual – Revision 1. In: Battelle Pacific Northwest Laboratory, BNWL, EUA, pp. 831 (1969).



Semana Nacional de Engenharia Nuclear e da Energia e Ciências das Radiações – VII SENCIR
Belo Horizonte, 12 a 14 de novembro de 2024

- [9] T.B. Fowler, *et al.*, Nuclear reactor core analysis code: CITATION. Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-2496, Rev.2, Suppl. 3, Oak Ridge, EUA (1972).
- [10] J. Chao, COBRA-3C/RERTR: A Thermal-hydraulic subchannel code with low pressure capabilities. Argonne National Laboratory, EUA (1980).
- [11] T.A. Santos, Otimização de parâmetros do núcleo do reator IEA-R1 utilizando o algoritmo de enxame de partículas, Tese, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN, Brasil (2023).
- [12] C. Pereira, et al, Particle swarm optimization applied to a nuclear engineering problems. Int. J. Nuclear Knowledge Manage. (online), Vol.2, pp. 313-332 (2007)