



Análise de sensibilidade da reatividade para uma vareta combustível com seção transversal bicôncava em um PWR

Gustavo R. Nogueira¹, Maria Vitória A. de Oliveira², Edson Henrice Jr.³ e Thiago D. Roberto⁴

¹*gustavonogueira98@hotmail.com,
Universidade Veiga de Almeida R. Ibituruna
108, 20271-020 Maracanã, Rio de Janeiro,
RJ*

²*mavi.oliveira11@gmail.com,
³ejunior@nuclear.ufrj.br, Programa de
Engenharia Nuclear (PEN/ COPPE/UFRJ -
RJ), Cidade universitária, Centro de
Tecnologia, bloco G, sala G-206, Ilha do
Fundão 21941-972 Rio de Janeiro, RJ*

⁴*thiago.roberto@uerj.br, Instituto de
Engenharia Nuclear (IEN / CNEN - RJ),
Rua Hélio de Almeida, 75, Cidade
Universitária, Ilha do Fundão 21941-972
Rio de Janeiro, RJ*

Resumo

Este trabalho faz uma análise preliminar de reatividade de um projeto original de uma vareta combustível com seção transversal na forma bicôncava vazada. A reatividade foi obtida pelo SEPERNT para uma variação de área do subcanal de três modelos de varetas combustíveis de seções transversais circular sólida, circular vazada e bicôncava vazada. Esta análise considerou o combustível UO₂ com enriquecido de 4% e 5%, a partir das faixas de 600K e 900K relativas as temperaturas médias de operação de um típico PWR. A pesquisa demonstra que a melhor faixa de área do subcanal para o projeto de vareta bicôncava vazada foram as regiões compreendidas entre 7,6 e 7,9 cm², para o enriquecimento de UO₂ a 5%, e de 6,2 a 6,6 mm², para o enriquecimento de UO₂ a 4%.

1. Introdução

Projetos inovadores de combustíveis nucleares vazados vêm ganhando espaço por apresentarem melhor desempenho energético em plantas nucleares quando comparados com combustíveis sólidos. Trabalhos recentes como [1] evidenciam que estes projetos promovem o melhor desempenho na transferência de calor para o fluido refrigerante, por possuírem uma área de refrigeração maior (parte interna e externa em contato como o refrigerante) e, conseqüentemente, diminuem o risco de situações de transientes não esperados como Reactivity Initiated Accident (RIA).

Seguindo a tendência de projetos de combustíveis vazados, este trabalho é sequência do estudo analítico por [2] de um projeto inédito de vareta combustível vazada com seção transversal bicôncava. A análise preliminar, foi obter o perfil médio das temperaturas radiais em condições do estado estacionário para esta vareta combustível com formato bicôncavo vazado. [3] conclui, que para as mesmas gerações globais de calor, a temperatura na superfície do combustível foi inferior quando comparada com a temperatura na superfície de combustíveis de seção transversal circular (sólida ou vazada).

Dessa forma, nesta etapa do estudo, foram realizados testes de sensibilidade da reatividade através da variação da área do subcanal para determinar a região de criticalidade do sistema.

2. Metodologia

[4] fazem um estudo para encontrar o fator de excentricidade, ε , que relaciona o raio da circunferência que localiza a curva da oval de Cassini a partir do plano XOZ definida por:

$$(X^2 + Z^2 + a^2)^2 - 4a^2X^2 = c^4 \quad (1)$$

A relação geométrica entre os parâmetros a e c, para a curva proposta neste trabalho, encontra-se no intervalo $a < c < a\sqrt{2}$, onde a razão $\varepsilon = a/c$ representa a excentricidade da curva e está no intervalo $0,707 < \varepsilon < 0,998$.

Como base nesta relação, foi possível fazer a modelagem aproximada desta curva (Figura 1) utilizando o código Tridimensional de Transporte de Partículas e Energia por Monte Carlo – SERPENT [5].

Este código foi utilizado pela dificuldade de modelagem da célula de combustível, uma vez que a implementação no código foi feita com base nas seções circulares, onde utilizamos a equação “*pad*” que permite modelar superfícies derivadas das formas principais utilizando os parâmetros radiais. A estrutura de cálculos do SERPEN é dada pelo método de Monte Carlo e este método permite a modelagem de diversos tipos projetos independentemente da sua geometria.

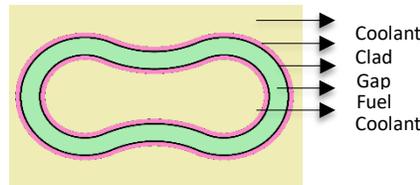


Figura 1: Vista superior da vareta combustível bicôncava vazada

A Fig.1 representa a vista superior da seção transversal da vareta combustível bicôncava vazada, sendo o fluido refrigerante compreendido pelas regiões interna e externa da vareta.

A Tabela 1 lista os parâmetros da geometria do núcleo, altura da vareta, número de varetas e as condições de operação típicas, com base na referência [3], para os cálculos neutrônicos necessário para base de cálculo do código SERPENT.

Tabela 1: Parâmetros da vareta combustível.

Fuel Rods	Circula Sólida	Circular Vazada	bicôncava Vazada
Pin pitch (mm)	12,6	16,51	16,51
Inner Clad inner radius, r_i (mm)	-	4,305	4,6
Inner Clad outer radius, r_o (mm)	-	4,8765	5,2
Inner Fuel radius, r_{fi} (mm)	-	4,9385	5,3
Outer Fuel radius, r_{fo} (mm)	4,1275	7,1125	7,3
Outer Clad inner radius, r_{ci} (mm)	4,1895	7,1745	7,4
Outer Clad outer radius, r_{co} (mm)	4,761	7,746	8,0
Number of assemblies	193	193	193
Total number of fuel rods	50.952	30.880	30.880
Array	17×17	13×13	13×13
Plant			
Reactor Thermal Power	3.411	5.116	5.116

Core	Circula Sólida	Circular Vazada	bicôncava Vazada
Allowable core total peacing factor	2,5	2,5	2,5
Core volume (m ³)			
Active length (m)	3,66	3,66	3,66
Primary Coolant			
System pressure (MPa)	15,51	15,51	15,51
Core inlet temperature (K)	600	600	600
Coolant mass flow (kg/s)	17,7	26,55	26,55

Utilizando o SERPENT, os valores estimados de k_{eff} foram obtidos a partir de diferentes configurações de área do subcanal, na temperatura do combustível e do tipo de enriquecimento.

3. Resultados e discursões

A Tabela 1 resume os principais dados necessários para determinar o k_{eff} no estado estacionário de operação. Os resultados gerados pelo SERPENT são listados nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 – k_{eff} para área do subcanal de uma vareta combustível de seção bicôncava vazada.

UO ₂ (4%) – 600 K			UO ₂ (5%) – 600 K		
Area [mm ²]	k_{eff} [-]	ρ [pcm]	Area [mm ²]	k_{eff} [-]	ρ [pcm]
6,595	1,00092	91,92	7,773	1,00491	488,60
6,600	1,00025	24,99	7,779	1,00597	593,46
6,600	1,00081	80,93	7,840	1,00336	334,87
UO ₂ (4%) – 900 K			UO ₂ (5%) – 900 K		
6,538	1,00302	301,09	7,762	1,00274	273,25
6,543	1,00186	185,65	7,773	1,00192	191,63
6,548	1,00030	29,99	7,840	1,00044	43,98

Tabela 3 – k_{eff} para área do subcanal de uma vareta combustível de seção circular vazada.

UO ₂ (4%) – 600 K			UO ₂ (5%) – 600 K		
Area [mm ²]	k_{eff} [-]	ρ [pcm]	Area [mm ²]	k_{eff} [-]	ρ [pcm]
14,372	1,01038	1027,34	17,397	1,00654	649,75
14,524	1,00498	495,53	17,564	1,00207	206,57
14,677	0,99973	-27,01	17,733	0,99730	-270,73
UO ₂ (4%) – 900 K			UO ₂ (5%) – 900 K		
14,372	1,00762	756,24	17,231	1,01059	1047,90
14,524	1,00262	261,32	17,397	1,00421	419,24
14,677	0,99422	-581,36	17,564	0,99757	-243,59

Tabela 4 – k_{eff} para área do subcanal de uma vareta combustível de seção circular sólida.

UO ₂ (4%) – 600 K			UO ₂ (5%) – 600 K		
Area [mm ²]	k_{eff} [-]	ρ [pcm]	Area [mm ²]	k_{eff} [-]	ρ [pcm]
9,120	1,00556	552,93	10,890	1,01141	1128,13
9,242	1,00120	119,86	11,022	1,00060	59,96
9,364	0,99343	-661,35	11,156	0,99661	-340,15
UO ₂ (4%) – 900 K			UO ₂ (5%) – 900 K		
9,000	1,01143	1130,08	10,758	1,01432	1411,78
9,120	1,00608	604,33	10,890	1,00607	603,34
9,242	0,99795	-205,42	11,022	1,00018	18,00

As Tabelas 2 até 4 representam a oscilação do k_{eff} em função da área do subcanal somente na região de criticalidade ($\rho \approx 0$). Considerando o estado estacionário de operação para este projeto, ao avaliar as tabelas, percebe-se que para um enriquecimento de UO₂ a 5%, a área do subcanal em que o $k_{eff} \approx 1$, ou seja, onde o reator irá operar na criticalidade, está compreendida entre 7,7 e 7,9 cm² para a seção transversal bicôncava vazada, 17,3 a 17,7 cm² para seção transversal circular vazada e de 10,8 a 11,0 cm² para seção transversal circular sólida. Para um enriquecimento a 4%, a variação na área do subcanal, quando comparada ao enriquecimento anterior, obedece a um fator de proporcionalidade da ordem de 1,2 independentemente da seção transversal. Ademais, ao comparar as variações das áreas dos subcanais onde ocorre a criticalidade nas Tabelas 2 até 4, observa-se que na região onde ocorre a criticalidade das varetas circulares vazadas é aproximadamente duas vezes mais que as demais seções. Porém, as áreas dos subcanais das varetas de seção bicôncava vazada e circular sólida possuem dimensões muito parecidas.

4. Conclusão

A partir dos parâmetros nucleares principais fornecidos pela modelagem no SERPENT, foi realizada a análise da sensibilidade da área do subcanal para encontrar a melhor estimativa de K_{eff} . Por conseguinte, constatou-se que a área do subcanal é uma variável que afeta significativamente o valor do fator de multiplicação dos nêutrons. Ao analisar a vareta bicôncava vazada, a melhor faixa de área está compreendida pelas regiões entre 7,7 a 7,9 cm², para o enriquecimento de UO₂ a 5%, e de 6,5 a 6,6 cm², para o enriquecimento de UO₂ a 4%, onde apresentaram a faixa de operação dentro da criticalidade ($K_{eff} = 1$) para temperaturas do combustível a 600K e 900K, e estas faixas de temperaturas não interferiram na variação da criticalidade do sistema.

As varetas de seção transversal bicôncava vazada apesar de possuírem dimensões radiais próximas das seções circulares vazadas, como exposto na Tabela 1, apresentaram criticalidade próxima as dimensões de áreas de subcanais das varetas de seções transversais circulares sólidas. A partir destas comparações, pode-se concluir que projetos de varetas combustíveis de seção bicôncava vazada tende a um custo menor de fabricação, uma vez que os elementos combustíveis possuirão menores quantidades de pinos, e com uma eficiência igual ou superior as de seções transversais convencionais.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Instituto Nacional de Ciências e Reatores Nucleares Inovadores (INCT de Reatores Nucleares Inovadores) por nos concederem o financiamento e o apoio necessário para o estudo.

Referências

- [1] KWON, Y.D., LEE, D.S., YUN, T.H., **Comparison of the Characteristics of Solid Type and Annular Type Nuclear Fuels Using Thermoelastic-Plastic-Creep FEM**, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016, Article ID 1673107, 9 pages, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/1673107>.
- [2] OLIVEIRA, A. M., ALVIM, M. C. A., **Comparison between Temperature Distributions of an Annular Fuel Rod of Circular Cross-Section and of a Hemoglobin Shaped Cross-Section Rod for PWR Reactors in Steady State Conditions**. INAC – 2017.
- [3] DUARTE, J. P., RIVERO, J. J., MELO, P.F., S., ALVIM, A. C. M., 2014, **Coupling of a Lumped Parameter and a Finite Difference Model for Estimation of a Reactivity-Induced Transient in a PWR with Annular Fuel Rods**, *Journal Nuclear Technology*, v.185, n.2 (Feb), pp.109-126.
- [4] ANGELOV, B., MLADENOV, I. M., 2000, **On the Geometry of Red Blood Cell**, *Coral Press Scientific Publishing*, v.1, s/n. (Set), pp. 27-46.
- [5] LEPPÄNEN, J., **Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code**. VTT Technical Research Centre of Finland, June, 2015.