



## **ANÁLISE NEUTRÔNICA DE ELEMENTOS DE UM REATOR PWR COM COMBUSTÍVEL REPROCESSADO E TÓRIO**

**Víctor F. Castro<sup>1</sup>, Fabiana B. A. Monteiro<sup>1</sup>, Claúbia Pereira<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Nuclear  
Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627  
victorfariacastro@gmail.com

**Palavras-Chave:** Núcleo, Reprocessamento, Tório, Seção de choque

### **RESUMO**

O trabalho consistiu no estudo do comportamento de elementos combustíveis de um PWR nos quais foi inserido combustível nuclear reprocessado e diluído em tório através da técnica UREX+. Os parâmetros estudados incluem o fator de multiplicação e a composição isotópica ao final de um período de queima, usando o módulo TRITON que acopla os códigos NEWT para transporte neutrônico utilizando metodologia determinística, e ORIGEN-S, para a queima, todos eles parte do pacote de códigos SCALE6.0. Juntamente com esse estudo, foram geradas bibliotecas de seções de choque colapsadas e homogeneizadas a dois grupos de energia para futura aplicação em códigos que utilizam métodos de difusão nodal, em particular o código PARCS.

### **1. INTRODUÇÃO**

A utilização de tório como combustível para reatores nucleares é estudada desde os princípios do desenvolvimento da área nuclear. O ciclo deste combustível, desde então é considerado uma alternativa, entre outras, ao uso de urânio [1]. No Brasil, estima-se que existam abundantes reservas de tório em torno de 0,60 milhões de toneladas, supondo-se ser a maior reserva no mundo, que totaliza cerca de 2,23 milhões de toneladas [2].

Além da abundância deste material, uma das grandes vantagens de seu uso como combustível em reatores é a existência de um isótopo fértil de tório. No caso do tório natural, mais de 99,9% encontrado na natureza é o isótopo <sup>232</sup>Th que ao interagir com um nêutron, pode converter-se em <sup>233</sup>U, que é um isótopo físsil.

Desta forma, nos anos 60, foi criado no Brasil um grupo para estudo e desenvolvimento de combustíveis baseados em tório, dentro do Programa Nuclear Brasileiro, mas logo foi abandonado no final desta mesma década, por decisão do governo brasileiro. Desde então, alguns programas de pesquisa e desenvolvimento nesta área foram criados, mas com acordos realizados entre governos brasileiro e alemão para construção de outros reatores PWR no Brasil, estes programas foram terminados [3].

Aliando-se as vantagens do ciclo de combustível do tório com a ideia de reprocessamento e reutilização do combustível queimado, diversos estudos vêm sendo realizados para a utilização de tório como possível diluidor do combustível queimado reprocessado. Neste âmbito, o Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG tem apresentado, desde a década de 90, novos estudos de técnicas de reprocessamento com a inclusão de tório, dentre eles pode-se citar [4] [5]. Baseando-se então nestas novas técnicas, a ideia é



ampliar os dois trabalhos citados anteriormente, e verificar o comportamento do núcleo, quando da inserção de elementos constituídos por estes combustíveis. Para isso faz-se necessário gerar as seções de choque macroscópicas correspondentes e então utilizá-las para a simulação dinâmica do núcleo e avaliar parâmetros tais como distribuição de potências, fatores de picos, etc. e como estes combustíveis podem interferir na segurança do núcleo.

Este trabalho é a parte inicial deste projeto. Inicialmente, um elemento combustível é montado com combustível nuclear reprocessado utilizando a técnica UREX+ em elementos combustíveis PWR e então diluído em tório. Para averiguar o modelamento foram analisados a evolução da criticalidade e a composição isotópica deste elemento ao ser irradiado. Os códigos utilizados foram o NEWT para o transporte de nêutrons e o ORIGEN-S para a queima. O módulo TRITON acopla estes dois programas e também conta com a funcionalidade do tratamento de seções de choque levando-se em conta a distribuição das células de combustível no elemento. Todos eles fazem parte do pacote de códigos SCALE6.0 [6]. O código NEWT possui a funcionalidade de obter parâmetros físicos para a geração de dados de seções de choque para a criação de uma biblioteca que pode ser usada em códigos de difusão nodais. Assim, esta função foi implementada no modelo criado, obtendo-se seções de choque homogeneizadas e colapsadas a duas energias.

## 2. METODOLOGIA

A modelagem dos elementos combustíveis baseou-se nos dados do reator disponíveis no FSAR (Relatório Final de Análise de Segurança) da usina de Angra 2 [7]. Trata-se de um PWR desenvolvido pela Siemens/KWU (atual Areva NP) em conjunto com a Eletrobras do Brasil. Seguindo este documento, 6 tipos de elementos combustíveis estão presentes no núcleo do reator de Angra 2, com diferentes enriquecimentos e quantidade de varetas contendo veneno queimável.

A Tab. 1 contém os parâmetros dos elementos combustíveis usados. Estes elementos são refrigerados e moderados com água leve e, para o desenvolvimento deste trabalho, foi considerado que não havia boro diluído em nenhuma das etapas de queima. Os seis tipos de elementos presentes no núcleo do reator são descritos na Tab. 2.

Tab. 1 Parâmetros dos elementos combustíveis do PWR de Angra 2.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Tipo de elemento	16x16
Passo do elemento	23,11 cm
Número de varetas combustíveis por elemento	236
Número de tubos guia por elemento	20
Passo das varetas	1,43 cm
Comprimento ativo	391,6 cm
Material do veneno queimável	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Material do revestimento e tubo guia	Zircaloy 4



Tab. 2. Tipos de elementos presentes no núcleo do reator de Angra 2.

Enriquecimento de $\text{UO}_2$ em $^{235}\text{U}$	Número de varetas contendo veneno queimável
1.9%	0
2.5%	0
	12
3.2%	0
	8
	12

No trabalho realizado para este artigo, os materiais combustíveis com  $\text{UO}_2$  foram totalmente substituídos por uma mistura de combustível reprocessado diluído em tório a 22,5% [8]. Este valor foi obtido em uma análise de criticalidade utilizando a sequência CSAS6, também parte do SCALE6.0, de forma a preservar o mesmo valor de criticalidade do núcleo. Nesta análise, obteve-se o  $k_{\text{eff}}$  do núcleo usando combustível fresco. Em seguida, todo o material combustível  $\text{UO}_2$  do núcleo foi substituído pelo combustível reprocessado diluído em tório a diferentes concentrações, variando entre 1% e 25%. Os  $k_{\text{eff}}$  destes modelos foram obtidos e comparados com o  $k_{\text{eff}}$  do núcleo com combustível fresco. À concentração de 22,5% de tório no combustível reprocessado, os  $k_{\text{eff}}$  dos núcleos modelados com diferentes combustíveis são idênticos e este foi o valor usado na análise dos elementos deste artigo.

Ao substituir o combustível  $\text{UO}_2$  dos elementos pelo combustível reprocessado, os elementos que possuem a mesma quantidade de varetas de combustível poderão ser modelados apenas uma única vez (i.e., os elementos com  $\text{UO}_2$  enriquecido a 2,5% e 3,2%, contendo 12 varetas de veneno queimável serão idênticos ao substituir o  $\text{UO}_2$  pelo combustível reprocessado). Desta forma, apenas três tipos de elementos combustíveis foram estudados de acordo com a quantidade de varetas de veneno queimável presentes (0, 8 e 12). Um quarto caso foi também modelado para os elementos localizados na borda do núcleo, levando-se em conta sua proximidade com o refletor axial. Estes elementos na borda do reator não possuem varetas de veneno queimável. Este caso se faz indispensável para calcular parâmetros necessários em códigos nodais, em particular, o fator de descontinuidade do elemento (ADF – Assembly Discontinuity Factor) na interface elemento-refletor.

Como dito anteriormente, o código NEWT permite a colapsoção dos grupos de energia e a homogeneização de materiais utilizados. Para a geração de seções de choque, 238 grupos foram colapsados a 2 grupos, sendo o primeiro o grupo rápido com energias entre 20 MeV a 4 eV e o segundo de 4 eV a  $10\text{E}-5$  eV. As temperaturas utilizadas para a queima foram de 873 K para o combustível, 618 K para o revestimento e 583 K para o moderador. O tempo de queima foi de 868,5 dias à potência específica constante de 38 MW/MTU sem paradas e sem tempo de resfriamento ao final desse período.

Da Fig. 1 à Fig. 3 estão representados os três tipos de elementos considerados. A configuração dos elementos foi obtida pelo relatório referenciado em [7].

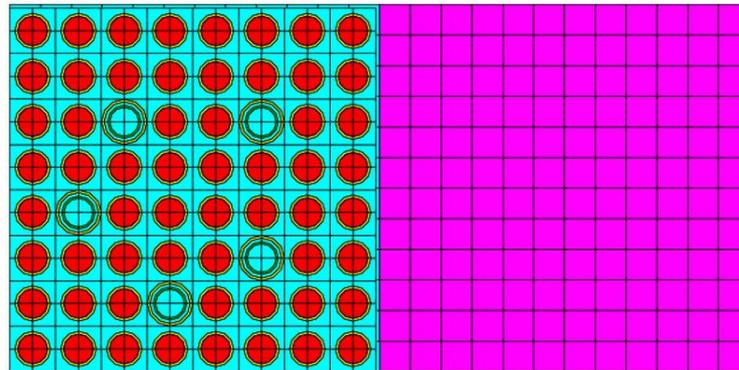


Fig. 2. 1/4 de elemento com 0 varetas de veneno queimável e refletor.

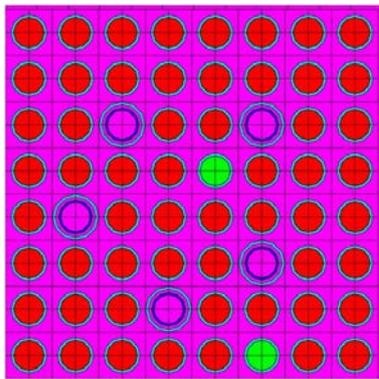


Fig. 3. 1/4 de elemento com 8 varetas de veneno queimável.

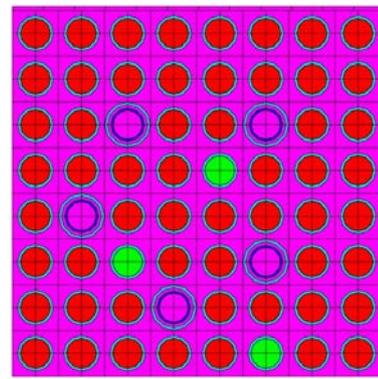


Fig. 4. 1/4 de elemento com 12 varetas de veneno queimável.

### 3. RESULTADOS

Os resultados apresentados representam as evoluções do  $k_{inf}$  e da composição isotópica de alguns dos principais actinídeos durante o período de queima especificado no capítulo anterior. Na Fig. 4, pode-se verificar o comportamento do fator de multiplicação de nêutrons infinito durante a queima dos elementos.

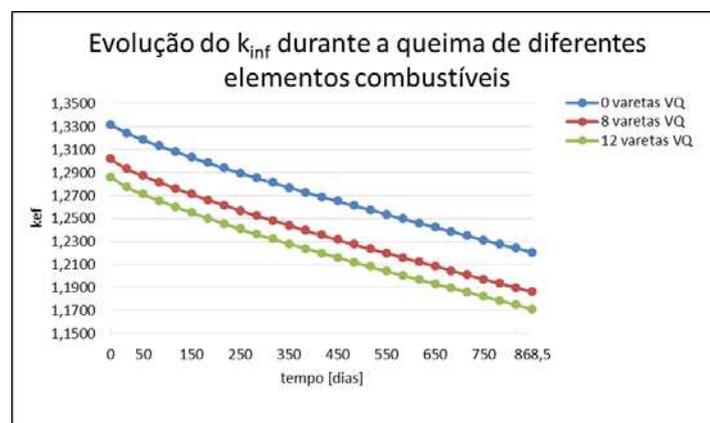


Fig. 5. Evolução do  $k_{inf}$  durante a queima dos elementos combustíveis.



A presença de varetas de veneno queimável em um elemento reduz o  $k_{inf}$  devido às grandes seções de choque de absorção de nêutrons dos  $^{155}\text{Gd}$  e  $^{157}\text{Gd}$ . O fato de que a inserção de veneno queimável introduz reatividade negativa no sistema, pode ser utilizado para prolongar-se o tempo de queima.

Da Fig. 5 à Fig. 8 é possível verificar a evolução isotópica em gramas do  $^{233,235}\text{U}$  e  $^{239,241}\text{Pu}$  durante o período de queima.

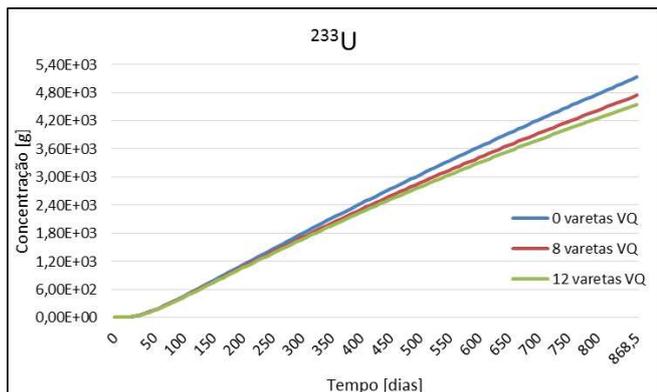


Fig. 6. Concentração de  $^{233}\text{U}$  durante a queima

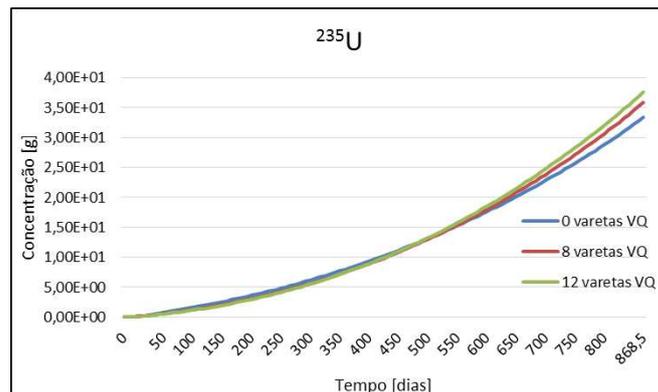


Fig. 7. Concentração de  $^{235}\text{U}$  durante a queima

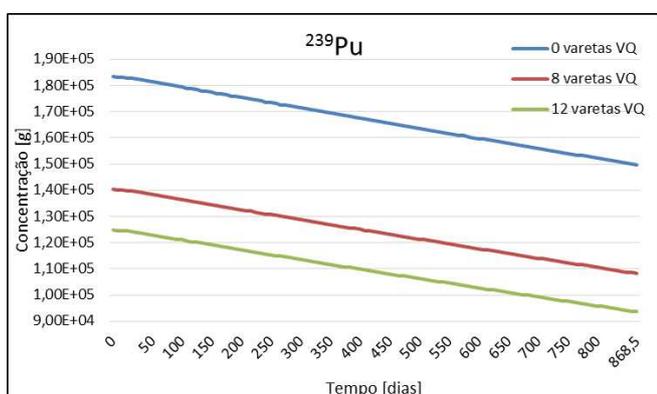


Fig. 8. Concentração de  $^{239}\text{Pu}$  durante a queima.

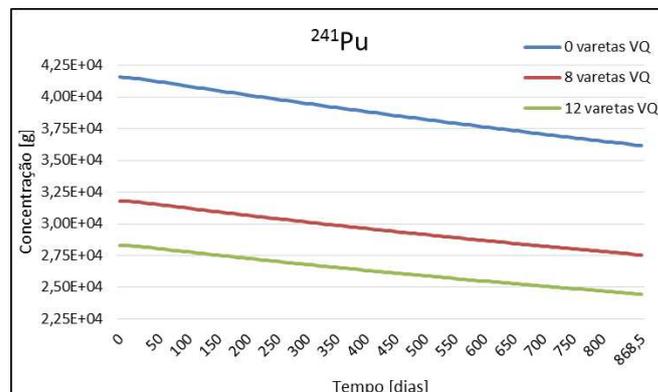


Fig. 9. Concentração de  $^{241}\text{Pu}$  durante a queima.

Verifica-se que, enquanto a quantidade de plutônio decresce durante a queima, existe um acréscimo de urânio, proveniente do combustível reprocessado, em particular, do  $^{233}\text{U}$ , parte do ciclo do tório que é o objeto de estudo. A presença de outros isótopos neste ciclo, em particular o  $^{233}\text{Pa}$  que tem alta seção de choque de absorção de nêutrons na faixa térmica, não impede o acúmulo do  $^{233}\text{U}$ . O período de queima avaliado é curto o suficiente para verificar que não há equilíbrio entre a queima de  $^{233}\text{U}$  e sua produção. Trabalhos futuros deverão incluir um tempo maior de irradiação para uma avaliação mais detalhada da produção deste isótopo.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, avaliou-se o comportamento de combustíveis reprocessados diluídos em tório durante sua irradiação. Realizaram-se cálculos de transporte e queima em três tipos de elementos combustíveis de um



PWR com variadas quantidades de veneno queimável, utilizando os códigos NEWT e ORIGEN-S acoplados pelo TRITON.

Resultados em termos do fator de multiplicação infinito foram apresentados e são coerentes com o modelo simulado, de modo que o elemento com menor quantidade de veneno queimável apresenta valores de  $k_{ef}$  maiores durante todas as etapas de queima.

Além desses parâmetros, foi possível obter os valores de seções de choque colapsadas e homogêneas, e dos ADF's dos sistemas modelados. À continuação deste trabalho propõe-se gerar mais parâmetros neutrônicos variando-se a temperatura do combustível e do moderador para a criação de uma biblioteca de seções de choque para utilização no código PARCS.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos às agências de fomento à pesquisa, CAPES, CNPq e FAPEMIG, que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] International Atomic Energy Agency, "Thorium fuel utilization: Options and trends," Viena, 2002.
- [2] International Atomic Energy Agency, "Thorium fuel cycle - Potential benefits and challenges," Viena, 2005.
- [3] J. R. Maiorino and T. Carluccio, "A Reviewe of Thorium Utilization as an option for Advanced Fuel Cycle - Potential Option for Brazil in the Future," in ANES 2004: Americas Nuclear Energy Symposium, Miami Beach, October 2004.
- [4] Euzimar Marcelo and Cláudia Pereira, "Avaliação Neutrônica da Utilização de Tório na Composição de Combustíveis por Técnicas de Baixo de Grau de Descontaminação," in 11th Meeting on Reactor Physics and Thermal Hydraulics, Poços de Caldas, 1997.
- [5] Fabiana B. A. Monteiro and Rochkhudson B. de Faria, "Assessment of the Insertion of Reprocessed Fuels and Combined Thorium Fuel Cycles in a PWR System," in 2014 IMRC Meeting, Cancun, 2014.
- [6] SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vols. I-III, January 2009, Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-750.
- [7] Eletrobras Termonuclear S.A., "Final Safety Analysis Report - FSAR Angra 2," Rio de Janeiro, 1999.
- [8] Monteiro, F. B. A. "Proposta de Combustível Reprocessado Micro Heterogêneo Diluído em Tório para Sistemas PWR.", Tese, Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. No prelo.