

Modelagem Computacional para Acidentes de Reatividade em Reatores Nucleares

Câmara Filho, P. C. B.

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil
paulo.camara@upe.br

Alves, U. E F.

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil
uefalves@upe.br

Lima, F. R. A.

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil
falima@cnen.gov.br

Castrillo, L. S.

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil
lazara.siveira@upe.br

Resumo

Reatores nucleares de pesquisa são comumente localizados em universidades e vastamente utilizados para desenvolvimento de novos procedimentos operacionais. O reator IPR-R1 TRIGA, localizado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, tem utilização destacada na produção de radioisótopos e no treinamento de pessoal. Atualmente o IPR-R1 passa por um processo de licenciamento para trabalhar a 250kW. Neste trabalho, é utilizado o código PARET-Program for the Analysis of Reactor Transients, para simular inserções de reatividade e verificar o comportamento dos parâmetros de segurança nessa nova potência de 250kW.

Abstract

Nuclear research reactors are commonly located in universities and widely used to develop new operational procedures. The IPR-R1 TRIGA reactor, located in the Center of Nuclear Technology Development, has highlighted the use of radioisotope production and training of personnel. Currently the IPR-R1 passes through a licensing process to work 250kW. In this work, we use the code PARET-Program for the Analysis of Reactor Transients, to simulate reactivity insertions and verify the behavior of the security parameters of this new power 250kW.

1 Introdução

No lugar da energia térmica, o aproveitamento em reatores de pesquisa é da radiação nuclear que propicia a realização de diferentes tipos de experimentos. O IPR-RI TRIGA (Training Research Isotopes, General Atomics), modelo Mark I, é um reator desse tipo e está localizado em Belo Horizonte, no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN. Atualmente o núcleo está operando com 100kW; no entanto existe um processo de licenciamento com o intuito de elevar sua potência para 250kW térmicos [1]. Com esse último valor de potência, a circulação natural garante que a temperatura máxima do combustível permaneça dentro dos limites de segurança [2]. No entanto, existe uma variedade de cenários e eventos que podem induzir acidentes, como inserções inadvertidas de reatividade resultando em aumento descontrolado da potência do reator e, em casos extremos, é possível haver danos a integridade do seu núcleo.

Para simular a sensibilidade de parâmetros termo-hidráulicos de segurança, como a temperatura máxima atingida no canal combustível mais quente, que implica maior fator de pico, foram modelados transitórios quando inseridos pulsos de reatividade positiva (RIA) no núcleo do reator IPR-R1.

Foi utilizado o código PARET (Program for the Analysis of Reactor Transients) para realização das simulações, o qual tem acoplados os modelos termo-hidráulicos e neutrônicos no núcleo e um contínuo efeito de realimentação de reatividade.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Descrição do Reator IPR-RI TRIGA

O Reator Nuclear IPR-RI TRIGA, fabricado pela General Atomic de San Diego – Califórnia, é refrigerado por água leve desmineralizada e possui, como combustível, urânio enriquecido a 20% em U_{235} . Foi projetado para treinamento, pesquisa e ativação neutrônica de materiais e produção de radioisótopos [1].

Existem mais reatores de pesquisa, do tipo TRIGA, em funcionamento em diversos países do mundo, do que qualquer outro tipo. No Brasil, ele encontra-se no CDTN e sua primeira criticalidade ocorreu em 1960, com uma potência de 30 kW. Desde então, vem sendo utilizado para importantes aplicações nas áreas de treinamento de pessoal especializado, produção de radioisótopos, entre outras. Após mudanças em sua configuração, a potência passou a 100 kW e, mais recentemente, já tem capacidade para operar a 250 kW. Esse último nível de potência ainda se encontra em processo de licenciamento.

O núcleo do reator forma um reticulado cilíndrico com 91 posições, onde estão instalados 63 elementos combustíveis-moderadores. Esses componentes são dispostos formando cinco anéis concêntricos e são mantidos em posição vertical, suportados por duas grades circulares. O núcleo é circundado por um refletor de grafita. Uma coluna de aproximadamente 5 metros de água faz a blindagem em relação ao topo do poço [3]. Na tabela 1, são especificados os principais dados geométricos do IPR-R1:

Tabela 1. Características dos Elementos Combustíveis(CDTN/CNEN,2000)

Propriedade	Elemento Alumínio	Elemento Aço Inox
Quantidade	59	4
Comprimento total (m)	0,7724	0,7206
Diâmetro externo do revestimento (m)	0,0373	0,0376
Espessura do revestimento(m)	0,00076	0,00051
Material do revestimento	Al 1100-F	Aço AISI-304
Diâmetro do combustível (m)	0,035,6	0,036,3
Largura do <i>gap</i> (m)	0,00009	0,00014
Comprimento ativo do combustível (m)	0,3556	0,381
Composição do combustível	U-ZrH1,0	U-ZrH1,6
Comprimento do refletor de grafita (m)	0,1016	0,0881
Diâmetro do refletor de grafita(m)	0,0356	0,0363
Área total de transferência de calor (m ²)	2,46	0,18
Enriquecimento em U_{235} (%)	20	20

2.2 Descrição do Código PARET

O PARET é um código computacional capaz de prever o curso e as consequências de acidentes de inserção de reatividade e de perda de vazão em reatores não pressurizados, através de uma análise que considera os efeitos acoplados de termo-hidráulica e neutrônica no núcleo e um

contínuo efeito de realimentação de reatividade. Ele simula acidentes em reatores com circulação forçada tanto no sentido ascendente como no sentido descendente, bem como acidentes durante o regime de circulação natural [4].

No PARET, o modelo do reator consiste em um núcleo resfriado à água que pode ser representado por até quatro elementos de combustível nas geometrias cilíndrica ou em placas, com seus respectivos canais de resfriamento. Assim, cada região pode ser representada com sua própria produção de energia, taxa de fluxo de refrigerante e parâmetros hidráulicos. Cada uma dessas regiões pode ainda ser subdividida num máximo de 20 cortes axiais [5], como mostrado na figura 1.

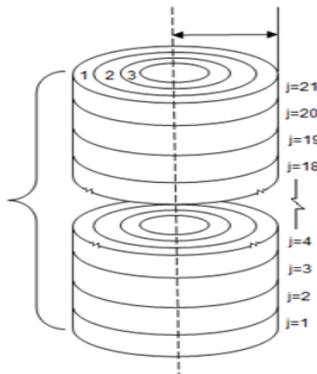


Figura 1. Exemplo de subdivisão do núcleo em seções axiais e radiais [5].

3 Metodologia

Este trabalho analisa o comportamento da temperatura, da reatividade retroalimentada e da potência do reator TRIGA IPR-R1 quando realizadas inserções de reatividade externa de 0,1\$, 1\$, 1,5\$, 2,5\$ e 3\$ por 0,5s.

Usando-se o código PARET, foi simulado um transiente durante um segundo em um canal do elemento combustível mais quente, o qual chamamos de B1, conforme mostrado na figura 2:

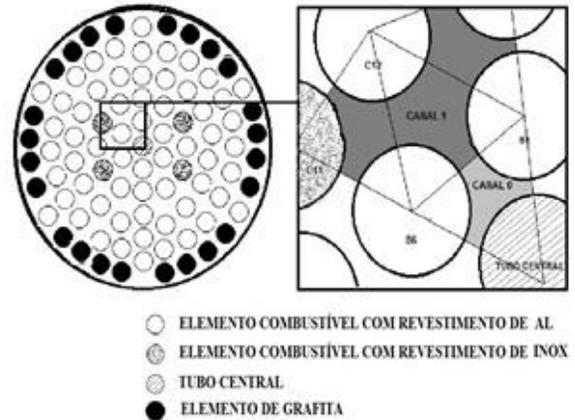


Figura 2. Canais de Refrigeração

Este trabalho utilizará 250 kW como a potência inicial do reator, com a qual já possui capacidade de operar desde 2004, porém estando ainda em fase de licenciamento [6].

De acordo com Alencar [7], a pressão máxima no refrigerante é basicamente a pressão da coluna de água no poço do reator. A altura máxima da coluna de água do topo do poço até a entrada do canal é de aproximadamente 5,5 m [1], sendo calculada a pressão do moderador, na entrada do canal, em $1,5681 \times 10^5$ Pa.

A entalpia foi considerada para um líquido saturado, visto que a pressão a que está submetido o moderador (água) é muito baixa (menor que 0,5 MPa). Segundo Mesquita [1], para o canal 1 (figura 2), as entalpias para cada potência do reator são descritas pela tabela 2.

Tabela 2: Entalpia x Potência do Reator

Potência do Reator (kW)	Entalpia (kg/m ² s)
265	205,40
212	237,98
160	246,35

Para a entrada de dados do PARET, o elemento combustível analisado foi dividido em 16 nós axiais e em 7 nós radiais. A densidade máxima de potência em cada elemento combustível corresponde ao produto do fator radial de distribuição no núcleo pelo fator axial na vareta, multiplicado pela densidade média de potência do núcleo [1]. A distribuição axial (F na equação 1) do fluxo de nêutrons em varetas combustíveis é descrita por uma função senoidal [8]. Para reatores TRIGA, essa função senoidal é truncada nas extremidades devido ao refletor de grafite, com razão pico/média de 1,25 a 1,30 [9]. Ela foi calculada com

base nas dimensões do elemento combustível, sendo dada pela

equação 1:

$$F = 1,25 \sin(0,32067x) \quad (1)$$

Em que, x é a medida axial do elemento, como mostrado na figura 3:

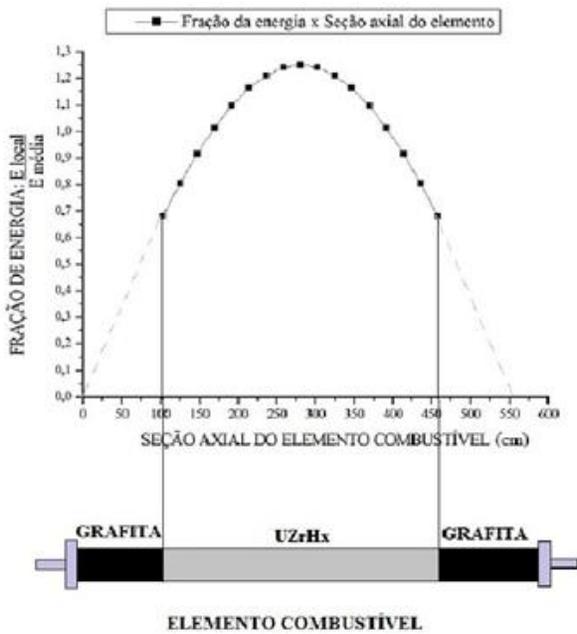


Figura 3. Fator de pico axial

Primeiramente foi executado um teste de validação, comparando-se os dados de temperatura máxima no combustível encontrado na simulação com os valores experimentais do trabalho de Mesquita [1]. Foram simulados valores de potência inicial de 265, 212 e 160 kW sem inserção de reatividade alguma.

Posteriormente fixou-se a potência em 250 kW e foram simuladas inserções de reatividade de 0,1 \$, 1 \$, 1,5 \$, 2,5 \$ e 3 \$ por 0,5 s, observando-se o comportamento da reatividade retroalimentada, da potência e dos valores máximos de temperatura atingidos no núcleo do combustível.

4 Resultados e análise das simulações

4.1 Teste de Validação do Experimento

No experimento realizado com as potências iniciais de 265, 212 e 160kW, sem inserção de reatividade externa, obtivemos valores muito próximos daqueles achados

experimentalmente por Mesquita[1], conforme indica a figura 4.

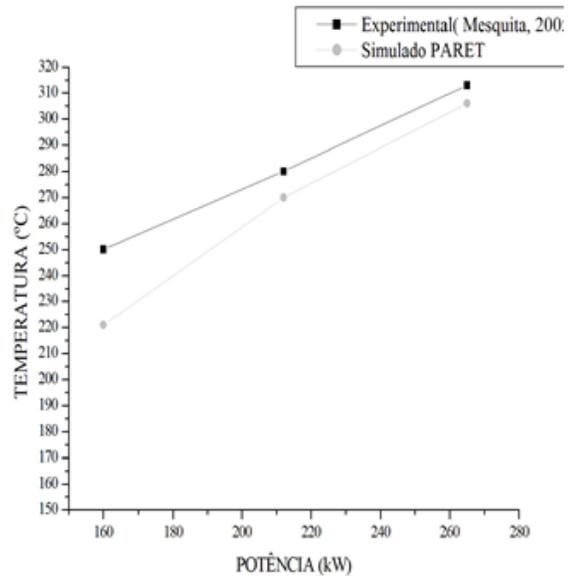


Figura 4. Temperatura x Potência

Nota-se que os dois gráficos possuem um perfil similar. O resultado encontrado mostra a proximidade dos valores obtidos com os dados experimentais, havendo uma diferença de 7°C para a potência de 265 kW, de 10 °C para a potência de 212 kW e de 21 °C para a potência de 160 kW. Esse resultado representa uma diferença que varia de 2,64% a um erro máximo de aproximadamente 8,4%. Um fator que pode ter levado a esse erro é que o PARET é um código conservativo, simplista, que utiliza o modelo de cinética pontual. Outro motivo é que foram simulados apenas três efeitos de feedback (temperatura, void e doppler), devido à falta de dados experimentais. O código, apesar de simples, mostra resultados satisfatórios.

4.2 Experimento de Inserções de Reatividade

Mantendo-se a potência inicial em 250 kW e realizando inserções de reatividade externa de 0,1 \$, 1 \$, 1,5 \$, 2,5 \$ e 3 \$ por 0,5 s, observamos os comportamentos da reatividade retroalimentada, da potência e da temperatura máxima no núcleo do combustível, conforme as figuras 5, 6 e 7.

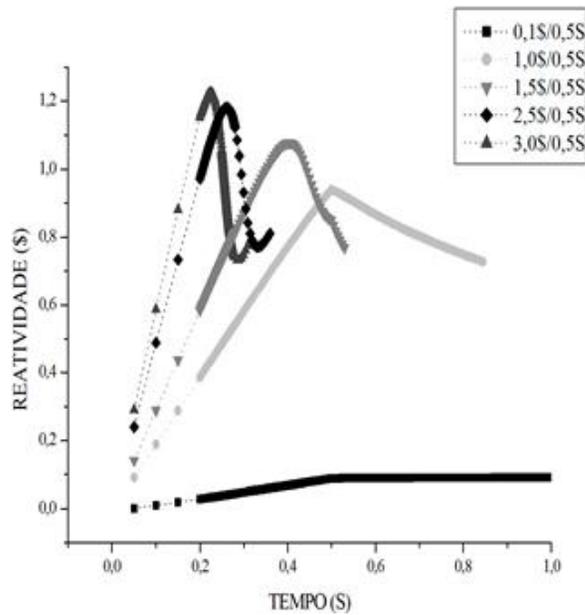


Figura 5. Reatividade x Tempo

Observa-se, na figura 5, que a reatividade sofre uma grande variação, atingindo um pico, mas ela tende a se estabilizar devido a autorregulação do reator. Isso ocorre porque a inserção de reatividade causa um aumento de potência e consequente aumento da temperatura. Este último efeito faz com que os núcleos fiquem mais espaçados, diminuindo os seus choques com nêutrons e diminuindo assim, a reatividade. A variação da reatividade retroalimentada, devido ao aumento da temperatura, é, dessa forma, determinada por variações de dois tipos de grandezas: as neutrônicas, como as secções de choque de absorção, e térmicas, como a diminuição da densidade do moderador.

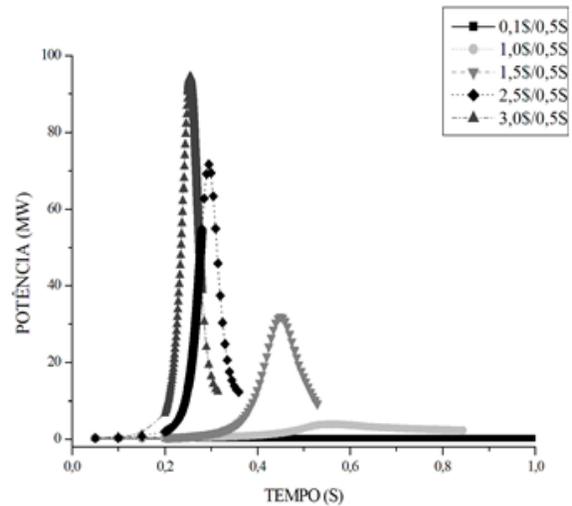


Figura 6. Potência x Tempo

O comportamento da potência, semelhante ao da reatividade, sofre um pico antes de 0,5 segundo. Esse fato pode ser atribuído ao coeficiente de reatividade negativo do combustível do IPR-R1, que interfere diretamente na potência, fazendo com que haja uma queda na taxa de variação. Porém, à medida que a reatividade aumenta, o período estável do reator diminui, tornando maior a probabilidade de aumentos incontroláveis e súbitos de potência, conforme apresentado no transitório de potência, na figura 6.

A figura 7 mostra que a temperatura máxima atingida no núcleo do combustível varia de acordo com a reatividade externamente inserida. Quando inserimos 0,1 \$/0,5 s, a temperatura varia de 296 °C a 303,9 °C. À medida que é aumentada a taxa de inserção de reatividade, as temperaturas máximas também sofrem um acréscimo. Quando inserimos 3 \$/0,5 s, a variação ocorre da mesma temperatura inicial, porém alcançando o patamar de 391 °C.

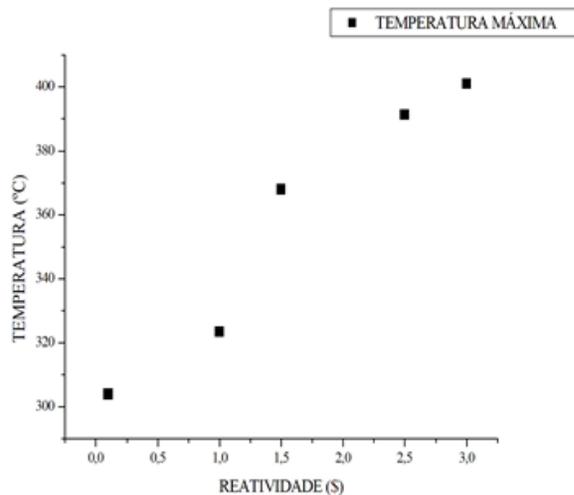


Figura 7. Temperatura Máxima do combustível em função da Reatividade Inserida Externamente

5 Conclusões

O limite de temperatura no IPR-R1 é devido à liberação de hidrogênio da liga de U-ZrH, pois esse hidrogênio causa uma pressão no material que reveste o combustível. A temperatura possui dois limites operacionais de temperatura [1]:

- Temperatura na qual o hidrogênio gasoso formado a partir do ZrH exerce uma pressão elevada no revestimento de alumínio. O valor dessa temperatura é função da relação H/Zr.
- Temperatura em que ocorre transformação de fase da liga U-ZrH. Acima da temperatura de 550 °C ocorre uma distorção progressiva do elemento combustível, provocando alterações significativas no seu volume. Essa temperatura constitui um limite de segurança para a operação do reator com combustível de baixa hidratação (H/Zr é menor que 1,6 para elementos com revestimento de Al).

Na prática, a temperatura limite do combustível com o revestimento de alumínio deverá ser 550 °C (transformação de fase). Embora nesta temperatura não ocorra a perda de integridade do revestimento, ela é um limite operacional, pois acima dela o combustível sofrerá alterações significativas no seu volume.

A análise realizada com o Código PARET indica que, mesmo com altas inserções de reatividade, como de 3 \$/0,5

s, a temperatura não atinge o limite operacional para curtos espaços temporais.

Referências

- [1] A. M. MESQUITA, “Investigação Experimental da Distribuição de Temperaturas no Reator Nuclear de Pesquisa TRIGA IPR-R1”, *Universidade Estadual de Campinas*, Campinas- SP (2005).
- [2] M. M. Haque; M.A. Zulquarnain; M.A. Salam, “Strengthening operational safety of the 3 MW TRIGA MK-II research reactor of Bangladesh Atomic Energy Commission through modification and upgrade of its water system.” *IAEA-CN-82/35*, Savar, Dhaka, Bangladesh, pp7 (2000).
- [3] M. B. Franco, “Levantamento de Parâmetros Nucleares do Reator TRIGA MARK 1 IPR-R1 com Configuração Concêntrica Visando a Aplicação da Técnica de Ativação Neutrônica K_0 ” *Universidade Estadual de Campinas*, Campinas-SP (2005).
- [4] A. C. I. RODRIGUES, “Análise de acidentes de inserção e reatividade postulados para reator IEA-R1m”. *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*, São Paulo-SP (1997)
- [5] C. F. OBENCHAIN, “PARET - A program for the analysis of reactor transients”, *Idaho National Engineering Laboratory*, Idaho (1969).
- [6] A. J. PINTO, “Simulação da evolução da potência de reatores nucleares de pesquisa utilizando o software Labview”, *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Vol. 14, N.º 1, pp. 51-61 (2010)
- [7] D. A. de ALENCAR, “Avaliação de integridade de revestimentos de combustíveis de reatores de pesquisa e teste de materiais utilizando o ensaio de corrente parasitas”, *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*, São Paulo-SP (2004).
- [8] M. M. EL-WAKIL, “Nuclear power engineering”. *McGraw-Hill Book Company*, New York, pp555 (1962)
- [9] GENERAL ATOMIC. “Safeguards summary report for the New York University TRIGA Mark I Reactor”. (*GA-9864*), San Diego, pp172 (1970)