



## **PROPOSTA DO USO DO TÓRIO COMO COMBUSTÍVEL EM REATORES NUCLEARES DE PESQUISA TRIGA®**

**Welen N. Lima, Amir Z. Mesquita**

<sup>1</sup>Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear  
Av. Antônio Carlos, 6627 campus UFMG  
31270-901, Belo Horizonte, MG

[welennunes@gmail.com](mailto:welennunes@gmail.com)  
[amir@cdtn.br](mailto:amir@cdtn.br)

**Palavras-Chave:** Triga IPR-R1; Análise Neutrônica; Monte Carlo, Tório.

### **RESUMO**

O ciclo do tório oferece várias vantagens em potencial sobre um ciclo de combustível do urânio. Ele possui propriedades físicas e nucleares superiores e produção reduzida de resíduos radioativos. Além disso, o Brasil possui vastas reservas de tório. O banco de dados da Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA coloca o país como detentor da maior reserva torífera mundial, muito embora o Brasil tenha oficialmente prospectado apenas um terço do território nacional para minerais atômicos. Tório é um elemento químico mais leve que o urânio e três a quatro vezes mais abundante no planeta, além de poder ser utilizado como combustível em reatores nucleares. O principal objetivo deste trabalho é apresentar um projeto para estudo da viabilidade técnica que justifique a fabricação e utilização do tório como combustível nuclear a partir de códigos neutrônicos e numéricos. O projeto a ser desenvolvido futuramente avaliará parâmetros como fator de multiplicação efetivo e outros parâmetros do núcleo de um reator tipo Triga a partir de códigos baseados no método Monte Carlo. Pretende-se concluir que é possível usar o Th-232 como combustível misto no reator Triga IPR-R1 do CDTN. Dessa forma este paper baseia-se na parte inicial do projeto, ou seja, apresenta parte do estado da arte sobre o uso do Th-232 e a metodologia a ser adotada para o desenvolvimento do projeto.

### **1. INTRODUÇÃO**

O tório oferece um elevado rendimento de nêutrons, o que é vantajoso para reações nucleares em cadeia. Essa característica permite prolongar a duração do combustível nuclear e tem o potencial de reduzir os custos de produção em comparação com os combustíveis nucleares convencionais, que utilizam urânio ou uma combinação de urânio e plutônio reciclado. Entre suas qualidades, o tório se destaca por sua fertilidade, estabilidade sob irradiação e a possibilidade de reciclagem. A adoção desse



combustível está ligada à maior sustentabilidade dos reatores regeneradores e à diminuição da quantidade de urânio necessária para gerar energia nuclear. Reatores novos que utilizam tório como combustível apresentam maior segurança em relação aos reatores atuais que utilizam urânio enriquecido [1]. O urânio-238 assim como o tório-232 são materiais férteis. Na natureza, praticamente, 100% do tório é o Th-232. O Th-231, que seria fissil, só se encontra traços. Os combustíveis nucleares são constituídos, em geral, por uma mistura de material fissil e material fértil. São usados como combustível, por exemplo, urânio (U-235 ou U-235 + U-238), mistura de urânio e tório (Th-232 + U-233) e de urânio e plutônio (U-238 + Pu-239), etc. O desenvolvimento do ciclo do combustível de urânio precedeu ao do tório devido à ocorrência natural de um isótopo fissil do urânio, o U-235.

### 1.1. Grupo do Tório do IPR/UFMG

Em qualquer trabalho sobre o uso do tório em reatores, não se pode deixar de mencionar o Grupo do Tório. Os trabalhos deste grupo iniciaram-se em 1965, dentro da Divisão de Engenharia de Reatores do Instituto de Pesquisas Radioativas – IPR/UFMG (hoje CDTN). A principal atribuição deste grupo era estudar as possibilidades técnicas e econômicas da utilização do tório em um programa nuclear autônomo. Para dar partida a um reator tendo como combustível o tório (material fértil), é preciso de uma adequada quantidade de material fissil, ou seja: urânio-235 (urânio enriquecido) ou plutônio-239 (criado pela captura de um nêutron pelo isótopo urânio-238). Não existiam, na época, instalações de enriquecimento de urânio no Brasil. Assim, para projetar um reator a tório, era necessário projetar e montar um reator a urânio natural e água pesada. Para conseguir o isótopo fissil (Pu-239) para a partida do reator a tório, construiu-se um reator de pesquisa a água pesada, o Capitu (Circuito de Água-Pesada Tório-Urânio). O objetivo final era a construção de um reator regenerador, que transforma tório-232 (isótopo fértil) em urânio-233 (isótopo fissil) [2].

O Grupo do Tório se destacou pela formação de mestres e doutores nos países desenvolvidos e pelas publicações técnicas relevantes na área de reatores nucleares. O grupo fazia parte de um programa de cooperação com a França. Pesquisadores foram enviados para treinamento neste país na área de transferência de calor em reatores. O Brasil nunca havia projetado um reator nuclear de potência. O Grupo do Tório era formado por engenheiros que queriam aproveitar a abundância de tório no país. A comunidade de pesquisadores nucleares do Brasil era formada por investigadores que atuavam com física teórica e física aplicada. O diferencial do Grupo do Tório foi a formação de um núcleo de engenheiros entre o grande número de físicos da época. Os engenheiros davam importância à transferência de calor, ao fluxo de nêutrons, à metalurgia, aos materiais estruturais, etc. Assim, foram originadas as primeiras instalações nacionais de pesquisa relativas aos reatores de potência. Foram montados, no IPR (hoje CDTN), um Laboratório de Termo-hidráulica, uma Unidade Subcrítica e um Laboratório de Testes de Componentes Nucleares. Foram compradas seis toneladas de água pesada nos Estados Unidos. A equipe realizou vários experimentos de física de reatores e construiu várias montagens experimentais de reticulados com água pesada,



para posicionamento de combustíveis a urânio natural, nestes laboratórios. Grande quantidade de trabalhos foram publicados e comparados com resultados internacionais. O grupo alcançou uma grande notoriedade na época, principalmente, entre os segmentos nacionalistas brasileiros. O grupo chegou a projetar um protótipo de reator de 30 MW, capaz de operar com 3 misturas de combustível em água pesada: urânio enriquecido e tório - Projeto Instinto, urânio natural - Projeto Toruna e plutônio tório - Projeto Pluto [3], [4].

Em 1975, com o acordo Brasil - Alemanha Ocidental, a opção pelo reator a urânio enriquecido e água leve, abortou as pesquisas em andamento pelo Grupo do Tório e este foi extinto. Entretanto, já na época do CDTN, ocorreram estudos sobre a utilização do tório como combustível nuclear em reatores PWR, que passaram a ser feitos em cooperação com o Centro Nuclear de Jülich da Alemanha. Estes trabalhos indicaram a viabilidade de seu uso em reatores PWR, com ganhos substanciais em economia de combustível [5].

Convém ressaltar que, atualmente, o conceito de reatores regeneradores (*breeder*), que é o caso dos reatores que utilizam tório-232, encontra-se novamente em destaque. Dos seis conceitos adotados para a nova geração de reatores (Geração 4), três são reatores rápidos [6].

## 1.2. Elemento Combustível do Reator Triga IPR-R1

Os elementos combustíveis do Reator Triga IPR-R1 são de dois tipos, sendo a maioria com revestimento em alumínio e quatro revestidos em aço inoxidável. Na Figura 1 é apresentado um desenho do elemento combustível revestido em aço inoxidável. As simulações a serem realizadas nesta proposta, serão em um elemento que terá a mesma geometria e componentes do elemento em aço inoxidável, a não ser a liga combustível, que terá concentrações diferentes de tório. Será também simulado trocando o revestimento de aço inox por zircaloy-4 [7].

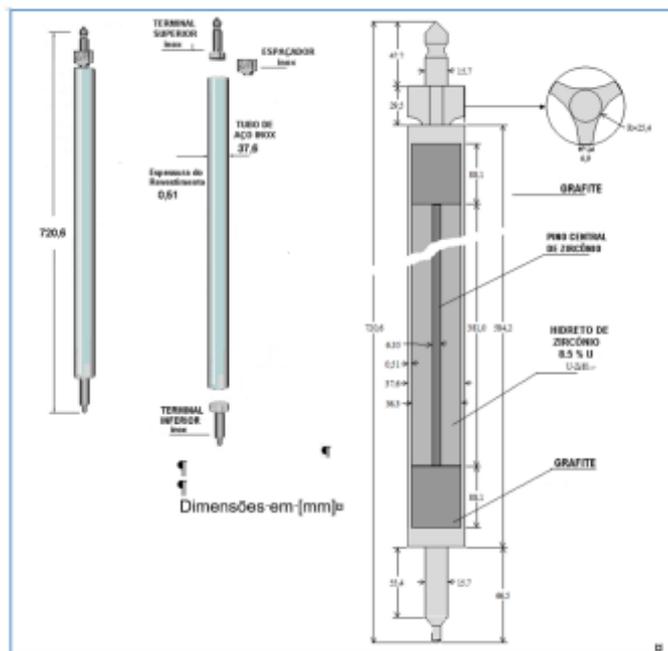


Figura 1. Elemento combustível triga com revestimento de aço-inoxidável [8]

No núcleo atual do reator Triga IPR-R1 está carregado com dois tipos de elemento combustível. Eles têm a forma cilíndrica e entre o combustível e o revestimento existe um pequeno espaço (*gap*) preenchido com hélio. A maioria (59) são do primeiro carregamento do reator e tem o revestimento em alumínio 1100F, com 0,76 mm de espessura. Em 2002 foram adicionados 4 elementos novos com revestimento em aço inoxidável (AISI-304), com 0,5 mm de espessura de parede. O comprimento total do elemento é de 72,24 cm tendo sua parte ativa 35,56 cm de altura (Al) e 38,10 cm (inox) e o diâmetro é 3,56 cm (Al) e 3,63 cm (inox). O elemento combustível revestido com alumínio possui nas duas extremidades da parte ativa dois discos de “veneno” queimável constituído de óxido de samário. Completando o elemento, existe em cada extremidade um tarugo de grafita que atua como refletor axial possuindo o mesmo diâmetro da parte ativa e altura de 10,16 cm (Al) e 8,64 cm (inoxidável). O elemento combustível de aço inoxidável possui em seu centro uma vareta de zircônio de 6,35 mm de diâmetro. Além dos refletores axiais, em cada extremidade dos elementos existem terminais de apoio em alumínio ou inox, conforme o tipo do combustível [9].

Cada elemento é constituído por uma mistura homogênea de urânio metálico (combustível) e hidreto de zircônio (moderador de nêutrons). A mistura combustível no elemento com revestimento de alumínio contém 8,0% em peso de urânio, 91% de zircônio e 1,0% de hidrogênio; no elemento com revestimento de aço, estas percentagens são 8,5%, 89,9% e 1,6%. Estes dois compostos, urânio e hidreto de zircônio, são caracterizados pelas fórmulas  $U-ZrH_{1,0}$  e  $U-ZrH_{1,6}$ , respectivamente. O enriquecimento em  $^{235}U$  é de 20% em ambas as misturas combustíveis. Cada elemento combustível-moderador possui cerca de 37 g de U-235, sendo seu peso total de 3 kg [8].



## 2. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos serão utilizados códigos baseados no método Monte Carlo para simulação dos parâmetros neutrônicos. A referência será o elemento combustível com revestimento em aço inoxidável utilizado no reator Triga IPR-R1 do CDTN, ou seja, combustível de urânio metálico enriquecido a 20%. As porcentagens em peso de cada componente são: 8,5% de urânio, 89,9% de zircônio e 1,6% e hidrogênio. Esta liga, urânio e hidreto de zircônio, é caracterizada pela fórmula  $U-ZrH_{1,6}$ .

A simulação, aqui proposta, será realizada com o núcleo do Triga abastecido com elementos combustíveis contendo uma mistura urânio e tório (Th-U metálico), em várias concentrações (fórmula  $Th-U-ZrH_{1,6}$ ). Serão realizados cálculos com diferentes razões Th/U, com porcentagem do tório, em peso, sempre maior que do urânio. As potências de operação simuladas serão de 100 kW e 250 kW. Na Figura 2 tem-se a configuração atual do núcleo do reator Triga IPR-R1.

Serão simulados, utilizando códigos neutrônicos, de modo a obter resultados teóricos tais como: fator de multiplicação de nêutrons, excesso de reatividade, coeficiente da reatividade/temperatura, reatividade de barras de controle, reatividade de elementos combustíveis, os elementos remanescentes da queima (*burnup*), distribuição de potência, fluxo de nêutrons nos dispositivos de irradiação e calor de decaimento do combustível após terminada sua vida operacional. Uma avaliação importante será a previsão da produção resultante de urânio-233 e o surgimento dos venenos resultantes da queima.

A maioria destes parâmetros são obtidos diretamente a partir do fator de multiplicação de nêutrons ou da distribuição do fluxo. A determinação desses parâmetros é fundamental no projeto de reatores nucleares e permite otimizar e analisar vários aspectos relativos à sua operação. Permitirá também ajudar a identificar e prevenir possíveis violações das condições seguras de operação [10].





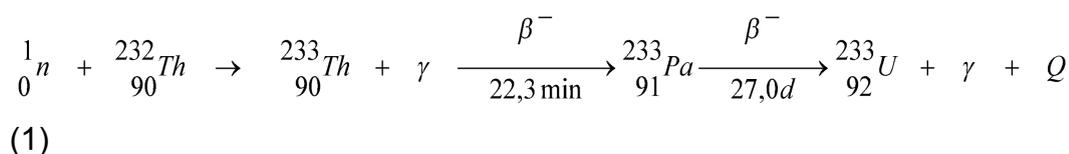
### 3. JUSTIFICATIVA

A licença de fabricação de combustíveis para reatores Triga foi transferida, há alguns anos, da General Atomics (San Diego, Califórnia, EUA), para a empresa Cerca (Compagnie pour l'Etude et la Realisation de Combustibles Atomiques). A Cerca é uma subsidiária da Framatome, localizada na cidade de Romans (França). Recentemente, foi anunciado que a Cerca fechará a linha de fabricação Triga, principalmente, porque teria de investir um capital significativo para atualizar a instalação e cumprir os novos requisitos de licenciamento da autoridade reguladora francesa. Consequentemente, todos os reatores Triga no mundo teriam sua operação interrompida devido à indisponibilidade de combustíveis novos para sustentar a operação [12].

Estes é um dos motivos que justificam pesquisas no desenvolvimento de combustíveis para os reatores Triga. A seguir serão apresentadas algumas características da importância da utilização do tório e do revestimento em zircaloy nos elementos combustíveis Triga.

O desenvolvimento de combustíveis à base de tório foi motivado pelas propriedades nucleares do ciclo do combustível desse elemento, quando aplicado em reatores térmicos, serem superiores à de outros elementos. No ciclo do tório, o isótopo  $^{232}\text{Th}$ , em vez de  $^{238}\text{U}$ , seria o material fértil, e o isótopo  $^{233}\text{U}$  seria o principal actínido físsil, desempenhando o papel atribuído ao  $^{239}\text{Pu}$  no ciclo do urânio. Comumente, o tório quando utilizado em reatores nucleares é na forma de  $\text{ThO}_2$  em pastilha cerâmica, que é uma das substâncias sólidas mais inertes quimicamente disponíveis e apresenta muitas vantagens sobre o  $\text{UO}_2$ , como ponto de fusão mais alto (um dos maiores existentes). Não possui predisposição à oxidação e, em temperaturas de operação usuais dos elementos combustíveis nos reatores, sua condutividade térmica é maior que a do  $\text{UO}_2$  [13].

Em relação aos dados nucleares, para o espectro de nêutrons térmicos, a seção de choque de captura neutrônica do  $^{232}\text{Th}$  é (7,6 barns), quase três vezes maior que a do  $^{238}\text{U}$  (2,7 barns). A alta taxa de captura em materiais férteis, implica que em reatores à base de tório existe a necessidade de um maior enriquecimento e, quando essa necessidade é atendida, a conversão de  $^{232}\text{Th}$  (para  $^{233}\text{U}$ ) é mais alta que a do  $^{238}\text{U}$  (para  $^{239}\text{Pu}$ ). Assim, o tório é um melhor material fértil que  $^{238}\text{U}$  em reatores térmicos [14]. O  $^{233}\text{U}$  é produzido a partir da captura radiativa de um nêutron pelo  $^{232}\text{Th}$ , seguida de decaimento beta, segundo a cadeia a seguir:





A capacidade de conversão do tório em isótopo fissil em reatores (Figura 3) é superior aos outros isótopos férteis. Por captura neutrônica o  $^{232}\text{Th}$  produz o isótopo radioativo  $^{233}\text{Th}$ . O  $^{233}\text{Th}$  decai com a emissão de uma partícula beta e forma o protactínio ( $^{233}\text{Pa}$ ), que por sua vez decai com a emissão de outra partícula beta e forma o isótopo fissil artificial  $^{233}\text{U}$ . Este fissiona ao absorver um nêutron de baixa energia. Ou seja, ao absorver um nêutron, é capaz de gerar mais que dois nêutrons, o que permite a regeneração (processo pelo qual um isótopo fértil, ao capturar um nêutron, produz mais elementos fisséis do que não fisséis). Em uma porcentagem menor de casos duas subsequentes capturas de nêutrons levam a um segundo isótopo fissil o U-235 [15]

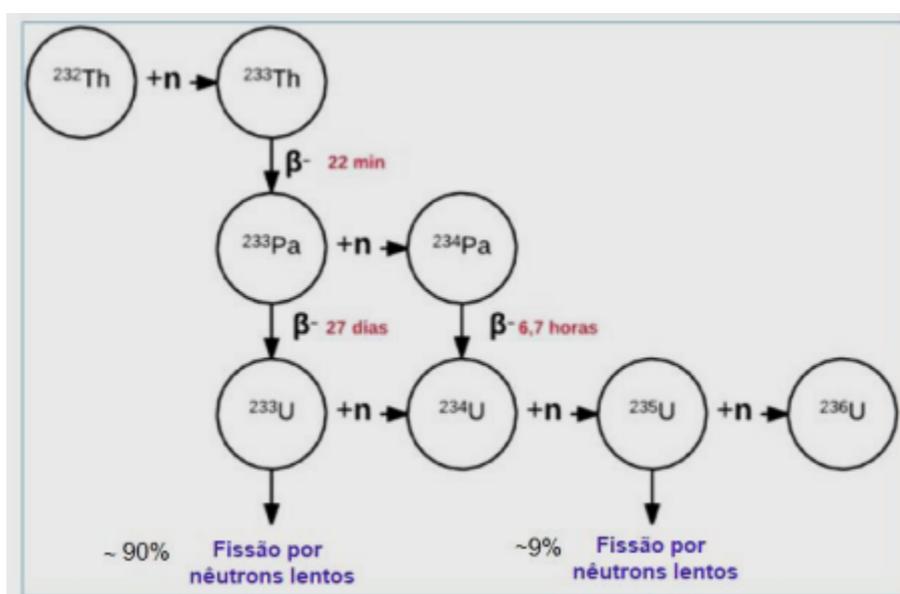


Figura 3. Fluxograma de Decaimento do Tório - 232

Um fator determinante da eficiência de um reator nuclear, referente à utilização de recursos naturais, é o número médio de nêutrons térmicos que causam fissões para cada nêutron absorvido no combustível, denominado Fator de Reprodução. Este fator é representado pela letra grega  $\eta$  (eta). Deste modo, em um combustível que contenham apenas U-235 (100% enriquecido), a captura do nêutron térmico que provoque sua fissão é de 2,06 nêutrons. Ou seja, do número médio de nêutrons liberados na fissão térmica  $\nu$  (ni) no U-235 é de  $\nu = 2,43$ . Mas,  $\sim 0,35$  nêutrons são capturados sem causar fissão, transformando o U-235 em U-236. Além disto, aproximadamente 0,5 dos nêutrons são absorvidos pelos materiais estruturais e outros dispositivos presentes no núcleo do reator [6], [16].

Dos três isótopos fisséis que podem ser utilizados em reatores nucleares: U-233, U-235, e o Pu-239, o U-233 é o que tem o maior Fator de Reprodução quando fissionado por nêutrons térmicos. Para o U-233 o  $\eta = 2,27$ , para o U-235 o  $\eta = 2,06$  e para o Pu-239  $\eta = 2,0$ . Desses 2,27 nêutrons produzidos por nêutron absorvido no U-233, um nêutron é suficiente para sustentar a reação de fissão em cadeia. Sobra então



(1,27 nêutrons) disponíveis para absorção pelo material fértil adicional e pelos demais materiais componentes do núcleo do reator. Isso abre o caminho para o projeto de reatores regeneradores que operam na faixa de baixa energia de nêutrons (nêutrons térmicos).

Neste caso, o material fértil inserido no núcleo do reator é o Th-232, que vai gerar o U-233. Este isótopo é depois retirado no núcleo do reator, separado do Th-232, concentrado, e com ele é feito o novo combustível. Dessa forma o reator estará queimando indiretamente o tório, que é um elemento mais abundante que o urânio. Aumentando assim, a vida útil das reservas nucleares de urânio no país.

O tório é um elemento químico, da família dos actínideos, amplamente distribuído em torno da crosta terrestre. Sua abundância na crosta terrestre é, em média de, 12 ppm, 5 vezes mais que o urânio [17]. O ciclo do tório oferece várias vantagens em potencial sobre um ciclo de combustível do urânio. Ele possui propriedades físicas e nucleares superiores e produção reduzida de resíduos radioativos. Nos produtos da queima do tório ocorre uma ausência quase total de transurânicos. Nos combustíveis U-235 (fissil) em que a maior parte da mistura é de U-238 (fértil), surge os vários isótopos do plutônio, destacando o Pu-239. Já o uso tório não ocorre o surgimento do plutônio, colaborando, assim, para a não proliferação de material fissil para fins não pacíficos.

Na década dos anos 60, houve interesse de muitos países pelo uso do tório em reatores, justificado pelo fato de que o  $^{233}\text{U}$  (captura de nêutrons no tório) é um combustível melhor que o  $^{239}\text{Pu}$  (captura de nêutrons no  $^{238}\text{U}$ ) por causa do alto rendimento de nêutrons produzidas por aquele isótopo em reatores térmicos. Portanto, espera-se em longo prazo, que reatores de tório possam proporcionar uma redução de custos no ciclo de combustível (quando comparados aos reatores de urânio, ou aos reatores de urânio e plutônio).

Baseado nas suas propriedades nucleares, físicas e mecânicas, além da sua estabilidade sob irradiação, o tório é um material adequado para ser usado como elemento fértil em reatores térmicos. A reciclagem do combustível para extração do U-233 produzido com tório fértil proporciona um aumento da vida do combustível.

#### 4. CONCLUSÃO

Da análise dos resultados a serem obtidos nas simulações, poder-se-á saber se o uso do Th-232 como combustível misto em um reator Triga será vantajoso, considerando o tório como uma opção de material nuclear em relação ao urânio. Vários percentuais da mistura Th-U serão simulados para conhecer a composição mais vantajosa. Conforme simulações realizadas por Gonçalves *et al.* (2018) [18] em reatores



PWR com combustível misto de ThO<sub>2</sub> e UO<sub>2</sub>, comparando com os combustíveis usuais de UO<sub>2</sub>, mostrou um menor surgimento dos venenos de fissão, como o xenônio-135 e o samário-149. A quantidade de redução na geração desses isótopos foi de, em média, 17% de <sup>135</sup>Xe e 21% de <sup>149</sup>Sm, para o reator com 40 % de ThO<sub>2</sub> em seu volume, quando comparado com o reator com as configurações originais. Espera-se resultados similares com o combustível proposto neste trabalho.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), à Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Morais, A.V.; Jeremias, H. Principais minérios de tório e sua importância para a área nuclear. *Unisanta Business and Management* Vol. 2, nº1, pp. 67 - 80. 2019.
- [2] Mesquita, A.Z.; Lameiras, F.S.; Martins, M. D. O ensino de tecnologia de reatores nucleares em um programa de pós-graduação de Engenharia Multidisciplinar. *RBPG. Revista Brasileira de Pós-Graduação*, v. 12, p. 839-855, 2016. DOI: 10.21713/2358-2332.2015.v12.866.
- [3] Saraiva, G.J.P. Energia Nuclear no Brasil – Fatores Internos e Pressões Externas. *Cadernos de Estudos Estratégicos*, No. 8. Escola Superior de Guerra. 2007.
- [4] Camargo, G. *O Fogo dos deuses uma história da energia nuclear*. Editora Contraponto, Rio de Janeiro, 344p. 2006.
- [5] Pinheiro, R.B. *et al.* Program of Research and Development on the Thorium Utilization in PWRs. Final Report (1979-1988), CDTN-KFA (1988).
- [6] Mesquita, A. Z. *Energia Nuclear – Uma Introdução*. Universidade Federal do Paraná (UFPR). 1ª. Ed. Curitiba. 2023.
- [7] Rodrigues, R. Sistema para Inspeção de Elementos Combustíveis de Reatores Nucleares de Pesquisa pelo Método de Sipping. Tese Doutorado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais. CDTN. Belo Horizonte. 2018.
- [8] Mesquita, A.Z. Investigação Experimental da Distribuição de Temperaturas no Reator Nuclear de Pesquisa TRIGA IPR-R1. Tese Doutorado Unicamp. 2005.
- [9] CDTN/Cnen - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear. Manual de operação do reator TRIGA IPR-R1. MO/TRIGA-IPR-R1/CDTN. Belo Horizonte, 2013.



- [10] Dalle, H.M. Simulação do Reator Triga IPR – R1 Utilizando Métodos de Transporte por Monte Carlo. Tese Doutorado. Unicamp. Campinas. 2005.
- [11] ORNL - Oak Ridge National Laboratory. SCALE: a comprehensive modeling and simulation suite for nuclear safety analysis and design. ORNL/TM-2005/39, Version 6.1, Junho de 2011.
- [12] Suwarno, H. Development of TRIGA Fuel Fabrication by Powder Technique. Atom Indonesia Vol. 40 (No. 3):113-119. December 2014. DOI: 10.17146/aij.2014.329.
- [13] Belle, J.; Berman, R.M. Thorium dioxide: properties and nuclear applications. Washington, D.C.: Naval Reactors Office, United States Dept. of Energy, 1984.
- [14] IAEA -International Atomic Energy Agency. Thorium fuel cycle: Potential benefits and challenges. Vienna. Maio, 2005.
- [15] Waltar, A. E.; Reynolds, A. B. Fast breeder reactors. New York: Pergamon Press, 1981. Weissert, L.R.; Schileo, G. Fabrication of Thorium Fuel Elements. American Society for Metals. United States Atomic Energy Commission. Series on Metallurgy in Nuclear Technology. Washington D.C. 1968.
- [16] Ishiguro, Y. A Energia Nuclear para o Brasil. Makron Books Ltda. São Paulo. 2002.
- [17] Lauf, R.J. Mineralogy of uranium and thorium. Atglen, PA: Schiffer Publishing, 2016.
- [18] Gonçalves, I.C.; Wichrowski, C.C.; Oliveira, C.L. Análise de burnup de um reator nuclear PWR com combustível misto de óxido de tório e urânio. Revista Militar de Ciência e Tecnologia. Vol. 35, no. 4. Instituto Militar de Engenharia. 2018.