



Estudo Neutrônico de Materiais Absorvedores de Nêutrons no Reator Avançado CANDU

Vinícius C. S. Costa, Michel C. B. de
Almeida and Clarysson A. M. Silva¹

¹*clarysson@nuclear.ufmg.br, Av. Antônio
Carlos, 6627, Campus UFMG PCA01 –
Anexo Engenharia, Pampulha,
31270-901 Belo Horizonte, MG*

1. Introdução

Em 2008 foi criado no Brasil o *National Institute for Advanced and Innovative Nuclear Reactors* (INCT-RNI), fruto da participação do país no *International Project on Innovative Nuclear Reactor and Fuel Cycle* (INPRO). A principal missão do INCT-RNI é realizar pesquisas e preparar recursos humanos para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras de reatores nucleares visando o desenvolvimento sustentável do Brasil. O Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais (DENU-UFMG) é uma das instituições que compõem o INCT-RNI e tem desenvolvido estudos relacionados a sistemas nucleares avançados como o *Advanced CANDU Reactor* (ACR).

O ACR (*Advanced CANDU Reactor*) é um reator tipo HWR (Heavy Water Reactor) que utiliza a água pesada (D₂O) como moderador, água leve (H₂O) como refrigerante e urânio levemente enriquecido como combustível. O ACR-1000 é um dos projetos propostos para este tipo de sistema e será o objeto deste trabalho. Este reator utiliza o CANFLEX-ACR como elemento combustível, o qual utiliza absorvedor de nêutrons, para auxílio no controle de reatividade [1]. Atualmente existem várias propostas de absorvedores para reatores a água pesada os quais têm sido estudados por vários pesquisadores [2][3]. No caso do ACR, o projeto inicial prevê dois conceitos de composição e geometria da vareta absorvedora: uma liga composta por óxido de zircônio dopado com óxidos de gadolínio e disprósio (liga Zr-Dy-Gd) [1][4] e uma vareta de zircônio revestido com háfnio (Hf) [5].

Este trabalho faz uma análise neutrônica do CANFLEX-ACR com o objetivo de avaliar o comportamento deste elemento combustível quando em sua vareta central é inserido tório (Th) e urânio empobrecido (DU) em comparação às propostas citadas.

2. Metodologia

O estudo foi desenvolvido no código SCALE 6.0, através de um modelo de célula combustível com superfícies externas refletoras. O elemento combustível simulado CANFLEX-ACR possui 42 varetas de combustível levemente enriquecido (UO₂ com 2,4%wt de ²³⁵U) e uma vareta central que contém o absorvedor de nêutrons [1]. Os absorvedores padrão Zr-Dy-Gd e Hf são inseridos de forma diferente no elemento combustível: a liga está localizada no eixo da vareta central, revestido por *Zircalloy* [1][4], e o Hf [5] como revestimento de uma vareta de zircônio. Para Th e DU optou-se pela disposição empregada na liga visando maior facilidade de fabricação.

A liga Zr-Dy-Gd é composta por óxidos de zircônio (ZrO_2), disprósio (Dy_2O_3) e gadolínio (Gd_2O_3), em que os absorvedores estão nas proporções 4%wt de Dy e 3%wt de Gd e massa específica 5,8 g/cm³ [6][7]. Para o Hf foi utilizada a composição isotópica natural do elemento e massa específica padrão do código SCALE 6.0, 13,31 g/cm³. O urânio empobrecido é inserido na forma UO_2 , com uma composição isotópica de 0,2%wt de ²³⁵U, 99,79%wt de ²³⁸U e 0,01%wt de ²³⁴U e massa específica de 10,2 g/cm³ [8]. Por fim, o tório foi utilizado na forma ThO_2 , com composição isotópica natural e massa específica 10,01 g/cm³ [9].

O estudo consiste numa análise comparativa entre os 4 absorvedores, sendo que para cada célula combustível, apenas um veneno queimável era utilizado. Foram avaliados a criticalidade (k_{inf}), o CVR do sistema e a evolução da composição do reator entre o início e o fim do ciclo.

3. Resultados

As análises iniciais no estado estacionário retornaram os resultados apresentados na tabela 1 para a criticalidade. O desvio padrão calculado é da ordem de $3 \cdot 10^{-4}$. É notável o aumento do k_{inf} quando utilizado tório e urânio empobrecido em comparação aos absorvedores padrão encontrados na literatura. O motivo para a diferença observada é principalmente a menor seção de choque macroscópica de captura radiativa para estes dois novos casos. Além disso, a presença de material físsil no DU, mesmo em pequenas quantidades, 0,2% de ²³⁵U em massa, também proporciona um aumento na criticalidade da célula combustível.

Tabela 1: Criticalidade do elemento combustível com cada absorvedor

	Zr-Dy-Gd	Háfnio	Th	DU
k_{inf}	1,00077	1,01967	1,06353	1,07407

O coeficiente de reatividade de vazio do refrigerante (CVR) para os quatro casos é apresentado na figura 1. Pode ser observado que a liga Zr-Dy-Gd e o Hf apresentam valores positivos de CVR. Este comportamento foi observado também para o Th e DU, que apresentaram uma evolução similar em função da fração de vazio, mas um pico consideravelmente maior quando VF é igual a 1, uma diferença de aproximadamente 17 mk. A razão mais uma vez está nas diferentes seções de choque macroscópicas de captura radiativa de cada material, que são menores para o Th e DU. Com menos absorções, um maior número de nêutrons está disponível para realizar fissão.

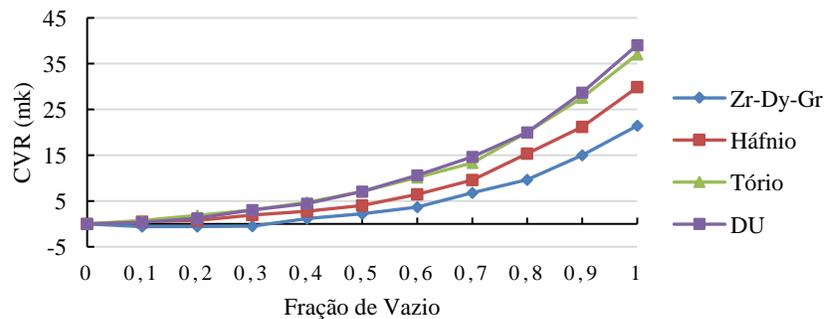


Figura 1: Coeficiente de reatividade de vazio para os absorvedores

Os valores da criticidade em função da queima para o elemento combustível CANFLEX-ACR são apresentados na figura 2. Em comparação aos absorvedores presentes a literatura, o Th e DU apresentam valores de criticidade notavelmente maiores, principalmente no início da queima, tendendo a um k_{inf} similar próximo ao fim do período de queima. Esta diferença inicial se deve ao maior número de absorções que ocorrem no Zr-Dy-Gd e Hf, em razão das seções de choque, o que reduz a quantidade de nêutrons disponíveis.

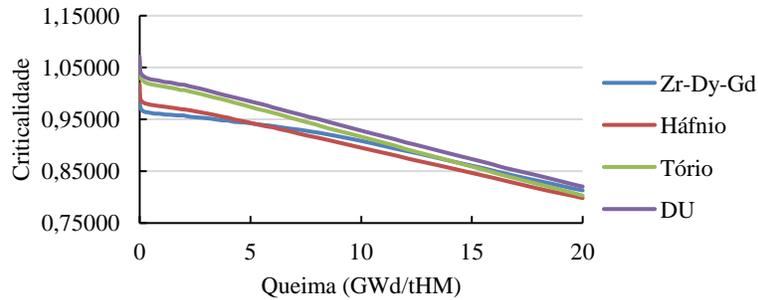


Figura 2: Criticidade em função da queima para os absorvedores

O comportamento observado se deve principalmente à atuação dos absorvedores. Ao se comparar o comportamento da criticidade das células com a variação da composição dos absorvedores, apresentada na figura 3, podemos observar que o maior número de absorções leva ao consumo mais acelerado do veneno. Considerando este comportamento, vemos que o Hf foi o veneno que mais absorveu nêutrons ao longo da queima. A liga Zr-Dy-Gd, por sua vez, se mostrou mais eficiente no início da queima e apresentou valores maiores de k_{inf} ao fim do ciclo. Isso se deve aos grandes valores de seção de choque de Gd, que rapidamente é consumido, deixando as absorções da liga em função do Dy.

Da variação da composição dos absorvedores, observamos o aumento do ^{178}Hf , que se deve à maior seção de choque de ^{177}Hf , o que leva ao acúmulo desse nuclídeo. Além disso, há a formação de ^{233}U a partir do ^{232}Th . O mesmo ocorre com o DU, com a produção de ^{239}Pu a partir do ^{238}U , e o ^{235}U já presente. Estes nuclídeos contribuem para um aumento do material físsil presente no elemento combustível.

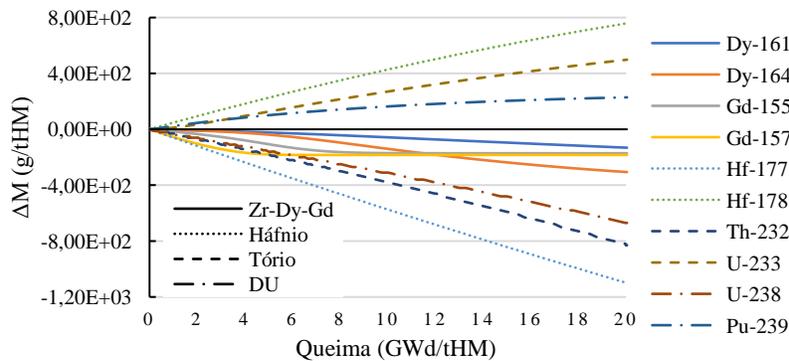


Figura 3: Variação da composição isotópica dos absorvedores

4. Conclusões

De modo geral, a menor capacidade de absorção do Th e DU eleva tanto a criticalidade da célula, principalmente nos momentos iniciais da queima, quanto o CVR, evidenciando uma menor efetividade destes absorvedores em controlar a reatividade do elemento combustível, quando comparado ao Zr-Dy-Gd e Hf, absorvedores já citados na literatura. Por outro lado, estes valores elevados indicam a possibilidade de se reduzir o enriquecimento do combustível, principalmente quando utilizado o DU, visto que sua criticalidade é maior que a dos demais absorvedores ao longo de toda a queima.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Professora Cláudia Pereira Bezerra Lima por executar as simulações no código SCALE 6.0 e agradecem agências de fomento à pesquisa: FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamentos de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear).

Referências

- [1] AECL, “ACR-1000 Technical Description Summary”, 1^a ed., Ontario, January (2010).
- [2] PIERCE, Dylan JC; CHAN, Paul K.; SHEN, Wei. Mitigation of End-Flux-Peaking in Fresh CANDU Fuel Bundles Using Neutron Absorbers. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, v. 6, n. 3, p. 031601, 2020.
- [3] BEZDEDEANU-NEACSA, R.; RIZOIU, A.; PRISECARU, I. Reducing Void Effect in Thorium-Based Advanced Candu Cells by Using Burnable Absorbers. *Journal of Nuclear Research and Development*, p. 27-33, 2018.
- [4] Stephen Yu, “ACR-1000 Design Overview”, Presentation to PEO/CNS, Chalk River, (2008).
- [5] Iosif Prodea et al., Void Reactivity Evaluation Using Hafnium Absorber in Advanced Candu Fuel Cells, University "Politehnica" of Bucharest Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering, vol. 72, no. 2, pp. 239-246, (2010).
- [6] Hill, et al., MCNP Simulations of End Flux Peaking in ACR-1000, 2.4 wt % ²³⁵U Fuel Bundles, IYNC 2008: International Youth Nuclear Congress 2008, Switzerland, (2008).
- [7] Costa, V. C. S. et al., Estudo Neutrônico do Uso de Veneno Queimável em Reatores CANDU Avançados. Belo Horizonte, V SENCIR, Maio (2021).
- [8] Saleh, I. H.; Abdel-Halim, A. A. Determination of depleted uranium using a high-resolution gamma-ray spectrometer and its applications in soil and sediments. *Journal of Taibah University for Science*, v. 10, n. 2, p. 205-211, 2016.
- [9] Lang, S. M.; Knudsen, F. P. Some Physical Properties of High-Density Thorium Dioxide. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 39, n. 12, p. 415-424, 1956.